



室蘭工業大学紀要 第64号 全1冊

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2015-03-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3768

ISSN 1344-2708

No.64

Mar.2015

MEMOIRS of THE MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

MURORAN INSTITU
INSTITUTE OF TEC
OF TECHNOLOGY MU
TECHNOLOGY MU
MURORAN INSTITU
INSTITUTE OF TEC
OF TECHNOLOGY MU
TECHNOLOGY MU
MURORAN INSTITU
INSTITUTE OF TEC
OF TECHNOLOGY MU
TECHNOLOGY MU

室蘭工業大学
紀 要

第64号 平成27年 3 月

MURORAN HOKKAIDO
JAPAN

目 次

依 頼 論 文

特 集：航空宇宙機システム研究センターにおける開発研究2 ― オオワシⅡ飛行にむけて並びに
関連技術の研究開発

まえがき

.....東野 和幸	1
------------	---

1. オオワシⅡ飛行にむけて並びに関連技術の研究開発（推進系）

(1) 将来輸送系リファレンスシステムの推進系に関する基礎検討

.....笹木 康平，飯島 明日香，中田 大将，湊 亮二郎，棚次 亘弘， 杉岡 正敏，東野 和幸，石本 真二，東 伸幸	3
--	---

(2) 再生冷却システムに利用する熱分解吸熱性燃料の特性評価

.....塚野 徹，山本 康平，飯島 明日香，笹木 康平，湊 亮二郎， 杉岡 正敏，棚次 亘弘，東野 和幸	9
--	---

(3) アルミ―水系水素製造の衛星推進系への応用

.....東野 和幸，小野寺 英之，杉岡 正敏，今井 良二，増田 井出夫	17
--------------------------------------	----

(4) オオワシ2号機推進システムに関する研究

.....湊 亮二郎，東野 和幸，棚次 亘弘	23
------------------------	----

2. オオワシⅡ飛行にむけて並びに関連技術の研究開発（誘導制御系）

(5) 無人航空機自律飛行のための誘導制御システム技術

―オオワシ2号機用誘導制御システム実現に向けて

.....上羽 正純，竹内 僚太郎，山下 智也，横田 滋弘	29
-------------------------------	----

3. オオワシⅡ飛行にむけて並びに関連技術の研究開発（機体、構造系）

(6) オオワシⅡ構造系開発

.....樋口 健，勝又 暢久	39
-----------------	----

(7) 小型超音速飛行実験機（オオワシ）の空力設計，空力評価，および飛行性能予測溝端 一秀，大石 栄，鈴木 祥弘，近藤 賢，渡口 翼	45
4. オオワシ II 飛行にむけて並びに関連技術の研究開発（試験設備系）	
(8) 高速走行軌道実験設備中田 大将，棚次 亘弘，東野 和幸，小倉 達也，笹尾 鎮矢，立桶 薫	55
(9) Humidity Effects on Unsteady Characteristics of Supersonic Flow高木 正平，上村 卓也，平田 裕，高田 晃輔	61
5. オオワシ II 飛行にむけて並びに関連技術の研究開発（関連研究開発分野）	
(10) 展開宇宙構造物に関する研究勝又 暢久，樋口 健，大加瀬 容平，貝森 政明	69
(11) Surface Shape Measurement by Grating Projection Method in Aerospace Structures樋口 健，藤垣 元治，塩川 貴之，岸本 直子，岩佐 貴史	77

投 稿 論 文

○学術論文

榎法華村における「漁具」、「漁法」、「魚種」、「魚加工」に関連した方言語彙について橋本 邦彦	85
サモア語、タヒチ語、ハワイ語の名詞的小辞の対照研究塩谷 亨	99

○研究報告

デンマーク語における副次強勢の起源について三村 竜之	109
原発問題によせて一計算合理性と人格適合性二宮公太郎，関 大輔	121

擬似夜明け療法の覚醒効果

..... 山上佳那, 矢島啓大, 湯浅友典, 相津佳永, 137
千葉武雄, 佐々木春喜, 三浦淳

○教育改善報告

児童発達支援施設の見学に表れた学生評定の易変性について

..... 今野 博信, 前田 潤 143

CONTENTS

Invited Papers

Specials : Development Study at the Aerospace Plane Research Center2 - Toward the Realization of Autonomous Flight of Unmanned Air Vehicle; Oowashi-II

Preface.....	1
<i>Kazuyuki HIGASHINO</i>	
1. Research on the Propulsion System	
(1) Basic Study on the Propulsion System of Future Transportation Reference System	3
<i>Kohei SASAKI, Asuka IIJIMA, Daisuke NAKATA, Ryojiro MINATO, Nobuhiro TANATSUGU, Masatoshi SUGIOKA, Kazuyuki HIGASHINO, Shinji ISHIMOTO and Nobuyuki AZUMA</i>	
(2) Characteristic Evaluation of Endothermic Fuel for Regenerative Cooling System	9
<i>Toru TSUKANO, Kohei YAMAMOTO, Asuka IIJIMA, Kohei SASAKI, Ryojiro MINATO, Masatoshi SUGIOKA, Nobuhiro TANATSUGU and Kazuyuki HIGASHINO</i>	
(3) Application of Aluminum – Water Reaction for Space Satellite Propulsion	17
<i>Kazuyuki HIGASHINO, Hideyuki ONODERA, Masatoshi SUGIOKA, Ryoji IMAI and Ideo MASUDA</i>	
(4) Study of Propulsion Engine for Oowashi 2	23
<i>Ryojiro MINATO, Kazuyuki HIGASHINO and Nobuhiro TANATSUGU</i>	
2. Research on the Guidance, Navigation and Control System Technologies	
(5) Guidance and Control System Technologies for Autonomous Flight of Unmanned Air Vehicle - Toward the Realization of Guidance, Navigation and Control System for Oowashi-II	29
<i>Masazumi UEBA, Ryotaro TAKEUCHI, Tomoya YAMASHITA and Shigehiro YOKOTA</i>	

3. Research on the Structure Development	
(6) Structure Development of Oowashi No.2	39
<i>Ken HIGUCHI and Nobuhisa KATSUMATA</i>	
(7) Aerodynamic Design, Characterization, and Flight Capability Prediction of the Small-scale Supersonic Flight Experiment Vehicle “Ohwashi”	45
<i>Kazuhide MIZOBATA, Sakae OISHI, Yoshihiro SUZUKI, Satoshi KONDOH and Tsubasa TOGUCHI</i>	
4. Research on the High-Speed Test Track and other facilities	
(8) High Speed Test Track	55
<i>Daisuke NAKATA, Nobuhiro TANATSUGU, Kazuyuki HIGASHINO, Tatsuya OGURA, Shinya SASAO and Kaoru TATEOKE</i>	
(9) Humidity Effects on Unsteady Characteristics of Supersonic Flow	61
<i>Shohei TAKAGI, Takuya UEMURA, Yutaka HIRATA and Kosuke TAKADA</i>	
5. Related Research	
(10) Development on Deployable Space Structures	69
<i>Nobuhisa KATSUMATA, Ken HIGUCHI, Yohei OOKASE and Masaaki KAIMORI</i>	
(11) Surface Shape Measurement by Grating Projection Method in Aerospace Structures	77
<i>Ken HIGUCHI, Motoharu FUJIGAKI, Takayuki SHIOKAWA, Naoko KISHIMOTO and Takashi IWASA</i>	

Papers

○Article

Dialectal Words Related to “Fishing Tools”, “Fishing Methods”, “Fish Names” and “Fish Processing” in <i>Todohokke</i>	85
<i>Kunihiko HASHIMOTO</i>	
A Contrastive Study of Nominal Particles in Samoan, Tahitian, and Hawaiian	99
<i>Toru SHIONOYA</i>	

○**Research report**

On the Origin and Development of Secondary Stress in Danish	109
<i>Tatsuyuki MIMURA</i>	
On the Problem of Nuclear Power Generation —— Calculation Rationality and Personality Suitability	121
<i>Kohtaroh NINOMIYA and Daisuke SEKI</i>	
Effects of Simulated Dawn on the Wakefulness.....	137
<i>Kana YAMAGAMI, Keidai YAJIMA, Tomonori YUASA, Yoshihisa AIZU, Takeo CHIBA, Haruki SASAKI and Jun MIURA</i>	

○**Educational improvement report**

Mutability of student's evaluation shown at the visit of Child Development support facility	143
<i>Hironobu KONNO and Jun MAEDA</i>	

まえがき

航空宇宙工学は、多くの関連分野の知識と技術を融合させて初めて実現する事の出来る総合システム工学です。空気力学、推進工学、航空宇宙構造・材料工学、航空宇宙誘導制御工学、実証する設備における試験技術等の各基盤分野で成り立っており、かつシステムとして統合する技術力が必要です。波及効果の大きさから世界各国は戦略的な科学分野と位置付け科学技術発展と人材育成の場としています。

当センターが取り組んでいる大気を利用して高速・高々度まで飛行する輸送システムは、地上間輸送及び地球軌道への往還輸送の双方を見据えた基幹システム技術であり、また重要な基盤技術です。飛躍的な発展が期待できる分野です。

総合科学技術会議は、国家基幹技術の一つとして宇宙輸送システムを第3期科学技術基本計画に盛り込み、促進しています。さらに第4期科学技術基本計画ではグリーンイノベーションの促進ということで環境にやさしいシステムの実現が盛り込まれています。

室蘭工業大学では、第二期中期目標において、重点的に取り組む特定研究分野として、航空宇宙機システム分野を設定し、国際水準の成果を達成するという中期計画を掲げ、独創的・先進的研究を戦略的に推進する事になっており、航空宇宙機システム研究センターはこれを実践してまいりました。革新的技術は、構成要素の小型・軽量化と高効率化および環境負荷の低減にあり、またシステムの観点から空力抵抗の低減、燃焼効率の改善など、実験から解析までを取り込んだこの分野が果たす役割は極めて大きいものがあります。

この特集号では、航空宇宙機システム研究センターが中心となり遂行している主な基盤研究についての成果を報告します。

航空宇宙機システム研究センター
センター長 東野和幸

特 集

将来輸送系リファレンスシステムの 推進系に関する基礎検討

笹木 康平^{*1}, 飯島 明日香^{*1}, 中田 大将^{*2*3}, 湊 亮二郎^{*2*3}, 棚次 亘弘^{*3}, 杉岡 正敏^{*3},
東野 和幸^{*2*3}, 石本 真二^{*4}, 東 伸幸^{*4}

Basic Study on the Propulsion System of Future Transportation Reference System

Kohei SASAKI^{*1}, Asuka IJIMA^{*1}, Daisuke NAKATA^{*2*3}, Ryojiro MINATO^{*2*3}, Nobuhiro TANATSUGU^{*3},
Masatoshi SUGIOKA^{*3}, Kazuyuki HIGASHINO^{*2*3}, Shinji ISHIMOTO^{*4}, Nobuyuki AZUMA^{*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

The feasibility of GG cycle reusable rocket engine is examined in this study based on the requirements of JAXA reference mission. Bioethanol is used as fuel and LOX is used as oxidizer. The combustion chamber pressure, the expansion ratio and the fuel injection temperature are set to 7 MPaA, 25 and 390 K. As a result, 0.6 in its turbine/pump efficiency and 0.954 in its Isp efficiency are needed to satisfy the mission requirements. Besides, the experimental study was conducted to confirm the validity of anticorrosion coating on A6061 alloy in high-pressure and high-temperature ethanol.

Keywords : Bioethanol, Reusable Rocket Engine, GG Cycle, Anti-Corrosion Coating

1 背景・目的

現在, 宇宙空間への輸送システムにはロケット推進系が用いられている. しかし再使用性を持たないために運用コストが高くなる点や, 環境適合性を有さない点について課題が残されており, これらの課題は今後宇宙開発を加速していくうえで問題となる恐れがある. そのため今後は, 環境適合性を有した完全再使用型ロケット推進系の実現が求められる.

そこで近年バイオエタノール (BE) をロケット

燃料として用いることが期待されている. BE は, 植物由来の原料から生産されるので環境適合性の面においても優れている. さらに, 煤の発生は少なく, 再使用性は低下しないと考えられる.

しかし, エタノールを推進系に適用する場合には, 比推力のような性能面においてメタンなどの炭化水素系燃料より劣ることを考慮する必要がある. そのため, システムの成立性に関する検討を要する.

そこで, JAXA では小型衛星の即応的な打ち上げミッション向きの部分再使用型小型打ち上げ機を想定し, 500 kg 以上のペイロードを高度 500 km の地球低軌道に投入するという要求を達成可能なシステムの検討を進めている⁽¹⁾. そして, この検討では再使用ブースターと使いきり上段という二段式

*1 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻

*2 室蘭工業大学 もの創造系領域

*3 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

*4 (独) 宇宙航空研究開発機構

の構成を想定している。よって本検討では、ブースター段エタノールエンジンへの適用を目指し、設計点調整を行いやすく開発コストの抑えられる Gas Generator (GG) サイクルに焦点を当て、成立性の検討を行った。なお、本検討における燃焼器冷却通路の圧損や、温度上昇、インジェクター圧損等については基礎実験結果や経験値を反映している。

さらに、エタノールロケットエンジンの実現への技術的課題である、BE とロケットエンジン材料の適合性についてもその特徴と対策について基礎実験結果と共に示す。

2 要求性能

本検討では、小型衛星打ち上げシステムに搭載するエンジンの概略検討のため、表 1 に示す要求性能に基づく推進システムの概念検討を実施し、成立性の検討を行う。

表 1 ロケットエンジン要求性能

項目	数値	特記事項
酸化剤	液体酸素	
燃料	エタノール	
2基搭載	真空中推力	785 kN 以上
	海面上推力	706 kN 以上 真空中推力の90%
真空中比推力	315 sec 以上	
ノズル直径	1.6m 以下	

3 検討仕様

3.1 エンジン主燃焼室設計

主燃焼室の設計に際して、燃焼室圧力等の主要な定格は NASA CEA2 を用いたパラメトリックスタディーにより得られたので以下に示す。

1) 主燃焼室圧力 (P_c)

高い燃焼室圧力を持つ燃焼器の開発には技術的困難が伴う。そのため、可能な限り低い燃焼室圧力でシステムを成立させることが望ましい。そこで本検討において P_c は、エタノールの超臨界圧力 6.14 MPaA を上回る圧力 ($P_c = 7$ MPaA) とする。

2) 混合比 (O/F)

LOX/エタノール 2 液推進系の最適 O/F は NASA CEA2 を用いて検討した。最適 O/F は平衡流・凍結流の仮定や燃焼室圧力にも依存するが、CEA では平衡流を仮定し、本検討での O/F は 1.8 とする。

3) 収縮比 (A_c/A_t)

インジェクターとノズル入口間の全圧比が 1 に近い値となる収縮比 ($A_c/A_t = 3$) で固定する。

4) 膨張比 (A_e/A_t)

膨張比は剥離限界を考慮する必要がある。そこで、剥離が生じる壁面静圧 P_{wall} を、式(1)に示す Schilling の実験式⁽²⁾により確認した。ここで、 P_a は外気圧力、 P_c は燃焼室圧力である。

$$P_{wall} = 0.583P_a(P_a/P_c)^{0.195} \quad (1)$$

なお、NASA SP-8120⁽²⁾ではノズル出口圧力は剥離壁面静圧に対して 20%の余裕を見ることが推奨されている。そのため、図 1 に NASA CEA2 より求めたノズル出口圧力と Schilling の実験式に 20%の余裕を持たせた剥離壁面静圧を示す。また、図 2 に膨張比に対する比推力、推力とそれぞれの要求値を併記する。図 1、図 2 より、本検討では $A_e/A_t = 25$ とする。

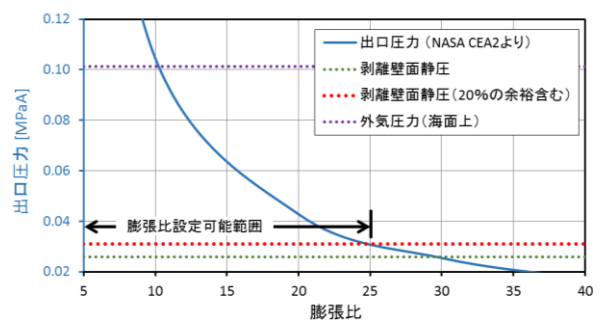


図 1 剥離限界静圧とノズル出口静圧

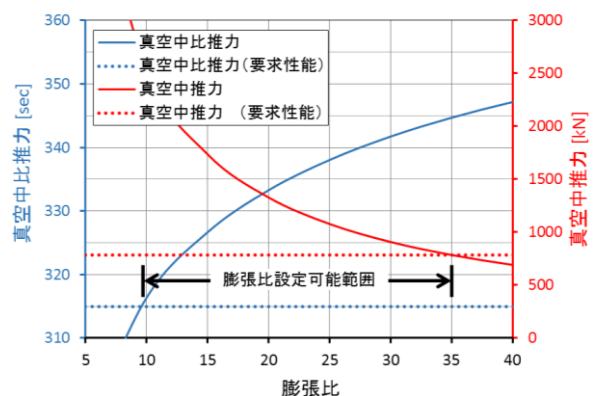


図 2 膨張比と比推力・推力の関係

5) 燃焼室形状

図 3 に主燃焼室のノズル形状を示す。 L_t , L_e については収縮比、膨張比を満たすように決定される。

また、エタノールの燃焼室特性長さ L^* はケロシンの場合の値を NASA SP-125⁽³⁾ より参照し、約 1 m とした。そして、 L_c については式(2)に示す L^* の定義により決定される。

$$L^* A_t = L_c A_c + V_t \quad (2)$$

ここで、 V_t は狭まり部の燃焼室体積である。

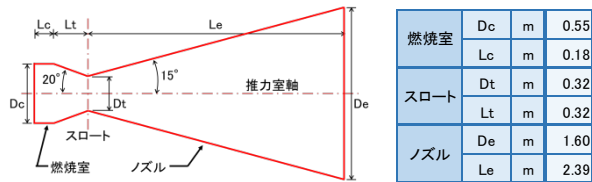


図3 主燃焼室ノズル形状

以上より、海面上推力や燃焼室流量等が上記の設計値により求めることができる。そこで、本検討における主燃焼室の定格一覧を表2に示す。

表2 主燃焼室 定格一覧

燃焼室圧力		MPaA	7	真 空 中	推力	kN	1078.4
燃焼室温度		K	3455		推力係数	-	1.916
投入温度	燃料	K	390	海 面 上	比推力	sec	338.0
	酸化剤	K	90		推力	kN	1012.4
混合比		-	1.8		推力係数	-	1.798
膨張比		-	25		比推力	sec	317.4
収縮比		-	3		特性排気速度	m/sec	1731
出口直径		m	1.6		燃焼室流量	kg/sec	325.3

3.2 ガス発生器 (GG)

GG 燃焼室圧力は主燃焼室と同じ値に設定し、GG 燃焼室温度は再使用に伴う耐久性を考慮して 850K 程度とした。そして、O/F は NASA CEA2 による平衡計算を行い、燃焼室温度を満たす値に決定した。図4に示す計算結果より、GG の混合比は O/F = 0.05 とする。また、本検討における GG の定格一覧を表3に示す。

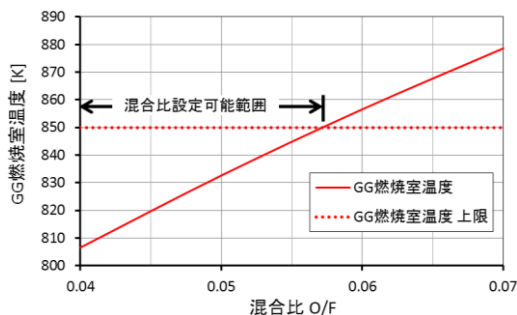


図4 混合比 O/F と GG 燃焼室温度

表3 GG 定格一覧

燃焼室圧力	MPaA	7	投入温度	燃料	K	300
燃焼室温度	K	833		酸化剤	K	90
縮小比	-	1.5		混合比	-	0.05

3.3 タンク初期条件・圧損係数

LOX とエタノールの密度は近い値であることから、タービンを共有して 1 軸とする設計も考えられる⁽⁴⁾。しかし、本検討では設計点の柔軟性を重視して図5に示す 2 軸式とする。

タンク圧についてはターボポンプキャビテーションを避けるため、NPSH を考慮して図5の値とする。なお、酸化剤側ポンプの NPSH については NAL TR-696⁽⁵⁾、NAL TR-716⁽⁶⁾などを参照し、燃料側ポンプの NPSH については RP-1 の場合⁽³⁾を参照した。いずれも 0.3 MPaA 程度が下限として妥当な値である。

また、各ラインにおける圧損係数については基礎実験結果や経験値を反映して図5のように仮定する。なお、圧損係数の定義については当該ラインにおける (上流圧力 - 下流圧力) / 基準圧力とした。

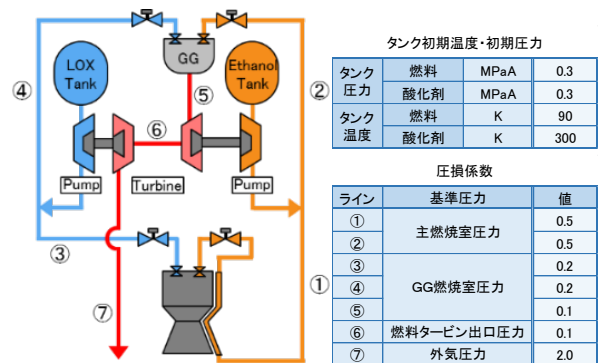


図5 システム図、タンク条件、圧損係数

4 設計点解析手法

ブリード比の決定は図6に示すプロセスにより実施した。まず、GG 流量仮定値を用いて燃料側および酸化剤側の必要ポンプ仕事を算出する。次に燃料側タービン圧力比を仮定すると自動的に酸化剤側タービン圧力比も決まるので、この時に必要ポンプ仕事と釣り合うために燃料・酸化剤側タービンが要求するブリード比 (BL_{fu} , BL_{ox}) を決定する。燃料・酸化剤側タービン圧力比を振った際に、 $BL_{fu}=BL_{ox}$ となる点がブリード流量最小

となる点である。そして、この結果を反映して GG 流量を更新し、再度ポンプ仕事を求めるイタレーションを行う。GG 流量のイタレーションについては 3~4 回のループで更新幅 0.01 kg となるため、ここで計算を打ち切った。

参考として、燃料側タービン圧力比に対する燃料側・酸化剤側要求ブリード流量の関係を図 7 に示す。交点の所でサイクルの要求するブリード比は最小となり燃料側タービン圧力比がこれよりも小さい場合には燃料側タービンは多くのブリード流量を要求し、酸化剤側は少ないブリード流量で成立する。この差分はバイパスして排ガスとすることでシステムを成立させることは可能であるが、1 次検討では最小ブリード流量で成立する点を探索するものとし、燃料側要求流量と酸化剤側要求流量がつりあう点を設計点とする。

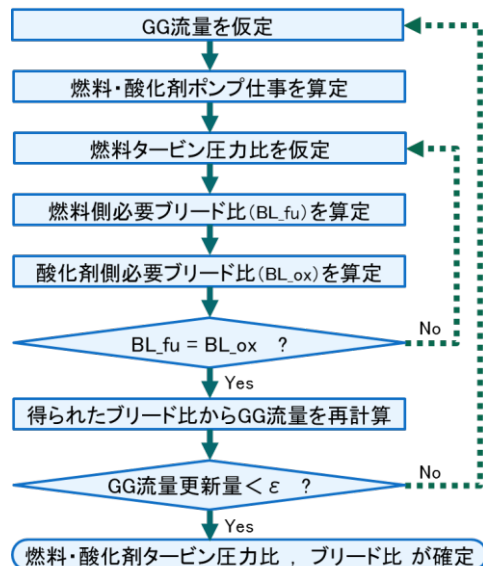


図 6 ブリード比の推算プロセス

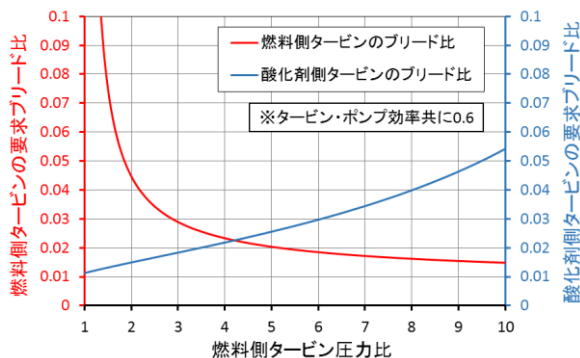


図 7 最適ブリード比

5 GG サイクル設計点解析結果

ブリード比の計算結果を表 4 にまとめる。表 5, 図 8 に示すシステム比推力（真空中）はチャンバ比推力に対してブリード比の割合だけ低下する。なお、ここでは必要な Isp 効率を逆算できるよう、Isp 効率を 1.0 と仮定した場合のマッピングを行った。

F-1 エンジン, H-1 エンジンなどの GG サイクルを用いたケロシン/LOX エンジン実機におけるタービン・ポンプ効率はその燃焼室圧力や推力レベルによらず 0.6~0.7 程度以上達成しており⁽⁷⁾, タービン段数と重量とのトレードオフスタディは必要であるものの、このレベルの効率は実現可能性があると考えられる。本検討においては、タービン・ポンプ効率共に 0.6 の場合、GG サイクルによりシステムが成立するには Isp 効率 0.954 が必要であることが表 5 より逆算される。JAXA 角田でのエタノール燃料を用いた基礎特性試験ではこのような Isp 効率は得られていないが⁽⁸⁾, チャンバが大型化すれば効率は良くなる傾向があることや、ブリードガスの燃焼室への再投入による推力寄与分も含め、現時点において開発コストの低い GG サイクルでの成立可能性についてはさらに精査する価値があると判断する。なお、2 段燃焼サイクルでの成立可能性はチャンバ比推力 338 秒に Isp 効率を乗じたものであり、こちらも Isp 効率 0.932 以上と比較的高い効率を要求する。ブリード比の分がそのまま GG サイクルとの差となっている。

表 4 ブリード比

タービン効率	BL [%]	ポンプ効率					
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	0.2	22.0	13.9	10.2	8.1	6.7	5.6
	0.3	14.4	9.2	6.7	5.3	4.4	3.8
	0.4	10.7	6.9	5.1	4.1	3.4	2.9
	0.5	8.5	5.5	4.1	3.2	2.7	2.3
	0.6	7.2	4.6	3.4	2.7	2.3	2.0
	0.7	6.2	4.0	3.0	2.4	2.0	1.7

表 5 システム比推力

システム Isp [sec]	タービン効率	ポンプ効率					
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	0.2	263.8	291.0	303.6	310.7	315.4	319.0
	0.3	289.4	307.0	315.3	320.0	323.2	325.2
	0.4	301.7	314.8	320.8	324.3	326.7	328.4
	0.5	309.2	319.5	324.2	327.2	329.1	330.4
	0.6	313.8	322.5	326.4	328.9	330.3	331.4
	0.7	317.2	324.6	327.9	330.0	331.4	332.4

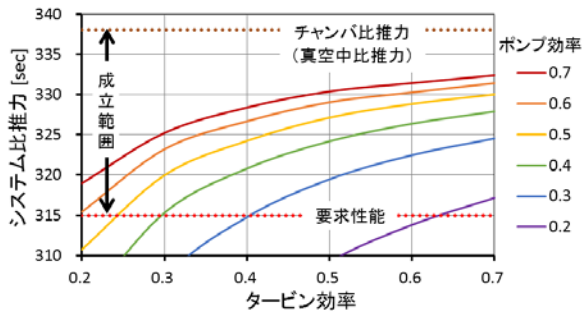


図 8 成立範囲とシステム比推力

6 技術的課題（材料適合性）

6.1 概要

エタノール推進剤はアルミニウムおよびゴム製 O リング等に対する腐食性が高く、防食等の対策が必要である。室蘭工業大学ではこれまで、BE とロケットエンジン材料の適合性についての系統的な基礎実験を行っており⁹⁾定量的な知見を得ているので、その一例を紹介する。

6.2 A6061+アルマイト防食の評価

6.2.1 実験装置・実験方法

本実験で使用した実験装置を図 9 に示す。図 9 のオートクレーブを用いた高温高压実験では、供試液と試験片を投入した容器を窒素ガスで加圧後、ヒーターで加熱して一定温度に保持した。

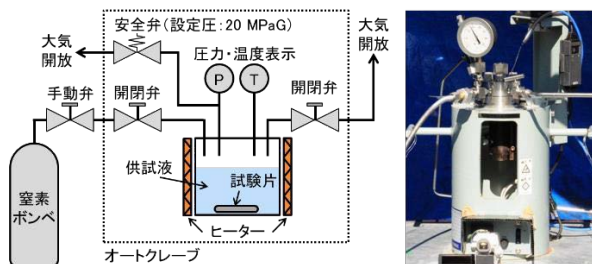


図 9 実験装置（オートクレーブ）

6.2.2 実験条件

実験条件一覧を表 6 に示す。本実験では Al 合金系材料の A6061 (Al-Mg-Si 系合金) にアルマイト処理を施した試験片を用いた。なお、試験片作製時に生じる未処理部分には、適合性が確認されている Ni メッキを施した。実験条件ではエタノールの臨界点 (約 514 K, 約 6.14 MPaA) および材料の耐熱温度等を考慮した。

表 6 実験条件

供試材料	温度	圧力	時間	供試流体	BE投入量
A6061+アルマイト (皮膜厚さ:30μm)	523 K	約10 MPaG	120 min	BE	20 ml

6.2.3 実験および分析結果

実験および分析結果を図 10 と図 11 に示す。外観観察では実験前後での変化は見られず、防食効果を確認した。次に、実験後の試験片の端面を研磨し、EPMA で面分析したが、BE による腐食は確認されなかった。また、角部は皮膜が非常に薄いことが確認できた。このように極めて薄い皮膜でも防食効果を示したが、端部では皮膜が成長しにくいことが確認された。この技術を実際の推進システムに適用するためには、前処理に面取りなどを行い、皮膜の成長を促進させることが必要と考えられる。

Al は両性金属であり、その酸化物であるアルマイト皮膜でも、中性であるエタノールに対して良好な耐食性を示すと考えられる。また、アルミナは絶縁体であり、電子の授受を伴う腐食反応の進行を抑制したと推測される。

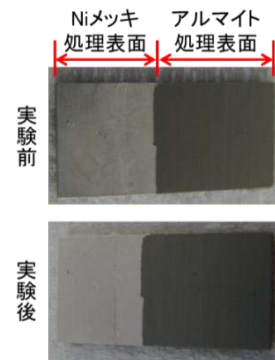


図 10 外観観察結果

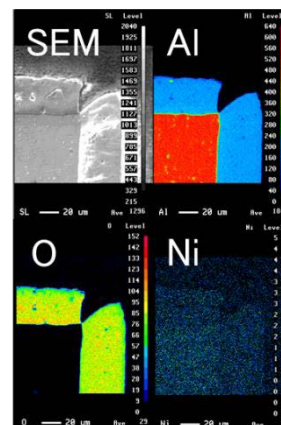


図 11 EPMA 分析結果

6.3 現在までの材料適合性評価結果

本実験では BE ロケットエンジンにおける材料適合性評価と, Al の腐食に関する基礎的知見を得るために浸漬実験を実施した. 実験により現在までに得られた知見の一覧を表 7 に示す⁽¹⁰⁾.

表 7 現在までの適合性評価結果

ロケットエンジン材料		温度範囲[K]				備考
分類	試験片材料	常温	~400	~523	~750	
Cu, Cu合金	OMC	○	○	○	-	EPMAでSの検出
	SMC	○	○	○	○	
	OFHC	○	○	○	○	
Ni, Ni合金	Ni	○	○	○	○	EPMAでSの検出
	HASTELLOY-X	○	○	○	○	
	Inconel600	○	○	○	○	
ステンレス	A286	○	○	-	-	EPMAでSの検出
	SUS304	○	○	○	○	
	SUS316	○	○	-	-	
Ti	Ti	○	○	○	○	
Al合金	A6061	x	x	x	-	熱サイクルで軟化
	A6061+Niメッキ	○	○	○	-	
	A6061+アルマイト	○	○	△	-	
樹脂	PEEK	○	○	-	-	繊維では亀裂発生
	PTFE	○	○	-	-	
	EP/CF	x	x	x	-	
	BMI/CF(積層板)	△	△	△	-	
	BMI/CF(織物)	○	x	x	-	
	PI/CF	○	x	x	-	
	SI/GF	△	x	x	-	
ゴムシート	CFRP+Niメッキ	○	○	○	-	線膨張係数に注意
	エチレンプロピレン	○	○	-	-	
Oリング	シリコン(VMQ)	x	x	-	-	メタルのリング等の使用が望ましい
	フッ素(FKM)	○	x	-	-	
	ニトリル(NBR)	x	x	-	-	
	HNBR	○	x(380)	-	-	
	ACM	x	x	-	-	
	EPDM	○	x	-	-	
	FVMQ	x	x	-	-	
	Viton(フッ素ゴム)	-	x	-	-	
	Kalrez	○	x	x	-	
	Viton+Teflon	○	x	x	-	

※ ○: 適合性あり, △: 条件付き適合性, x: 適合性なし, -: 未実施

7 結言

JAXA リファレンスミッションにおいて提示された要求仕様に対して, バイオエタノール/LOX を推進剤とする 2 液式エンジンに GG サイクルを採用した場合の成立性について検討した. 燃焼室圧力を 7 MPaA, 膨張比を 25, 燃料投入温度を 390 K に設定した場合, タービン・ポンプ効率共に 0.6 で,

Isp 効率 0.954 ならば仕様を満たすことが判明した.

また, エタノールを推進剤として使用する際には, アルミ等への腐食性の問題を解決する必要がある. しかし, 高圧・高温環境を模擬したオートクレープ内でアルマイト防食されたアルミニウムはエタノールによる腐食を受けないことを定量的に確認した.

参考文献

- (1)石本真二: "再使用将来輸送系リファレンスモデルの検討状況", 第 3 回再使用将来輸送系ワークショップ, 2014.6.26
- (2)"Liquid Rocket Engine Nozzles", NASA SP-8120, 1976
- (3)Huzel,D.H., Huang,D.K.: "Design of Liquid Propellant Rocket Engines", NASA SP-125, 1971
- (4)河津要, 根岸秀世, 山西伸宏: "LOX/エタノール再生冷却ロケットエンジンのシステム成立性検討", JSASS-2010-4494, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 2010
- (5)上條謙二郎, 志村隆, 橋本亮平, 山田仁, 野坂正隆, 渡辺光男, 渡辺義明, 長谷川敏, 菊池正孝, 十亀英司: "液酸・液水ロケットエンジンターボポンプシステムの研究", 航空宇宙技術研究所報告 NAL TR-696, 1982
- (6)山田仁, 上條謙二郎, 渡辺光男, 平田邦夫: "ロケット用液体酸素および液体水素ポンプ・インデューサの吸込性能" 航空宇宙技術研究所報告 NAL TR-716, 1982
- (7)"Turbopump Systems for Liquid Rocket Engines", NASA SP-8107, 1974
- (8)笹山容資, 東野和幸, 牧野隆, 石川康弘, 野口雄一: "バイオエタノールロケットエンジン燃焼器噴射エレメントに関する実験的研究", JSASS-2011-4396, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 2011
- (9)泉俊太郎, 杉岡正敏, 東野和幸: "バイオエタノールロケットエンジンにおけるアルミニウムの材料適合性に関する研究", JSASS-2012-4403, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012
- (10)泉俊太郎, 杉岡正敏, 東野和幸, 東伸幸, 小林悌宇: "液体ロケットエンジンにおけるバイオエタノールの材料適合性に関する実験的研究", JSASS-2013-H046, 日本航空宇宙学会北部支部 2013 年講演会, 2013

再生冷却システムに利用する熱分解吸熱性燃料の特性評価

塚野 徹^{*1}, 山本 康平^{*1}, 飯島 明日香^{*2}, 笹木 康平^{*2}, 湊 亮二郎^{*3*4},
杉岡 正敏^{*4}, 棚次 亘弘^{*4}, 東野 和幸^{*3*4}

Characteristic Evaluation of Endothermic Fuel
for Regenerative Cooling System

Toru TSUKANO^{*1}, Kohei YAMAMOTO^{*1}, Asuka IIJIMA^{*2}, Kohei SASAKI^{*2}, Ryojiro MINATO^{*3*4},
Masatoshi SUGIOKA^{*4}, Nobuhiro TANATSUGU^{*4}, Kazuyuki HIGASHINO^{*3*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

There exists the regenerative cooling system using endothermic fuel for refrigeration as one of the means for cooling heat load of hypersonic vehicle. The hydrocarbon fuel has been known to exhibit the endothermic thermal decomposition reaction. Cooling capacity of the regenerative cooling becomes about three times by employing the endothermic reaction. In the present study, endothermic thermal decomposition characteristics were verified experimentally and analytically for the fuels tested in order to construct the regenerative cooling system using the endothermic thermal decomposition by the catalytic reaction of methylcyclohexane (MCH) and bioethanol (BE). From the experimental results, it was found that the decrease of initiation temperature in the decomposition of fuels was about 350 K for MCH and 150K for BE with the catalysts, respectively.

Keywords : Endothermic Fuel, Regenerative Cooling System, Catalytic Reaction, Methylcyclohexane, Bio Ethanol

1 序論

次世代の航空宇宙輸送システムにおいて、超・極超音速飛行体の機体に特有の空力加熱や推力増大によるエンジンへの熱負荷が大きな課題となる。そこで、この課題を解決する手段の一つとして燃料を冷媒とした再生冷却システムが考えられる。液体水素 (LH₂) は単位質量当たりの発熱量、比熱が大きく、極低温流体であることから再生冷却に

用いる燃料として優れている。しかし、取扱いが難しいことや密度が小さいことによるタンクの大型化などが問題となる。一方、炭化水素系燃料は極低温流体である液体水素 (LH₂) と比較して単位質量当たりの発熱量、比熱が小さいが、密度は液体水素の 10 倍程度あり、推進剤タンクの小型化が可能で、機体の質量を軽減でき常温で液体であるため断熱が不要であり、ガス漏洩対策が容易で取扱易い利点がある。しかし、比較的吸熱能力が低いことから炭化水素系燃料を利用した再生冷却システムは高熱負荷である高い燃焼圧では適さない。炭化水素化合物には熱分解によって吸熱反応を示すものがあり、このような炭化水素系燃料は熱分解吸熱性燃料 (Endothermic Fuel, EF) と呼ばれてい

*1 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻修了
*2 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻
*3 室蘭工業大学 もの創造系領域
*4 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

る. この EF を再生冷却に利用する研究が行われており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, 適用可能な速度範囲が飛躍的に向上することが期待できる.

関連する研究として, ケロシン系燃料の主要成分である環状飽和炭化水素の代表例としてメチルシクロヘキサン (Methylcyclohexane, MCH) およびクリーン燃料として注目されるバイオエタノール (Bio Ethanol, BE) を用い, EF の効果を実験的に検証した研究結果を報告している⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

2 研究目的

本研究では, EF を利用した再生冷却システムを構築することを目的とし, 供試燃料に MCH および BE を用いた触媒反応を含む熱分解吸熱特性を理論的および実験的に検証した.

3 熱分解吸熱特性の検証手法

3.1 供試燃料の選択理由

炭化水素化合物 (BE 含む) の反応の中で, 炭素-水素間の結合が切れる脱水素反応は炭素-炭素間の結合が切れる熱分解反応に比べて吸熱量が大きく, 再生冷却への適用が期待できる. 既存のケロシン系燃料の成分の中で環状飽和炭化水素は約 60 % を占めており⁽⁶⁾, EF としての効果を示す成分として考えられている⁽³⁾. 特に MCH は, 脱水素反応によって生成するトルエンは発癌性が少なく比較的安全である. このことから本研究の供試燃料の一つに MCH を用いた. MCH はシクロヘキサンの水素原子をメチル基で置換した構造であり, 図 1 に示すような反応経路が考えられる. 前述の通り, 脱水素反応は高い吸熱能力を有し, 触媒反応を利

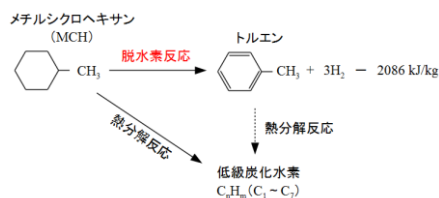


図 1 MCH の主な反応経路

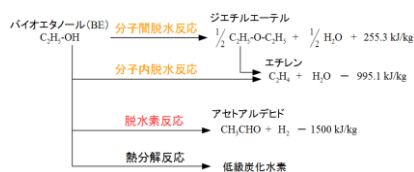


図 2 BE の主な反応経路

表 1 EF と LH₂ の物性

燃料	EF		LH ₂
	BE	MCH	
化学式	C ₂ H ₅ OH	C ₇ H ₁₄	H ₂
分子量	46.09	98.18	2.016
低位発熱量 [MJ/kg]	26.82	43.86	120.0
沸点 [K]	351.5	374.1	20.38
貯蔵時の温度 [K]	300	300	20
密度 (貯蔵温度) [kg/m ³]	784	764	71.3
昇温条件 [K]	300→600	300→600	20→300
平均比熱 [kJ/(kg・K)]	2.02	2.22	12.4
物理的吸熱量 [kJ/kg]	612.0	987.5	3962
化学的吸熱量 [kJ/kg]	1500	2086	—
総吸熱量 [kJ/kg]	2112	3073	3962

用することで選択的に促進させることができる.

また, カーボンニュートラルであることからクリーン燃料として期待される BE を用いた. BE の分子構造は工業用エタノールと同様であり, 図 2 に示すような反応経路が考えられ, 環状飽和炭化水素と同様に EF としての運用が期待できる. 特に BE はロケット燃料としての運用実績がなく, 熱分解吸熱をはじめとする燃料の特性についての知見を得ることは重要な研究課題である.

使用した供試燃料と LH₂ の物性を比較した表を表 1 に示す. 表 1 の物理的吸熱は昇温条件のエンタルピー変化を表し, 化学的吸熱は熱分解吸熱反応によるエンタルピー変化を表している. また, 総吸熱量とは, 物理的吸熱量と化学的吸熱量の総和である. 化学的吸熱の利用によって吸熱能力は約 3 倍になり, EF を用いた再生冷却システムは高い熱負荷低減への適用が期待できる.

3.2 供試触媒の選択理由

本研究では, 比較的低い温度で吸熱効果の大きな反応を促進させるために触媒反応を利用した. 反応分子に対して適切な触媒を用いることで, 触媒へ吸着する過程である種の反応中間体が形成され, 反応経路が変化する. これによって, 特定の反応に必要な活性化エネルギーを低減させることができ, 反応開始温度の低減および選択的な反応の促進が可能になる. 供試燃料である MCH の脱水素反応を促進させる触媒として白金アルミナ担持触媒 (Pt/Al₂O₃) を用い, BE の脱水反応および脱水素反応を促進させる触媒として γ アルミナ (γ-Al₂O₃) および Pt/Al₂O₃ を使用した. 使用した触媒の選択理由を以下に述べる.

触媒反応において, 一般的に水素化や脱水素反応に活性を示すのは遷移金属のうち, 主に Fe, Co, Ni, Cu, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt の 10 元素であ

る。また、活性には以下のような序列があり、炭化水素化合物の脱水素反応に対して白金族が触媒として一般的に高活性である⁷⁾。

Rh, Ru, Pt, Pd, Ir $\gg$ Ni, Co

一方、 γ - Al_2O_3 は、反応物から電子対を受け取るルイス酸点を有しており、アルコールの脱水反応に対する代表的な工業用触媒として用いられている。

本研究では、単位質量当たりの表面積を大きくして高活性とするために多孔質な粒状の触媒を用いた。 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ は多孔質な γ - Al_2O_3 を担体として白金粒子を高分散担持させた担持触媒である。 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ のPt含有量は0.5 wt%のものを使用した。

3.3 準静的環境下における実験を用いた検証手法

3.3.1 実験方法

EFの熱分解吸熱特性の検証のために、定常的に反応が進行して、ある瞬間では静的であると仮定できる準静的環境下での実験を行い、反応温度による反応性を評価した。本実験の実験条件を表2に示す。本実験では、供試流体のガスサンプリングを行い、水素炎イオン化型検出器(Flame Ionization Detector, FID)および熱伝導度検出器(Thermal Conductivity Detector, TCD)を用いたガスクロマトグラフィー(GC)によってガス成分を分析した。GC分析より、供試流体が反応した割合を示す反応率および反応後の供試流体以外の成分の割合を示す選択率より反応の進行を評価した。

表2 準静的環境下における実験の条件

供試流体	MCH		BE		
キャリアガス	N ₂				
混合ガス流量	20 ml/min				
実験温度	373～1023 K		373～1273 K		
触媒	なし	Pt/Al ₂ O ₃ (0.5wt%)	なし	γ-/Al ₂ O ₃	Pt/Al ₂ O ₃ (0.5wt%)
		粒状			粒状
形状	—	粒径 2.8～4.5 mm	—	2.0～4.0 mm	2.8～4.5 mm
触媒質量	—	2.0 g	—	2.0 g	2.0 g

3.3.2 実験装置

準静的環境下における実験に使用した実験装置の概要を図3に示す。実験装置はバブラー、反応管、電気加熱式ヒーター、ガスサンプリングポートで構成される。バブラーでは、一定温度に保った供試液にキャリアガスの GN_2 を流通させることで、反応系全体で混合ガス中の供試液の濃度が蒸

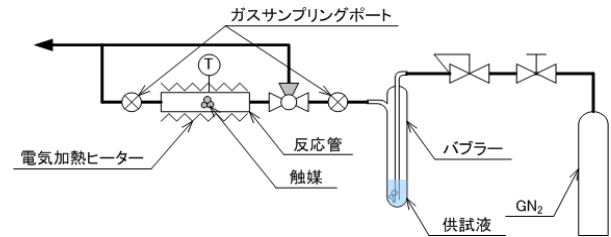


図3 準静的環境下における実験の装置概要

気圧で一定としている。反応管では、内部に供試した触媒を設置し、バブラーで混合されたガスが導入される。反応管は電気加熱式ヒーターによって外部から所定温度になるように加熱されており、反応管内部の触媒と反応させる。ガスサンプリングポートを反応管の上流側と下流側に設置し、反応前後のガスを採取し分析した。

3.4 動的環境下における実験を用いた検証手法

3.4.1 実験方法

EFの熱分解吸熱現象の確認および吸熱量の評価を目的として動的環境下における加熱流通実験を行った。表3に実験条件を示す。本実験では、吸熱現象を温度差によって確認するため、吸熱による温度差が得られるように十分な流通量の供試流体を流通させた。触媒を用いない場合の吸熱特性の検証には、厚みのある金属製の加熱管に供試流体を流通させ、加熱管の半径方向を通過した熱量と供試流体が加熱管を通過することで変化した熱量で評価した。MCHの熱分解は過去の研究において実施されており⁸⁾、本研究ではBEについての評価を行った。また触媒を用いた場合の吸熱特性の検証には、触媒を充填した円筒形の触媒リアクター内部に供試流体を流通させ、分解反応を起こさせる。触媒リアクター内の供試流体のエンタルピー変化によって吸熱量を評価した。

表3 動的環境下における実験の条件

供試流体	MCH		BE (GN ₂)	BE		
質量流量	1.2 ~1.6 g/s			0.5 ~2.0 g/s		
実験温度	423~723 K		400~950 K	550~950 K		
使用触媒	γ -Al ₂ O ₃	Pt/Al ₂ O ₃ (0.5wt%)	なし	α -Al ₂ O ₃	γ -Al ₂ O ₃	Pt/Al ₂ O ₃ (0.5wt%)
触媒質量	300 g			300 g		
触媒形状	粒状		—	粒状		
触媒粒径	2.0 ~ 4.0 mm	2.5 ~4.5 mm	—	約2.0 mm	2.0 ~4.0 mm	2.5 ~4.5 mm

3.4.2 実験装置

動的環境下における実験に使用した装置を図4に示す。密閉したタンク内に供試流体を封入し、外部からシリコンオイルを介して電気ヒーター(2

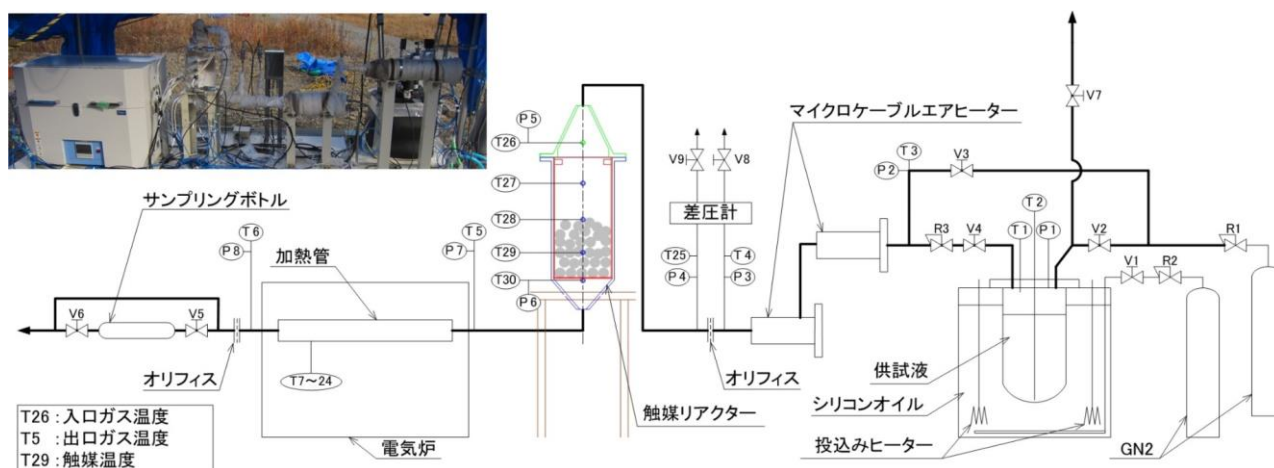


図4 動的環境下における実験の装置概要

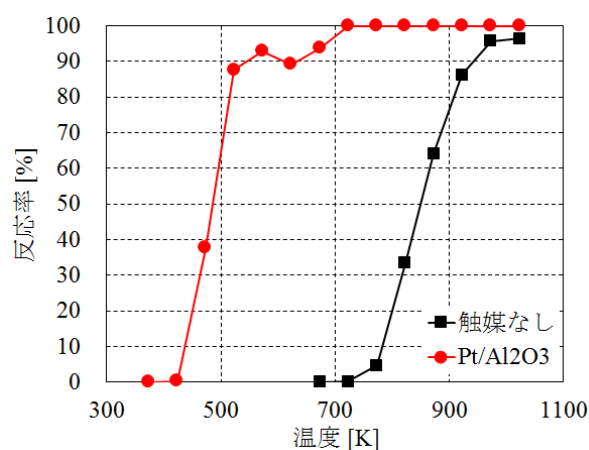
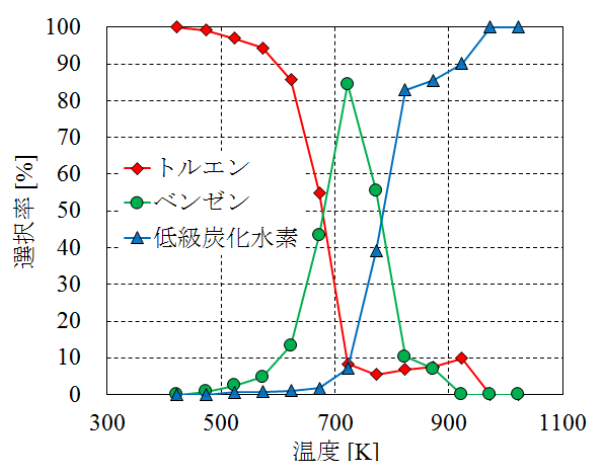
kW×2) で約 423 K まで加熱することで自己加圧 (約 0.2 MPaG) された供試流体の蒸気が装置内に供給される. 更に 2 基のエアーヒーター (3 kW×2) を用いて供試流体を段階的に設定温度まで昇温する. 触媒を用いない実験の場合, 電気炉 (3.4 kW) 内に設置した加熱管内に供試流体を流通させ, 実験温度まで昇温し, 反応させる. 加熱管は全長 500 mm, 内径 5 mm, 外径 63 mm の円筒形状になっており, その材質は代表的な高温材料である INCONEL600 である. 加熱管の管壁の内側と外側に熱電対を 9 箇所ずつ設置して管壁の温度差を計測し, 加熱管から供試流体への伝熱量を算出した.

次に触媒を用いる実験の場合, 触媒を充填した円筒形の触媒リアクター内に供試流体を流通させ, 分解反応を起こさせる. 触媒リアクターの温度を設定温度で安定させるために触媒リアクターと上流配管の外部にシーシヒーター (触媒リアクター部: 400 W×3, 配管部: 200 W×2) を取り付け, 実験直前まで予熱する. 触媒リアクターの入口と出口では, 温度と圧力をそれぞれ計測し, 触媒を充填している箇所の温度を 3 点計測している.

4 MCH の熱分解吸熱特性

4-1 準静的環境下における実験の評価結果

熱分解吸熱特性の検証として, 準静的環境下において供試流体の MCH に対して Pt/Al₂O₃ 触媒を用いた加熱流通実験を実施した. 実験結果として, 図 5 に温度に対する反応率を触媒の有無で比較したグラフを示し, 図 6 に Pt/Al₂O₃ 触媒を用いた場合の温度に対する分解生成物の割合を示す. 図 5 より, Pt/Al₂O₃ 触媒を用いることで MCH の反応


図5 MCH に対する Pt/Al₂O₃ の触媒効果

図6 MCH の分解生成物の割合 (Pt/Al₂O₃)

開始温度を 750 K から 400 K まで, 約 350 K 低減できることを確認した. 図 6 より, 反応させる温度によって分解生成物の割合が変化することから, 反応の制御が可能である. すなわち, 吸熱能力向上の可能性を示した. 特に, 比較的大きな吸熱量

を有する MCH からトルエンが生成する脱水素反応は、図 5 と図 6 の結果から約 523 ～ 623 K の範囲で促進されており、EF への適用にはこの温度範囲での利用が効果的である。

4-2 動的環境下における実験の評価結果

MCH の吸熱効果を確認するために行った動的環境下における実験結果として、温度に対する比エンタルピーの変化量を図 7 に示す。比エンタルピーの変化量は式 (1) のように定義し、負の値は吸熱であることを示す。

$$Q_{CR} = h(T_{OUT}) - h(T_{IN}) \quad (1)$$

Q_{CR} [J/kg]: 比エンタルピーの変化量

h [J/kg]: 比エンタルピー

T_{in} [K]: リアクター入口供試流体温度

T_{out} [K]: リアクター出口供試流体温度

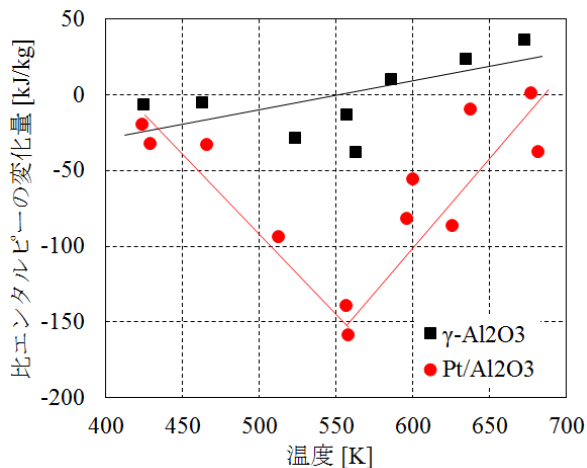


図 7 MCH の吸熱効果

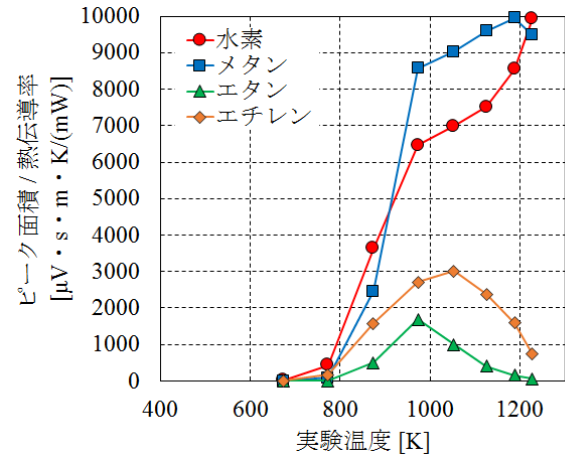
図 7 より、Pt/Al₂O₃ と γ-Al₂O₃ を比較すると、γ-Al₂O₃ の場合では、比エンタルピーの変化が微小である。Pt/Al₂O₃ の場合では、約 560 K で比エンタルピーの変化量が最大となり、この時の吸熱量は約 150 kJ/kg であった。この大きな吸熱効果は白金触媒によるものであり、準静的環境下における実験で脱水素反応が促進された温度と一致することからも裏付けられる。

5 BE の熱分解吸熱特性

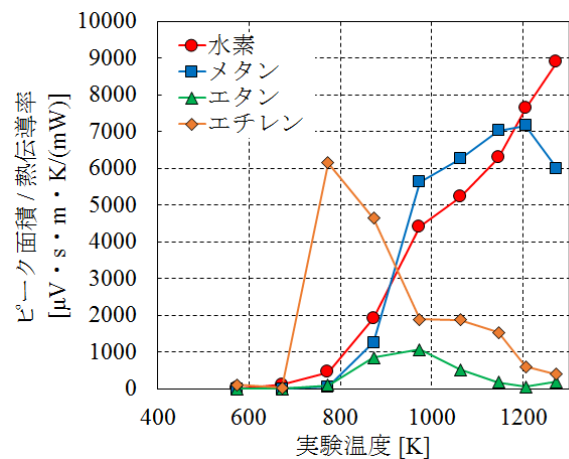
5-1 準静的環境下における実験の評価結果

BE の熱分解反応を評価するために行った準静

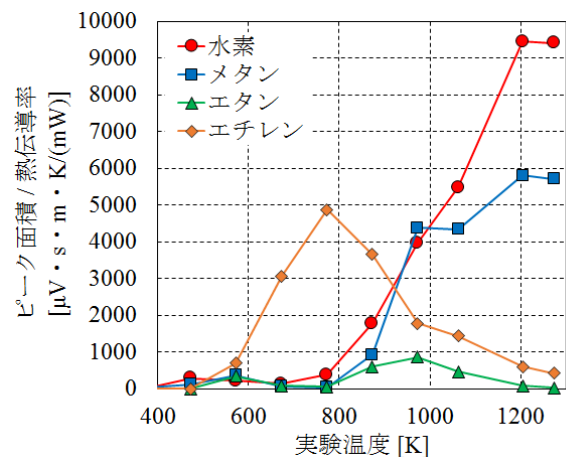
的環境下における加熱流通実験の結果を図 8 (a) ～ (c) に示す。図 8 より、触媒を用いることで反応開始温度が約 800 K から約 650 K まで低減できることを確認した。また、反応生成物が変化して



(a) 触媒なしの場合



(b) γ-Al₂O₃ の場合



(c) Pt/Al₂O₃ の場合

図 8 BE の熱分解生成物

いることから反応経路が変化していることがわかり、エチレンが生成していることから図 2 と比較すると、脱水反応による吸熱が生じていることが考えられる。また、 γ - Al_2O_3 に比べて $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ を用いた場合の方が比較的低温で反応が開始されることから、 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ を EF 用触媒として用いる方が再生冷却溝の高温熱疲労をより低減できるため有利であるといえる。また、BE の脱水素反応によって生成するアセトアルデヒドは微量であり、環境負荷が小さいことがわかった。

5-2 動的環境下における実験の評価結果

BE の熱分解吸熱特性を評価することを目的とした動的環境下における加熱流通実験の結果を図 9 および図 10 に示す。図 9 は流体への投入熱量と受熱量の関係を示しており、比較のため装置特性を示す GN_2 を用いた実験結果を併記した。各点の温度は加熱部出口の流体の温度を示している。 GN_2 の場合、温度の増加に伴い、投入熱量と受熱量が比例的に増大している。一方、BE の場合、900 K

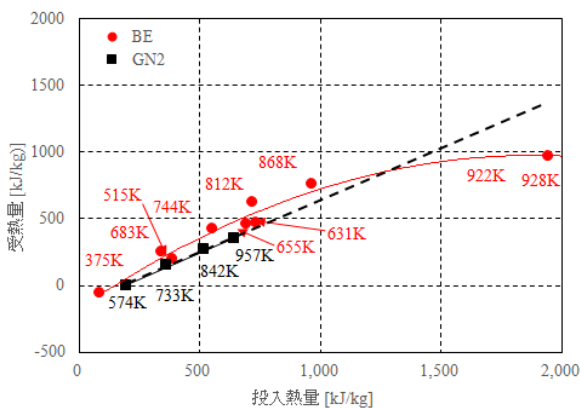


図 9 BE の吸熱特性

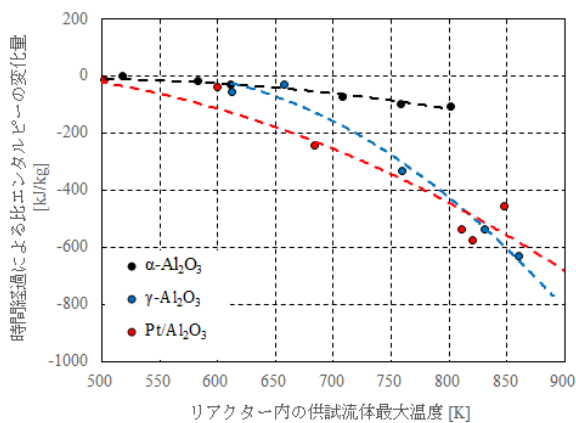


図 10 BE の触媒を利用した吸熱特性

までは GN_2 と同様の傾向を示しているが、900 K 以上では、投入熱量に対して受熱量が小さく、熱量が熱分解によって消費されていることがわかる。これは図 8 (a) に示した準静的環境下において反応生成物が増加し、熱分解反応が促進されている温度範囲と一致していることから明らかである。

図 10 は、触媒付近の流体温度の最大温度と流通終了時の温度との温度差に対応する時間経過による比エンタルピーの変化量を用いて評価した。触媒効果の比較のために BE の熱分解反応に対して不活性な α - Al_2O_3 を用いた実験によって装置特性を併記した。 α - Al_2O_3 の場合、温度増加によって熱量の変化は極めて微小である。

一方、 γ - Al_2O_3 と $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ の場合では、触媒効果によって約 650 K と比較的低温で吸熱効果を得られており、反応温度の増加に伴い大きな吸熱効果が得られることがわかる。また、 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ の方が γ - Al_2O_3 に比べ吸熱効果を得られる温度が約 50 K 低く、Pt の触媒効果が現れていると考えられる。このような吸熱が得られる動的環境下での温度範囲では、図 8 (b), (c) に示すように準静的環境下において分解生成物を得られる温度範囲と高い精度で一致する。

6 結論

本研究では、熱分解吸熱性燃料 (EF) を利用した再生冷却を適用した推進システムを構築することを目的として、ケロシン系燃料の主要成分の一つである環状飽和炭化水素の代表例としてメチルシクロヘキサン (MCH) およびクリーン燃料として注目されるバイオエタノール (BE) を用いて、熱分解吸熱特性を理論的および実験的に明らかにした。特に BE については、触媒を用いた熱分解吸熱特性の理論的および実験的な検証の前例はなく、初の試みである。

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 理論的には、MCH および BE での EF は炭素－炭素間の結合を切断する熱分解によって吸熱を示し、触媒反応を利用することで結合解離エネルギーが大きい炭素－水素間の結合を切断する脱水素反応などの活性化エネルギーが低下することで、反応温度を低下させると同時に吸熱量を増加させることができた。

また、実験結果から反応経路および反応機構を推定し、反応温度によってこれらが変化

することで吸熱効果が増加することを明らかにした。

- (2) 実験による研究結果として、MCH および BE の両者で熱分解反応による吸熱現象を確認した。特に BE の吸熱現象について初めての知見を得た。また、触媒を利用することで熱分解による吸熱効果が増加する温度が低下することについて実験的に初めての知見を得た。このことは理論的な検証と傾向が一致することからも裏付けられる。

MCH の場合では、Pt/Al₂O₃ を用いることで約 400 K から吸熱効果を得られ、約 550 K で吸熱量は最大となった。

BE の場合では、 γ -Al₂O₃ および Pt/Al₂O₃ を用いることで約 650 K から吸熱効果を得られ、温度上昇に伴って吸熱量の増加傾向を確認した。

- (3) 実用的応用に対しては、本研究での基礎的知見を基にして、滞留時間で反応を整理することで、流動状態が大きく異なる場合においても吸熱能力をある程度推定することができ、実機へ適用する際の重要なパラメータについての情報も得ることができることを明らかにした。

- (7) 服部英，多田旭男，菊池英一，瀬川幸一，射水雄三：新しい触媒化学，三共出版，1988，p4-7。
(8) 東野和幸，杉岡正敏，棚次亘弘，湊亮二郎，笹山容資，磯田浩志：熱分解吸熱反応燃料の吸熱量の測定と評価，日本航空宇宙学会論文集，Vol.60，No.3 (2012)，p115-12

文献

- (1) H. Lander and A. C. Nixon : Endothermic Fuels for Hypersonic Vehicles, Journal of Aircraft, Vol.8, No.4 (1971), p200-207.
(2) Alexander Kuranov and Alexey Korabelnikov : Atmospheric Cruise Flight Challenges for Hypersonic Vehicles Under the Ajax Concept, Journal of Propulsion and Power, Vol.24, No.6 (2008), p1229-1247.
(3) 小野文衛，竹腰正雄，斎藤俊仁，植田修一：有機ハイドライドの推進剤としての可能性について，第 52 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2008)，p577-582。
(4) 塚野徹，杉岡正敏，棚次亘弘，東野和幸：白金触媒を用いた熱分解吸熱性燃料の吸熱量の測定と評価，日本航空宇宙学会論文集，Vol.62，No.5 (2014)，p150-156。
(5) 山本康平，塚野徹，湊亮二郎，杉岡正敏，東野和幸：バイオエタノールの熱分解反応に関する研究～特に準静的環境における熱分解特性～，第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2013)。
(6) Tim Edwards : Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion 1903-2003, Journal of Propulsion and Power, Vol.19, No.6 (2003)。

アルミ-水系水素製造の衛星推進系への応用

東野 和幸^{*1*}, 小野寺 英之^{*3}, 杉岡 正敏^{*2}, 今井 良二^{*1*}, 増田 井出夫^{*4}

Application of Aluminum – Water Reaction for Space Satellite Propulsion

Kazuyuki HIGASHINO^{*1*}, Hideyuki ONODERA^{*3}, Masatoshi SUGIOKA^{*2}, Ryoji IMAI^{*1*},
and Ideo MASUDA^{*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

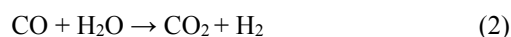
Hydrazine has been extensively used as one of fuel for spacecraft and satellite propulsion. However, hydrazine is toxic to human body and global environment. Therefore, the fuel for space plane needs the non-toxic clean fuel. Hydrogen has been extensively used as fuel for spacecraft propulsion system, which is environmentally friendly fuel. Hydrogen is generally produced by steam reforming of fossil fuels, but carbon dioxide (CO₂) is formed as by-product which causes global warming. We have been investigating the development of new hydrogen production by using aluminum with water. Hydrogen production by aluminum with water forms only hydrogen and aluminum hydroxide. In this study, we investigated the control method in the production of hydrogen using Al powder by changing the reaction temperature, the size effect of Al powder on hydrogen production ability and the development of new Al alloys (Al-X: X= Sn, Zn, etc.) for hydrogen production.

Keywords : Al- H₂O Reaction, Hydrogen, Clean fuel, Non-toxic propellant, Spacecraft propulsion application

1 緒言

現在, 宇宙機推進システムの燃料としてヒドラジンが使用されている. ヒドラジンは高比推力で貯蔵性に優れた燃料である. しかし, ヒドラジンは人体に極めて有毒である. ヒドラジンを扱うには高い専門性が必要で, 民間や大学の小型衛星に搭載することが困難である. また, 日本ではヒドラジンの輸入に依存しており, ヒドラジンに代わる推進剤が求められる. そこで本学では Al と水の反応から得られる水素を宇宙機推進システムに応用する研究を行っている.

水素は化学推進薬の中でも単独では最も比推力が高く, 人体に無害である. しかし, 従来の水素製造法である (1), (2) 式の炭化水素(CnHm)の水蒸気改質法では化石燃料が必要であり, 地球温暖化の原因である CO₂ を副生する.



また, 水素は金属中に吸収されて金属水素化物になり, 金属材料の強度を低下させる (水素脆性). さらに水素分子は非常に小さく, 水素漏れにより貯蔵性が低い. これらのため, 長期ミッションが目的である人工衛星への適応性は低い. しかし, (3)

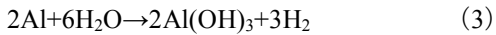
*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

*3 室蘭工業大学 生産システム工学系専攻

*4 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

式に示す Al と水による水素製造方法では以下の利点が存在する.



(3) 式で得られる生成物は水素と水酸化アルミニウムのみで, どちらも人体に無害であり, 環境への負担も小さい¹⁻⁴⁾. またこの方法は人工衛星での噴射に必要な水素のみを随時製造することができるため, 地上において高圧ガスの取り扱いが不要, かつ長期間水素を貯蔵する必要がない.

一方, これまで本学では Al 合金を用いることにより, 短時間で常圧および高圧水素を製造することに成功している⁵⁻⁸⁾. しかし, 重量検討の結果, ヒドラジン系推進システムと比較して 1.2 倍重量が増加することが判明した. さらに反応温度を 90[°C]に設定する必要がある, 電力を多く必要とする. また, 宇宙機のエンジンは何度も始動する必要があるが, Al-水反応を停止した後, 再度水素製造が可能か等を確認していない. そこで, 本研究では, 軽量で反応温度が低く, 反応の制御が可能である Al 合金粉末の開発, 反応条件の検討および Al-水推進系の衛星への適用を目的にし, 次節に述べる実験での比較検討を行う.

2 水素製造実験

2.1 実験装置

本研究での水素製造は図 1 に示す金属製高圧反応容器 (オートクレーブ) を用いる. ヒータで実験温度まで加熱し, 水素製造量は水素捕集管を用いた水上置換で水素を捕集して測定する. Al 合金の作製にはアルミナタンマン管とセラミック管状電気炉を用いる. 金属試料を入れたアルミナタンマン管を電気炉に入れ金属の融点以上に加熱し, 試料を熔融する. その後, 熔融金属を鋳型に流し込み, 冷却して金属合金試料を作製した.

2.2 実験方法

表 1 に水素製造実験と実験条件 (①-④) 等を示す.

- (1) 加熱実験①: 水と純 Al を実験温度まで上昇させ, 水素を発生させる. 30 分間水素を発生させた後ヒータを止めて 30[°C]まで自然冷却させる. 温度が 30[°C]以下まで低下後, 再び実験温度まで上昇させる. これを 4 回

繰り返す. 90°C の場合では無攪拌の実験も行う.

- (2) 粒径変化実験②③: 表 2 に粒子径条件を示す. 粒子径の違いによる水素製造では実験温度まで上昇した後に, 温度を一定に保ち, 実験時間に達するまで水素製造量を計測する. Al 微粒子 (粒径 20~0[μm]) の実験も同様な方法で行う.
- (3) Al 合金実験④: 表 3 に Al 合金組成を示す. 合金組成の違い (Al-Zn, Al-Sn) による水素製造実験では, 水と Al 合金を所定の温度で接触させ, 所定の実験時間に達するまで水素製造量を計測する.
- (4) XRD 分析: 反応後の液体 (水) と固体の混合物から固体を分離して XRD 分析を行い, その固体成分を同定する.

表 1 水素製造実験と条件

実験名	①	②
質量 g	5	
温度 °C	30,50,60,70,80,90	60
粒径 μm	100~0	表2に示す
攪拌速度 rpm	0,1350	1350
水量 ml	80	
実験時間 min	開始, 停止を4回行う	360
組成	純Al	

実験名	③	④
質量 g	5	
温度 °C	60	60
粒径 μm	20~0	150~0
攪拌速度 rpm	0,1350	1350
水量 ml	80	
実験時間 min	360	
組成	純Al	表3に示す



図 1 実験装置

表 2 Al 粒子径

粒径 [μm]	500~250
	250~150
	150~100
	100~53
	53~20
	20~0

表 3 Al 合金組成

組成 (質量%)	Al-5%Zn, Al-10%Zn	Al-5%Sn, Al-10%Sn
	Al-20%Zn, Al-30%Zn	Al-20%Sn, Al-30%Sn
	Al-40%Zn	Al-40%Sn

3 実験結果と考察

3.1 加熱実験

図2にAl-水反応の結果を示す。すなわち、(a)～(e)に撹拌速度 1350[rpm]での加熱実験の結果を示す。この結果、温度が高いほど制御性が向上する傾向があるが、水素製造量は減少する傾向があることが明らかとなった。

このことより、反応させる温度が高い場合は制御性が良いので、人工衛星での噴射に必要な水素を製造する際に適していることが判明した。しかし反応温度が低い場合は、水素製造量をコントロールすることは困難なので人工衛星のエンジン操作に適していないと考えられる。高温で制御が可能になる理由として、高温の水中で生成される水和酸化皮膜($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 等)が過剰な水素生成反応を妨げているためであると考えられる。

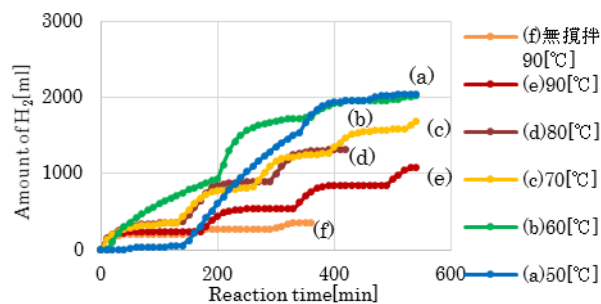


図2 加熱実験(Al)

図2(f)に撹拌速度 0[rpm], 90[°C]の場合を示す。無撹拌の場合においても、制御性があることが判明した。しかし、撹拌がある場合より水素製造量が大幅に減少した。水素製造量が減少した原因としては、Al粒子が堆積し、隣接するAl粒子どうしが密着するため、水との接触面積が小さくなったためと考えられる。

3.2 粒径変化実験

図3に粒径変化の実験結果を示す。粒径が細かいほど水素製造量は大幅に増加することが判明した。実験開始から360[min]後におけるAl(粒径: 20~0[μm])の水素製造効率(計測値を理論値で割った値)は77.8[%]である。また、Al(粒径: 20~0[μm])は、実験開始から2270[min]後に6650[ml]の水素を計測した。水素製造効率は99.5[%]である。これは、粒径が小さくなると水との接触面積が大きくなるため、水素製造量が増加すると考えられる。

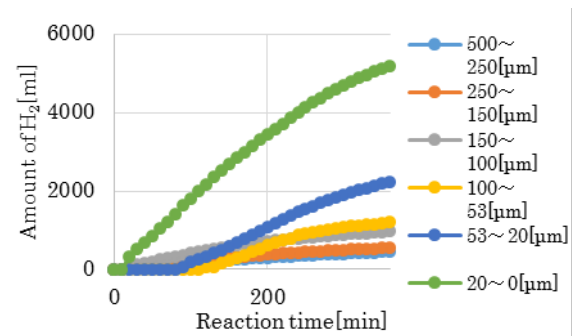


図3 粒径変化実験

3.3 Al 微粒子による水素製造実験

図4にAl(20~0[μm])の水素製造結果を示す。実験開始から470[min]後に6712[ml]の水素が得られ、理論値(6728[ml])に対して97.8[%]の水素を製造した。20[μm]以下のAl微粒子ではほとんどのAlが水と短時間で反応し、水素を製造することが明らかになった。

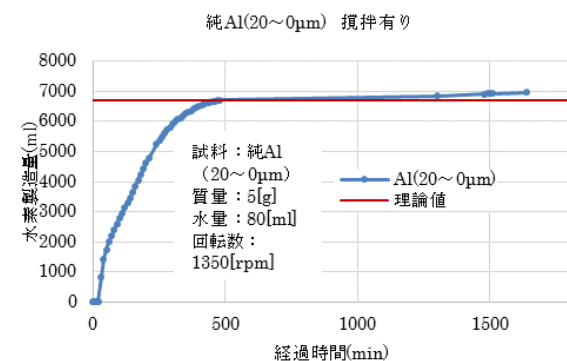


図4 Al 微粒子での水素製造

3.4 Al 粉末のXRD解析

図5, 図6にAl(20[μm]~0)の水素製造実験前後のXRD分析の結果を示す。

反応前ではAlのみが同定されたが、水素製造実験後の試料からは水酸化アルミニウム($\text{Al}(\text{OH})_3$)が検出された。この結果はほとんどのAlが水と反応して水酸化アルミニウムに変化したと考えられる。また、図6の反応後のXRD分析から2種類の水酸化アルミニウムが検出された。これは、水酸化アルミニウムにはγ型とされるギブサイト(Gibbsite)およびα型とされるバイヤーライト(Bayerite)が存在するためと考えられる。さらに、熱水溶液中では水酸化アルミニウム($\text{Al}(\text{OH})_3$)から一分子の水が脱水して生成するベーマイト(Beohmite) $\text{AlO}(\text{OH})$ も生成する可能性もある。これらの物質がAl-水系での水素製造にどのように関係しているか

は今後の研究課題である。

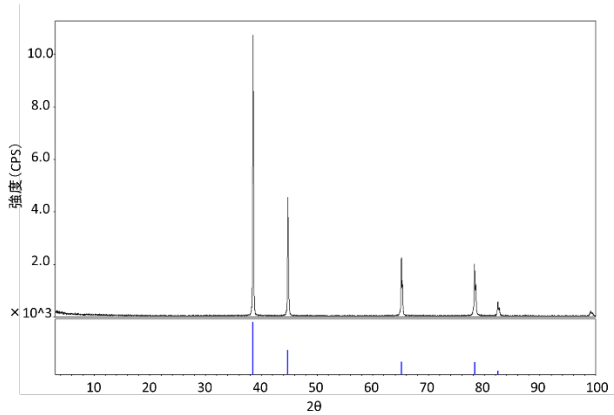


図5 Al(20~0[μm])水素製造実験前の XRD 分析

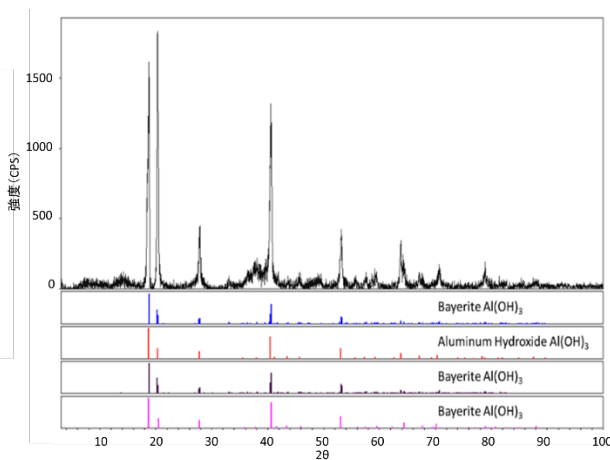


図6 Al(20~0[μm])水素製造実験後の XRD 分析

3.5 Al-Zn 合金と Al-Sn 合金の水素製造

図7に Al-Zn 合金, 図8に Al-Sn 合金の水素製造の結果を示す。どちらの合金でも反応温度は 60[°C] である。この結果, どちらの合金も添加金属が多いほど水素製造量が多い傾向がある。しかし, Al-5[%]Sn は添加金属が少ないにも拘らず水素製造量が多いことが観察された。また, 全ての組成の Al-Sn 合金が常温で水と接触しただけで水素が発生することを目視観察で確認した。

一方, Al-Zn 合金は水と常温で接触しただけでは水素は発生しないが, 室温よりも高い温度では Al-Sn と同様な挙動を示すものと推定される。さらに, 前節の加熱実験より反応の制御ができる可能性はある。

以上のことより, Al-Sn 合金は水と常温で反応する優れた合金と考えられ, 特に Al-5[%]Sn は添加金属が少なく即応性があり, 宇宙機の推進系に適していると考えられる。

一方, Al-Zn は室温においては Al-Sn よりも反応

性は劣るが, 室温以上の温度では Al-Sn と同程度の水素製造能力を示すことが期待される。また, Al-Zn に第3成分を加えることにより, Al-Sn と同程度またはそれ以上の性能向上が期待される。

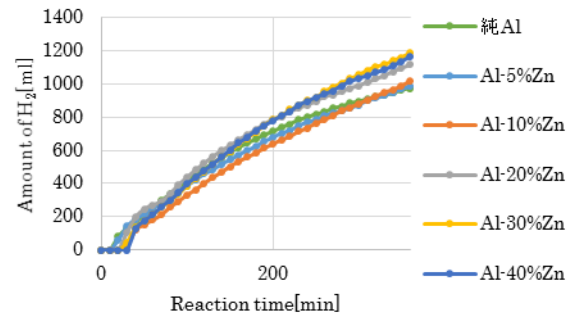


図7 Al-Zn による水素製造(60[°C])

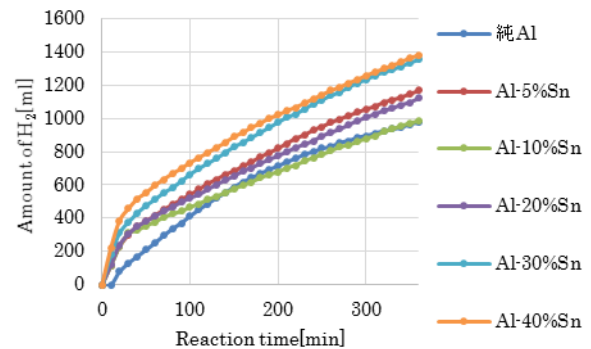


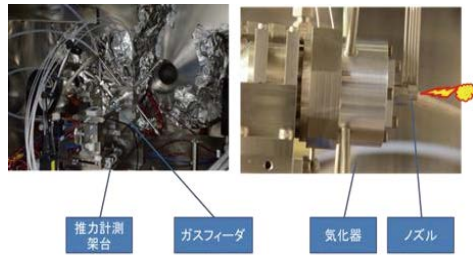
図8 Al-Sn による水素製造(60[°C])

3.6 Al-水系水素製造の衛星推進系への応用

3.6.1 噴射試験

液(水または反応後の液)をボンベからの水素で 0.65MPaG (タンクの制約)に加圧し, 水素を真空槽中の推力計測架台上に設置されたスラスタ(アルミ製, スロート径 0.5 mm, ノズル開口比 100)に供給して, 水素噴射を 30 秒間実施した。その後, 液を気化器(スラスタ上流の絞り部)に 10 秒間供給した。噴射中にスラスタの推力, プレナムチャンバ圧力, 水素ガス流量, タンク質量(液の流量を知るため)の計測と噴射時の様子の確認, 比推力の算出を行った。

図9に実験装置, 図10と表4に噴射試験の結果を示す。水素ガスの噴射試験結果より, 発生した水素ガスのみで理論値に近い比推力が得られる可能性が示された。また, 水素ガスに発生液(水素製造後の水溶液)を加えて噴射試験を実施したところ, ノズル(スロート径 0.5 mm)



- ・ 噴射中にスラスタの推力、プレナムチャンバ圧力、水素ガス流量、タンク質量(液の流量を知るため)等を計測。噴射時の様子を確認。
- ・ 比推力等を算出。

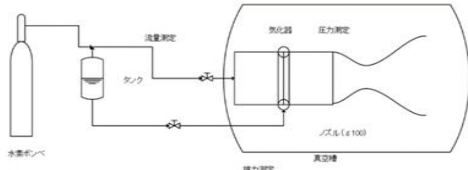


図 9 実験装置

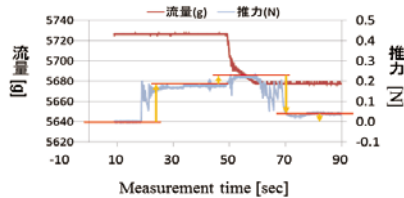


図 10 噴射試験の結果

表 4 噴射試験の結果

	ガス流量[g/s]	液 流量[g/s]	推力 [N]	Pc [MPaA]	真空槽圧力 [Torr]	Isp [s]	液Isp [s]
[水素+水]							
H ₂	0.0743		0.188	0.567	0.1	258.1	
H ₂ +H ₂ O	0.0423	1.92	0.265	0.653	0.2	639.4	13.8
[水素+30 %実液]							
H ₂	0.0718		0.178	0.550	0.1	253.1	
H ₂ +H ₂ O	0.0433	1.90	0.222	0.629	0.3	523.7	11.7

は閉塞せず、比推力が増加（水素+水では 639.4 水素+30 % 実液では 523.7 s）することが判明した。このことは、発生液が推力増加に寄与する可能性を示唆している。

3.6.2 純 Al-水推進系と他方式との比較

小型衛星に純 Al-水反応を利用した推進系と他の方式（水素ガスジェット、窒素ガスジェット、ヒドラジンガスジェット）との計算による比較を行った。Al-水系での水素発生量は(3)式に基づき計算した。比推力は常時一定とし、ブローダウンによる低下は考慮しなかった。コールドガスジェットは市販製品タンクの使用を想定し、宇宙用の 4 倍と仮定し、高压ガス特別充填申請の対象外となるようにした。Al-水推進系は地上では作動させないため、宇宙用タンクと同等の肉厚と仮定した。ヒドラジン推進系は宇宙用タンクを想定した。Al-水推進系は水素コールドガスと同じ比推力と仮定し、水を同時に噴射する効果は考慮しなかった。水素・窒素のコールドガスの Isp は「Spacecraft Propulsion」⁹⁾より引用した。

図 1 1 に Al-水推進系と他方式との比較を示す。この結果、純 Al-水反応を利用した方式は新たな推進系として成立する可能性があり、他の方式に比べ安全上でも有利であることが判明した。

4 結言

Al-水系での水素製造実験を行い、本研究により明らかになった結果を以下に示す。

(1)加熱実験

純 Al では、反応させる温度が 70～90[°C]の場合は水素製造における反応制御が容易であり、宇宙機推進系への応用が可能である。

項目	Al-水推進系	水素 Cold Gas (高压タンク)	水素 Cold Gas (低圧タンク)	窒素 Cold Gas (高压タンク)	窒素 Cold Gas (低圧タンク)	1液ヒドラジン
比推力	水素コールドガス: 260 s (水・アルミ重量含め: 9.6 s)	260 s	260 s	68 s	68 s	210 s
推進系質量合計[kg]	18.6	26.3	26.9	13.7	14.3	4.09
推進系質量[kg]	○ 水: 9.1 kg (△) アルミ: 4.6 kg	△ 0.5	△ 0.5	○ 1.9	○ 1.9	◎ 0.62
機器質量[kg]	4.4	25.8	26.4	11.8	12.4	3.47
推進系体積	○ 水: 9.1 L アルミ: 1.7 L	△ 63 L @ 10 MPa	× 666 L @ 0.95 MPa	○ 17 L @ 10 MPa	× 179 L @ 0.95 MPa	◎ 0.68 L
高压ガス	○ 非該当	× 該当	○ 非該当	× 該当	○ 非該当	× 該当
推進系の毒性、危険性	○ 非該当	△ 該当	△ 該当	○ 非該当	○ 非該当	× 該当
備考	宇宙用のタンクを想定 (地上では加圧しないため)	民製品のタンク 肉厚を想定	民製品のタンク 肉厚を想定	民製品のタンク 肉厚を想定	民製品のタンク 肉厚を想定	宇宙用のタンクを 想定

図 1 1 Al-水推進系と他方式との比較 (50 kg 衛星 ΔV=26 m/s の場合 (※50 cm 立方体 125 L))

(2)粒径変化実験

粒径が小さいほど水素製造が優れており, 20 ~ 0[μm]の微粒子の場合, 短時間においても水素製造量は大幅に増加することが判明した.

(3)Al-Zn 合金と Al-Sn 合金の水素製造実験

Al-Sn 合金は常温で水と反応させて水素を製造ができる可能性がある. 一方, Al-Zn 合金でも室温以上の温度で水素製造の可能性がある, Al-Zn 系に第 3 金属を添加した Al-Zn-X 系合金では Al-Sn 合金に匹敵する性能発現が期待できる.

(4)噴射試験

発生した水素ガスのみで理論上に近い比推力が得られる可能性が示された. また, 水素ガスに発生液を加えて噴射試験を実施したところ, ノズル (スロート径 0.5 mm) は閉塞せず, 比推力が増加 (水素+水では 639.4 s, 水素+30 % 実液では 523.7 s) することが判明した. 発生液が推力増加に寄与する可能性がある.

(5)純 Al-水反応方式と他の方式との比較

純 Al-水反応を利用した方式は推進系として応用できる可能性があり, 他の方式 (水素ガスジェット, 窒素ガスジェット, ヒドラジンガスジェット) に比べ安全上でも有利であることが判明した.

Production of green hydrogen by reaction of aluminum and water, Proceedings of 19th Regional Symposium on Chemical Engineering(RSCE2012), A-13-1 ~ A-13-5, Bali, Indonesia.

(5)石川昂紀, 小林隆夫, 神田康晴, 杉岡正敏, 東野和幸, アルミ-水系反応による高圧水素発生と宇宙機推進システムへの適用, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会要旨集(2010), 3H07.

(6)近藤光輝, 笹山容資, 東野和幸, 杉岡正敏, 宇宙機推進システムとしての Al/水系反応を利用した高圧水素製造に関する研究, 日本航空宇宙学会北部支部 2012 年講演会ならびに第 13 回再使用型宇宙輸送系シンポジウム(2012), JSASS-2012-H019.

(7)近藤光輝, 東野和幸, 杉岡正敏, 宇宙機推進システムとしての Al と水との反応を利用した常圧および高圧水素製造に関する研究, 第 54 回航空原動機・宇宙機推進講演会要旨集(2013), JSASS-2013-0033.

(8)小野寺英之, 杉岡正敏, 今井良二, 東野和幸, 増田井出夫, アルミ-水反応の衛星推進系への適用, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会要旨集 (2014), 1J11.

(9)Charles D. Brown, Spacecraft Propulsion (AIAA Education Series), (1966) Chapter7, Table7.1.

参考文献

- (1) Y. Kanda, Y. Uemichi, K. Higashino, and M. Sugioka, New hydrogen production by mechano-chemical reaction of aluminum with water, Abstract of The 8th Asian Pacific Conference on Sustainable Energy & Environmental Technologies (APCSEE2011), p113, Adelaide, Australia.
- (2) Y. Kanda, S. Kondo, S. Ooya, T. Kobayashi, Y. Uemichi, K. Higashino, and M. Sugioka, Green hydrogen production by mechanochemical mixing of aluminum with water, Journal of Chemical Engineering of Japan, 44(2011), p803-808.
- (3) M. Sugioka, K. Higashino, Y. Uemichi, and Y. Kanda, Production of green hydrogen by mechanical mixing of aluminum with water using stainless steel reactor, Proceedings of The 4th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (2012), p675-676, Singapore.
- (4) M. Sugioka, K. Higashino, Y. Uemichi, and Y. Kanda,

オオワシ 2 号機推進システムに関する研究

湊 亮二郎^{*1*2}, 東野 和幸^{*1*2}, 棚次 亘弘^{*2}

Study of Propulsion Engine for Oowashi 2

Ryojiro MINATO, Kazuyuki HIGASHINO and Nobuhiro TANATSUGU

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

Supersonic Unmanned Aerial Vehicle Project proceeds in Aerospace Plane Research Center at Muroran Institute Technology. The Gas Generator cycled Air Turbo Ramjet Engine is the most promising candidate for propulsion engine for this UAV. For this GG-ATR engine, its fuel and oxidizer are bio-ethanol and liquefied oxygen (LOX), respectively.

The present paper describes about GG-ATR engine cycle analysis, design and manufacturing of engine components, ground test facilities. In addition, the authors describe about future study plan for ground test of GG-ATR engine.

Keywords : Gas Generator Cycle Air Turboramjet Engine, Bio Ethanol

1 序論

現在、室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センターでは、小型無人超音速実験機オオワシの飛行実験計画が進行している¹⁾。2010 年には超音速飛行実験用のオオワシ 1 号機の飛行試験が成功した。これを踏まえて、現在は超音速飛行を見越したオオワシ 2 号機の研究開発が進められており、その推進エンジンとして、ガスジェネレータサイクル・エアターボラムジェットエンジン (Gas Generator Cycle Air Turbo Ramjet Engine, GG-ATR) が考えられている²⁻⁴⁾。

図 1 に GG-ATR エンジンの概念図を示す。GG-ATR エンジンは通常のジェットエンジンと異なり、タービンはガスジェネレータ (GG) で発生させた高圧、高温の燃料過濃の燃焼ガスで駆動させる。これによって圧縮機を作動させ、大気中から空気を流入、圧縮させる。GG で燃料過濃の状態で燃焼させるのは、タービンの耐熱性のためであり、この GG 燃焼ガスはタービン駆動後、圧縮機で圧縮された空気とラム燃焼器で混合させて燃焼させる。ラム燃焼器での燃焼ガスを、ノズルから噴射させることで推力を発生される。GG-ATR エンジンでは燃料の他に酸化剤も搭載する必要があるが、タービン駆動ガスと圧縮機で圧縮される空気が分離しているので、タービンの作動状態を飛行条件に依らず一定

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

に保つことが可能で、高速飛行に適している。通常のジェットエンジンとは異なり、圧縮機で圧縮された空気は、タービンを駆動することがないため、その膨張エネルギーを全て、推進仕事に費やすことができるため、同サイズのエンジンでは GG-ATR エンジンはターボジェットエンジンよりも大推力を発生させることが可能である。

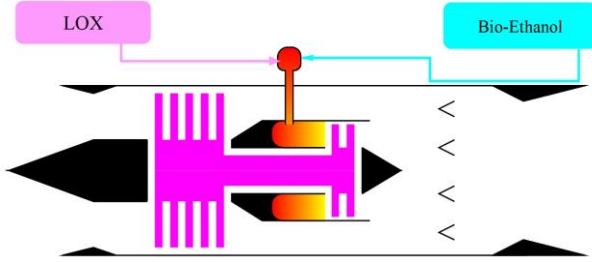


図1 GG-ATR エンジンの概念図

オオワシ2号機に搭載される GG-ATR エンジンは、バイオエタノールを燃料、液体酸素（LOX）を酸化剤として利用することが想定されている。本研究では、GG-ATR エンジンの性能解析から設計・製作、エンジン地上燃焼試験に至るまでの研究開発過程について述べ、その現状を考察する。

2 エンジンサイクル性能評価

2.1 GG-ATR エンジンの推力, Isp

GG-ATR エンジンの設計、開発の前段階として、同エンジンのサイクル解析を行った。

GG-ATR エンジンのサイクル解析を行うにあたり、推力 F と比推力(Isp)の関係を次の式(1), (2)で示しておく。

$$F = \dot{m}_{air} \left[(1+f) \sqrt{2\eta_c C_p T_{ram} \left(1 - \left(\frac{p}{P_{nozzle}} \right)^{\frac{\kappa_{nozzle}-1}{\kappa_{nozzle}}} \right)} - V \right] + (p_{nozzle} - p_{atm}) A_{nozzle} \quad (1)$$

$$I_{SP} = \frac{1}{g} \left(1 + \frac{1}{f} \right) \sqrt{2\eta_c C_p T_{ram} \left(1 - \left(\frac{p}{P_{nozzle}} \right)^{\frac{\kappa_{nozzle}-1}{\kappa_{nozzle}}} \right)} + (p_{nozzle} - p_{atm}) \frac{A_{nozzle}}{\dot{m}_{air} f g} - \frac{V}{f g} \quad (2)$$

f は推進剤質量流量 $\dot{m}_{GG}$ （燃料と酸化剤の和）と空気流量 $\dot{m}_{air}$ の比である。

2.2 インテーク, ターボ系要素の性能解析

エンジン性能解析では、最初にインテーク性能解析から始める。初期条件として飛行マッハ数と高度を与えておき、気流全圧 P_T 、全温 T_T を求める。そしてインテークの性能を MIL-Spec E-5008B より計算する⁵⁾。

圧縮機の性能は、予め定格回転数における圧力比と断熱圧縮効率を与える。次にエンジンの回転数と飛行条件から修正回転数を求め、そこから圧縮機における修正流量と圧力比、及び圧縮仕事を求める。

次にタービンとガスジェネレータの作動特性を求める。タービンの性能は、タービン入口温度 $T_{T,GG}$ （GG 燃焼温度）、とタービン膨張比 π_{turb} を予め与えておく。タービン効率は過去の研究例から、タービンノズルの噴射速度とタービン動翼の回転周速度の比の関数として与える⁶⁾。これらよりタービン仕事は式(4)から求まるが、これには式(3)に現れる GG 流量 $\dot{m}_{GG}$ を求める必要がある。

$$W_{turb} = \eta_{turb} \dot{m}_{GG} C_{p,GG} T_{T,GG} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_{turb}} \right)^{\frac{\kappa_{turb}-1}{\kappa_{turb}}} \right) \quad (3)$$

タービンノズルでは常に流れがチョークしているとすると、GG 燃焼ガスの流量と圧力にはロケットエンジンの特性排気速度と同様な関係が成り立つ。

$$C_{GG}^* = \frac{P_{GG} A_{turb}^*}{\dot{m}_{GG}} = \sqrt{\frac{\hat{R} T_{GG}}{\kappa_{GG} M_{w,GG}} \left(\frac{\kappa_{GG} + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa_{GG}+1}{\kappa_{GG}-1}}} \quad (4)$$

ただし、 A_{turb}^* はタービンノズルの通過断面積である。Off-Design 条件では、 A_{turb}^* が一定という条件から次の式が成り立つ。

$$\frac{\dot{m}_{GG} C_{GG}^*}{(\dot{m}_{GG} C_{GG}^*)_{SLS}} = \frac{P_{GG}}{(P_{GG})_{SLS}} \quad (5)$$

これにより以下の手順で GG 燃焼圧力 P_{GG}^* を求める。

1. GG 燃焼圧力 P_{GG}^* を仮定する。
2. GG 燃焼ガス流量 $\dot{m}_{GG}$ をタービン-圧縮機パワーバランスから求める。
3. GG での化学平衡計算を行い、GG における特性排気速度 C_{GG}^* を求める。
4. 式(5)より、GG 燃焼圧力 P_{GG} を修正する。

5. 上記の過程を解が収束するまで繰り返す。

これによって、GG 燃焼圧力と流量を決定する。化学平衡計算プログラムは著者らによって開発されたが、NASA SP-273 計算コード⁷⁾と検証を行い、ほぼ同じ結果が得られていることを確認した。

以上の過程を踏まえて、圧縮機とタービンの仕事が求めて、パワーバランスが等しいことから、推進剤質量流量 $\dot{m}_{GG}$ と空気流量 $\dot{m}_{air}$ の比 f は、式(6)のように与えられる。

$$f = \frac{\dot{m}_{GG}}{\dot{m}_{Air}} = \frac{C_p T_{T,0} [\pi_{Fan}^{(\kappa-1)/\kappa} - 1]}{\eta_{Fan} \eta_{turb} C_{p,GG} T_{GG} [1 - \pi_{turb}^{-(\kappa_{GG}-1)/\kappa_{GG}}]} \quad (6)$$

式(2)より、Isp を向上させるには f を小さくする必要がある。

2. 3 ラム燃焼器の性能解析

GG-ATR エンジン性能解析の最後の過程で、ラム燃焼器の圧力 P_{ram} を求める。これはインテークでの圧力回復、圧縮機圧力比、ラム燃焼器圧力損失から求めることができる。

$$P_{ram} = P_T \pi_{intake} \pi_{Fan} \pi_{ram} \quad (7)$$

更にノズルにおける圧力損失からノズル出口における全圧を求めることができる。

$$P_{nozzle} = P_{ram} \pi_{nozzle} \quad (8)$$

この式より、式(1), (2)に必要なノズル膨張比を計算することができる。

ラム燃焼器の温度 T_{ram} については、式(6)より、推進剤流量と空気流量の比が決まる。式(7)で求めたラム燃焼器での圧力条件で化学平衡計算を行い、ラム燃焼器の燃焼温度を求めることができる。なお化学平衡計算における、反応物の初期エンタルピーは、GG 燃焼ガス（推進剤）についてはタービン出口温度、空気については空気の断熱圧縮と圧縮機仕事から圧縮機出口温度を求め、その温度におけるエンタルピーを初期エンタルピーとする。

T_{ram} , P_{nozzle} を用いて、式(1), (2)に示された GG-ATR エンジンの推力、Isp を求めることができる。

2. 4 GG-ATR エンジンの性能解析結果

図 2,3 に地上静止状態における GG-ATR エンジンの Isp と密度比推力の解析結果を示す。本研究では、解析条件として

圧縮機圧力比	2.5
断熱圧縮効率（設計点）	78%
タービン入口温度	1100 K
タービン膨張比	5.0
タービン断熱効率（設計点）	70%

として、酸化剤に液体酸素（LOX）、燃料に液体水素（LH2）、液化天然ガス（LNG）、エタノール、 $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ （ケロシン燃料の主成分）を想定した。

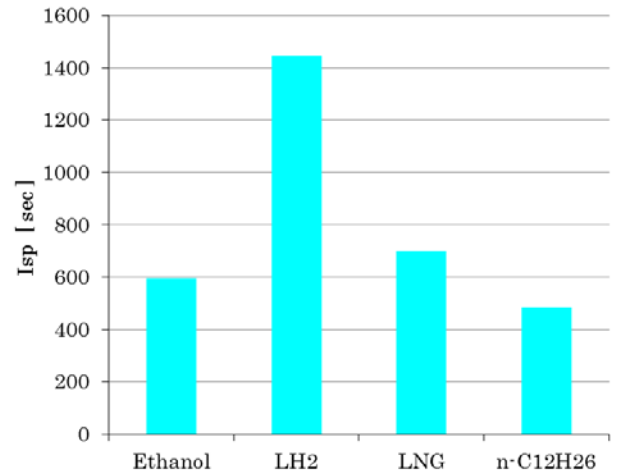


図 2 地上静止状態での GG-ATR エンジンの Isp

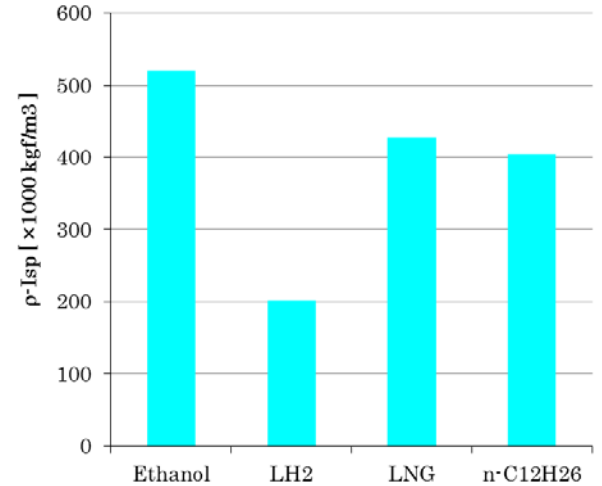


図 3 地上静止状態での GG-ATR エンジンの密度比推力

これら 4 つの燃料に関して、地上静止状態における GG-ATR エンジンの Isp と密度比推力の比較を図 2, 3 に示した。密度比推力とは、Isp に推進剤の平均密度を掛けたもので、Isp が単位推進剤重量当たり

の発生推力を表すものに対して、密度比推力は推進剤の単位体積当たりの発生推力を示す。

Isp に関しては、分子量が小さい液体水素が最も高く、次いで LNG、エタノール、 $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ の順になっている。エタノールは $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ より発熱量が小さいものの、Isp は逆に $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ より上回っている。エタノールは 1 分子に含まれる炭素数が少なく、GG 燃焼ガスの分子量が、 $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ の場合と比較して小さいことが考えられる。

また密度比推力に関しては、エタノールが最も高い結果となった。液体水素と LNG の Isp は高いものの、燃料の密度が小さいため、密度比推力はエタノールより劣る。小型無人超音速機では搭載できる推進剤タンクの体積が限られていることから、エタノールは非常に有力な燃料と言える。

3 GG-ATR エンジン要素の研究開発

3.1 斜流圧縮機・タービン

GG-ATR エンジンの圧縮機として斜流型圧縮機を搭載することを考えている。図 4,5 にそれぞれ斜流圧縮機動翼インペラの空力 CFD 解析、及び回転強度解析の解析結果の一部を示す。

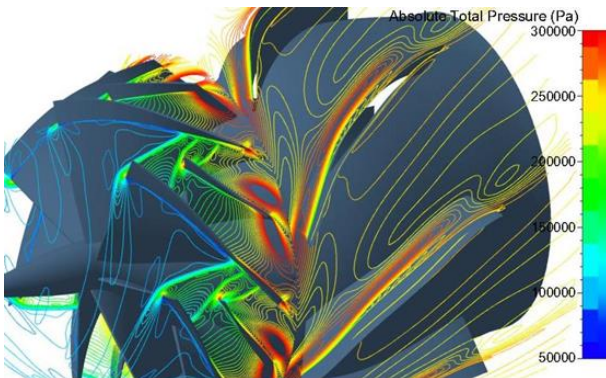


図 4 斜流圧縮機の CFD 解析

この斜流圧縮機の入口径は 150mm、空気流量は標準状態 (288.15K, 101.3kPa)、定格回転数 (58000rpm) 条件で 3.47kg/sec で、圧力比は定格回転数条件で 2.5 である。

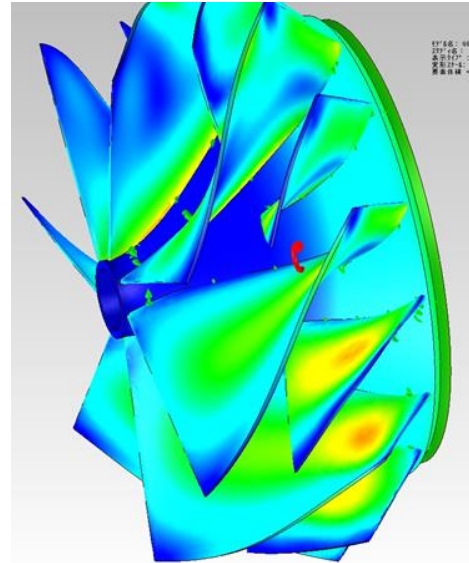


図 5 斜流圧縮機の回転強度解析

GG-ATR エンジン用斜流圧縮機インペラは定格運転時に 58000rpm で回転するため、ブレードには相応の回転応力が作用する。図 5 にはこの斜流圧縮機インペラを 64000rpm で回転させた時の Von Mises 応力分布を有限要素法 (FEM) で求めたものである。この解析結果では、64000rpm で回転させた場合でも、最大 Von Mises 応力は許容応力の範囲内であったことが示されている。

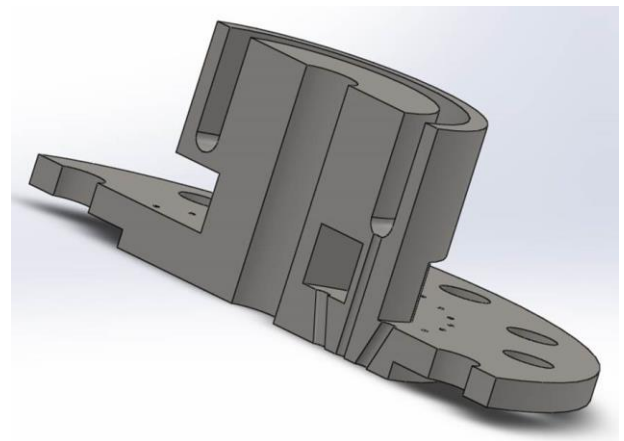


図 6 GG 噴射器の CAD モデル

3.2 ガスジェネレータとラム燃焼器の開発

GG-ATR エンジンにはガスジェネレータとラム燃焼器の 2 種類の燃焼器がある。図 6 に GG-ATR エンジンに搭載が想定されている GG 噴射器の概観図を示した。噴射口は 3 点衝突型の形状をとっており、

中央に LOX, 左右 2 つの噴射口からはエタノールが噴射される. この噴射器からは定格作動時には, LOX は 0.22 kg/sec , エタノールは 0.48 kg/sec の流量を噴射される. GG 内の燃焼温度や燃焼圧力は定格作動時において, それぞれ 1100K , 1.35MPa としている. この温度に燃焼器が耐えられるように, GG 燃焼器の内壁をフィルム冷却で冷却する.

GG 燃焼器の設計に必要な要素として, 着火保炎が確実であること. GG 燃焼圧力による弾性応力や, 燃焼による熱応力に耐えられる構造であること. 及びタービンノズルで燃焼ガスの温度分布が一様であることなどが求められる.

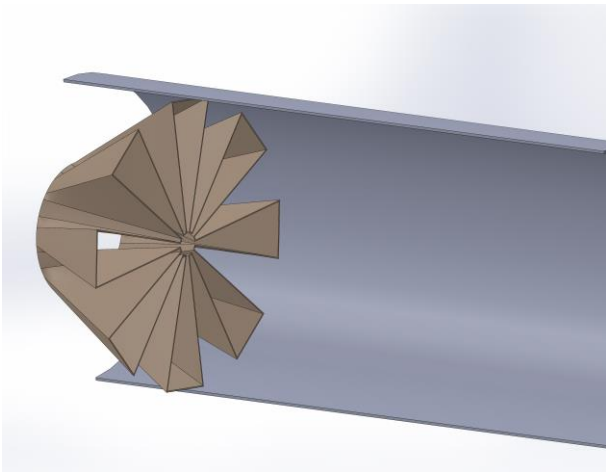


図 7 ラム燃焼器ミキサーの概観図

図 7 にはラム燃焼器ミキサーの概観図を示した. タービン駆動後の GG 燃焼ガス温度は 800K 以上あり, 空気と混合しただけで容易に燃焼するものと考えられる. そのため, ラム燃焼器での空気と GG 燃焼ガスの混合性能が, GG-ATR エンジンの推力発生の鍵を握っている. ミキサーは混合に伴う圧力損失を最小限に抑えつつ, 燃焼器長さを出来るだけ短くさせるようにする必要がある. そのような要求から, ラム燃焼器のミキサーには, 図 7 に示すようなローブ型ミキサーというタイプのものを想定している. このローブ型ミキサーの混合の CFD 解析を行い, 地上試験で混合性能を検証していく.

4 地上燃焼試験設備

GG-ATR エンジンのターボ系要素については, 2013 年度までに部品の製作, 組み立てを終了させた. 次の段階として, エンジンの地上試験がある. 図 8 に製作した GG-ATR エンジンを示す.



図 8 製作した GG-ATR エンジン

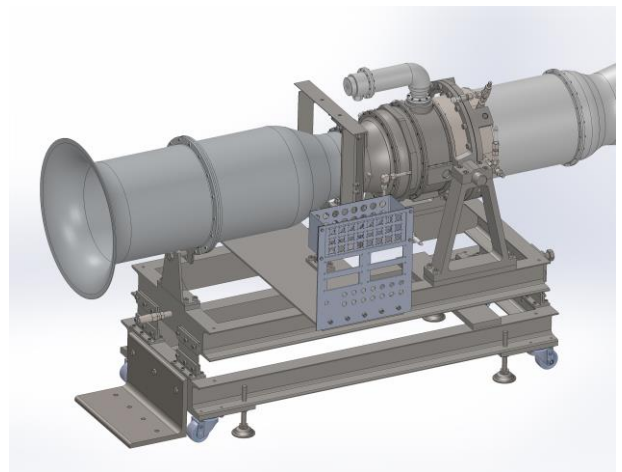


図 9 GG-ATR エンジン地上試験架台

図 9 には GG-ATR エンジン地上試験架台の CAD モデルを示す. 地上試験では以下の 3 段階を踏んで行う計画である.

- A) N_2 ガス(GN2)駆動によるターボ系回転要素冷走試験
 - B) GN2 駆動によるターボ系要素性能冷走試験
 - C) GG 燃焼ガス駆動によるエンジン全体試験
- A)の GN2 によるターボ系回転要素試験では, ター

ビンシャフトの動バランスのチェック, 回転軸の変位計測, 危険速度の把握などを目的としており, タービン軸の回転体力学に関する試験である. B)では同じく GN2 を用いて, 圧縮機やタービンの空力特性を計測し, その性能把握を目的としている. 更に事前に CFD で解析した空力性能結果と比較する. エンジンの推力や Isp などの計測は C)の GG 燃焼ガス駆動によるエンジン全体試験で把握することになる.

5 結言

本論文では航空宇宙機システム研究センターで進められている, 小型無人超音速機オオワシ 2 号機に搭載される GG-ATR エンジンに関するこれまでの研究概要について述べた.

これまでに GG-ATR エンジンに関する研究として, エンジンサイクル性能解析, 圧縮機やタービンなどのターボ系要素の空力解析, エンジン部品のターボ系要素の製作とエンジンの組み立てなどが挙げられる.

今後, 超音速飛行試験に向けて, 地上試験設備の整備, ラム燃焼器, ガスジェネレータなどの非回転エンジン要素の設計製作, GN2 ガスによるエンジン冷走試験, GG 燃焼ガスによるエンジン熱走試験などが挙げられる.

参考文献

- 1). Mizobata K., Minato, R., Higuchi, K., UEBA, M., Takagi, S., Nakata, D., Higashino, K., and Tanatsugu, N., "Development of a Small-scale Supersonic Flight Experiment Vehicle as a Flying Test Bed for Future Space Transportation Research," ISTS Special Issue: Selected papers from the 29th International Symposium on Space Technology and Science, Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, Vol.12, No.ists29, pp. Po3 1-10, 2014.
- 2). Christensen, K. "Air Turborocket/Vehicle Performance Comparison", Journal of Propulsion and Power Vol.15, No.5 (1999), pp.706-712.
- 3). Christensen, K. "Comparison of Methods for Calculating Turbine Work in the Air Turborocket", Journal of Propulsion and Power Vol.17, No.2 (2001), pp.256-261.
- 4). 長谷川, 北原, 犬飼. : 小型・大推力エアターボラムジェットエンジン, 日本航空宇宙学会論文集, 第 50 巻, 582 号. pp. 272-277.
- 5) Model Specification for Engines Aircraft Turbojet, MIL-SPEC MIL-E-5008B, U.S. Department of Defense, Jan. 1959.
- 6) "Liquid Rocket Engine Turbine", NASA SP-8110 (1974).
- 7). Gordon, S. and McBride, B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shock and Chapman-Jouguet Detonations", NASA SP-273. (1971).

無人航空機自律飛行のための誘導制御システム技術

- オオワシ 2 号機用誘導制御システム実現に向けて -

上羽 正純^{*1*2}、竹内 僚太郎^{*3}、山下 智也^{*3}、横田 滋弘^{*4}

Guidance and Control System Technologies for Autonomous Flight of Unmanned Air Vehicle

- Toward the realization of Guidance, Navigation and Control System for Owashi-II -

Masazumi UEBA^{*1*2}, Ryotaro TAKEUCHI^{*3}, Tomoya YAMASHITA^{*3}, Shigehiro YOKOTA^{*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

In order to realize unmanned air vehicle (UAV) which can fly autonomously, it is necessary to develop guidance, navigation and control system technologies as well as telemetry and command system technologies. The former achieves the required trajectory and attitude, the latter monitors the flight condition of the UAV and directs the adequate command in case of emergency. Besides, in the development of Owashi II, small-scale unmanned supersonic airplane, we need to establish required technologies by validating step by step. This paper describes the status of the development of the two systems.

Keywords : Guidance, Navigation and Control, Telemetry and Command, Unmanned Air Vehicle

1. はじめに

超音速機をはじめとする大気中を高速・高々度まで飛行する飛翔体実現のための基盤技術の一つである誘導制御技術は、姿勢の安定を確保しつつ所望の姿勢精度で目標地点へ飛行するのみならず、エンジン性能・空力加熱等の条件を満たしつつ、離陸、上昇、旋回、超音速飛行、下降、着陸といった各種飛行モードに自律的にかつ最適に飛行するための重要技術である。更にこれにより実現される小型無人超音速実験機は、誘導制御技術以外の空気力学、構造力学、推進力学の各基盤技術をシステム技術として確立するための実証プ

ラットフォームとして大変重要である。

また、このような小型無人実験機には安全な飛行を目的として、通常の航空機同様、実験機から送られてくるデータにより地上において飛行状態を常に監視し、必要に応じて飛行モードの変更、緊急時の安全モードへの移行措置を指示する等の遠隔監視制御を有することが必須である。すなわち、誘導制御システム技術の研究開発は飛行制御としての誘導制御系技術と監視制御としての遠隔監視制御系技術の両方をセットで進めることが重要である。

ここでは、オオワシ 2 号機を最終無人航空機と想定して、2011 年度より開始している無人航空機自律飛行のための誘導制御システムについて構築の基本方針、構成ならび現在の進捗状況を紹介する。

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

*3 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻

*4 室蘭工業大学 生産システム工学専攻

2. 小型無人超音速実験機の飛行条件

マッハ2の超音速の実現を目指す本実験機は、離陸から超音速に到達するまでの10分程度の飛行時間で概ね100km飛行し、高度10kmに到達することを想定している(図1)。実験機が離着陸可能で、かつ、安全の観点から、離陸直後から海上に出ることか可能で、海上での飛行距離が100km確保可能な実験場所として、北海道大樹町の多目的航空公園の使用及びその東方海上エリアの飛行を想定している。



図1 小型無人超音速機の飛行実験

3. 誘導制御システムと要求性能・機能

3.1 基本構成

航空宇宙機の誘導制御システムは図2に示すように誘導制御系(Guidance Navigation and Control Subsystem 以下GNC系)と遠隔監視制御系(Telemetry and Command Subsystem: 以下TTC系)より構成される。

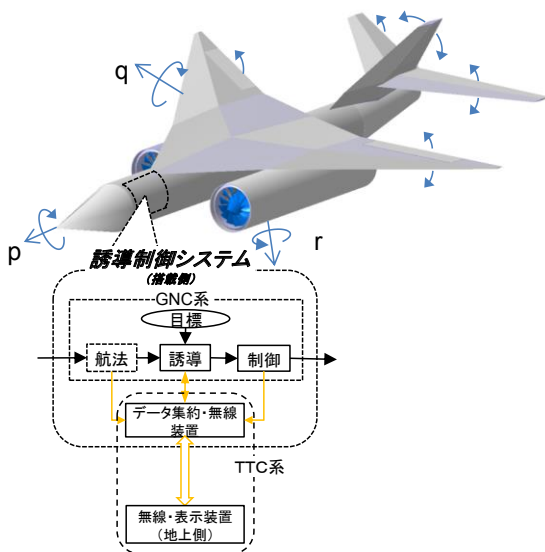


図2 誘導制御システムの基本構成

GNC系については、更に航法、誘導、制御の各サブシステムよりなる。

TTC系は、実験機側と地上側のそれぞれに用意した無線通信装置を用いて、実験機から地上へ飛行状態を伝送するテレメトリ回線と地上から実験機へコマンドを送信するコマンド回線より構成される⁴⁾。

3.2 要求性能・機能

無人航空機の自律飛行のための誘導制御システムの基盤技術の目標性能として、現段階では暫定的に表1に示すオオワシ2号機による実証飛行実現のための性能目標を用いる。重量、消費電力、体積については、オオワシ1号機以上の大きさの機体に実装できることを前提とした。

また、下記機能を具備することとした。

- 1) 位置・速度・姿勢制御、飛行モードの切替
- 2) 飛行データを常時かつ緊急時でも可能な限り取得
- 3) 自律制御の段階的開発のため、手動操縦と自動飛行の切替が可能

表1 要求性能(暫定)

GNC系	姿勢制御精度	0.1~1°
	重量	1kg以下
	消費電力	1W以下
	体積	1,000 cm ³ 以下
TTC系	テレメトリ回線情報速度	128kbps程度
	コマンド回線情報速度	10kbps程度
	搭載側重量	2kg以下
	搭載側消費電力	10W以下
	搭載側体積	2,000 cm ³ 以下

4. 誘導制御システム構築の方針と課題

ここでは、図2に示した誘導制御系と遠隔監視制御系の構築の方針と課題、さらには飛行実証の観点からの構築の方針と課題を述べる。

4.1 誘導制御系

①市販慣性航法装置の使用

航法系を実験機に実装する手段として、近年小型低価格化が進む市販の慣性航法装置を用いる。これにより、搭載マイコンボードでの処理を誘導・制御則計算に特化させる。

課題：市販の低価格慣性航法装置は、ロケット搭載品と比して位置、速度、姿勢誤差が大きい。そのため、

実験の飛行時間内において使用可能なことを確認する必要がある。

② 誘導則の生成

一般に誘導系は、航法系による計算結果より、現在の位置・速度・姿勢から、目標点まで到達するための飛行経路及びそこに到達するための制御目標を生成する。航空機の場合にはあらかじめ設定されている飛行経路には、エネルギー最小等の評価基準がないため、ロケットと同様な誘導則は不要である。但し、次に述べる制御系によりほぼ飛行経路を達成しているという前提のもと、次の飛行モードに移行させ、座標系等の基準を生成するという役割を担わせる。

課題：あらかじめ設定した飛行経路がどの程度達成されるかを見極め、ずれが大きい場合にはそれに応じた誘導則を導入する。また、緊急時の誘導則も準備しておく必要がある。

③飛行モードに対応した制御系

PID制御器を基本に、表2に示す飛行モードに対応できる各種制御則を準備しておく。

表2 飛行モードと制御

	制御変数	飛行モード				
		離陸(含む上昇)	水平定常	旋回	着陸(GS&AT同時制御)	着陸(自動フル)
縦系の制御	U (x軸方向速度)	誘導則指示値	一定	一定	誘導則指示値	誘導則指示値
	W (z軸方向速度)	誘導則指示値	一定	一定	誘導則指示値	誘導則指示値
	θ (ピッチ角)	誘導則指示値	一定	一定	誘導則指示値(一定)	誘導則指示値
横・方向系の制御	V (y軸方向速度)	ゼロ	ゼロ	ゼロ*	誘導則指示値(ゼロ)	誘導則指示値
	Φ (ロール角)	ゼロ	ゼロ	一定	誘導則指示値(ゼロ)	誘導則指示値
	ψ (ヨー角)	ゼロ	ゼロ	目標角迄	誘導則指示値(ゼロ)	誘導則指示値

課題：超音速飛行に適した機体形状は、亜音速となる高迎角低速の着陸時には機体の不安定度が増すためこれに対応した制御則を使用する。一方、離陸時の全備重量に対して、超音速飛行完了後の帰還時の全備重量が半分以下となるなどによりダイナミクスの変化が大きいこと、機体のダイナミクスは完全には飛行前には完全には把握できないことを想定して、飛行中の制御系が作動している状態でのリアルタイムでダイナミクス同定することが必要である。

④ 誘導制御回路

②、③のアルゴリズムを実装する誘導制御回路は、必要な機能を有し、現時点で最高性能を有する市販のマイコンボードを用いる。

課題：所望の周期での誘導則、制御則等の各種計算の総処理量及び周辺機器との高速データ通信速度ならびにそのポート数を明確化する必要がある。不十分な場

合は、同一シリーズの上位マイコンボードへ移行が容易な措置を講じる必要がある。

4.2 遠隔監視制御系

① 誘導制御回路との分離

遠隔監視制御系の目的は、可能な限り飛行状態をモニターし、確実に地上からのコマンドを伝送、機上で受け取ることである。そのため、誘導制御系自身の不具合が遠隔監視制御系に及ばない方策として、重量、容積の点では劣るが、それぞれの制御系のコアとなる制御回路を独立な2枚のマイコンボードで構築する。

②市販無線通信技術による装置の調達

遠隔監視制御系で重要となるのは、表1に示すように地上装置と実験機を結ぶ伝送距離、実験機側からデータを送信するテレメトリのデータ速度と実験機が受け取るコマンドに関するデータ速度である。これらの性能を満たす無線通信装置を市販品及びその改造、必要に応じて特注品として調達する。

課題：実験機搭載無線通信装置については、消費電力、重量、寸法に制約があるため、情報データ速度とのトレードオフを行う必要がある。また、無線通信回線確保の前提として全方位に同一の利得を有するアンテナを実験機に実装する必要があるが、使用する機体構造用のCFRPの影響を受けにくいアンテナを使用あるいは開発する必要がある。

4.3 飛行実証の観点から構築

4.1 及び 4.2 の方針に基づいて各サブシステムの構築を進めた場合、最終実験ではなく、小規模な飛行実証実験を実施しながら技術の確立及びハードウェアを構築することが、費用、リスクの低減という観点で望ましい。そのため、誘導制御系においては、センサ及びアクチュエータとの接続 I/F を RS232C、UART、PWM、遠隔監視制御系においては、無線通信装置との I/F を UART と汎用的な I/F を使用することに固定した。

これにより、ラジコン飛行機で一般的なサーボ、電動モーター、ジェットエンジン用 ECU の使用が可能となるとともに、飛行距離にあわせて市販の無線通信モジュールの使用も可能にした。

即ち、誘導制御系、遠隔監視制御系のコア部分は変更することなく、周辺装置の交換により使用機体及び飛行距離に対応できる構成となり、小型で安価なラジコン飛行機を用いた 100 m 程度の距離での飛行実証からスタートして、段階的により大きなサイズ、高速飛行可能なラジコン飛行機を使用した 1 km、10 km と

段階的に飛行距離を伸ばした飛行実証が可能である。
課題：人間の視認を超える遠距離での飛行には、高信頼な無線通信回線の使用と確実な飛行制御が必要である。そのためには、長距離地上区間における無線通信伝送性能確認、設計通りの飛行経路を確実に自律飛行制御性能の事前確認が必要である。

5. 誘導制御・遠隔監視制御系構築の現状

4. での方針に基づき構築を進めている誘導制御システムの現状をハードウェア及びソフトウェアの両面から紹介する。ハードウェアとしては製作した回路・装置、準備した周辺装置を、ソフトウェアとしては、制御側の設計状況及びリアルタイムシステム同定アルゴリズムの研究状況、最後にラジコン機を用いて実施した飛行実証を紹介する。

5.1 構成回路及び装置

GNC系とTTC系については、図3に示すような回路、装置構成した^①。緑点線四角にてGNC系を黄色四角点線でTTC系を示す。赤四角実践のハードウェアについては、新規製作を基本とした。但し、無線通信装置は、開発の初期段階及び初期飛行実証段階では市販無線通信モジュールを使用することとした。以下、新規製作の制御回路及び無線通信装置について説明する。

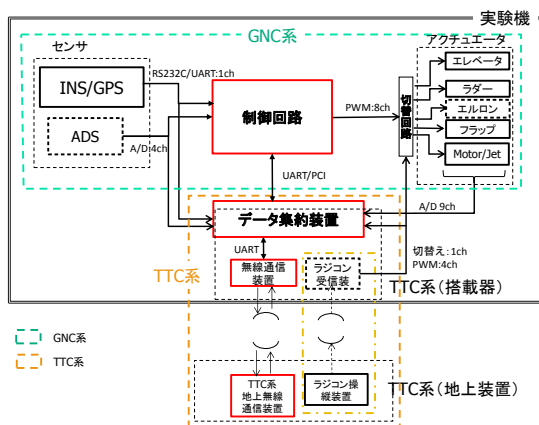
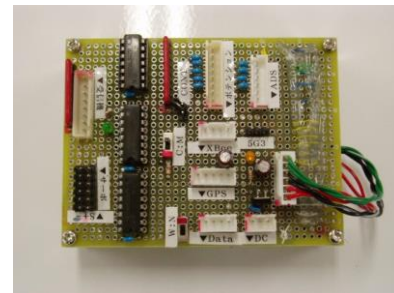


図3 誘導制御系・遠隔監視制御系構成

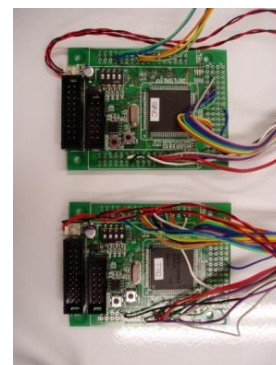
5.1.1 誘導制御回路・遠隔監視制御回路

製作した誘導制御・遠隔監視制御回路^②を図4に示す。Aは誘導制御及び遠隔監視制御一体型であり小さなラジコン機への装着を可能としている。Bは分離型であ

り、その分接続する機器のCH数を多く確保している。それぞれの性能を表3に示す。



A) 一体型



B) 分離型

図4 誘導制御・遠隔監視制御回路

表3 誘導制御・遠隔監視制御回路性能

	一体型	分離型*
CPU	SH7286	RX610 × 2
ROM (KB)	512KB	2MB × 2
RAM (KB)	24KB	128KB × 2
動作クロック (MHz)	100MHz	100MHz
計算周期	10ms	10ms
SCI (ch)	2ch	3ch
PCI (ch)	N/A	1ch
A/D (ch)	9ch	13ch
PWM (ch)	5ch	10ch
寸法 (W×L×D) (各mm)	100×80×30	(80×60×20) × 2
重量 (g)	200	200 × 2

*: 2ボード合計

5.1.2 遠隔監視制御系用無線通信装置

現在、免許不要にて利用できる2.4 GHz帯の無線通信モジュールが各種市販されている。その中で、テレメトリ回線として伝送速度を115.2 kbpsが可能で段階的に飛行距離を伸ばした実証に使用できると思われる遠隔監視制御系の無線通信モジュールとして表4のように選定した^③。

これらは共に半二重あるいは全二重通信対応であり、下りはテレメトリー回線、上りをコマンド回線として使用可能である。また、使用するアンテナにより伝送距離の長距離化が可能であり、最大 10 km での飛行に使用する予定である。XBee-PRO S1 については屋外伝送実験により性能を確認完了し、TWE-STRONG については、今後性能確認を実施する予定である。選定した無線通信モジュールの外観及びサイズを図5に示す。

表4 選定市販無線通信モジュールの伝送距離

製品名	使用アンテナ	伝送距離
XBee-PRO S1	U.FLコネクタ型アンテナ	500m(実測)
TWE-STRONG	内蔵アンテナ	1.7km(カタログ値)
	無指向アンテナ	3.1km(カタログ値)
	八木宇田アンテナ	10km(カタログ値)



図5 選定無線通信モジュール

100kmの伝送距離を有する無線通信装置としては市販品は存在しないため、テレメトリー及びコマンド回線として表5に示すような性能を有する装置を製作することとした。現在、図6に示すようにテレメトリー受信装置の製作が完了し、テレメトリー用送信装置を本年度完成に向けて製作中である。

表5 100 km用無線通信回線目標性能

	テレメトリー回線	コマンド回線
使用周波数(帯)	1281.5MHz*	400MHz帯
送信装置 アンテナ利得	0dB	0dBi
送信電力	2Wmax	1Wmax
受信装置 アンテナ利得	10 dBi	10dBi
情報データ速度	128kbps	10kbps

*:中心周波数

項目	性能値
最小受信感度	-111.3dBm
FEC	Reed Solomon符号化
復調器	MSKあるいはFSKに対応
電力変動対応幅	-57 ~ -111.3dBm
受信帯域幅	1.5MHz
復調データ出力	シリアルデジタルデータ
サイズ(mm)	300(L) × 100(W) × 40(H)

図6 製作テレメトリー受信装置

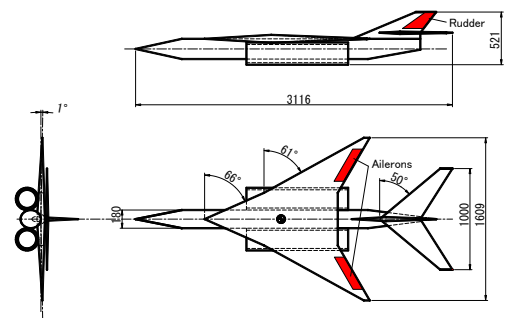
5.2 制御系設計

表2に示したように本研究開発においてはフライングテストベッドとしての小型無人超音速実験機実現を目標にしつつ、離陸から着陸までの一連の飛行モードを自律で行う飛行技術の確立を目指している。

自律の飛行制御は技術として確立されているものの設計段階における無人航空機としては、空力、構造、推進及びシステムからの要求条件を満足しつつ、小型の超音速実験機であることに起因する問題を解決する必要がある。



a)外観



b) 形状寸法

図7 オオワシ1号機

すなわち、空力的に静安定が不足あるいは静安定がない、推力も可変にできない等の厳しい条件下で、重着陸時の降下率を小さくするといった着陸制御性能が要求される。また、小型の無人航空機であるが故にかつ、今後の無人航空機の展開を想定して風洞試験による空力微係数の測定コストを不要にする、あるいは超音速機であるが故、燃料が全備重量に占める割合が高く、離陸前と着陸後のダイナミクスの変化が大きくな

ることにも対応できるよう飛行中にリアルタイムでダイナミクスを同定する手法が必要となる。

ここでは、着陸時の制御系性能の評価およびダイナミクス同定の検討状況について紹介する。

5.2.1 着陸時飛行制御系設計

小型の無人航空機は、その重量制限の観点から、強度の高い降着装置を構築することができず、着陸時には制御系により可能な限り降下率を小さくすることが望ましい。そのためには推力を連続可変にすることが前提であるが、重量制限より推力可変のためのバルブシステムも搭載できず、推力がステップ状にならざるを得ないという制約がある。

表6 オオワシ1号機 質量特性及び空力微係数

質量(kg)	m	27.3
翼面積(m ²)	S	0.9548
慣性能率(kgm ²)	I _x	0.94
	I _y	8.30
	I _z	11.13
慣性乗積(kgm ²)	I _{xz}	0.155*

*:推定

a) 質量特性

C_{xu}	-0.134	C_{mu}	0.0
C_{xa}	-0.142	C_{ma}	-1.34
C_{zu}	0.0	$C_{m\delta e}$	-1.48
C_{za}	-2.95	C_{mq}	-5.03
$C_{z\delta e}$	-0.874	$C_{m\dot{a}}$	-3.42

b) 縦の空力微係数

$C_{y\beta}$	-0.39015*	C_{lr}	0.0802
$C_{y\delta r}$	0.1483	$C_{n\beta}$	0.2693
$C_{l\beta}$	-0.1241	$C_{n\delta a}$	-0.4755
$C_{l\delta a}$	0.1022	$C_{n\delta r}$	-0.1152*
$C_{l\delta r}$	0.01521	C_{np}	0.0107
C_{lp}	-0.2194	C_{nr}	-0.484*

c) 横・方向の空力微係数

また、一般に航空機においては迎角が大きい状態では横・方向系の特性は大きく変化する。特に超音速機においてはデルタ翼形状であり、低速で着陸するためには、高迎角になり不安定化しやすい。これは、エルロンの利きに影響を与え、LCDP⁽⁴⁾(Lateral Control Departure Parameter)として指標化されている。

これらを解決するための事前評価として図7に示すオオワシ1号機を対象に表6に示す特性及び空力微係

数を用いてシミュレーションを実施した。これらの空力微係数のうち、 $C_{l\delta a}$ 、 $C_{n\delta a}$ 、 $C_{l\beta}$ 、 $C_{n\beta}$ の4つについては迎角とともに変化する。

(1) 横・方向飛行制御系

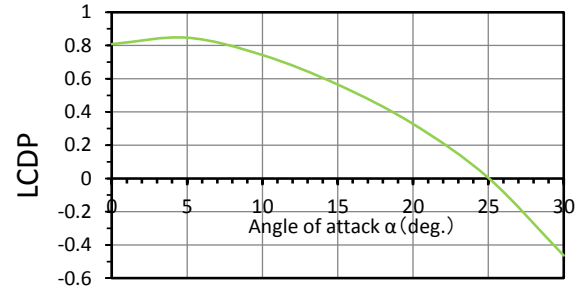
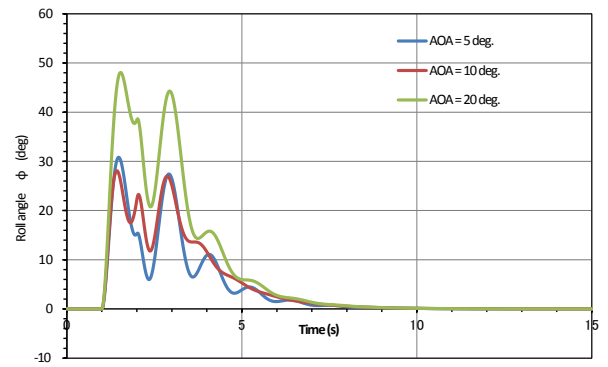
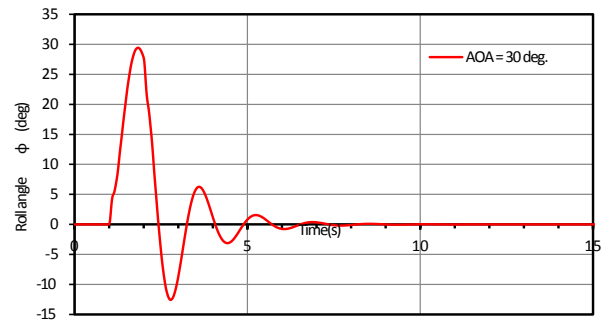


図8 LCDP vs 迎角(AOA)



a) LCDP>0 となる迎角



b) LCDP<0 となる迎角

図9 突風に対するロール角変動

本制御系としては、横滑り角をゼロとするターンコーディネーションを実現する制御則⁽⁵⁾を使用する。

横・方向のダイナミクス $\phi/\delta a$ の伝達関数においてその分子の定数項はLCDPと称され、オオワシ1号機

の迎角により変化する横・方向空力微係数を用いて計算すると図8のようになる。即ち概ね迎角 25° 以上では、エルロンに対する応答は低迎角の時と比べて逆応答となる。従って、1) LCDP が負にならない迎角で着陸する、2) LCDP が負になって場合制御パラメータを切り替える、3) LCDP が負にならないようにラダー等のループを組み込む等の方策を組み込む必要がある。ここでは、3) を検討するため、まず 1)、2) について迎角によるダイナミクスの変化に対応させて制御系を独立に設計して着陸時の突風応答外乱に対するロール角変動について、横方向から 1 秒間、5m/s の突風を受けるとして評価した (図9) ^⑥。

LCDP <0 の迎角においては、制御入力 of の仕方も逆になるため、最終的には突風に対しては同様の応答となる。しかしながら、ダイナミクス自体は逆応答特性を有している。また、オオワシ 1 号機のようなデルタ翼にあっては、5m/s 程度の突風でも $30\sim 50^\circ$ 程度ロール角が変動することが確認できた。

(2) 縦系制御系

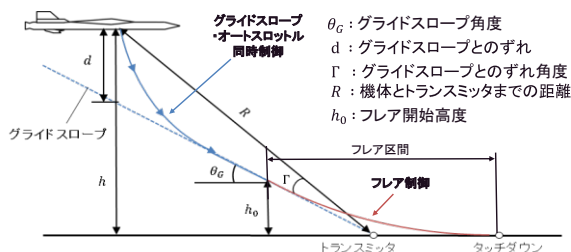


図10 着陸時飛行プロファイル

小型無人実験機においては、最終的に超音速飛行実験を実施に至るまでは、亜音速飛行の範囲内で繰り返し飛行実験することが必要であり、着陸はそのため必須の技術である。しかしながら、着陸時においては、降着装置及び機体構造への影響から、降下率を可能な限り小さくする必要がある。本実験機は、通常の航空機と同様に図10に示すように、ある高度からグライドパスにのり、高度 10 m 以下になった場合は滑らかに着地するためのフレア制御を行うことを想定している。グライドスロープにおいては、ピッチ角制御を行うとともに、降下する速度を一定とする制御を同時に行う。

この着地時の降下率及びフレア区間長を、横・方向制御の際と同様に、下向きの突風が作用した場合について評価した。突風についてはその大きさと作用タイミングが重要である。すなわち、制御系により突風か

ら回復して着地可能かどうかという点に着目して、作用する高度を変えて評価を行った。大きさ 5.0 m の突風が下向きに 1 秒間が高度 2.0 m 及び 1.0 m で作用したとしてシミュレーションを行った結果のうち、降下率の履歴を図11^{⑦, ⑧}に示す。

外乱がない場合の降下率 0.1 m/s の高度を着地高度として、外乱が作用した時はその着地高度に接地した時点での降下率を評価した。高度 2m で外乱が作用した場合には、接地までに降下率を回復できているが、高度 1.0 m で作用した場合には、回復できずに 0.7 m/s 程度になることが確認できた。

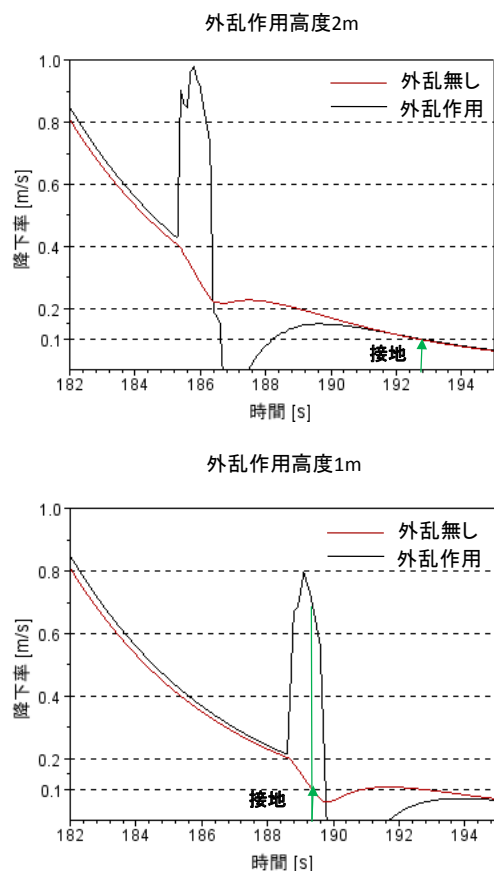


図11 突風に対する降下率評価シミュレーション

5.2.3 リアルタイムシステム同定技術

システム同定については様々な手法が提案されてきているものの、同定したい対象、ノイズ、加振条件に大きく依存する。かつ、当初の目的である飛行しながらダイナミクスを同定する場合には、それに適した工夫が必要である。ここでは、オオワシ 2 号機に適用するための課題を克服するとともに、飛行検証するために、実際に飛行可能なラジコン飛行機を対象としてシ

ミュレーションによる評価を行った。このラジコン飛行機のCADモデルを作成し、幾何学形状より空力微係数を推算し、この推算値よりオリジナル伝達関数を求め、この伝達関数を逐次最小二乗法によるシステム同定により推定可能となるセンサノイズ、加振条件を明らかにした結果を報告する。



図 12 検証用模型飛行機

表 7 模型飛行機の物理特性

機体重量[kg]	1.90
翼面積[m ²]	0.364
慣性能率[kgm ²]	0.132
全長[m]	1.173
モータ出力[W]	400
翼面荷重[kg/m ²]	5.21

使用するラジコン模型飛行機を図 12 に、かつ、その寸法、重量等の諸元を表 7 に示す。

本模型飛行機の縦系ダイナミクスとしてエレベータ角 δ_e に対するピッチ角 θ の伝達関数を求めることとして、下記の条件にてシミュレーションを行った。

- ・ピッチ角 θ の観測ノイズ分散値 $0.001^\circ \sim 1.0^\circ$
- ・計測時間 10 秒～50 秒
- ・エレベータ角加振入力 M 系列入力 ($-1^\circ \sim 1^\circ$)
- ・動作周期: 10 ms

図 13 に示すように、計測時間 20 秒、ノイズ分散値が 0.01° のときオリジナルのゲイン曲線と最もよく一致し、また、計測時間を増加させても推定精度は、ほとんど変化がなかった⁹⁾。

今後は飛行制御中という閉ループ状態にて、かつ、加振源をエレベータ舵角でなく、ピッチ角コマンドとし、M 系列以外の広帯域でスペクトル密度が大きい加振による同定手法を検討していく¹⁰⁾。

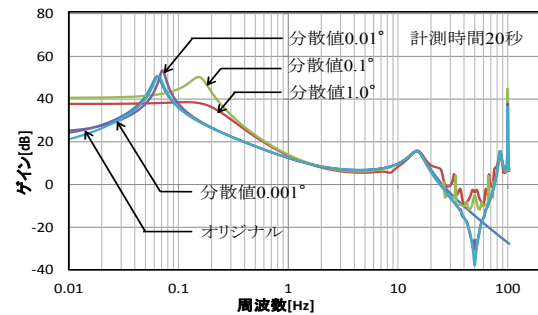


図 13 推定ゲイン曲線

6. ラジコン機を用いた飛行実験

これまで構築した誘導制御・遠隔監視制御回路、選択した無線通信モジュール、設計制御則が正常に動作することをラジコン機に誘導制御システムを構築し、飛行により正常に動作することを確認した。

使用した模型飛行機は前述のシステム同定で対象としたラジコン機であり、これに図 14 に示すハードウェアを組み込み、誘導制御システムを構築した。

実証する飛行モードとしては、初めての自律飛行であるため最も簡単な水平定常飛行として、このために必要な最低限の制御則として、方位角を除くピッチ角制御則、ロール角制御則¹¹⁾を実装した。

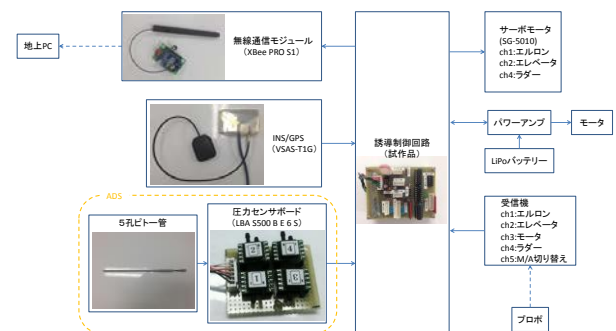


図 14 ラジコン機への実装の誘導制御系

上記準備ののち、白老滑空場にておこなった飛行実験の飛行軌跡を図 15 に示す。図の軌跡において、白線は手動操縦による、赤が自動制御による飛行を示す。離陸から着陸までの中で、3 回の自動飛行を実施した。

軌跡中赤矢印で示した自動飛行におけるピッチ角、ロール角のプロファイルを図 16 に示す。ピッチ角、ロール角としては、概ね $\pm 2 \sim 4^\circ$ 以内に制御されており、約 400 m の水平定常飛行が達成された。



図 15 水平定常飛行実験軌跡

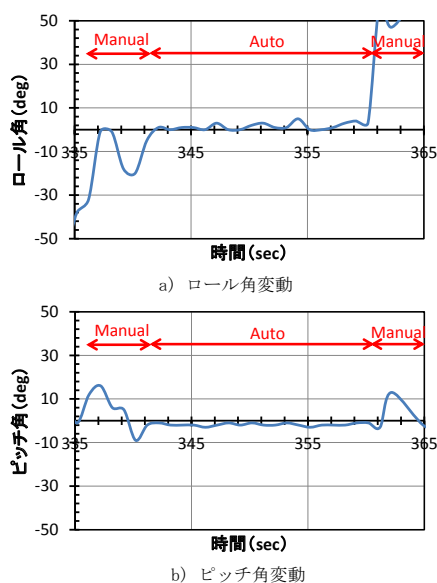


図 16 飛行実験における姿勢角プロフィール

しかしながら、軌跡からは、右にカーブしていることがわかる。本カーブはその後の各種確認試験において、慣性航法装置の座標軸、機体座標系、ラジコン機のトリムの3つのアライメントのずれにより発生していることが明らかとなった。そのため、今後そのずれを補正して水平直線飛行させるために方位角制御を実装するとともに、速度及び高度制御を組み込み、完全な水平定常飛行の実現を目指す。また、今回の実験での誘導制御回路の計算量を確認し、今後の各種計算量の増加に対応するための基礎データとする。

7. まとめ

オオワシ2号機の飛行実証への使用のための汎用技術である無人航空機自律飛行のための誘導制御システム技術について、誘導制御システム構築に必要なハードウェア及びソフトウェア、それらの性能向上による

交換を念頭に同時並行で実装し、段階的に飛行実証を行いながら、開発を進めている現状をまとめた。今後は、オオワシ2号機飛行における特有の課題を解決しつつ、必要なハードウェア、ソフトウェアの構築・検証の完了を進め、小型無人超音速実験機の完全自律飛行を目指す。

参考文献

- 〈1〉 上羽, “小型無人超音速機向け誘導制御システムの研究開発-概要-,” 年次報告書 2012 航空宇宙機システム研究センター 室蘭工業大学, 2013 年 7 月, pp. 66-68
- 〈2〉 上羽, “誘導制御及び遠隔監視制御回路の開発,” 年次報告書 2012 航空宇宙機システム研究センター 室蘭工業大学, 2013 年 7 月, pp. 84-87
- 〈3〉 上羽, 野口, 竹内, “小型無人航空機向け遠隔監視制御系用無線通信装置の構築,” 年次報告書 2013 航空宇宙機システム研究センター 室蘭工業大学, 2014 年 8 月, pp. 78-80
- 〈4〉 塚本, 矢内原, 水藤, “スプリットエレポンを用いた有翼宇宙往還機の横/方向制御の検討,” 第 41 回宇宙科学技術連合講演会, pp. 1225-1226, 1997
- 〈5〉 上羽, 溝端, “小型超音速実験機の着陸時横・方向制御系の検討,” 年次報告書 2012 航空宇宙機システム研究センター 室蘭工業大学, 2013 年 7 月, pp. 77-80
- 〈6〉 上羽, 溝端, “小型無人超音速実験機の着陸制御の一検討,” 第 51 回飛行機シンポジウム, 香川県, 2013 年 11 月, 1C10
- 〈7〉 上羽, 横田, “小型無人超音速機の縦系着陸制御系設計と外乱に対する性能評価,” 年次報告書 2013 航空宇宙機システム研究センター 室蘭工業大学, 2014 年 8 月, pp. 85-89
- 〈8〉 横田, 上羽, “小型無人超音速実験機の縦系着陸制御設計と外乱に対する性能評価,” 第 52 回飛行機シンポジウム, 長崎県, 2014 年 10 月, 2G09
- 〈9〉 山下, 上羽, “小型無人超音速実験機のリアルタイムダイナミクス同定法,” 第 51 回飛行機シンポジウム, 香川県, 2013 年 11 月, 1C12
- 〈10〉 山下, 上羽, “小型無人超音速実験機の飛行時リアルタイムダイナミクス同定法の検討,” 第 52 回飛行機シンポジウム, 長崎県, 2014 年 10 月, 2G08
- 〈11〉 上羽, 竹内, 山下, “小型無人超音速機向け誘導制御システムの構築とラジコン機による飛行検証,” 年次報告書 2013 航空宇宙機システム研究センター 室蘭工業大学, 2014 年 8 月, pp. 81-84

オオワシⅡ構造系開発

樋口 健^{*1*2}, 勝又暢久^{*1*2}

Structure Development of Oowashi No.2

Ken HIGUCHI^{*1*2} and Nobuhisa KATSUMATA^{*1*2}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

Technological research and development on the structure system of the supersonic aircraft are required to construct the supersonic flying test bed (FTB). Lightweight and high performance composite materials will be used where possible portions of the structures. The structure must be designed considering various interfaces, such as aerodynamic performance for take-off/landing and supersonic flight, guidance and control for autonomous flight, wireless communications for flight information, propulsion system components, thermal protection for onboard equipment over a broad range of temperatures from cryogenic to very high temperature, impact loading due to landing shock, and flight maneuverability, along with recovery/reusability. The circumstances, the present state of the structure design, and the required developmental research are summarized here, and the remaining problems for the design of flight model of Oowashi No.2 are presented.

Keywords : Supersonic flying test bed, Structure development, Composite materials, Aircraft subsystem interfaces

1 はじめに

本学では小型無人超音速実験機の研究・開発を進めており、近い将来に超音速で飛行する実験機を製作する。オオワシ 2 号機の機体形状はオオワシ 1 号機の機体形状を 1.5 倍に相似拡大したものを出発点として考える。しかし、機体構造の強度・剛性の手法が未だ構築がされていないため、機体構造の評価手法を構築する必要がある。構造材料としては複合材を活用することにより軽量化と高性能化を狙うこととなっているが、実機への適用方法や検証方法など解決すべき課題は多い。また、オオワシ 2 号機においては、搭載機器の大きさ、重量、種類、配置が 1 号機とは根本的に変更とな

る。離着陸から超音速までの空力設計との整合性、極低温から超高温までの温度範囲を持つ推進系との整合性、自律飛行における誘導制御および通信系との整合性、誘導航法系との離着陸条件の整合性、繰り返し使用可能性、など、構造設計には留意すべきインターフェースが極めて多い。構造系サブシステムは他サブシステムとのインターフェースが重要となる。本稿では、構造系の研究開発の経緯と現状をまとめる。

2 構造系開発の概要

2.1 オオワシⅡにおける構造様式と構造概念

2.1.1 機体構造の概要

胴体構造は、ストリンガー（縦通材）とリングフレーム（円框）及び周囲をスキン（外板）で構成される。図 1, 2 に機体構造外観を示す。図 3 に、機体構造構成部材を示す。胴体構造は、リン

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

グフレームの周囲に 90 度おきに機体前部から後部まで 4 本のストリンガーを配置する。リングフレームはアルミ合金製の切削加工製または板金製である。ストリンガーはアルミ合金製のチャンネル材を使用する。リングフレームとストリンガーで構成される構造内部には、機体前部より高压ガス源 (GN2) タンク、燃料としてのバイオエタノール (BE) タンク、酸化剤としての液体酸素 (LOX) タンクなど、推進剤系のタンクを搭載し、後部はエンジンを搭載する。胴体外部のスキンは、機体内部の艀装を行った後に取付けるが、構造強度及び剛性はリングフレーム、ストリンガー及びスキンを取り付けた状態で成立するため、各スキンの取り付けはリングフレームおよびストリンガーと十分な結合力を果たせるのに必要な本数のボルト固定とする。

主翼桁、主翼リブ、主翼前縁、主翼後縁、機体カバープレート、エアーインテイクカウリングの構造材料は軽量化の観点から主として CFRP スキンのサンドイッチプレート製とし、胴体リングフレームと胴体ストリンガーはコストの観点からアルミ合金製とする。ノーズコーンは空力加熱を考慮して材料を選定する。

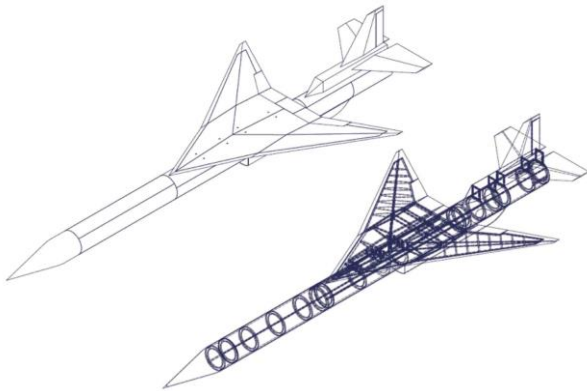


図 1 機体構造と外観

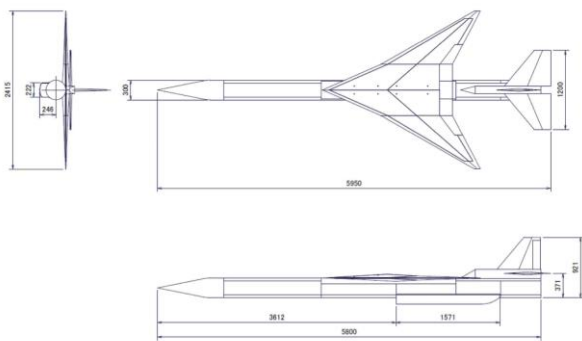


図 2 機体構造外形寸法

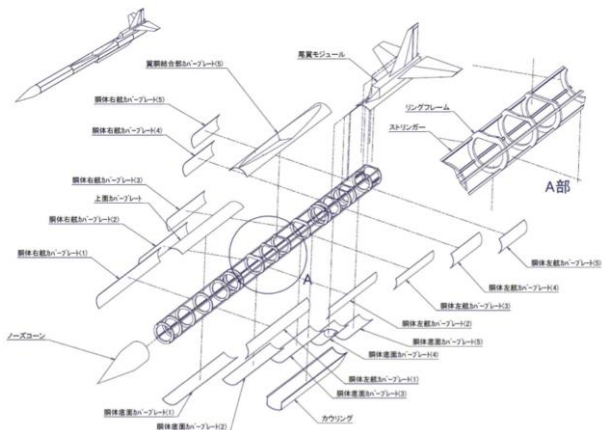


図 3 複合材機体構造構成案

2.1.2 機体強度解析

図 1, 2 に示す機体構成案 (全備重量 350kg と想定) に荷重倍数 6 と安全率 1.5 を作用させた場合の主要構造要素各部の安全余裕を、有限要素法汎用構造解析ソフトウェア (Patran/NASTRAN) で解析した結果を表 1 に示す。

表 1 機体構造主要個所の強度解析

部位	最大応力 (kgf/m ²)	強度 (kgf/m ²)	安全 余裕 (MS)	破壊モード
翼胴結合部 カバープレート	28.47	30.0	0.05	材料破壊
一般部 カバープレート	14.49	30.0	1.07	表面版の 材料破壊
一般部 カバープレート	18.67	25.75	0.6	剪断座屈
ストリンガー	9.57	25.28	1.64	クリップ リング
リングフレーム	0.55	27.42	Large	材料破壊

2.1.2 主翼強度解析

オオワシ 2 号機においては、先ずオオワシ 1 号機の主翼寸法を 1.5 倍に相似拡大した外形とし、(1) 主桁など内部構造をオオワシ 1 号機と同じとした場合、(2) 桁のコア材を CFRP 化した場合、(3) 3 本桁構造とした場合、についてそれぞれモデル化し、有限要素法汎用構造解析ソフトウェア (Patran/NASTRAN) で構造解析を行った。超音速飛行時に、自重に荷重倍数 6 と安全率 1.5 を掛けた揚力が発生している場合の解析結果を図 4 に示す。オオワシ 1 号機の主翼構造 (PM 品) 試験で負荷された主翼付根での曲げモーメント約 12kgfm に対し、

オオワシ 2 号機の主翼では、設計上の曲げモーメントは約 710kgfm (60 倍)である。(1)の主桁など内部構造をオオワシ 1 号機と同じとした場合には限界ひずみを大きく上回っている部位が多いが、(2)のように桁のコア材を CFRP 化すると限界ひずみを大きく上回っている部位は減り、(3)のように 3 本桁構造とした場合には限界ひずみを大きく上回る部位は局所的に限定されることがわかる。

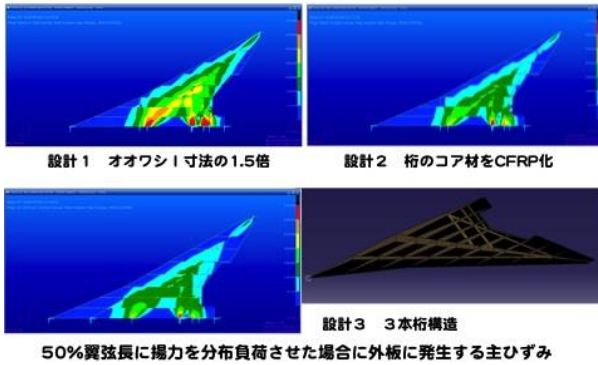


図 4 超音速飛行負荷時の発生ひずみ

次に、主翼を 3 分割で製造する案を検討した。主翼を 3 分割することにはいくつかの利点がある。(1)飛行試験で翼端を損傷することは多い。翼端を損傷しても左右同形の片翼だけを取り替え可能とできる。(2)曲げ荷重が最も大きくかかる翼胴結合部の強度設計が非常に重要であると考えており、中央翼と胴体をできるだけ一体化して強度検討することができる。曲げ荷重最大の場所で分割しなくて済む。(3)左翼および右翼をリブなしのダイヤモンド断面ハニカムサンドイッチパネルとして一体化できるとすると、部品点数が大幅に減り、軽量化と低コスト化が図れる可能性がある。(4)強度剛性試験の荷重荷装置と試験場所を作り易い。(5)組み立て時にハンドリングし易い。(6)飛行試験場所が大学から離れていることを想定すると、分解して運搬し易い大きさであることが必要となる。

そこで、ここでは、オオワシ 1 号機の主翼寸法を 1.5 倍に相似拡大した外形とし、構成は、CFRP 製で成型した主翼桁構造組立（主桁、前桁としての前縁部材、後桁としての後縁部材）と表面版を CFRP 製とするサンドイッチパネル製の主翼面パネル構成とする。主翼桁構造と翼外面パネルは接着部分とアクセスのためのファスニング部分とを作る。主翼と胴体との結合は M8 ボルト 8 箇所て固定する。主翼構造案を図 5 に示す。

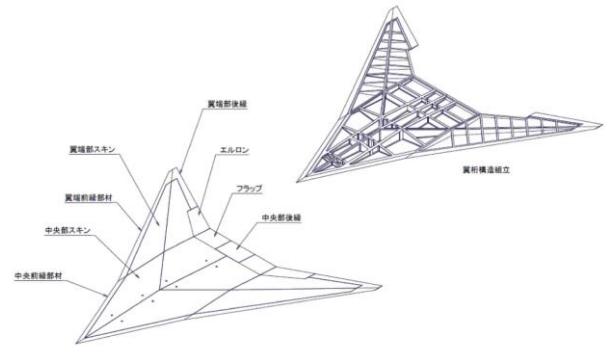


図 5 複合材主翼構造案

2.1.4 固有振動数解析

飛行制御系と干渉しない機体固有振動数が要求される。全機系の固有振動数解析ではそれぞれのその検討で開発した NASTRAN 数学モデルを用い、主翼と胴体の結合部 8 点を結合して全機系モデルとした。固有値解析の数学モデル上の質量配分と設計質量配分を表 2 に示す。固有振動解析結果を表 3 に示す。低次 6 次までは剛体モードであるので 7 次以降の固有振動数とモードを示した。

表 2 数学モデル上の質量配分と設計質量配分

部位	NASTRAN モデル 質量配分 [kg]	設計 質量配分 [kg]
胴体リング	8.46	8.46
ストリンガー	6.78	6.78
カバー	17.06	12.2
主翼	46.33	46.33
GN2 タンク	1	1
Thhanol タンク	65	65
LOX タンク	28.5	28.5
エンジン	50	50
電気計装（機首）	10	10
電気計装(テイル)	10	10
尾翼	20	20
主脚	30	30
前脚	10	10
インテーク	5	5
ファスナー	2	2
アクチュエータ	5	5
配管	20	20
マージン	13.55	18
合計	350.0	348.27

表 3 固有振動解析結果

モード 番号	固有振動 数 [Hz]	振動モード
7	6.5	水平尾翼ローカル
8	6.6	水平尾翼ローカル
9	7.6	水平尾翼ローカル
10	7.6	水平尾翼ローカル
11	11.9	垂直尾翼ローカル
12	17.1	垂直尾翼ローカル
13	18.5	機体ヨー軸曲げ
14	19.6	機体ピッチ軸曲げ
15	28.8	機体ロール軸ねじれ
16	31.7	主翼曲げ

全機構造固有値解析結果を見ると、水平尾翼(昇降舵)や方向舵が振動するモードが低次の固有値として得られるので、数学モデルに実際に合う適切なヒンジ剛性を与えないと意味のある固有値が得られないことがわかる。換言すると、補助翼、フラップ、水平尾翼(昇降舵)、方向舵など可動翼のヒンジ軸まわりの剛性の設定が、機体の安定飛行に重要であることがわかる。特に、遷音速飛行に際しては空力的にもヒンジ軸まわりの剛性は重要である。実際にはオオワシ2号機はフライバイワイヤ方式となるであろうから、可動翼駆動機器の保持剛性を十分大きくしないと制御しきれないことがわかる。

2.2 オオワシ2号機の実機大モックアップ

2.2.1 実機大モックアップ製作の必要性

オオワシ2号機の機体形状は、オオワシ1号機の空力設計を生かすために相似拡大の形状としているが、オオワシ1号機に比べ大幅な高速化と大型化にともなう飛行荷重の増大と固有振動数低下に対処するため、機体構造設計は強度・剛性の大幅な向上が必要である。要求される飛行性能を満たすためには併せて軽量化も必要であるため、複合材を用いた軽量・高強度・高剛性の機体構造を予定している。しかし、複合材構造は製造後のインターフェース調整や設計変更が容易でないため、概念設計の段階で実機大モックアップを製作して、実機詳細設計の検討、実機試験方法の検討、搭載機器インターフェースの確認、機体インテグレーション手順および組立治具の検討、実機製作コスト低減方法の検討等に供することとした。

2.2.2 実機大モックアップの設計と製作

モックアップの設計製作方針は、コストダウンを優先させるために使用材料は実機とは異なるが、構造様式や寸法は想定される実機と同じとし、各種インターフェース確認ができるものとした。

現在の主翼設計では、主翼構造は中央翼と左右翼の3分割組立方式とし、スパー(桁)とリブ(小骨)材質はABS樹脂切削・接着構造としている。エルロン、フラップ等の舵面は形状のみ模擬し、主翼内の舵面アクチュエータ搭載部は内部アクセス検討用に外板を着脱可能とした。翼構造の一部に、外板/リブ一体化サンドイッチ成形翼型を適用したものを試作した。また、一部に実機で想定されるロハセルコア/CFRPスキンのサンドイッチパネルを試作し適用した。

胴体モックアップには、主翼取付けインターフェース構造、垂直尾翼・水平尾翼インターフェース構造、エンジン搭載インターフェース構造を含む。脚とエンジンインテークは現在は含まれていないが、将来取付けを検討できるようにした。ストリンガー(縦通材)は機軸方向に3分割してアルミ角パイプ製とした。リングフレーム(円筐)はABS樹脂の切削とした。胴体外板は内部アクセス検討用に透明樹脂の曲面板とし着脱可能とした。主たる材料は、アルミニウム合金、バルサ、航空ベニヤ、ケミカルウッド、ABS樹脂、ポリカーボネイトである。

実機ではCFRPを主体とした複合材構造にする計画であるが、今後想定される設計変更の必要性和設計変更の容易さ、搭載機器インターフェース、要求重量・強度・剛性、スケジュール、製造コストなどを勘案して実機に適する材料を選定して行くこととしている。なお、地上温度と高高度大気温度との温度差に起因して発生する、CFRPとアルミ合金等金属との熱応力の問題を回避するためには、同質材料で製造する必要がある、CFRPを主体とした複合材構造にするには、製造コストとの兼ね合いが解決すべき大きな現実的問題である。

エンジン搭載部では、CFRP、アルミ合金等の材料が耐熱性の観点から使えないと考えられるため、エンジン周囲の空気式強制を行った上で、ステンレス鋼またはチタン合金を用いる必要がある。これは重量増加要因となる。これらのインテグレーション検討のためにも、実機大モックアップを用いて検討できるようになった(図6、7)。



図6 モックアップ（全景）

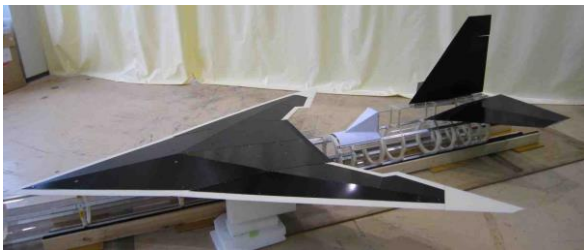


図7 モックアップ（主翼および胴体後部）

2.3 翼胴一体型構造

2.3.1 機器搭載性向上対策

実機大モックアップは図8に示すベースライン形状にしたがって製作された。オオワシ2号機の機体構造も、このベースライン形状にしたがって設計されることとなっているが、主翼直下が胴体内径に円筒が収められない領域ができる。今後の設計変更や搭載機器の配置調整には大きな制約となるため、胴体の前から後ろまで同一内径の空間を確保できるように考慮する必要がある。また、主翼と胴体の結合部には鋭角に凹んだ流路が機体の左右にできるため、高速飛行時に空力抵抗が大きくなる要因となる懸念がある。これらを改善するために設計変更を行った。

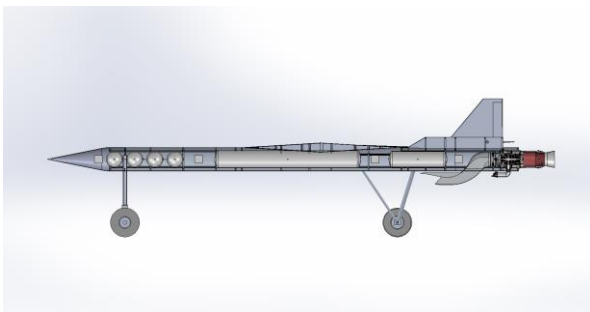


図8 機体形状のベースライン

今後の設計進捗に伴い、搭載機器配置検討の自由度を確保するために、主翼直下の胴体内径が小さくなっている構造を見直し、同一直径の搭載空間を作ることとした。胴体の上に主翼全体を載せる構造様式ではなく、主翼中央部と胴体中央部を一体型とし、その両端に左右主翼端をつなげる構造様式とした。併せて、主翼と胴体の結合部で鋭角になっている空間にフィレットを施すことにより空力的な損失を減じるとともに、同一直径の搭載空間を作るための強度上の困難をフィレット部分で克服する考え方を採ることとした。このモックアップを実スケールで製作することは費用の問題があったので、樹脂3Dプリンティングによる1/2スケールモデルを製作した。

2.3.2 翼胴一体型構想

翼胴結合部にフィレットを施し、併せて胴体内搭載容積を拡大する改修を検討した。フィレットを付けることにより、主翼と胴体の結合部の鋭角に凹んだ流路を廃することができるだけでなく、主翼直下の胴体内部に円筒タンクを積めるように改修する際の主翼桁高さを減ずることによる主翼曲げ強度不足を補い、リングフレーム内径の凹部をなくする形状を検討した。フィレット形状は、できるだけ単純化するために図9に示すように曲面の曲率を1方向とする形状案とした。なお、ストリンガー（縦通材）を胴体前部から胴体後部まで直線では通せなくなるため、ストリンガーの形状とストリンガー同士のつなぎ方には工夫を要する。フィレット内部は、今後の艤装設計により、配管・配線経路として利用したり、電池を分散して配置するための空間として、あるいは舵面駆動のために空間として利用したりすることが可能となる。

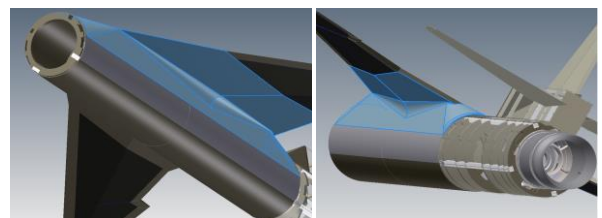


図9 フィレット付加と翼胴一体型構造

翼胴結合部構造を他サブシステムから見てインターフェースが理解しやすい縮小三次元模型には、いわゆる樹脂製3Dプリンタによる造形方法を利用した。図10(c)に示すように、胴体中央部を貫通するように円筒タンク搭載部が確保でき、機器

配置の自由度が大幅に向上した。これにより、フィレットにより高速飛行時の空力抵抗を減らす工夫も考慮されるとともに、図8の機器配置例に示すように、今後の搭載機器配置を見直す際の大きな制約が取り除かれた。



(a) 上面 (b) 下面 (c) 中央胴体内部
図10 翼胴一体型構造部の1/2スケールモックアップ（樹脂3Dプリンタ製）

2.3 オオワシ2号機の基本構造計画

以上の観点から検討したオオワシ2号機の基本構造を図11に示す。

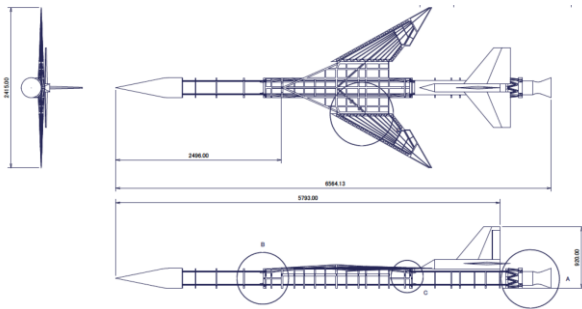


図11 オオワシ2号機の基本構造計画

3 構造系のまとめと今後の詳細設計・製造

オオワシ2号機の構造系サブシステムの設計のまとめと現状は図11に示されている。

今後の実機の製造においては、コストダウンと各種インターフェース調整という現実的問題が極めて重要となるため、これからの詳細設計においては、研究開発とともに、他サブシステムとの調整に手間ひまを要するものと考えている。構造系自身の開発要素のみならず、低速から超音速まで高性能を発揮する空力設計、極低温推進剤／超高温エンジン、空力加熱、誘導制御、通信、電源系、超高速飛行に対する空力弾性問題、搭載機器の寸法／重量／種類／配置の変更、離着陸方式の検討、脚形式と要する強度、などサブシステムとインターフェースするものは多い。

小型超音速飛行実験機（オオワシ）の空力設計、空力評価、および飛行性能予測

溝端 一秀^{*1*2}, 大石 栄^{*3}, 鈴木 祥弘^{*4}, 近藤 賢^{*4}, 渡口 翼^{*4}

Aerodynamic Design, Characterization, and Flight Capability Prediction of the Small-scale Supersonic Flight Experiment Vehicle “Oowashi”

Kazuhide MIZOBATA^{*1*2}, Sakae OISHI^{*3}, Yoshihiro SUZUKI^{*4}, Satoshi KONDOH^{*4} and Tsubasa TOGUCHI^{*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

Innovation in technologies for high-speed atmospheric flights is essential for establishment of both supersonic/hypersonic and reusable space transportations. It is quite effective to verify such technologies through small-scale flight tests in practical high-speed environments, prior to installation to large-scale vehicles. Thus we are developing a small-scale supersonic flight experiment vehicle as a flying test bed. Two generations of aerodynamic configuration with a cranked-arrow main wing are proposed. Their aerodynamics are analyzed intensively through wind tunnel tests and are found to be favorable. On the basis of the aerodynamic characterization and propulsion design analysis, it is predicted that some thrust enhancement and/or drag reduction in the transonic regime are required for realization of supersonic flights up to Mach 2. For this end, aerodynamic configuration modification based on the area rule is being applied.

Prior to the construction of the supersonic vehicles, a full scale prototype vehicle and subscale vehicles are designed and fabricated in order to verify the subsonic flying characteristics through flight tests. Preliminary flight tests of the 1st-generation prototype vehicle are carried out and good flight capability in subsonic regime is demonstrated. In addition, a subscale vehicle is being fabricated in house for cost-effective and repeated preliminary flight tests.

Keywords : Cranked-arrow wing, Supersonic, Flying Test Bed, Flight Test, Jet Propulsion

1 背景および目的

大陸間輸送および地球周回軌道への往還輸送システムを革新する必要性が近年高まってきており、しかも両者を実現するための基盤技術は大気中を高速度で飛行するためのものであり、共通である。

そのような大気中を高速度で飛行するための基盤技術は、飛行試験によって実際の高速飛行環

境においてその機能・性能を実証することが肝要である。そこで、各種基盤技術を実際の高速飛行環境で実証するためのフライングテストベッドとして、マッハ2程度までの速度で飛行できる小型実験機を構築することを目指している。推進器としては、反転軸流ファン式ターボジェットエンジン⁽¹⁾を自主設計しており、これを搭載する双発機体形状（M2006 形状）を第一世代機体のベースラインとしている。

この小型超音速飛行実験機には、自力で滑走・離陸し、上昇・加速・超音速巡航を経て、自力で進入・着陸する性能を付与することが望ましい。従って、超音速飛行性能に重点を置きつつも亜音速飛行性能も欠かすことができない。そこで、超

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域
*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター
*3 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻修了
*4 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻

音速実験機と同一の形状・寸法のプロトタイプ機体を製作し、亜音速飛行試験を実施することによって、亜音速飛行性能を検証している。

さらに、超音速飛行に一層適合したエアターボラムジェット・ガスジェネレーターサイクル (ATR-GG) エンジン⁽²⁾の設計とこれを搭載する第二世代機体の設計を進めている。

本稿では、これらの取り組みのうち空気力学の範疇に属する事項、すなわち機体の空力設計、空力特性評価、およびそれらに基づく飛行性能予測および予備的飛行試験を概観する。第2節では機体の空力形状設計と空力評価について、第3節では飛行性能予測について述べる。第4節では遷音速域における抗力低減の取り組みを、第5節では予備的飛行試験について述べる。第6節はまとめである。

2 機体の空力設計と空力評価

2.1 第一世代実験機の空力形状

反転軸流ファン式ターボジェットエンジンを二基搭載しマッハ2程度の超音速飛行が可能な機体空力形状として図1の M2006 形状が提案された。遷音速・超音速域での造波抗力低減を狙って翼面にはダイヤモンド翼型を採用し、亜音速空力特性を改善するために主翼平面形状をクランクトアローとしている。ロール安定確保のために高翼式とし、上反角 1° を与えている。

この M2006 空力形状について 2006 年度から 2008 年度にかけて JAXA/ISAS 高速気流総合実験設備において低亜音速～超音速 (M0.3～2.0) の範囲で綿密に風洞試験を実施し、揚力・抗力特性、ピッチング静安定と適正重心位置、ヨートリム能力と方向安定、ローリング性能と横安定、等々を評価した。その結果、おおむね良好な空力特性を有することを確認済みである⁽³⁾。

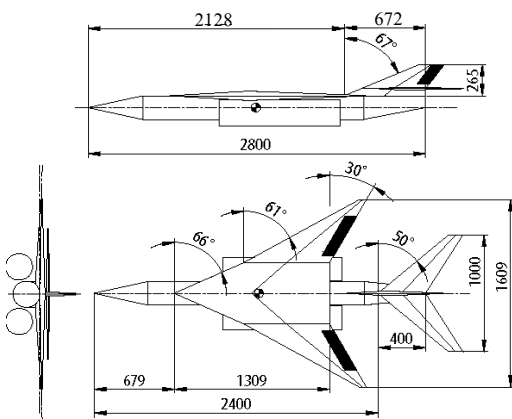


図1. M2006 形状

2.2 プロトタイプ機体の空力形状

風試による空力評価においては、壁の影響、スケール効果、気流の性質、等の誤差要因を免れ得ないため、有翼飛行体の空力特性・飛行性能の最終評価のためには飛行試験が欠かせない。そこで、上述の小型超音速飛行実験機の亜音速飛行特性を飛行試験によって検証するために、亜音速飛行に適合したプロトタイプ機体を設計・製作した。その形状・寸法を図2に示す。形状・寸法は超音速飛行実験機と概ね同等であるが、高迎角時の姿勢安定および制御性を確保するために、尾翼の後退角・アスペクト比を小さくするとともに、水平尾翼を全可動エレボンとし、主翼にはエルロンとフラップを備える。さらに、燃料・前脚 (引き込み脚)・アビオニクス機器の搭載性のために前胴部を延長している。この空力形状を M2006prototype と呼ぶ。

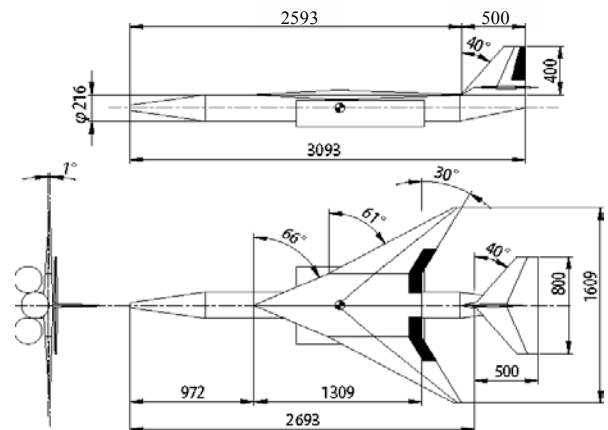


図2. M2006prototype 形状

2.3 第二世代実験機の空力形状と空力評価

ATR-GG エンジン (外径 216mm 程度) を一基搭載して、滑走・離陸、加速・上昇、およびマッハ2程度の超音速飛行までの一連の飛行が可能な機体形状として、図3の M2011 形状を設計している。主翼および尾翼の形状と位置関係は M2006 プロトタイプ機と相似としており、これによって M2006 形状の風試データやプロトタイプ機の飛行試験データを活用することができる。一方、飛行ミッションに応じて推進剤の所要搭載量が増えることを想定して、胴体全長はベースライン形状の 5.8m (推進剤搭載量 80kg、Nose-A) のほかに 6.8m (同 105kg、Nose-B) および 7.8m (同 130kg、Nose-C) の計3通りを想定している。

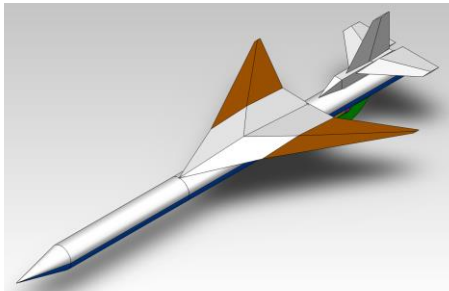
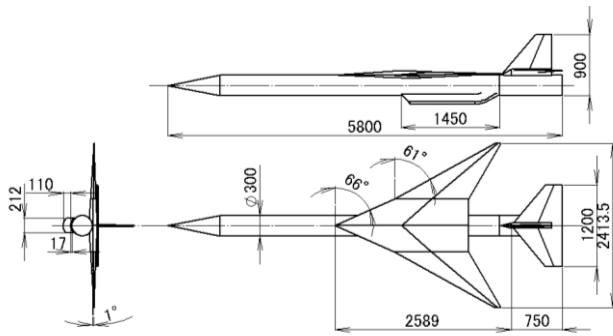
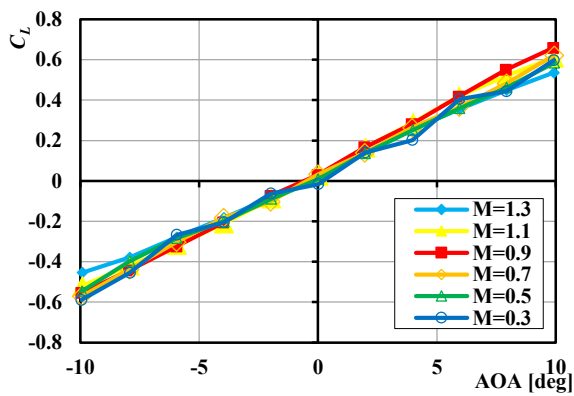
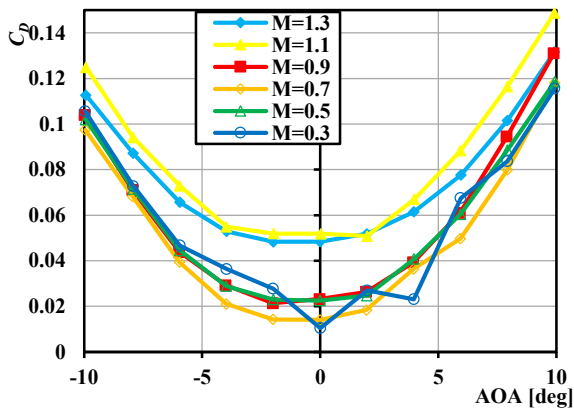


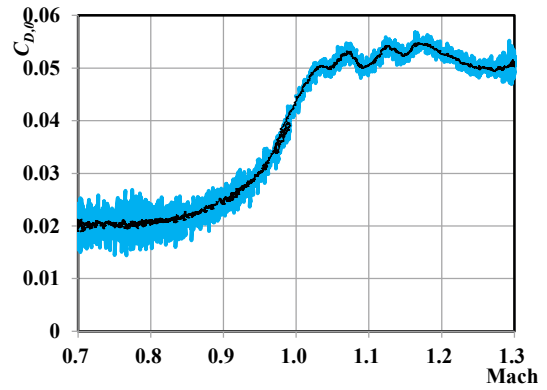
図 3. 第二世代空力形状 M2011



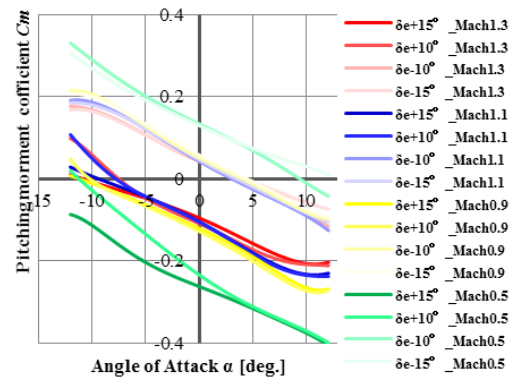
(a) 揚力係数



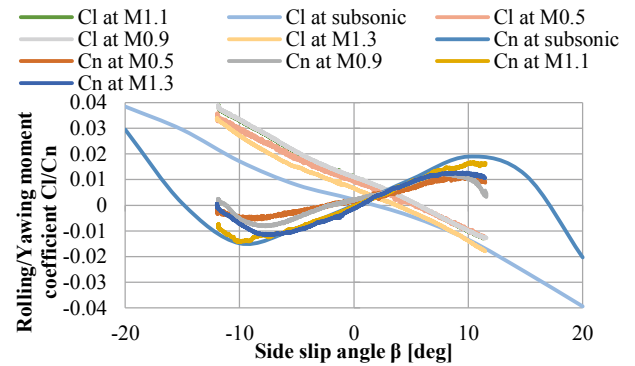
(b) 抗力係数



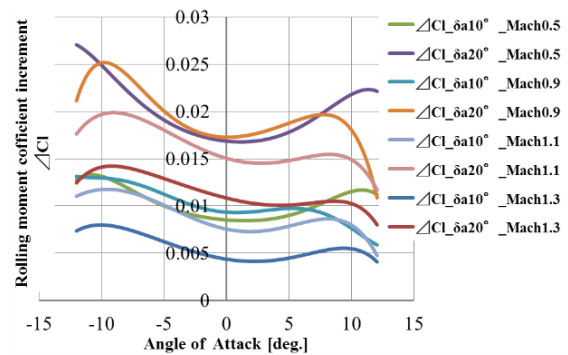
(c) 寄生抗力係数のマッハ数依存性



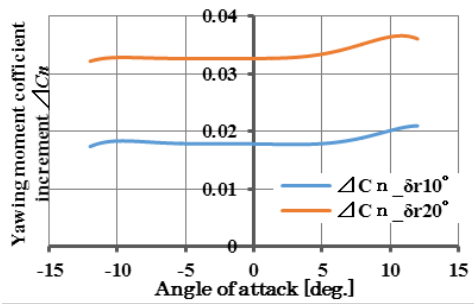
(d) ピッチングモーメント係数



(e) ローリングモーメントおよびヨーイングモーメント係数



(f) エルロン操舵によるローリングモーメント係数の増分



(g) ラダー操舵によるヨーイングモーメント係数
図 4. M2011 形状の縦および横の空力係数（モーメントの回転中心は主翼の空力中心）

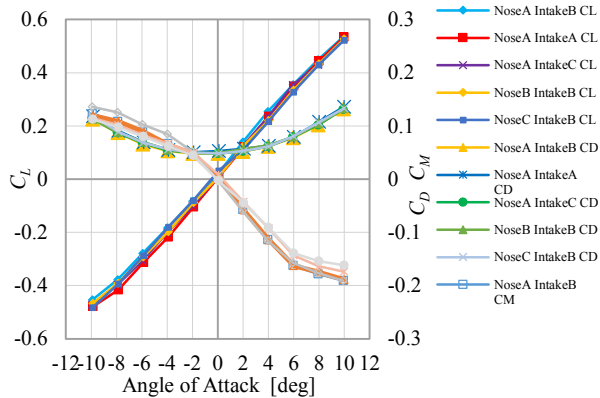


図 5. ノーズ長・インテーク長の異なる 5 通りの M2011 形状の縦の空力係数（マッハ 1.3）

この空力形状 M2011 について、JAXA/ISAS 高速気流総合実験設備において亜音速および遷音速風試（M0.3～1.3）を実施した。縦および横の空力係数を図 4 に示す⁽³⁾⁽⁴⁾。揚力係数については、迎角に対して良好な線形性が示されている。抗力係数については、エンジンを胴体内に収めることによって亜音速寄生抗力 0.02 程度を得ており、また、主翼の高後退角ゆえに遷音速域の抗力発散は極めて穏やかである。ピッチングモーメント係数 C_M については、種々のマッハ数および昇降舵角について迎角 α に対する C_M 曲線が概ね一様に右下がりであることから、ピッチング静安定が良好であると分かる。また遷音速域で昇降舵の効き（ピッチトリム能力）が半減することが示されているが、高動圧の遷音速域で必要な迎角は 1 度程度以下であることから問題ない。横滑りによるローリングモーメント（すなわち上反角効果）およびヨーイングモーメント（すなわち風見安定）についても、横滑り角 β が 10° 以下の範囲で良好な特性が示されている。エルロンそのものの効きについても遷音速域で半減するが、遷音速では強いマニュver を控えるので問題ない。ラダーの効きについて

も良好な特性が示されている。

また、ノーズ長・インテーク長の異なる 5 つの形状について、マッハ 1.3 における縦の空力係数の比較を図 5 に示す。揚力係数および抗力係数は、ノーズ長・インテーク長によってほとんど変化しない。ピッチングモーメントについては、ノーズ長が長くなる（ノーズ B, C）とピッチング静安定性（ $\alpha \sim C_M$ 曲線の負の傾き）が少し減じるが、問題ない程度である。

さらに、エンジンインテーク（空気取り入れ口）や角台（尾翼操舵系を収納するための垂直尾翼根の部位）の搭載、およびエンジン作動状態によるインテーク内の空気流量の変化によって全機抗力がどのように変わるかを亜音速・遷音速・超音速風試によって評価している⁽⁵⁾。

機体全体のロール操縦性能については、エルロンそのものの効きだけでなく、上反角効果、アドバースヨー効果、および風見安定が絡み合っ、高迎角条件でエルロンの効きが劣化したり逆効きとなる横制御発散（Lateral Control Departure）が生ずる可能性がある。その可能性を判定するための指標として、エルロン操舵のみによってロール制御する場合の aileron alone departure parameter (AADP)：

$$AADP = C_{n,\beta} - \frac{C_{n,\delta_a}}{C_{l,\delta_a}} C_{l,\beta} \quad (1)$$

およびラダー操舵を同時に用いる場合の lateral control departure parameter (LCDP)：

$$LCDP = C_{n,\beta} - \frac{C_{n,\delta_a} + k C_{n,\delta_r}}{C_{l,\delta_a} + k C_{l,\delta_r}} C_{l,\beta} \quad (2)$$

がある。ここで $k = \delta_r / \delta_a$ はラダー舵角とエルロン舵角の比であり、ラダーゲインと呼ばれる。AADP および LCDP がゼロになるとエルロン操舵によっては全くロール制御できなくなり、負になるとエルロン操舵とは逆の方向に機体がロールすることになる。M2006prototype 形状と M2011 Nose-C 形状について、風試データから推算された AADP および LCDP を図 6 に示す。M2006prototype 形状ではエルロンのみの操舵によって正のロール制御が可能な迎角範囲は $-13 \sim 19^\circ$ と見積もられるが、これに比して M2011 Nose-C 形状では、機首が長くなることによる風見安定の劣化によって、当該迎角範囲が $-9 \sim 12^\circ$ に狭まるものと予想される。離着陸時には 12° 以上の迎角は容易に発生することが別途の離着陸性能解析から分かっており、

AADP・LCDP 正の迎角範囲を拡大することが望まれる。そこでラゲイン 1.0 でラダー操舵を併用する場合の LCDP は図 6 の赤線の通りと推算され、迎角 17°程度まで正のロール制御性が得られるものと期待される。

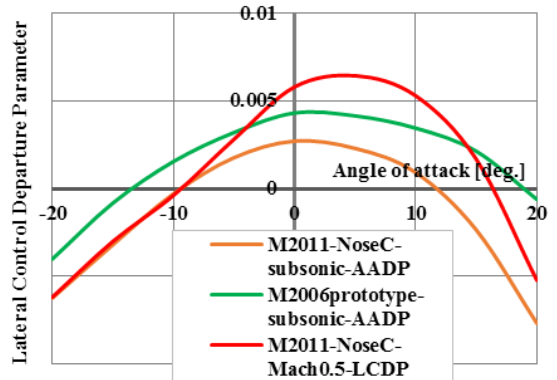


図 6. M2006prototype 形状と M2011 Nose-C 形状について、風試データから推算された AADP および LCDP

3 飛行性能予測

3.1 推力余裕

エンジンの設計解析から得られる推力マップと風試で得られた空力係数データを用いて、推力余裕（推力から寄生抗力を差し引いた値）のマップを描くと図 7 のとおりとなる。ここではエンジン回転数として定格の 5%増しを仮定している。マッハ 1.0～1.5 の遷音速域において高度 11km 辺りに推力余裕の尾根が見られ、この尾根を通して超音速域まで加速することが効果的である。

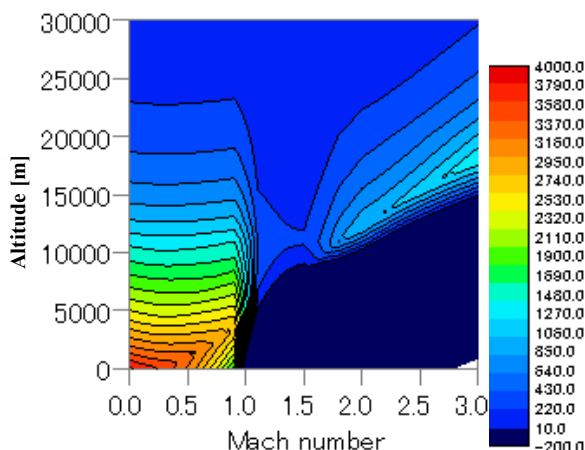
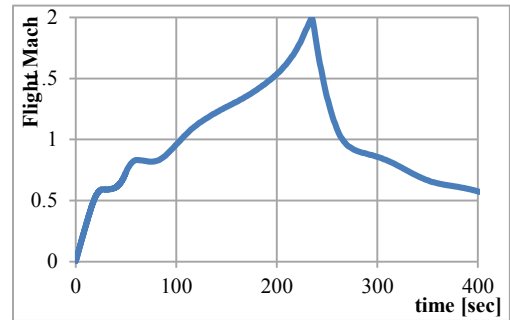


図 7. 第二世代機体の推力余裕マップ
(エンジン回転数 105%)

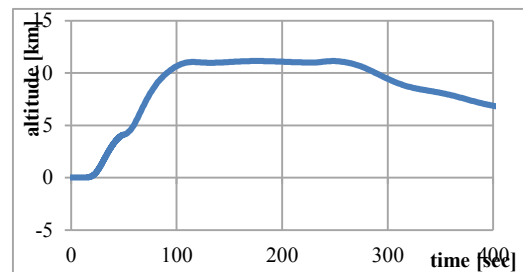
3.2 三自由度飛行解析

空力データ、機体構造設計から見積もられる機体質量データ、およびエンジン設計解析による推

力・比推力マップを用いて、3 自由度飛行経路解析を実施した。エンジン回転数を定格の 5%増しにするとともに、燃料搭載量を 130kg (Nose-C、機体全長 7.8m に対応) とした場合の解を図 8 に示す。飛行マッハ数 2.0 に到達した瞬間に燃料が燃え尽きる解となっている。



(a) 飛行マッハ数の履歴



(b) 飛行高度の履歴

図 8. 飛行経路解析の解の例
(エンジン回転数 105%、燃料搭載量 130kg)

3.3 6 自由度飛行解析

風試に基づく空力モーメントの評価、および構造設計・艤装計画に基づく重心および慣性モーメントの推算が進んできたことから、これらの結果に基づく 6 自由度飛行解析を進めている⁽⁶⁾。重心の並進運動と同時に姿勢変化運動を解くことができるため、姿勢変化・姿勢安定を含めた実際の飛行性能を評価できると期待される。解析ツールとして MATLAB/Simulink を、外界表示として FlightGear を用いており、図 9 のようなマンマシン・インターフェースを用いることができる。飛行性能予測のほかの用途として、地上パイロットの無線操縦の訓練に活用できる。さらに、自律飛行のための誘導・制御システムの機能検証にも有用と考えられる。この 6 自由度飛行解析による飛行経路解の例を図 10 に示す。大樹町滑走路から離陸し、遷音速周回飛行をした後、滑走路まで帰還できることが示されている。

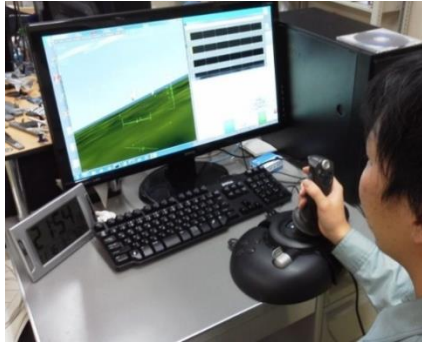
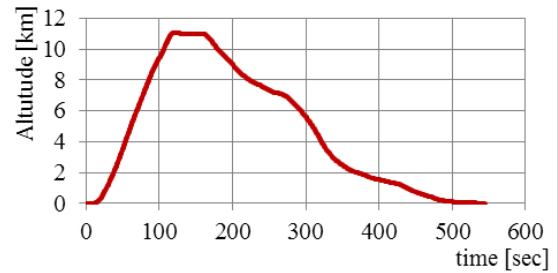


図 9． 6 自由度飛行解析のマンマシン・インターフェース



(d) 飛行高度の履歴

図 10． 6 自由度飛行解析による解の例

4 エリアルールに基づく抗力低減の試み

この第二世代実験機について、図 7 の推力余裕マップから、マッハ 1.1～1.5 の遷音速域において推力余裕が小さく加速性能が十分でないことが判る。そこで遷音速域における抗力低減が望まれ、これを実現するには、いわゆる「エリアルール（面積法則）」の適用が有用である。これは、非粘性超音速流における細長物体理論から導かれた法則であり、機軸方向の機体断面積分布を図 11 のような滑らかな Sears-Haack 形状⁽⁷⁾に近づけることによって造波抗力を低減できるとするものである。断面積分布の定義方法として、機軸上の点から発するマッハコーンで機体を切断したときの、下流側の切断円錐の側面積を用いる方法、底面積を用いる方法、上流側の切断円錐について同様に扱う方法、等、いくつかのバリエーションが提案されている⁽⁸⁾。ここでは、下流側の切断円錐の底面積を用いる方法を採用する。

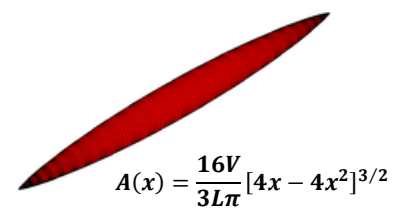
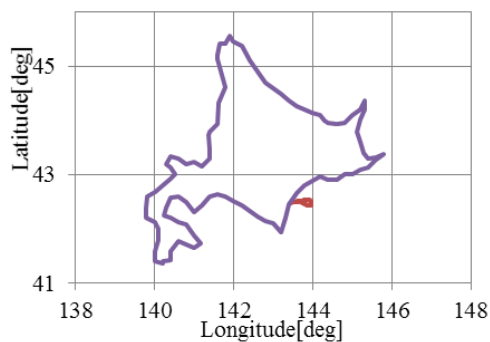


図 11． Sears-Haack 形状⁽⁷⁾

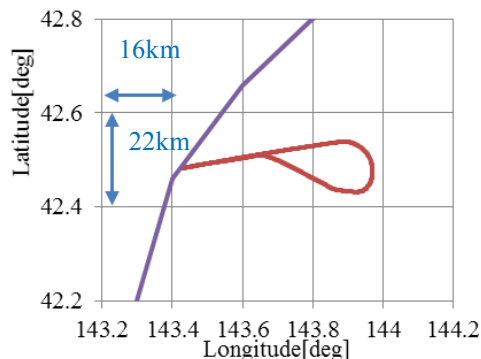
この方法を用いて、第二世代実験機の M2011 Nose-C 形状について、マッハ 1.1 における断面積分布を調べた結果を図 12 に示す。赤線で示された Sears-Haack 形状に比べて、機首、主翼、および尾翼の断面積が大きく、さらに主翼と尾翼の間に大きなくびれが生じている。

そこで、この断面積分布を極力 Sears-Haack 形状に近づけるべく、以下の形状修正を加える。

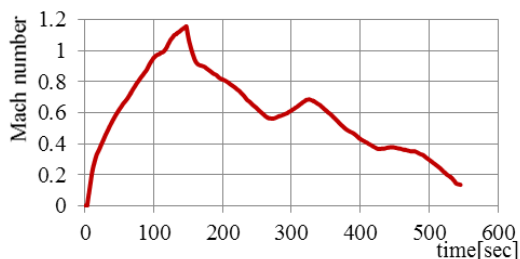
- 1) 機首の形状を整える。
- 2) 主翼・尾翼を前方に移す。その際、空力特性の



(a) 飛行軌跡



(b) 飛行軌跡の拡大図



(c) 飛行マッハ数の履歴

大幅な変化を避けるために、主翼・尾翼の形状および距離は変えない。

- 3) 主翼・尾翼の間にバルジ (bulge: 出っ張り) を設ける。バルジは主脚格納庫として利用可能。
- 4) 主翼の翼根下面と胴体の間にフィレット (fillet) を設ける。これはエアリアルールに基づく修正ではなく、翼胴接合のための構造設計の観点、およびコーナー流れを整えて翼胴干渉抗力を低減する観点から設けるものである。

なお、エアリアルール適用の際、主翼と重なる胴体部分をくびれさせることが最も有効と考えられるが、これは同時に胴体構造および機装を圧迫することとなり、機体システム設計の上で損失も大きい。そこでここでは胴体を太らせる方向の形状修正を採用している。これらの修正をすべて適用することによって図 1 3 の形状を、また部分的に適用することによって図 1 4 の形状を得る。

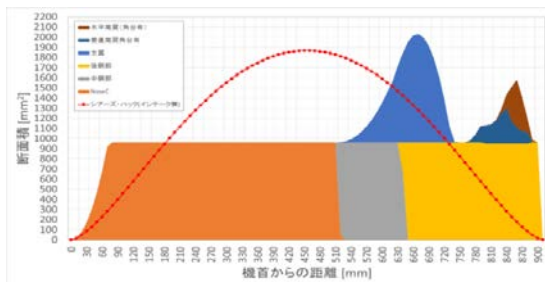
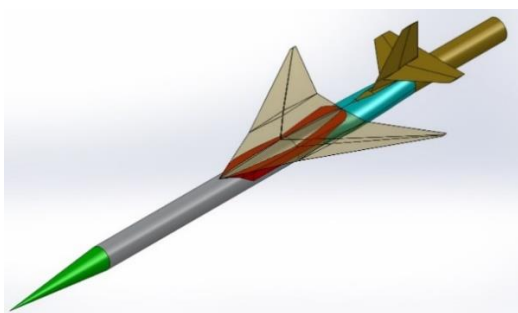
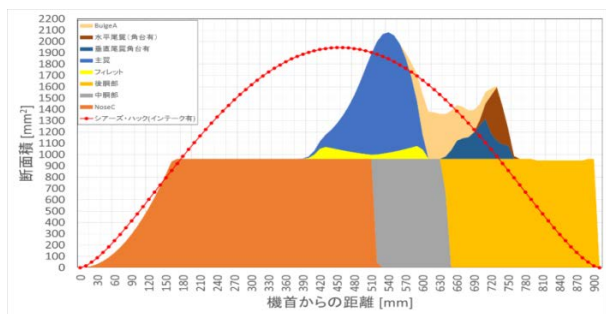


図 1 2. M2011Nose-C 形状のマッハ 1.1 における断面積分布

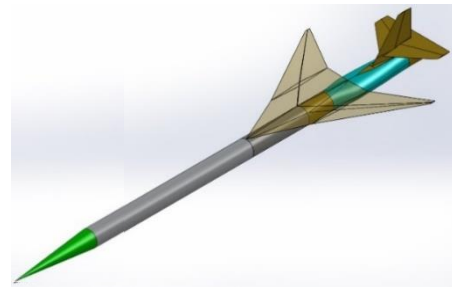


(a) 機体形状

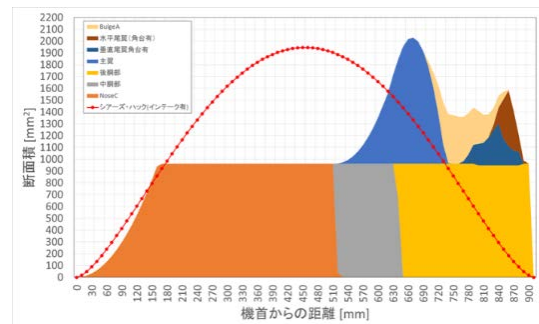


(b) マッハ 1.1 における断面積分布

図 1 3. エアリアルールを最大限適用した形状



(a) 機体形状



(b) マッハ 1.1 における断面積分布

図 1 4. エアリアルールを部分的に適用した形状

エアリアルールに基づく修正を部分的に適用した図 1 4 の形状について、遷音速風試および造波抗力解析を実施した。その結果を図 1 5 に示す。遷音速域 (M1.1~1.3) において抗力が 5~20% 低減できている。また、造波抗力解析の結果は、風試結果と良好な一致を示している。

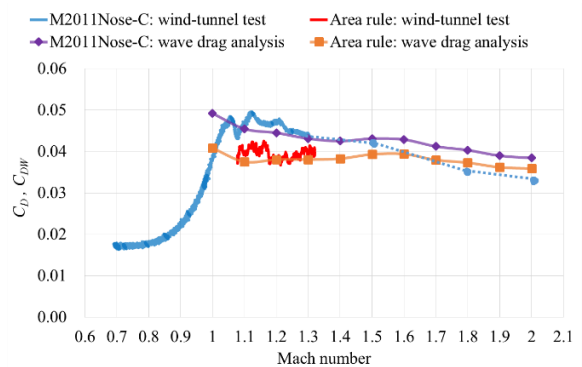


図 1 5. エアリアルール準拠形状の抗力

5 予備的飛行試験

5.1 第一世代実験機の予備的飛行試験

第一世代実験機の低速飛行性能を飛行試験で検証するために、M2006prototype 形状の機体を 2009 年度に製作した。その概観を図 1 6 に示す。この機体の構造様式は CFRP を主体とするセミモノコックであり、各種アンテナを搭載する機首は

GFRP としている。また、製作手順の簡便のために、小骨・円筐・縦通材等、成形の手間が大きい部材は木質としている。燃料を除く機体質量は 22.2kg、燃料搭載量 4.6kg、アビオニクス 0.2kg、総質量 27.0kg である。推進器としては市販のターボジェットエンジンを用いており、最大推力は 33kgf である。公募にもとづいて愛称を「オオワシ 1 号機」としている。

このプロトタイプ機体の飛行試験を、2010 年 8 月に白老滑空場（北海道白老町北吉原）にて実施した。操縦方法は地上パイロットによる無線操縦である。飛行特性データ取得のための機上アビオニクスとして、GPS/INS センサ、5 孔ピトー管を含むエアードータセンサ (ADS)、操舵信号収録装置、エンジンの電子制御ユニット (ECU)、および空撮ビデオカメラを搭載している。

離陸直後の加速上昇中の機体の様子を図 1 7 に示す。約 4 分 30 秒かけて白老滑空場上空を 6 周した。滑走・離陸および飛行は良好であり、姿勢安定および制御性に問題ないことが確認された。機上アビオニクスで収録されたデータのうち、GPS の位置情報による飛行経路を図 1 8 に示す。また、ADS データから推定される対気速度、迎角、および横滑り角の履歴を図 1 9 に示す。いずれも、離陸後の 6 週の周回飛行、すなわち 12 回の水平飛行と 12 回の右旋回に合致している。

機上取得された加速度データと、予め地上静止状態で取得されたエンジン推力データに基づいて、揚力係数および抗力係数を推定した結果を図 2 0 に示す。飛行中、機体姿勢の変化が比較的小さく概ねトリム状態が保たれていると思われる局面のデータを選んで用いている。飛行試験による揚力係数は風試データに良く一致している。抗力係数は値の散らばりが比較的大きく、さらに風試データに比べて寄生抗力係数が 0.03 程度大きくなっている。この値の散らばりは、地上静止状態で計測した推力値と実飛行状態での推力値の差異によるものと考えられる。また、寄生抗力の食い違いは、風試模型のエンジンナセルは円筒形 (flow through) であったのに比して、プロトタイプ機体のエンジンナセル内部にはエンジンマウント等の構造部材が突き出ているためと考えられる。



図 1 6．M2006 プロトタイプ機



図 1 7．加速上昇中の機体の様子



図 1 8．GPS 位置情報に基づく飛行経路

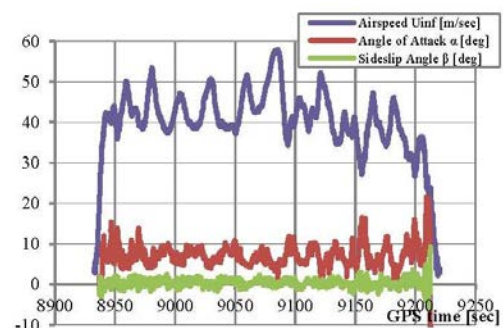
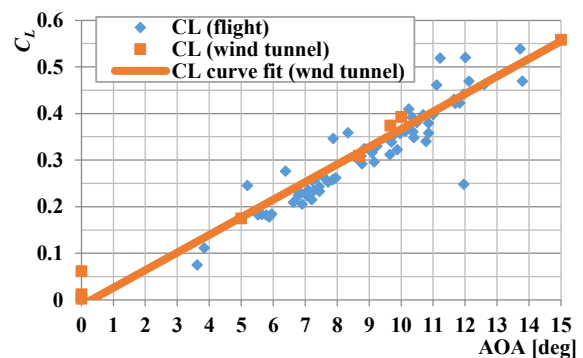
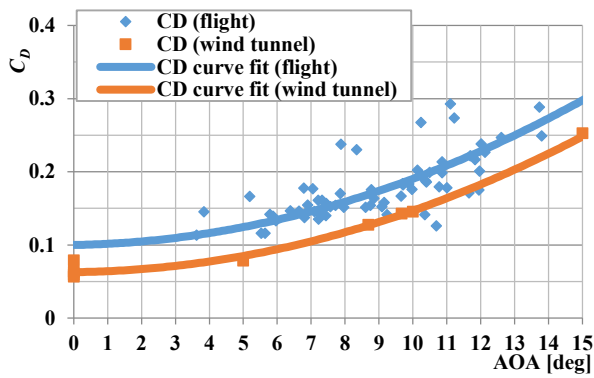


図 1 9．ADS データによる対気速度、迎角、および横滑り角



(a) 揚力係数



(b) 抗力係数

図 20. 機上計測に基づく揚力係数と抗力係数の推定

5.2 予備的飛行試験のための縮小機体の準備

空力特性・飛行特性を評価するために、繰り返し安全に飛行試験を実施することを狙って、無線操縦式の縮小機体を設計・製作している⁽⁹⁾。試作された第一世代実験機縮小機体（縮小比 1/2）を図 21 に、第二世代実験機縮小機体（縮小比 1/3）の設計を図 22 に示す。縮小比をこのように設定することによって、二種類の機体の間で主翼・尾翼の形状・寸法および胴体直径を共通化し、機体部品の共通化を図っている。これら縮小機体を用いた予備的超音速飛行試験を平成 26 年度に実施する計画である。



図 21. 試作された第一世代実験機の縮小機体（M2006prototype 形状、縮小比 1/2）

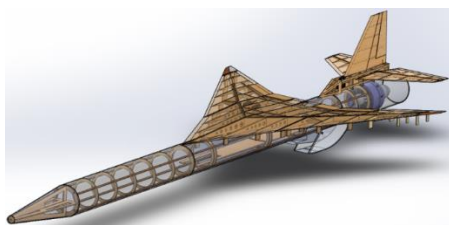


図 22. 第二世代実験機の縮小機体の設計（M2001 Nose-A 形状、縮小比 1/3）

6 結論

大気中を高速度で飛行するための基盤技術の飛行実証を目的として、フライングテストベッド

として小型超音速飛行実験機の構築を進めている。推進系として自主開発の反転軸流ファン式ターボジェットエンジン 2 発を搭載する第一世代実験機（M2006 形状）を研究し、その亜音速飛行特性を検証するために、おおむね同一形状・同一寸法のプロトタイプ実験機（M2006prototype 形状）を製作し、無線操縦による飛行試験を実施した。おおむね良好な飛行性能が実証された。

また、超音速飛行に一層適合した ATR-GG エンジンの自主開発とこれを一基搭載する第二世代実験機（M2011 形状）の設計を進めている。風試によって亜音速域および遷音速域でおおむね良好な空力特性が確認されているが、離着陸時の高迎角によるロール制御性の劣化が予測され、エルロン操舵と同時にラダー操舵を併用することが推奨される。3 自由度飛行経路解析によって、エンジン推力の若干の増強と十分な燃料搭載によって目標飛行マッハ数 2.0 に到達できるものと予測された。そこで、遷音速域の加速性能を改善するためにエリアルールに基づく空力形状修正を試み、造波抗力低減の可能性を確認した。さらに、実際の飛行性能予測のための 6 自由度飛行解析や、予備的飛行試験のための縮小機体の準備を進めている。

今後、空力形状の改良、超音速飛行に適合した CFRP 構造の設計・製作、ATR-GG エンジンの試作と性能評価、自律誘導制御系の構築、等を進め、超音速飛行可能なフライングテストベッドの実現を目指す。

文献

- (1) Ryojiro Minato, et al., “Development Study on Counter Rotating Fan Jet Engine for Supersonic Flight,” ISABE 2011-1233, Gothenburg, Sweden, September 12-16, 2011.
- (2) Minato R, et al., “Design and Performance Analysis of Bio-Ethanol Fueled GGcycle Air Turbo Ramjet Engine,” AIAA Aerospace Sciences Meeting 2012, Nashville, Tennessee, USA, January 2012.
- (3) Kazuhide MIZOBATA, et al., “Development of a Small-scale Supersonic Flight Experiment Vehicle as a Flying Test Bed,” 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS), Brisbane, Australia, September 2012.
- (4) 鈴木祥弘、ほか、「室蘭工大の小型超音速飛行実験機（オオワシ）の操舵空力特性」、平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム、STCP-2013-027、相模原、2014 年 1 月。
- (5) 大石栄、ほか、「小型超音速飛行実験機の風洞試験

に基づく機体抗力検討」、平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム、STCP-2012-059、相模原、2013 年 1 月。

(6) 近藤賢、ほか、「室蘭工大の小型超音速飛行実験機の空力特性と飛行性能予測」、JSASS-2014-H026、日本航空宇宙学会北部支部 2014 年講演会、2014 年 3 月、仙台。

(7)http://en.wikipedia.org/wiki/Sears%E2%80%93Haack_body

(8) V. R. Nikolic and E. J. Jumper, “Two Simplified Versions of Supersonic Area Rule,” Journal of Aircraft, Vol. 42, No. 2, March–April 2005, pp.551-555.

(9) 渡口翼、ほか、「室蘭工大の小型超音速飛行実験機の予備的飛行試験」、JSASS-2014-H027、日本航空宇宙学会北部支部 2014 年講演会、2014 年 3 月、仙台。

高速走行軌道実験設備

中田 大将^{*1}, 棚次 亘弘^{*2}, 東野 和幸^{*1}, 小倉 達也^{*3}, 笹尾 鎮矢^{*3}, 立桶 薫^{*4}

High Speed Test Track

Daisuke NAKATA^{*1*2}, Nobuhiro TANATSUGU^{*2}, Kazuyuki HIGASHINO^{*1*2}, Tatsuya OGURA^{*3},
Shinya SASAO^{*3} and Kaoru TATEOKE^{*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

Muroran Institute of Technology has constructed High Speed Rocket Sled Track Facility in 2009 and it is in use for many practical experimental tests with commercial companies and academic organizations. In this paper, fundamental studies on the propulsion system, the deceleration system, structure design, running profile estimation program and the onboard balance system are described.

Keywords : High Speed Test Track, Rocket Sled, Water Drag, Hybrid Rocket, Anti-G Test

1 はじめに

高速走行軌道実験はレール上に置かれた台車（スレッド）に供試体を乗せロケットで地上滑走させるもので、米国においてはロケットスレッドと呼ばれ超音速にての実レイノルズ数空力測定試験やフラッタ試験、射出シートやパラシュート開傘試験などの用途でその有用性が広く認識されている⁽¹⁾。

室蘭工業大学では我が国初の常設軌道（全長 300 m）を白老町に敷設し、2010 年度から実証試験を進めている⁽²⁻⁹⁾。300 m 軌道では最高時速 405 km を達成しており航空宇宙機器の耐 G 試験等の用途で他大学や民間企業の利用も行われている⁽¹⁰⁻¹²⁾。将来的にマッハ 2 程度で運用可能な 3 km 軌道設備の建設を目指しており、各種基盤技術研究や実験機の離陸補助等に使用することを想定している。

2 軌道設備

室蘭工業大学白老実験場にされたフルサイズ軌道（図 1）は軌間 1.435 m、全長 300 m を有し新幹線規格で建設されており、継ぎ目は全てテルミット溶接されている。スタート点から 159 m 地点以降には減速システムに用いる水路が設けられている。貯水された水路に走行台車に取り付けられた制動板が突入することにより減速する仕組みである。

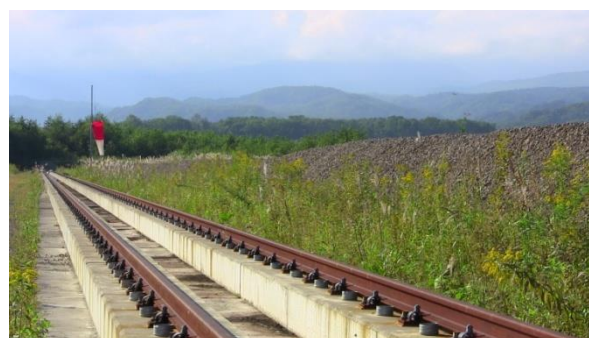


図 1 フルサイズ軌道（全長 300 m）

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

*3 室蘭工業大学 生産システム工学系専攻

*4 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻

この他、軌間 0.13 m、全長 100 m のサブスケール軌道（図 2）も並行して敷設されており、フルサイズでの試験の前段階として、新しい台車設計指針の確認、制動システムの確認試験、エアーデータセンサの精度確認など、各種基盤技術実証に用いている。



図 2 サブスケール軌道（全長 100 m）

表 1 軌道設備諸元

	軌間, m	全長, m	最高速, km/h	完成年
フルサイズ軌道	1.435	300	405	2010 年
サブスケール軌道	0.128	100	130	2008 年

3 推進装置

フルサイズ軌道の推進装置には低コストで保管・運用上安全性の高いハイブリッドロケット（Cesaroni 社 HyperTEK L970）を主として採用している。図 3 は推力 1 kN クラスのものを 4 本クラスタ化した例である。酸化剤には常温で自己加圧により液化する亜酸化窒素を用いており、外気温によってタンク圧は 2 MPa～5 MPa 程度まで変化する⁽²⁾。複数本のロケットの着火タイミングのばらつきは事前走行プロファイルの予測精度に影響を与えるため、斉時着火を目指すための基礎研究を進めている。



図 3 フルサイズ軌道用推進装置（ハイブリッドロケット）

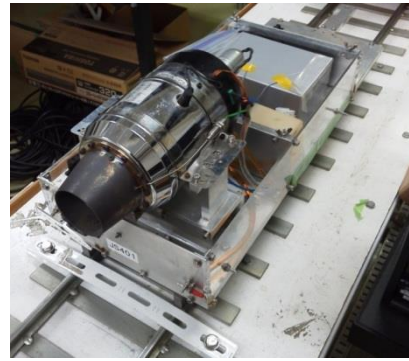


図 4 サブスケール軌道用推進装置（小型ジェットエンジン）

サブスケール軌道では推進装置として RC 機用の小型ジェットエンジン（Jet Munt 社 Merlin 160G）を使用している（図 4）。定格推力は 160 N（外気温 15℃、回転数 116000 rpm における）であり、エンジン重量は 1.45 kg、全長は 30 cm である。ジェットエンジンはイニシャルコストはやや高いものの、ランニングコストはごく小さい。ロケットと比べて推重比は小さいため、耐 G 試験等の用途には不向きである。

4 制動装置

フルサイズ軌道の推進高速のスレッドを安全に停止するにはレール間に設けられた水路にスレッドに取り付けられた制動板（バケット）を浸す水ブレーキが用いられている（図 5、6）。水の抵抗は(1)式で表わされる通り速度の二乗に比例するため、一定水位では最初に大きな減速 G がかかるものの、その制動力は急激に低下する。

$$F_W = \frac{1}{2} C_{dw} \rho_w A_{bucket} u^2 \quad (1)$$

限られた距離で最適な減速を行うため図 7 に示すように水位を多段階（3～10 段階）としている。図 5 に見られるようにバケットは先端にゆくほど幅の狭い台形平板となっているため、浸水面積は最初の区間と最後の区間では大きな差があり、速度の二乗で減衰する制動力をほぼ一定に保つことが出来る。式(1)において水の抵抗係数 C_{dw} は開水路断面におけるバケット平板が占める閉塞率に依存傾向があることが知られており、この観点からサブスケール軌道において閉塞率と C_{dw} の関係を 50 回以上にわたる実験および CFD 計算から推定している⁽¹²⁾。



図5 減速水路に浸された制動板（バケット）



図6 時速 350 km で水路に突入する走行スレッド

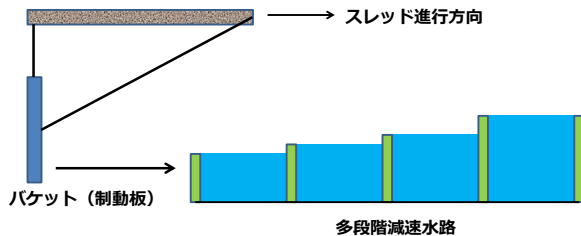


図7 多段階水路の概念図。各閉塞区間を仕切る緑の仕切板はスチロール製であり、バケットが突入することで破砕される。

5 走行プロファイル解析

JAXA リファレンス限られた距離で台車および搭載品の耐 G を上回ることなく加速・減速を行うためには正確な運動予測が必須である。現在のところ、300 m 軌道では ± 5 m 程度で停止位置の予測が可能である。加速区間についてはロケットの推力カーブの再現性が良好である限り精度の高い予測が可能であるが、減速区間については前節で述べた水ブレーキの抵抗係数の誤差や水位設定誤差

が伝搬し当初の想定値から大きく外れた制動 G を与える恐れがあるため、上下限のオフノミナル推定が必要である。図8、図9は最高速 400 km/h に達するスレッドに対してノミナル推定された多段階水路の減速プロファイルと、実測のプロファイルである。

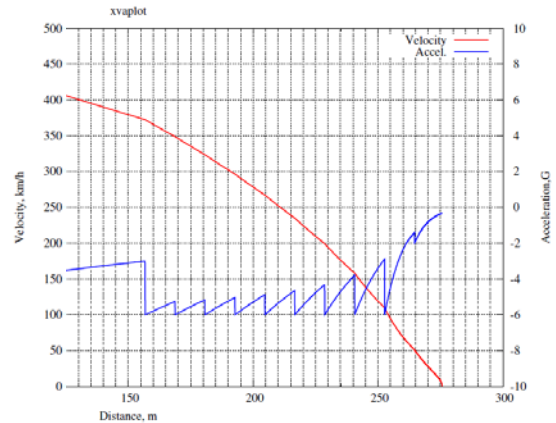


図8 多段階水路による減速プロファイル予測の例。赤線は速度（左軸）、青線は加速度（右軸）。

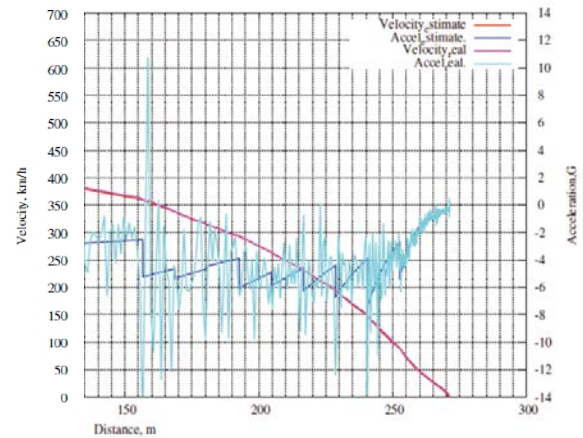


図9 上記のノミナル予測に対応する実走行データ。水色線が加速度センサより得られた加速度（右軸）、ピンクの線は加速度の積分値として得られる速度プロファイル（左軸）である。ピンクの線に速度プロファイルが一致するよう各水路区間での水制動係数を再フィッティングして得られた速度カーブと加速度カーブが赤線・青線。

図8は10段階の水位による制動により6 G での準定常減速を狙った事前解析の例である。ノミナル推定他、水位誤差や空気抵抗・水抵抗係数誤差によるオフノミナル推定も行い、スレッドが300 mの軌道区間において許容 G の制約内で安全に停止

することを確認する。図9は走行後の事後解析であるが、加速度は振動成分を多く含むものの、積分・二回積分を行うと速度はほぼゼロになり、位置は実測の停止位置と誤差1 m程度ではほぼ一致する。図9の青線は水制動係数を再フィッティングして得られる加速度プロファイルであるが、初段～3段目での水位が狙いよりもやや小さめであったために減速Gが6 Gよりも小さくなったことが読み取れる。一方で、7～8段目では7 G程度の減速力がかかっている。

直線軌道であるため解析モデルは(2)式のようにごくシンプルであり、係数の正確な推定が重要である。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = T - C_f N - \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_{sled} u^2 - \frac{1}{2} C_{dw} \rho_w A_{bucket} u^2 \quad (2)$$

右辺第一項は推力、第二項は摩擦係数と垂直抗力の積、第三項は空気抵抗、第四項は水制動力である。推力についてはハイブリッドロケットの場合には温度依存性があり、その補正が重要となる。完全に理論推定することは難しく、現在は様々な気温における実測値をデータベース化して参照している⁽²⁾。第二項では推力作用線および水制動作用線は必ずしも重心を通らないため、台車回りに働くモーメントを考慮する必要がある。例えば、水制動時には台車の下部に取り付けられたバケットに大きな力が働くため、台車は前のめりとなる。前部スリッパはレールを上から強く抑える状態となり、後部スリッパはレールから浮き上がろうとするが、レールからは外れない構造となっているため(図5参照)レール下面で摩擦を受ける状態となる。第三項では空気抵抗係数の正確な把握が必要である。第四項では水制動に関する抗力係数 C_{dw} が水路閉塞率の影響を受けるため、この観点での補正が重要となる⁽¹²⁾。これについては前節で述べたとおりである。以下第三項について詳細に述べる。

走行スレッドはフレーム構造物であり、軌道面との地面効果や剥離した流れが再度台車後部で抵抗要素となる影響も考えられ、先端形状や投影面積から空気抵抗係数 C_{da} を推定することは難しい。米国では風洞にスレッド全体の縮小模型を入れて空気抵抗を推定したケースが報じられているが、納得できるレベルでの一致を見ない。本学ではダミーペイロードを搭載した状態で台車を空走行させ、ロケット燃焼終了後・水制動区間突入前(即ち第一項と第四項が無く、レール摩擦と空気抵抗

しか無い状況)の空走区間から空気抵抗係数を逆算してプロファイル予測を行い本試験に臨んでいる⁽⁸⁾。フィッティングには(3)式を用い、レール摩擦係数 C_f と空気抵抗係数 C_{da} の両者を可変パラメータとして最良推定を行った(図8)。なお、 C_f については台車単体での牽引試験等によりドライコンディションのレール面では0.30-0.35の範疇であることが予めわかっているため、この範疇で取り扱う。図10の例では $C_{da}=0.95$ 程度と推定された。

$$M \frac{du}{dt} = -C_f N - \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_{sled} u^2 \quad (3-1)$$

その一般解は

$$u = -\frac{k}{b} \tan \left(\frac{k(t-t_0)}{M} - \arctan \frac{bu_0}{k} \right) \quad (3-2)$$

ここで

$$b = \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_{sled}$$

$$k = \sqrt{b C_f M}$$

である。

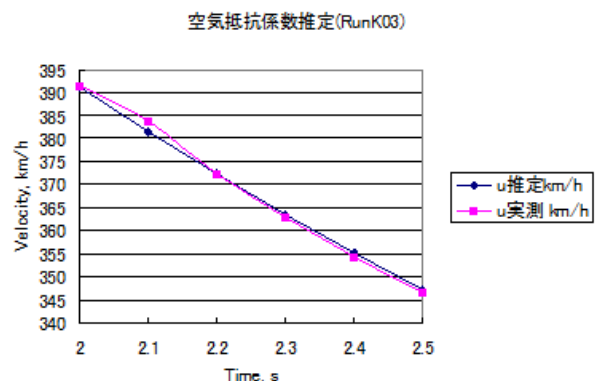


図10 空気抵抗係数のフィッティング推定

スレッドが高速度・高加速度化するにつれて水位の設定誤差が及ぼす影響については慎重な検討が必要である。例えば、100 m/s で走行するスレッドを6 Gの減速加速度で停止させるためには初期ゲートの水位はわずかに18 mm程度でなければならないが、この場合わずか3 mmの水位誤差が1 Gの狂いとなって現れる。水路にはつなぎ目のリーク等もあるため、走行直前の実水位の正確な把握が不可欠である。

加速度センサにはCrossbow社CXL04GP3を用いており、データロガーにはMSR165または日置電機

メモリハイロガー8023 を用いている。データ収録系自身が 20 G 程度の加速度に耐える必要があり、加振試験によって事前に確認している。データは現在 100 Hz で取得されているが、精度の高い検証のためにはサンプリングレートの向上が必要である。

6 台車設計

図 1 1 は 2012 年度から投入された RS-702 型走行台車で幅 1590 mm、長さ 2030 mm のアルミ合金製である（搭載品を除く台車本体の寸法）。推進系・計測系を除く空虚重量は 72 kg であり初号機よりも大幅な軽量化を達成している⁽⁶⁾。MSC Patran / NASTRAN により構造解析を行い、静荷重試験によって解析の正当性を評価した。推進系の荷重伝達経路については比較的分散されていることもありクリティカルな問題とはならないが、減速時にはバケット先端部の狭い面積に大きな荷重がかかるため、全体のモーメントも含めた入念な構造設計が必要である。設計当時の最大想定荷重 12.7 kN に対して衝撃荷重の過渡応答を考慮した係数 2.0 と安全率 1.2 を乗じた負荷に耐える構造となっている。



図 1 1 RS-702 走行台車。全長 2 m、空虚重量 72 kg、耐加速度 10 G、制動板耐荷重 32 kN。

構造解析は全体を粗いメッシュで分割したモデルと部材ごとの詳細解析を組み合わせで実施した。図 1 2 は制動板が 30 kN の荷重を受けた際の 3 次元構造解析の結果である。トラス部材である斜めのバーは単純引っ張りを受け、台車先端は斜め部材に引っ張られて沈み込む。このような構造解析を経て削りこみを行い台車の軽量化を進める。台車幅や台車長さ・桁の本数などについては搭載品取り付けの観点から削減には限りがあり、搭載スペースを確保しつつ構造強度を確保する。



図 1 2 NASTRAN による構造解析の結果。カラーマップは左下部に水制動時の荷重が負荷された場合の Mises 応力。

構造解析の結果の妥当性を確認するため、図 1 3 のようなレイアウトで静荷重試験を実施した。重要と考えられる 17 箇所に歪ゲージを貼りジャッキによってバケット部分に荷重を加えた。実測値は解析による推定値の 80%~105%の範疇に収まり、ほとんどの箇所に必要な強度が確保されていると判断された。許容応力を上回ると判断された部分（上記の例では前部ビームと背後の垂直部材）は補強を行った。

また、1 シーズンの複数回の走行を経て各ビーム部やトラスピンの非破壊検査（探傷試験）を実施し、より疲労による亀裂等が無いか確認している。

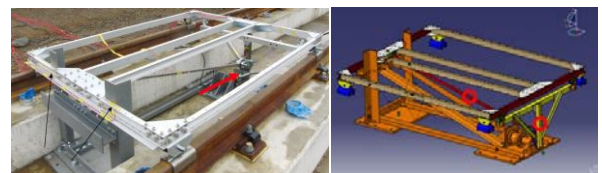


図 1 3 油圧ジャッキによる静荷重試験。左図の赤い矢印の部分に 1.5 トンの荷重を負荷した。

7 機上搭載天秤

スレッドに搭載し、空気抵抗を測定可能な機上天秤の開発と実証を進めている⁽³⁾。加速度により大きな慣性力の働く機上でこれに耐える秤量のロードセルを搭載すると微小な空気抵抗を測定する場合の測定精度が悪化する。そこで、空気抵抗を測定したい供試体と同重量のカウンターウェイトを搭載し、差分として検出される空気抵抗のみを測定できるような仕組みにしている。図 1 4 に示すような平行四辺形のリンク機構を有したロバーバル型についてサブスケール軌道での実証を重ねて

いる。風洞試験の如く 0.01 %クラスの精度は望めないが、1%程度の精度を有した天秤が実現すれば飛行試験前に簡便な実機搭載試験が可能であり、空力弾性効果や実レイノルズ数効果などの確認を行う上で有効である。サブスケール軌道では図 1 4 に示すような 10 cm 角平板を用い、風洞試験で得られる抗力係数とよい一致を見ている⁽¹³⁾。またフルサイズ軌道では胴体径 15 cm、全長 1.4 m 程度の AGARD-B モデルを用いた空力測定実験を実施している⁽³⁾。

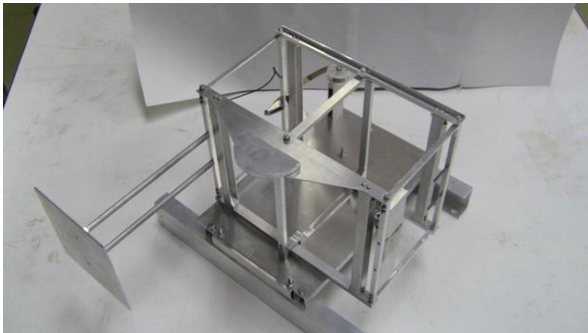


図 1 4 加速度補償型機上搭載天秤

8 まとめ

室蘭工業大学で敷設し、運用している高速走行軌道実験設備の概要と基盤技術実証について述べた。とりわけ、ハイブリッドロケットの採用、多段階水位による最適制動、加速度補償型天秤などは我が国独自の取り組みである。民間企業や他大学との共同利用も実施されており学内外で活用されている。

参考文献

- (1) Dornheim, H. J. McSpadden “The History of Hurricane Mesa Test Facility,” AIAA Paper 2004-3336
- (2) Daisuke Nakata, Ami Kozu, Jun Yajima, Kenji Nishine, Kazuyuki Higashino and Nobuhiro Tanatsugu, “Predicted and Experimented Acceleration Profile of the Rocket Sled,” JSASS Aerospace Technology Japan, Vol. 10, No. ists28, pp. Ta_1-Ta_5, 2012.
- (3) Daisuke Nakata, Kenji Nishine, Kaoru Tateoke, Kazuyuki Higashino, Nobuhiro Tanatsugu, “Aerodynamic Measurement on the High Speed Test Track,” Transactions of JSASS Aerospace Technology Japan, Vol. 12, No. ists29, pp. Tg_5-Tg_10, 2014.
- (4) Daisuke Nakata, Nobuhiro Tanatsugu, Kazuyuki Higashino, Ken Higuchi, Takeshi Tsuchiya and Takehiro Himeno, “Rocket Sled Track Facility as a Test Platform and Launch Assist of Space Planes,” Ground Based Space Facility conference, Paris, France, 2013.
- (5) Daisuke Nakata, Jun Yajima, Kenji Nishine, Kazuyuki Higashino and Nobuhiro Tanatsugu, “Research and Development of High Speed Test Track Facility in Japan,” AIAA Science Meeting 2012, Nashville, Tennessee, U.S.A., 2012.
- (6) 中田大将, 樋口 健, 棚次亘弘, 東野和幸: ロケットスレッドの構造設計について, 日本航空宇宙学会・日本機械学会共催 第 55 回構造強度に関する講演会, JSASS-2013-3012, 2013.
- (7) 棚次亘弘, 東野和幸, 樋口 健, 中田大将, 姫野武洋, 渡邊力夫: 高速走行軌道試験設備, 日本航空宇宙学会第 44 期年会講演会, 2013.
- (8) 中田大将, 西根賢治, 立桶 薫, ムハマド ナビル, 棚次亘弘, 東野和幸: 高速走行軌道実験設備の高速化, 高加速度化, 平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム, 2013.
- (9) 中田大将, 矢島淳, 西根賢治, 森木嵩人, ムハマドファクルー, 東野和幸, 棚次亘弘: 高速走行軌道実験設備の基盤技術について, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, 2012.
- (10) 側原圭太, 加藤優一, 松岡健, 笠原次郎, 松尾亜紀子, 船木一幸, 中田大将, 東野和幸, 棚次亘弘: 高速走行軌道装置における回転デトネーションエンジン滑走試験に関する研究, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 2014.
- (11) 渡辺豪, 渡邊力夫, 中田大将, 東野和幸, 棚次亘弘: 高速走行軌道装置を用いた水/液体窒素ロケットの稼働試験, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012.
- (12) 友常雄太郎, 姫野武洋, 渡辺紀徳, 中田大将, 棚次亘弘, 東野和幸: 高速走行軌道実験の水制動特性に関する数値解析, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, 2012.
- (13) 小倉達也: ジェットスレッド搭載用加速度補償型抗力測定天秤の設計と精度評価, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014.

Humidity Effects on Unsteady Characteristics of Supersonic Flow

Shohei TAKAGI^{*1}, Takuya UEMURA^{*2} Yutaka HIRATA^{*2} and Kosuke TAKADA^{*2}

(Received 28th November 2014, Accepted 22nd January 2015)

Abstract

In supersonic wind tunnels, the humidity content of the working fluid is known to have a significant effect on flow conditions in the test section. The intent of this paper is to evaluate the influence of moisture on the test section flow quality for the indraft supersonic wind tunnel located at the Muroran Institute of Technology. The static-pressure fluctuation is measured by means of an unsteady pressure sensor buried in a 10-degree-aperture cone model installed in the test section. The results show that supersonic flow at Mach 2 is contaminated by the self-sustained oscillation of a condensation shock wave for ambient relative humidity greater than approximately 50%. It is also found that for the Mach 2 flow, that the ratio of the static-pressure fluctuation to the dynamic pressure is less than 0.1%, if the absolute humidity is kept below a critical value of 2[g/m³]. Experimental observations also reveal that the three-dimensional boundary-layer transition process is hypersensitive to the influence of free-stream humidity.

Keywords: Supersonic flow, humidity, condensation shock wave, free-stream property

1 INTRODUCTION

Dry air is generally used in supersonic ground test facilities, in order to avoid the condensation of water particles present in humid air. When humid air is expanded to supersonic conditions, a supersaturated condition often results, wherein no condensation occurs even when flow temperatures drop below the dew point. However, the generation of tiny water droplets in the flow for any reason, spawns a sudden, homogenous condensation process. When water particles are condensed in a supersonic nozzle, latent heat is also released. A condensation shock wave forms downstream of the nozzle throat, and due to the large latent-heat release, thermal choking results in the self-sustained oscillation of the shock wave. The mechanism for this oscillation has been reasonably explained in a series of experimental studies by Matsuo^{1,2)} et.al., using a Ludwig tube. The latent-heat release also influences the accuracy of a Pitot-static tube for Mach number measurements³⁻⁵⁾. Numerical calculations⁶⁾ for viscous flow at large subsonic Mach number, have shown that the lift-to-drag ratio is decreased as relative humidity is increased, due to the presence of this condensation shock wave.

Since the supersonic wind tunnel located at the Muroran Institute of Technology (MIT henceforth) is of the indraft type, the supersonic flow in the test section is expected to be much quieter than that attained in equivalent blowdown-type wind tunnels, which employ a high pressure reservoir tank, with the attendant flow noise created when the flow exits this tank and enters the duct upstream of the test section. However, because ambient atmospheric humidity can produce additional disturbances as discussed above, it is important that the flow quality of any such indraft tunnel be assessed and quantified, especially for potential use in the study of laminar-to-turbulent transition, which is well known to be sensitive to free-stream noise.

The objective of the present paper is to evaluate the flow quality of the MIT wind tunnel, taking into account the influence of atmospheric conditions such as temperature, pressure, humidity and so forth. In order to evaluate the flow quality in the test section, static-pressure fluctuations in combination with condensation density are measured. A 10-degree-aperture cone (known to be the canonical model for static-pressure fluctuation measurements) was newly prepared for the present research and installed in the middle of the test section with an unsteady pressure sensor buried within the model. Further since light is scattered by tiny water droplets in the mist created by condensation, a sophisticated new method, which employs five sets of laser-photo diodes aligned to the axial flow, was invented to evaluate the condensation density in the test section. It is well-known that boundary-layer transition

*1 Muroran Institute of Technology, Aerospace Plane Research Center

*2 Muroran Institute of Technology, Division of Aero- space Engineering (Completed)

is sensitive to the disturbance environment in the mean flow, and the flow quality is often judged by the observed absence or presence of certain disturbance modes. For example, three-dimensional boundary layers exhibit instabilities to both stationary and traveling disturbance modes. Since both modes are sensitive to flow disturbances⁷⁻⁹⁾, the appearance of these modes is often used as an indicator of the flow quality. Low free-stream disturbances favor the stationary mode and vice versa. It is well-known that stationary mode is hypersensitive to surface roughness. Thus, surface-flow visualization by means of surface-oil flow technique on a yawed circular cylinder model (which typifies swept-wing flow near the leading edge) is often made to confirm the low free-stream disturbance environment. In addition, hot-wire measurement is made to observe the traveling mode.

2 Experimental apparatus

2.1 Supersonic wind tunnel

For Mach 2, 3 and 4 flows, the MIT supersonic wind tunnel has three different nozzle blocks which are 2m in streamwise length and expand vertically while the transverse dimension is held constant, resulting in a 400 mm square test section. Two Schlieren windows are installed on the side walls of the test section and the Mach 2 nozzle block was used for the present experiment. The tunnel outlines are illustrated in Fig. 1.

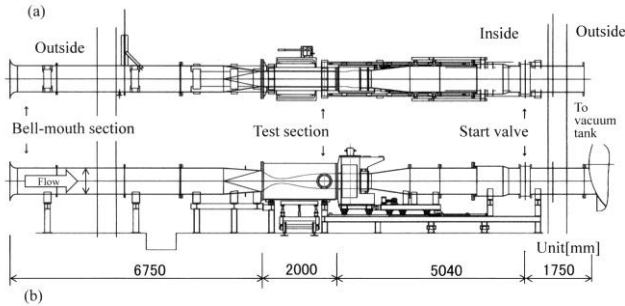


Fig. 1 MIT supersonic wind tunnel. (a) Plan view and (b) Side view.

Atmospheric air is sucked through a round-shaped bell mouth installed outdoors, and a conversion duct installed between the bell mouth and the nozzle block with a diameter of about 1m changes the round cross section to a rectangular shape. Downstream of the nozzle block, a sting holder for model support is mounted in the test section, and aft of the sting, a butterfly valve for intermittent operation is installed. Further downstream of the valve, five vacuum tanks with a total volume of 500 cubic meters are installed, allowing a blow duration of roughly 12 seconds independent of nozzle block. More details regarding this wind tunnel except for the tanks can be also seen in Ref. 10.

2.2 Condensation-density measurement and absolute humidity

When atmospheric humidity is high, the supersonic

flow in the test section is perceptibly clouded due to condensation. Since this condensate consists of tiny ice particles that scatter light, the condensation density can be evaluated using a laser beam across the main flow in combination with a photo diode receiving the permeated laser beam. For the present experiment, inexpensive red-color laser pointers with a wavelength of 650 [nm] and a PIN photo diode with maximum sensitivity at 970[nm] (Hamamatsu Photonix Model S6775) were employed. Although this photo diode does not have its maximum sensitivity at the wavelength of the laser beam, it was found that the beam receiver has sufficient sensitivity to evaluate the condensation density.

Because high humidity air lends to self-sustained oscillation in the supersonic nozzle, both time-averaged as well as time-dependent components of photo-diode output were observed. Furthermore, oscillating patterns in the streamwise direction were tracked, thus providing a measure of convective velocity from the phase delay between time traces. To accomplish this, five identical sets of the laser-photo diodes separated by a streamwise distance of 45[mm] were horizontally installed in the streamwise direction as shown in Fig.2 and these outputs are simultaneously acquired at a sampling rate of 5[μ s] or 10[μ s] with the use of an NF Block Model EZ-7510, which will be mentioned in detail in subsection 2.4.

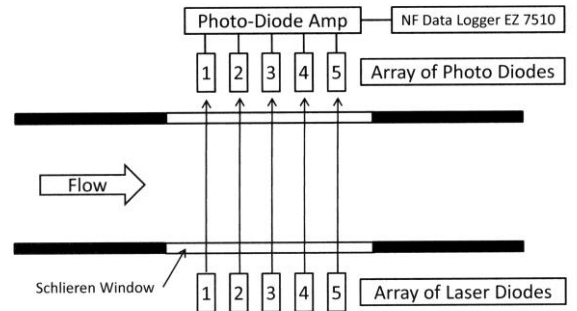


Fig. 2 Five pairs of laser-photo diodes horizontally aligned in streamwise direction with an interval of 45[mm] in test section downstream of supersonic nozzle.

The absolute humidity D [g/m³] of the atmospheric air was calculated from the relative humidity U [%] with the use of the following psychrometric relations (see Ref. 11):

$$D = U \times 0.794 \times \text{EXP}(e) / 100, \quad (1)$$

$$e = (6096.9385 / T + 21.2409642 - 0.02711193 \times T + 1.673952 \times 10^{-5} \times T^2 + 2.4335 \times \ln(T)) / (1 + 0.00366 \times t),$$

where e is the evaporated pressure[Pa], T at absolute temperature [K] is $T = 273.15 + t$, t being the dry air temperature in [$^{\circ}$ C]. Hereafter absolute humidity and relative humidity are called AH and RH, respectively, and AH3.1 represents an absolute humidity of 3.1 [g/m³] and RH50 corresponds to relative humidity of 50[%].

2.3 10-degree-aperture cone model and yawed cylinder model

For free-stream noise evaluation in dry-air supersonic flow, the use of a total-pressure probe (identical to a Pitot tube) is preferable to a static-pressure measurement. This reason is based on the inherent nature that static-pressure fluctuations consist of contributions from both free-stream turbulence and fluctuations arising from boundary-layer physics which cannot, in general, be deconvolved. A total-pressure probe, however, is not always preferential for free-stream noise evaluation in the case of humid air as a working fluid. Because atmospheric humidity in the Muroran district varies considerably throughout the year, the evaluation of the free-stream disturbance environment must account for this seasonal variation. In an indraft tunnel drawing in atmospheric air, ambient water vapor changes into ice particles during the flow expansion through the nozzle, and downstream when these ice particles pass through the bow shock, they again change phase into water vapor or water droplets. If a Pitot tube were to be employed under such high humidity conditions, the stagnation point, where the pressure-sensing elements are placed, would be contaminated by water droplets. Consequently, the pressure sensor may indicate a misreading and perhaps more importantly, suffer from the possibility of deterioration or fatal damage due to water droplet impingement.

Boundary layers developing on the inside walls of the test section are turbulent under normal operation and static-pressure measurements on the inside walls of the test section are therefore unsuitable in the assessment of the free-stream static-pressure fluctuation, because turbulent motion in the boundary layer also spawns pressure fluctuations. To avoid this complication, static-pressure measurements for free-stream noise evaluation were conducted using an AEDC cone model rather than a Pitot-tube measurement.

In support of this, an AEDC 10-degree-aperture cone model was newly constructed for static-pressure measurements. A schematic of the cone model cross section is shown in Fig.3a, which indicates that the model has a total length of 250[mm] with a 70[mm] long stainless steel initial portion having a tip radius of 0.14[mm], and the remaining part of the cone made from the VESPEL® insulating material. The surface roughness of the metallic portion is approximately $0.21[\mu\text{m}]$ in the center-line averaged roughness, while the surface finish of the rest is, and the discontinuity between the metallic and VESPEL parts is less than $5[\mu\text{m}]$. A Kulite unsteady pressure sensor Model XCQ-62-350mBARD (5[PSI]=34.5[kPa]) with an external diameter of 1.65[mm] was vertically buried beneath a hole with a diameter of 0.5[mm] located 120 [mm] downstream of the tip. The distance between the cone surface and top surface of the pressure sensor should be as small as possible in order to avoid the influence of any Helmholtz resonance frequency. For

the present model, the distance was fabricated at 0.5[mm], resulting in a resonance frequency of approximately 50[kHz], which is considerably higher than the rolloff frequency of 30[kHz]. Four static-pressure ports with a diameter 0.5mm spaced evenly at 90 degrees around the model 245[mm] downstream of the tip were installed with one port connected to the back pressure of the Kulite sensor. A Model CDV-700A DC amplifier manufactured by Kyowa Electronic Instruments was employed to condition the pressure signals.

Due to the concern of extremely low frequency components in the static pressure fluctuations raising the overall level, all waveforms were post-processed during data reduction to remove these components and their RMS values calculated in an Excel spreadsheet.

According to the existing database¹²⁾ regarding static-pressure fluctuations on the AEDC model, the transition Reynolds number is expected to be $5\text{-}6 \times 10^6$ under a mean-flow condition with a static-pressure fluctuation level of 0.1%-0.3% of the dynamic pressure. Therefore, the position of the installed pressure sensor was set to correspond to a Reynolds number of approximately 0.8×10^6 , to insure that boundary layer on the cone at that location retains the laminar state.

For 3-D boundary-layer transition studies, a stainless steel yawed circular cylinder model with a diameter of 40[mm] and a length of 500[mm] at a yaw angle of 60 degrees was fabricated. The model was installed in the test section in the vertical plane with both ends of the model cut so as to be parallel to the main stream. An oil-flow technique was employed to visualize the cylinder surface flow. The chemicals utilized for visualization were comprised of a mixture of oxide titanium, oleic acid and liquid paraffin mixed in the ratio of

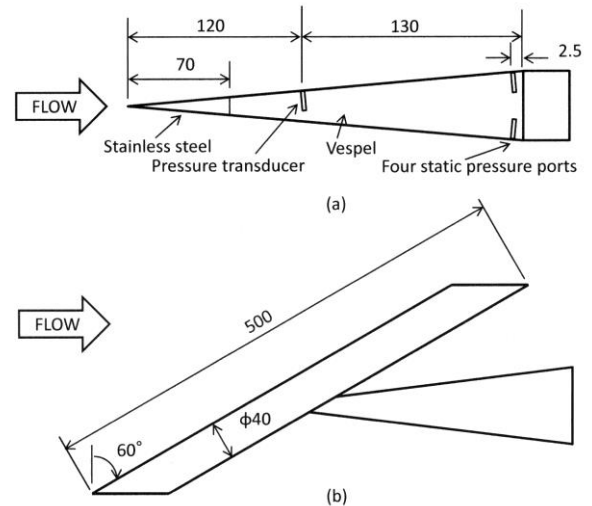


Fig. 3 Wind tunnel model. (a) 10-degree-aperture cone model, (b) yawed circular cylinder model. Unit in mm. 1:2:8. A video camera was employed to capture the cylinder surface oil flow under the Mach 2 flow condition, and a still camera was used at the end of the blow.

2.4 Data acquisition and analysis

All acquired analog data were stored in a data logger Model EZ-7510 supplied by NF Block, which has eight analog input ports with a resolution of 16 bits at the maximum sampling rate of 1MHz. For the present measurements, the sampling rate was set at either 100[kHz] or 200[kHz] per channel. An anti-aliasing filter (Nippon Audio Model PGF-8, 100dB/Oct) for each analog input port was used with the one-half frequency of the sampling rate. Acquired data from the unsteady pressure sensor and the photodiodes were reduced by the use of Matlab or Excel spreadsheet.

3 Experimental results

3.1 Evaluation of vapor condensation

As shown in Fig. 2, laser beams, which vertically permeate through the Schlieren window at the test section, are received by photodiodes on the other side of the test section, and the photodiode outputs in DC coupling mode are stored on the Logger EZ7510. Figure 4a compares four typical waveforms of the diode outputs acquired at various atmospheric conditions; i.e. (AH2.9, RH52), (AH5.0, RH44), (AH6.6, RH52) and (AH8.9, RH78). The vertical axis indicates the intensity of the received beam and is arbitrary but permits a relative amplitude comparison between wave-forms. Also, the waveforms are arbitrarily shifted on the horizontal time axis in this figure.

Prior to a given wind-tunnel blow, each waveform holds constant indicating no optical obstruction, but suddenly decreases at a certain time which corresponds to the starting time of the blow. Because the laser beam completely scattered initially, the photodiode output should be zero, showing that complete beam scatter in all cases is noticeable at the starting time. It is apparent that the light scatter is due to condensation of water vapors attendant in atmospheric air.

For the case of (AH6.6, RH52), small but regular periodic fluctuations superimposed on the photodiode output before and after the start time are observable and attributable to the hum component 100[Hz], because room lighting was turned on during the blow.

The four photodiode data plots shown in Fig.4 may be classified into two groups. For cases where AH is less than 6.6[g/m³], it may be seen that photodiode output is held constant for an interval of 0.4 seconds right after the start, indicating that supersonic flow was steadily established. However, for the highest humidity case of AH8.9, a thick width of waveforms is observed, and the diode output oscillates periodically at 225[Hz] as shown in Fig.4b, where the time axis is enlarged. For this case, the mean intensity of the penetrated laser beam is reduced to 48% of that before the start and the peak to peak of its amplitude reaches as large as 65%. The origin of this large oscillation is related to the condensation process of water vapor present in the air near the supersonic throat. Also, it may be inferred that

the high frequency selectivity of the oscillation is characteristic of a self-sustained oscillation.

For cases less than AH1.9, the photodiode output is observed to be virtually constant, except during the transient time right after the flow is started.

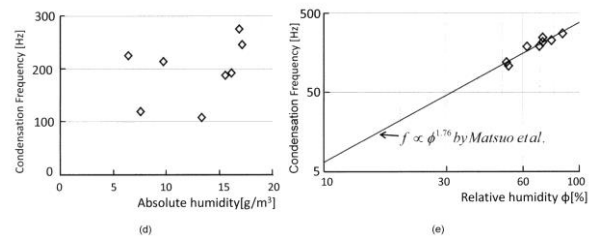
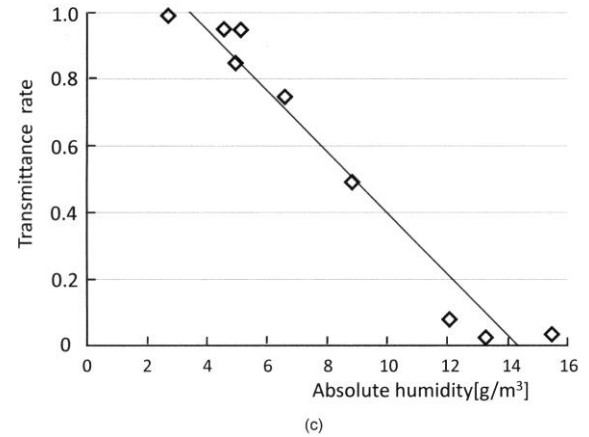
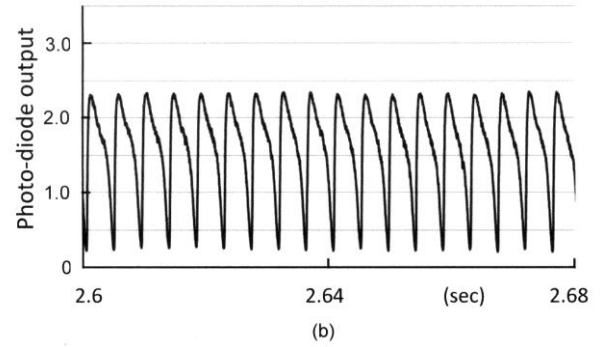
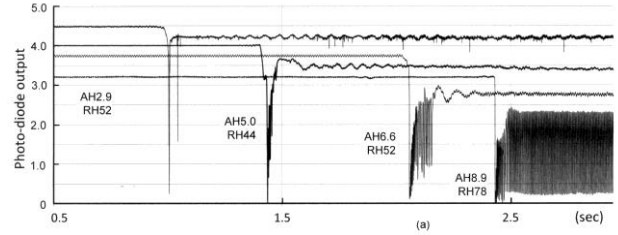


Fig. 4. Characteristic properties of permeated laser beam against humidity before and after the blow. (a) Comparison of photo-diode outputs, (b) Diode output in enlarged time scale in case of AH8.9, (c) Permeated beam ratio against absolute humidity, (d) Condensation-oscillation frequency against absolute humidity, (e) Condensation oscillation frequency against relative humidity.

Figure 4c shows a plot of the photodiode output against absolute humidity together with a straight line obtained from the least squares method. The intensity of the penetrated laser beam linearly increases as absolute humidity decreases. Figure 4c also shows that the beam

is completely intercepted by condensation in the case of absolute humidity larger than AH18, whereas for the case of absolute humidity less than AH2, no beam scatter at all was observed.

The periodic oscillation of condensation versus absolute humidity and relative humidity is illustrated in Fig.4d and 4e, respectively. The first appearance of periodic oscillation is observed for relative humidity larger than roughly 50% relative humidity as indicated by the waveforms shown in Fig.4a. Although periodic oscillation has no strong correlation with absolute humidity, it is expected that there is a certain relationship between oscillation frequency and relative humidity. To support this assertion, an empirical formula proposed by Matsuo et. al.¹⁾ is also plotted in Fig.4e. This formula provides that the condensation frequency varies as relative humidity raised to the power of 1.76, times the total temperature T_0 to the power of 0.5, and exhibits good agreement with the present data assuming that T_0 is held invariable, due to the fact that the variation of T_0 is small in the present experiment.

In order to measure the convective velocity of the condensation fluctuation in the streamwise direction, five pairs of the laser-photo diodes spaced at an interval of 45mm and aligned in the flow direction, were simultaneously acquired as shown in Fig.5. In this figure, the photo diode output under the condition AH8.9 and RH78 (which is a case of the highest humidity in Fig.4a), is replotted for phase comparison. It should also be noted that the amplitudes of the five wave traces are evenly amplified, despite the fact that each photo-diode sensitivity to laser beam intensity is different. Nonetheless it is apparent that the phase of the diode outputs numbering from upstream to downstream, gradually decreases. The difference in phase between signals was calculated by means of the cross-correlation function.

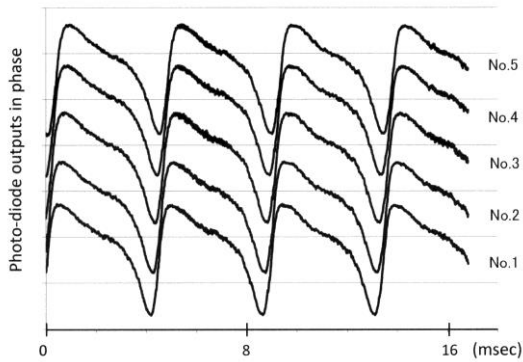


Fig. 5 Simultaneously acquired output traces of arrayed photo diodes.

As a result, the phase difference between the most upstream and the most downstream sensors is 0.356 [ms] for a spatial separation of 180[mm], corresponding to a phase velocity of 505[m/s], which is almost equal to the main stream velocity obtained from the

Pitot-static measurement. Taking into account the accuracy of the Pitot static-tube measurement affected by humidity, it could be concluded that condensation fluctuation propagates downstream, convected by the main flow.

3.2 Static-fluctuation measurements on cone model

The previous results suggest that the oscillation of vapor condensation induces a static-pressure fluctuation in the test section and static-pressure fluctuation measurements using the 10-degree-aperture cone model are shown in Fig.6. Four typical time traces from static-pressure sensors under different humidity conditions are shown in Fig.6a and the corresponding spectrally analyzed results are shown in Fig.6b.

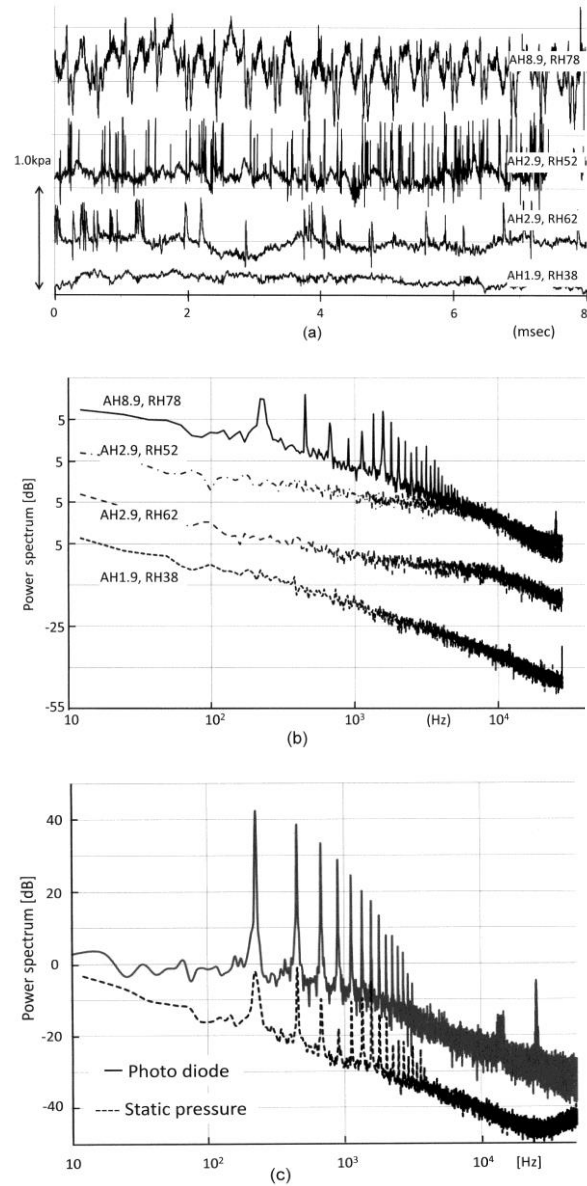


Fig. 6 Comparison of static-pressure fluctuation on cone model and photo-diode output against absolute humidity. (a) Waveforms of static-pressure fluctuations, (b) Power spectra of static-pressure fluctuations, (c) Power spectra of static-pressure fluctuation and photo-diode output.

Since the waveforms are shifted for comparison,

these amplitudes are comparable in each other. Also, corresponding power spectra also are shifted by +15 dB on the basis of the case of (AH1.9, RH38). A static pressure fluctuation for the case of the highest humidity (AH8.9, RH78) was previously illustrated in Fig.4 and is compared with the laser-photo diode measurements. It is expected that static-pressure fluctuation for the lowest humidity case (AH1.9, RH38) in terms of both absolute humidity and relative humidity, should be the smallest in amplitude. This result is consistent with the spectral analysis, indicating that there are no peculiar spectral components in the whole frequency range and spectral components tend to monotonically decrease as frequency is increased. For this case, the ratio of the intensity of the static-pressure fluctuation to the dynamic pressure is less than 0.1[%] as will be discussed later. On the other hand, for the case of the highest absolute humidity, the static pressure is observed to fluctuate periodically, and the peak to peak of the fluctuation reaches approximately 1[%] dynamic pressure. Also, spectral analysis of this fluctuation reveals discrete components corresponding to 225[Hz] and higher harmonics. The fact that this frequency agrees with that obtained from the laser-photo diode measurement suggests that the self-sustained oscillation due to condensation directly affects static pressure in the test section. For further confirmation, the spectrum of the photo-diode output is compared with that of static-pressure fluctuation in Fig.6c, where it is apparent that the periodic oscillations, including higher harmonic components are closely correlated with the AEDC cone measurements. Perhaps the most interesting point, however, is that except for these periodic oscillations, the baseline of the spectral components shows no difference between them, i.e. there are no irregular components present in the photo-diode output of Fig.5. This phenomenon is different from the other two cases of humidity level, without self-sustained oscillation due to condensation shown in Fig.4.

For the two cases of (AH2.9, RH52) and (AH2.9, RH62), which are the same absolute humidity, but different relative humidity, no clouded contamination was visibly perceivable and the laser intensity was reduced to -5[%] under (AH2.9, RH52), while for (AH2.9, RH62) no reduction in laser intensity occurs. The common phenomenon is spiky signals overriding on top of fluctuating static-pressure waveforms, indicating that spiky signals are more prevalent for lower relative humidity flow, rather than the higher case. As a consequence, a comparison of the spectra shown in Fig.6 shows that static-pressure fluctuation over the frequency range of 1-30 [kHz] is high compared with the other two cases as aforementioned. This suggests that such spiky signals not observed in the other two cases contribute to raising fluctuation components in the frequency range of 1-30[kHz]. The pulse width of the spiky signal is roughly 0.2[ms] to 0.5[ms] which corresponds to 120 to 240[mm] in the

streamwise direction assuming that the flow velocity along the cone is roughly the same as that of the main flow (500[m/s]). The origin of fluctuations with this spatial scale may be inferred as follows: when tiny ice particles generated near the supersonic nozzle under high humidity conditions pass the conical shock wave at the tip of the cone model, a phase change from ice to liquid occurs, and the resulting liquid particles are retarded because of the endothermic latent heat process, which results in an increase of the static pressure. Therefore, it can be inferred that when phase changing particles pass near the pressure port, a positive pressure rise occurs. On the other hand, under the high humidity conditions which accompany self-sustained oscillation, the phase change of ice particles synchronizing with the oscillatory condensation, does not contribute to an increase of fluctuations in the 1-30[kHz] frequency range. In order to confirm the above speculation, simultaneous measurements of static pressure together with a hot-wire anemometer installed slightly downstream of the static pressure port are planned in the future. Also, in the case of (AH2.9, RH52), the output from the photo diodes sometimes indicates falling pulses, which may be ascribed to the passage of ice particles through the laser beam.

The RMS values of static-pressure fluctuation against absolute humidity and relative humidity are illustrated in Fig.7. The results show that as absolute humidity and/or relative humidity are decreased, pressure fluctuation level tends to decrease. It does not seem, however, that the level of static-pressure fluctuation is correlated with either absolute humidity or relative humidity. Nevertheless, Figure 7 shows that below AH2.0 a fluctuation level of 0.1% of the dynamic pressure of the flow obtains in the Muroran district in winter, which is generally regarded to be a quiet supersonic flow¹³⁾. Under such low humidity atmospheric conditions as well as under the comparatively high humidity condition accompanying condensation oscillation, an experimental study regarding 3-D boundary-layer transition was conducted to document the effect of humidity on such a transition process.

3.3 Transition study on 3-D boundary layer

Surface-oil flow pattern on a yawed circular cylinder model is shown in Fig.8a for the case of (AH2.9, RH56). Although the flow quality did not satisfy the quiet supersonic flow condition with a static pressure fluctuation below 0.1[%] of dynamic pressure, Figure 8a is one of several captured snapshots, showing comparatively clear striations. The visualized region is downstream 30 degrees from the attachment line, because the flow near the critical point for the cross-flow instability is hypersensitive to surface roughness, resulting in triggering a row of stationary vortices. The 1mm scale and the azimuthal-angle scale ϕ from the attachment line are taken at the upper portion and at the right hand in the picture, respectively. Many striations downstream of $\phi = 40^\circ$ are visible.

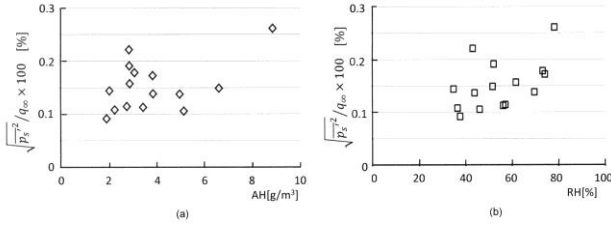


Fig. 7 Comparison of static-pressure fluctuation RMS, (a) Static-pressure fluctuation RMS against absolute humidity, (b) Static-pressure fluctuation RMS against relative humidity.

The wavelength λ along the white line parallel to the attachment line at $\phi = 50^\circ$ was calculated by digital image analysis as shown in Fig.8b. This result shows

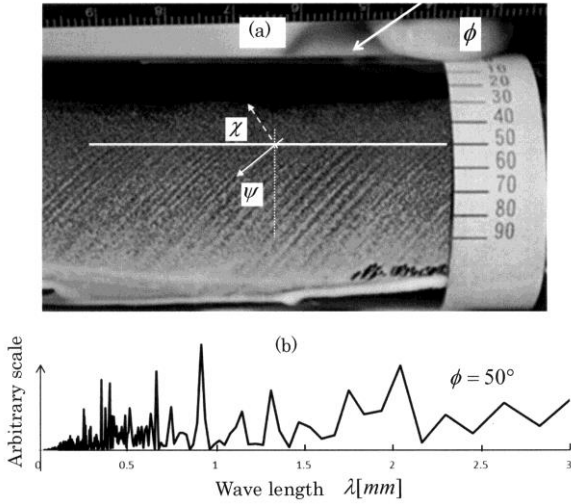


Fig. 8 Three-dimensional boundary layer transition on yawed cylinder model under (AH2.6, RH52), (a) Visualized pattern by surface-oil flow technique, (b) Spectrum by means of image analysis along white line at $\phi = 50^\circ$ in Fig.8a.

approximately $\lambda = 0.9$ [mm], while compressible linear stability analysis¹⁴⁾ under the present experimental condition predicts this wavelength to be 0.82 [mm]. Good agreement between experiment and analysis suggests that the striations may be attributable to the action of a row of stationary vortices originating from a cross-flow instability.

On the other hand, for the case of AH6.9 which is accompanied with the aforementioned self-sustained oscillation, video image visualized surface flow shows that although streaks were slightly visible at the incipient time of the blow, eventually the stationary structure disappeared by the end of the blow, as shown in Fig.9. It is suggestively shown that high free-stream disturbance flow is unfavorable for the growth of the stationary cross-flow mode.

Also, a traveling cross-flow mode under the extremely low humid environment was observed by means of hot-wire anemometer measurements and also compared with stability analysis. This time-dependent modes peaking at approximately 60 kHz and growing downstream as shown in Fig.10a may be identified with the cross-flow instability mode¹⁴⁾.

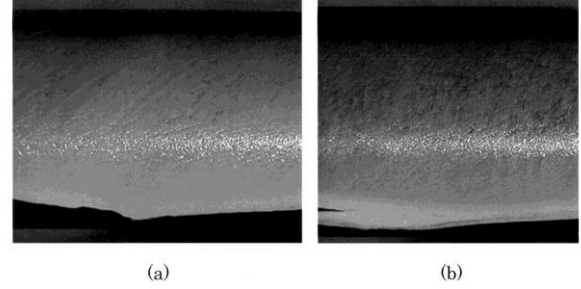


Fig. 9 Surface-oil flow pattern under absolute humidity of 6.9 [g/cm³], (a) Flow pattern at two seconds after blow, (b) Flow pattern at six seconds after blow.

However, for the case of even slightly high humidity condition (AH2.12, RH60), similar hot-wire measurement at $\phi = 60^\circ$ does not show the signature of the traveling mode, suggesting that the cross-flow instability is hypersensitive to free-stream turbulence. Under much higher humid condition (AH2.46, RH72), no distinct components are also observed as shown in Fig. 10b, in spite of growth of continuous components over wide range of frequency. Thus, since the influence of the free-stream noise level as well as the content of the free-stream noise is quite complex in the process of boundary-layer transition, further investigation is required.

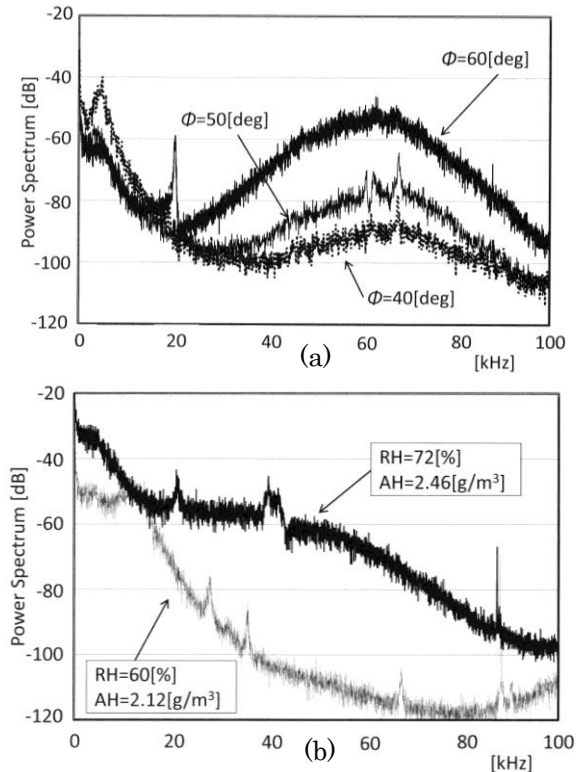


Fig.10 Power spectra of hot-wire anemometer output at various azimuthal position of the attachment line of yawed circular cylinder, (a) Power spectra of hot-wire anemometer output at various azimuthal positions and (b) Power spectra of hot-wire anemometer output at two different humid conditions.

4 Conclusion

The main flow of an indraft supersonic wind tunnel drawing air in from the ambient atmosphere is contaminated by the condensation of moisture present in the incoming air and the resulting flow properties are sensitive to atmospheric humidity. In order to quantitatively evaluate the influence of humidity at Mach 2 in the indraft supersonic wind tunnel located at the Muroran Institute of Technology, static-pressure fluctuations in the test section with the aid of a 10-degree-aperture cone model were measured. Also, moisture condensation was evaluated by the use of an array of laser-photo diodes beamed across the test section. Exploiting the characteristic feature that the cross-flow instability in 3-D boundary layers is hypersensitive to the flow properties, surface-oil flow visualizations and hot-wire measurements were employed to confirm the growth of stationary and traveling modes on the yawed circular cylinder. Several conclusions may be drawn from these investigations:

- 1) The ratio of the static-pressure fluctuation level to dynamic pressure is less than 0.1% when absolute humidity is below 2.0[g/m³].
- 2) For absolute humidity in the range 2-6[g/m³], positive pressure pulses overriding the static-pressure fluctuations increase over the frequency range of 1-30[kHz], with a spatial scale in the streamwise direction corresponding to 120-240[mm].
- 3) A train of positive pulses overriding the static-pressure fluctuation are ascribed to the passage of liquid particles accompanying latent heat release due to phase change from ice particles near the static-pressure port. Such static-pressure pulses are attributable to the endothermic process associated with the ice particles changing to liquid particles when they pass through the conical shock wave formed at the tip of the cone model.
- 4) Self-sustained oscillation due to liquid condensation occurs when an absolute humidity of 6[g/m³] and relative humidity of 50[%] and [90%] exists in the ambient air.
- 5) Condensation oscillation results in increase of the static-pressure fluctuation in the test section.
- 6) Condensation oscillation advects with the main stream in the test section.
- 7) Under low absolute humidity conditions and the attendant low-turbulence environment, the stationary and traveling cross-flow modes on the yawed circular cylinder surface was observable, as predicted by compressible linear stability analysis.
- 8) For the case of slightly high humid environment compared with the previous case, growth of the traveling mode is suppressed, while free-stream turbulence flow with the accompanying self-sustained condensation oscillation, no stationary vortices appeared.

ACKNOWLEDGMENT

Compressible linear stability analysis associated with the present experimental configuration was made by Professor S. Sakaue at Osaka Prefecture University. The authors would like to express their sincere appreciation. Also, thanks are extended to Mr. H. Ohtateme, graduate student, at Muroran Institute of Technology, who helped to conduct the present experiment and to reduce experimental data.

REFERENCES

- (1) Matsuo, K., Kawagoe, S., Sonoda, K., and Setoguchi, T.: Flow oscillation in Laval nozzle accompanying condensation - part 1. Oscillatory range of occurrence and frequency, *J. of Jap. Soc. of Mech. Eng. (B Series)*, **49** (1983), pp.108-114. (in Japanese)
- (2) Matsuo, K., Kawagoe, S., Sonoda, K., and Setoguchi, T.: Flow oscillation in Laval nozzle accompanying condensation - part 2, Oscillatory amplitude and generation mechanism, *J. of Jap. Soc. of Mech. Eng. (B Series)*, **50**(1984) pp.1319-1324. (in Japanese)
- (3) Huang, J. C., Gault, R. I., Benard, E. and Raghunathan, S.: Effect of humidity on transonic flow, *J. Aircraft*, **45** (2008), pp. 2092-2099.
- (4) Nagai, S., Tsuda, S., Koyama, T., Hirabayashi, N.: Humidity management for a hypersonic wind tunnel, *J. of Jap. Soc. for Aeronaut. Space Sci.*, **55** (2010), pp.483-489. (in Japanese)
- (5) Herring, G. C.: Mach-number measurement with laser and pressure probes in humid supersonic flow, *AIAA J.*, **46** (2008), pp. 2107- 2108.
- (6) Iriya, A., Yamamoto, S. and Daiguji, H.: Numerical method for transonic viscous flow considering humidity. *J. of Jap. Soc. of Mech. Eng. (B Series)*, **62** (1996), pp.3854-3859. (in Japanese)
- (7) Saric, S. W. and Reed, H. L.: *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, **21** (1989), pp.235-284.
- (8) Bippes, H.: Basic experiments on transition in three-dimensional boundary layers dominated by crossflow instability, *Progr. in Aerospace Sci.*, **35** (1999), pp.363-412.
- (9) Takagi, S. and Itoh, N.: Observation of traveling waves in the three-dimensional boundary layer along a yawed cylinder, *Fluid Dyn.Res.*, **12** (1994), pp. 167-189.
- (10) Minato, R, Mizobata, K., and Kuwada, K., Experimental Measurements of Starting Loads and Model Behaviors in the Indraft Supersonic Wind Tunnel, *Trans. of the Jap. Soc. for Aeronaut. Space Sci.*, **53**, (2010), pp.54-62.
- (11) Daiichi Kagaku: Calculation of moisture : <http://www.daiichi-kagaku.co.jp/situdo/notes/note108.html>. (in Japanese)
- (12) Dougherty, N. S., Jr.; and Fisher, D. F.: Boundary-Layer Transition on a 10-Deg Cone: Wind Tunnel/Flight Correlation. AIAA-80- 0154, 1980.
- (13) Wolf, S.W.D., Laub, J.A. and King, L.S.: Flow characteristics of the NASA-Ames laminar flow supersonic wind tunnel for Mach 1.6 operation, *AIAA* 94- 2502.
- (14) Takagi, S., Sakaue, S., Hirata, Y., Uemura, T. and Takada, K.: Observation of Cross-Flow Instability Mode in a Yawed Cylinder Boundary Layer at Mach 2. *AIAA J.* **53**, No.1 (2015), pp.260-265

展開宇宙構造物に関する研究

勝又 暢久^{*1*2}, 樋口 健^{*1*2}, 大加瀬 容平^{*3}, 貝森 政明^{*4}

Development on Deployable Space Structures

Nobuhisa KATSUMATA^{*1*2}, Ken HIGUCHI^{*1*2}, Yohei OOKASE^{*3}, Masaaki KAIMORI^{*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

The purpose of this paper is to introduce two deployable booms for corresponding to the recent request of high accuracy and/or large space structure, which are Storable Tubular Extendible Member (STEM) boom and Braid Coated Bi-Convex Tape boom applying Shape Memory alloys (SMA-BCON). As for STEM boom study, the static shape of Bi-STEM is firstly obtained by contact analysis between inner and outer shells. Then, the dynamic behavior of the Bi-STEM is examined by transient analysis. As for SMA-BCON boom study, the deployment behavior is evaluated using handmaid conceptual model. The stepwise deployment behavior is achieved and the importance of synchronous deployments of each boom for the stable center body behavior is pointed out through deployment experiments.

Keywords: Deployable boom, Bi-STEM boom, SMA-BCON boom, Structural Analysis, Deployment experiments

1 はじめに

宇宙ミッションの高度化に伴い、近年では宇宙構造物のさらなる大型化または高精度化が求められている。高精度化の要求に対しては、宇宙空間における厳しい熱環境変化による変形やヒンジ・ラッチ部のミスアライメントなどにより生じる精度劣化が問題となる。この問題への対応策として、宇宙空間へ打ち上げ後にアンテナやリフレクターの形状を計測し、その計測結果を用いて精度が向上するように形状を変化・適応させるスマート構造 (Smart Structure) や適応構造 (Adaptive Structure) が考えられ、現在さまざまな研究が行われている。また大型化の要求に対応するためには、

輸送時の質量・体積の制約から、打ち上げ時には収納し、宇宙空間で展開して大型化できる展開構造物が必須となる。近年ではゴッサマー構造 (Gossamer Structure) に代表される膜面やケーブルを用いた超軽量構造や、気体などで膨らませて展開させるインフレイタブル構造などの超軽量構造物の研究が盛んに行われている。またこれらの超軽量構造を展開させ、さらに展開後に形状を維持できるだけの剛性を維持できる伸展ブームは、展開構造物において重要な構造要素の一つである。構造全体の高精度化、大型化に対応するためにも、伸展ブームのさらなる軽量化と高剛性化、また高収納性と確実な展開のための機構の簡略化が、伸展ブームの設計において重要となる。

これらの背景を踏まえ、2 種類の伸展・展開ブームについての研究成果を紹介する。

1 つ目は、伸展ブームとして宇宙での利用実績も有する薄肉開断面梁 STEM (Storable Tubular Extendible Member) ブームの研究成果について示す。比剛性と真直性を高めるために二重にし、そ

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域
*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター
*3 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻
*4 室蘭工業大学 機械航空創造系学科卒業

それぞれの STEM が分離しないように先端開口部を結合した Bi-STEM 構造(図 1)を研究対象とした。二重にすることで生じる内外シェル間接触や断面形状の変化が力学特性に及ぼす影響について、接触を考慮した有限要素解析により解析的に形状を求め、時刻歴応答解析によって摩擦の影響を検討した結果を示す。

2 つ目は, STEM ブーム同様に軽量かつ高剛性伸展ブームとして近年開発された組紐被覆コンベックステープブーム^{(5),(6)} (Braid Coated Bi-Convex tape Boom, 以降 BCON ブームとする)に関する研究を示す。BCON ブームの利点を活かしつつ, 小型化と展開力の制御性を考慮してコンベックステープ(巻尺)部分に SMA (Shape Memory Alloys) を適用した新たな伸展ブーム「SMA-BCON ブーム」について, 構造概念の実証を目的としたモックアップレベルの展開実験結果を示す。

2 Bi-STEM ブームの概要と研究目的

観測衛星のスピン面内とスピン軸方向の 3 軸にアンテナを配置することで計測精度を高める観測ミッションが提案されている。スピン軸方向への伸展においては, 高い比剛性と真直性がスピン衛星の姿勢安定性のためにきわめて重要である。それらの要求を満たす一次元伸展構造物として, 薄肉円形開断面梁を収納リールから送り出して伸展する STEM ブームの適用が検討されている(図 1)。

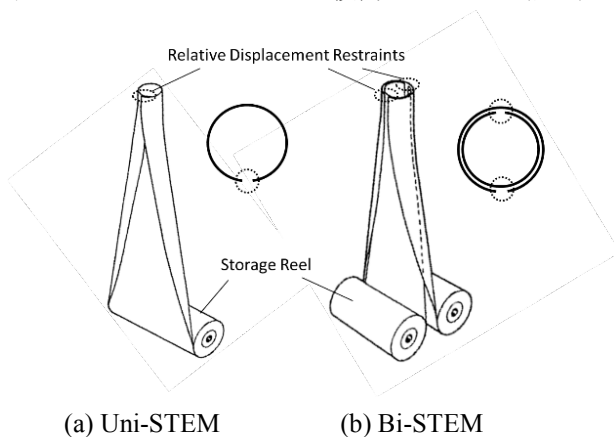


図 1 Uni-STEM と Bi-STEM の概念図^[4]

STEM は, あらかじめ所望の形状 (ex. 円筒状) に成形した材料を再度裾開きして巻き取って収納し, 宇宙空間で拘束を解放して形状を復元する手法 (構造硬化模擬) を用いることで, 伸展後の形状精度を得ている。そのため, 伸展機構の単純化, 軽量化や打上げ時の小型化, および宇宙空間における確実な伸展が期待できる。特に, 図 1 (b) のよ

うに薄肉円形開断面梁を二重にし, 先端開口部を結合した Bi-STEM は, 曲げとねじりの連成が抑制されるため, 高い比剛性と真直性を示す。

STEM に関する過去の研究では, 真空槽内や微小重力下における実験, あるいはパラメータ調整を行った近似モデルによる数値解析等が行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし, Bi-STEM の力学特性あるいは内外シェル間接触や断面形状の変化がそれらに及ぼす影響は明らかにされていない。物理現象を正確にとらえて解析の信頼性および精度を向上させるためには, Bi-STEM にしたことで生じる特性変化を明らかにすることが重要となる。

そこで本章から第 5 章までにおいて, 内外シェル間接触および断面形状の変化を考慮した Bi-STEM の静的形状を, 汎用解析ソフトウェア ANSYS を用いた非線形静解析によって取得する。次に, 得られた有限要素モデルに対する時刻歴応答解析を行い, Bi-STEM の動的特性を検討する。

3 非線形静解析による Bi-STEM の形状取得

3.1 Uni-STEM 解析モデルの作成

Bi-STEM の構成要素は, 薄肉開断面伸展梁 Uni-STEM である。図 1 (a) に示すように, Uni-STEM は収納リールで巻き取るために固定端が直線状に開いた形状 (以降, 裾開き形状) となっている。また自由端には図 2 のような先端ビスを付けて, 相対変位を拘束している。STEM の材料は, 高比剛性かつ適度な柔軟性を有するサカセ・アドテック製の三軸織 CFRP (TWF-CFRP) として解析モデルに反映した(表 1)。

Uni-STEM の自然な静的裾開き形状を得るために, 図 3 に示す一様断面の薄肉円形開断面梁を作成する。自由端の開口部には先端ビスを模擬する硬いばね要素 ($k = 1.0 \times 10^4 [\text{N/m}]$) を用いて開口部 2 節点を結合している。次に, 固定端節点を図 4 に示すサイクロイド経路に沿って強制変位させて展開する。この過程は大変形問題であるので, Newton-Raphson 法を用いた繰り返し計算によって解を求める。その結果得られた静的形状を図 5 に示す。

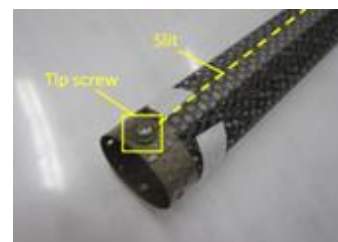


図 2 Uni-STEM 先端ビス

表 1 解析に用いた三軸織 CFRP の材料物性値

Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio ν	Density ρ [kg/m ³]
15.035	0.499	999

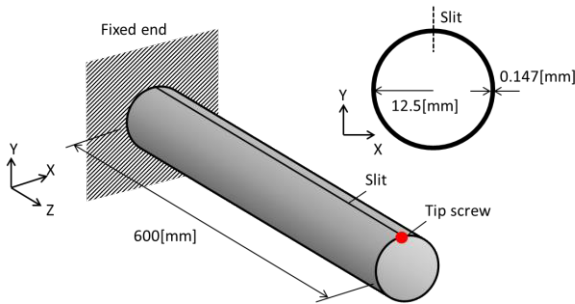


図 3 薄肉円形開断面梁の形状寸法

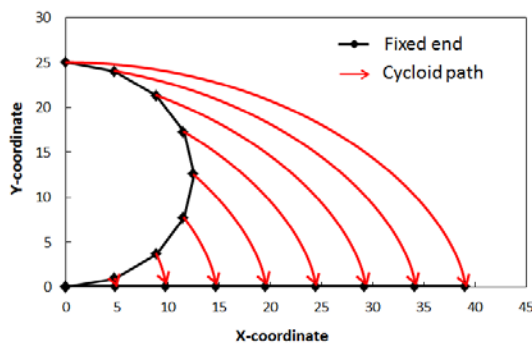


図 4 各節点のサイクロイド経路 (X>0 の部分のみ)

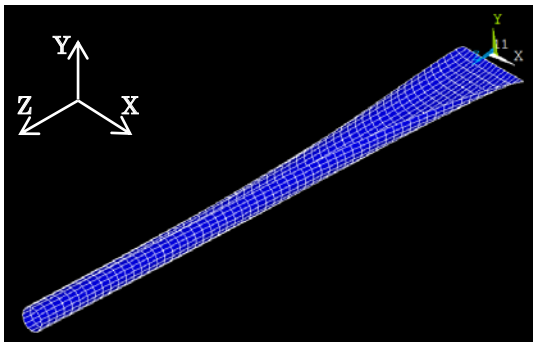


図 5 Uni-STEM の静的形状

3.2 Bi-STEM 解析モデルの作成

前項では、薄肉円形開断面梁の固定端をサイクロイド経路に沿って強制変位させることにより Uni-STEM の静的形状を得た。本項では、前項と同じ寸法の薄肉円形開断面梁を二つ用い、接触解析によって Bi-STEM の静的形状を求める(図 6)。なお、Bi-STEM の先端ビスを模擬するために、図 7 (b) のように 6 つの硬いばね要素 ($k = 1.0 \times 10^4$ [N/m]) を用いて開口部付近の節点を結合する。Bi-STEM 解析モデルの作成手順を以下に示すとともに、得られた静的形状を図 8 に示す。

—作成手順—

- (1) XYZ 空間に内側シェル、外側シェル、剛体平板を作成する。また、あらかじめ図 7 (b) のように 6 つのばね要素を作成しておき、図 7 (a) のように一部のばね要素を無効化(剛性を微小化)する。
- (2) 内外シェルの固定端を前項のサイクロイド経路に沿って展開する。
- (3) 外側シェルの自由端開口部 2 節点に X 方向荷重 $F_x = \pm 4$ [N] を与えて展開する。このとき、外側シェルの剛体平板に押し付けながら展開することにより、外側シェルの長手方向中央付近が自然に展開される。
- (4) 内側シェルの自由端開口部 2 節点に X 方向荷重 $F_x = \pm 4$ [N] を与えて展開する。このとき、外側シェルの剛体平板に押し付けながら展開することにより、外側シェルの長手方向中央付近が自然に展開される。
- (5) X 方向荷重 $F_x = \pm 4$ [N] を徐々に小さくし、外側シェルの自由端を閉じる。
- (6) 剛体平板を -Y 方向に遠ざけることにより、外側シェルの長手方向中央付近が自然に閉じられる。
- (7) 円筒中心を内外シェル固定端の中央に変位させ、図 7 (b) のようにすべてのばね要素を有効化したのち、先端の変位拘束を削除する。

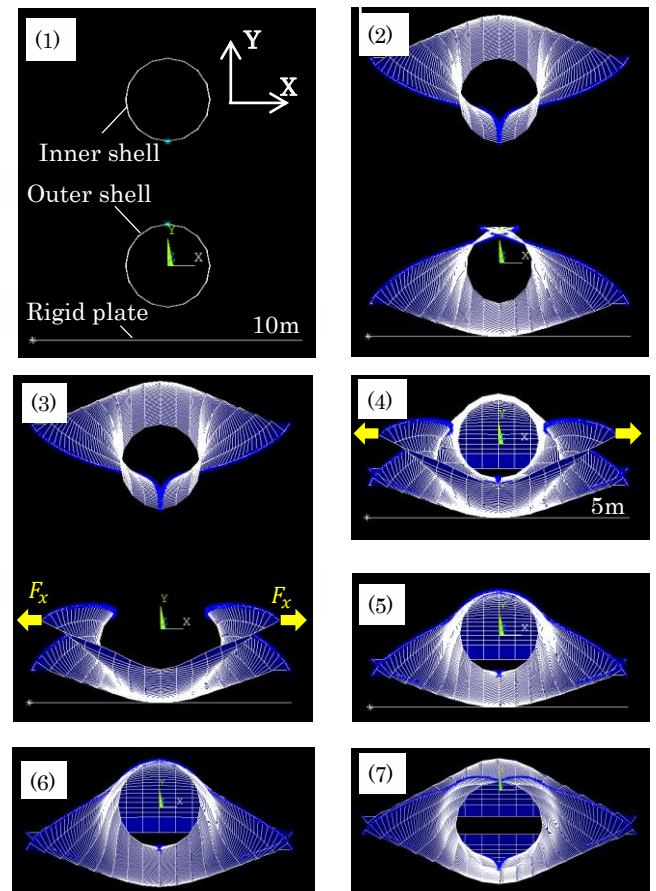
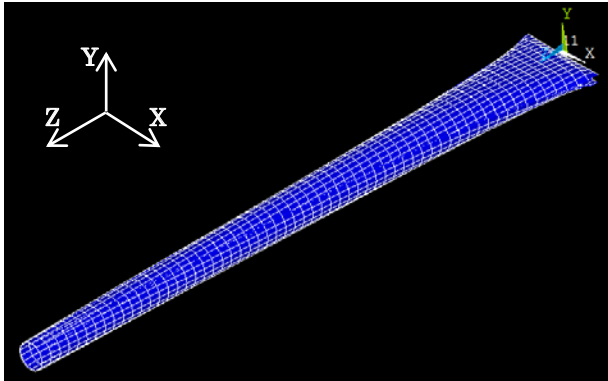
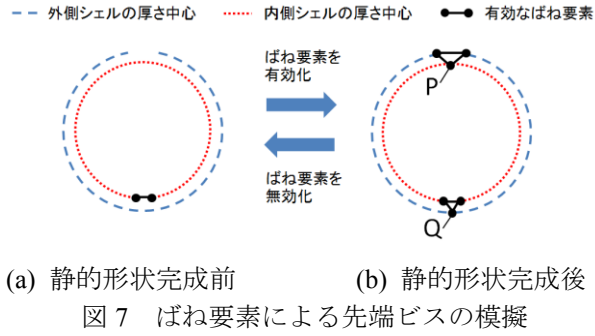


図 6 Bi-STEM 静的形状の作成手順



4 時刻歴応答解析による Bi-STEM の動的特性

Bi-STEM は、内外シェル間の接触問題を含むため、接触面を線形ばねで結合する通常のモーダル解析では正確な固有振動数を算出することができない。そのため時刻歴応答解析を実施して、接触状態の時間変化を考慮した自由減衰振動の変位履歴を求める。この変位履歴をさまざまな内外シェル間摩擦係数について求め、摩擦係数の大きさが振動周期や減衰率に与える影響を調べた。解析には、前節で作成した Bi-STEM 解析モデルを用いた。また表 2 に時刻歴応答解析の解析条件を示す。

図 9 に各摩擦係数に対する Bi-STEM 先端変位の時刻歴応答曲線を示す。摩擦係数の違いにより振動波形が規則的に変化していることがわかる。

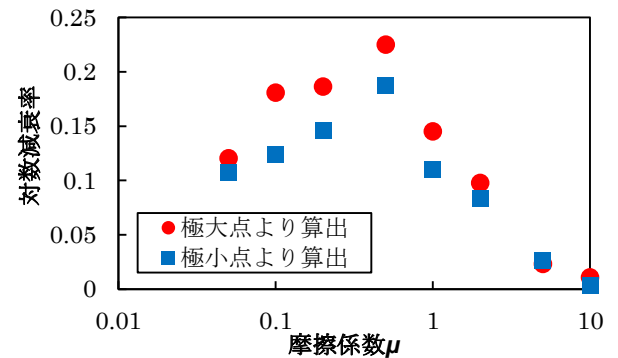
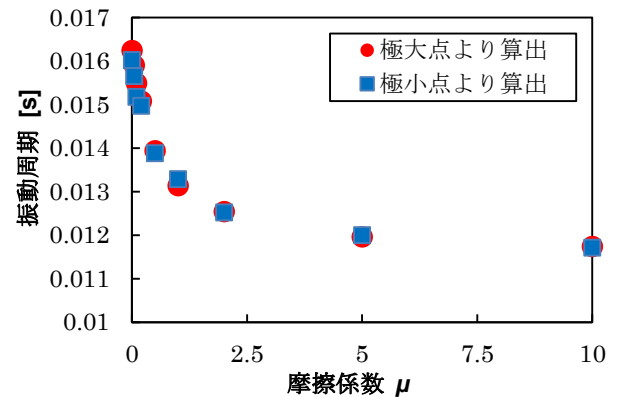
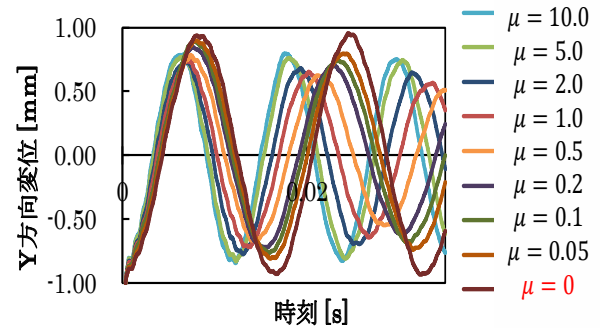
表 2 時刻歴応答解析の解析条件

固定端の拘束条件	根元部末端から $Z = 100$ [mm] の位置を完全拘束
シェル間摩擦係数 μ^{*1}	0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0
初期変位 y_0 [mm] ^{*2}	-1.0
変位履歴 ^{*2}	節点 P, Q (図 7 (b)) の Y 方向変位の平均値

*1 静摩擦係数と動摩擦係数は μ で等しい

*2 変位は静的つり合い位置から計測

図 10 および図 11 に、振動周期および対数減衰率の摩擦係数依存性をそれぞれ示す。振動周期および対数減衰率の算出には、図 9 に示す時刻歴応答曲線の極大点 2 点(あるいは極小点 2 点)の時刻および変位を用いた。図 10 より、振動周期は摩擦係数の増加に伴って単調に減少することが分かる。これは、摩擦力によって接触面が固着し、梁の曲げ剛性が増加したためと予想される。また、図 11 より対数減衰率を極大にする摩擦係数が $\mu = 0 \sim 10$ の間に存在することがわかる。これは、摩擦係数が小さい場合には摩擦力が小さくなり、摩擦係数が大きい場合には固着する接触面の面積が増えるため、いずれの場合も (摩擦力) $\times$ (接触面の滑り速さ) で表されるエネルギー散逸率がモデル全体で小さくなることが要因と考えられる。



5 Bi-STEM に関する研究のまとめ

非線形静解析により、固定端付近における断面形状の変化および内外シェル間の接触を考慮した Bi-STEM の静的形状を取得した。

得られた Bi-STEM 解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行い、自由減衰振動の変位履歴を求めた。その際、内外シェル間摩擦係数を変化させ、摩擦係数が Bi-STEM の振動周期や対数減衰率に及ぼす影響について調べた。その結果、振動周期は摩擦係数の増加に伴って単調に減少し、摩擦係数依存性は大きいことが分かった。また、対数減衰率はある摩擦係数($0 < \mu < 10$)で極大値をとることが分かった。

今後は、X 方向曲げ振動やねじり振動の時刻歴応答も求め、Bi-STEM の力学特性を詳細かつ体系的に検討可能な数学モデルを完成させる予定である。

6 SMA-BCON ブームの概要と研究目的

STEM ブーム同様に軽量かつ高剛性伸展ブームとして BCON ブームが近年開発され、盛んに研究されている。BCON ブームとは、コンベックステープ 2 枚を断面が楕円型になるように組み合わせ、その外周を収縮性と伸長性に優れた組紐によって拘束されたブームである。コンベックステープは組紐内で長手方向にスライドすることが可能なため、収納（巻き付け）時の周長差を許容しながらコンパクトに収納できることが特徴である。

また一般的なコンベックステープ（ばね鋼など）を用いた場合、収納時の弾性エネルギーを解放することで展開する。そのため、安定した展開を実現するためには断続展開 (Step-wise Deployment) や減衰器などにより展開力を制御しながら展開する必要がある。また収納時の巻き付け部形状によって展開力は変化する。巻き付け部の形状が四角形の場合には、BCON ブームは四角形の頂点でのみ曲げられるため、一般的なコンベックステープを用いた場合には展開力のロスが懸念される。

そこで本章から第 9 章において、展開力の制御、また小型・超小型衛星のデ・オービット機構への応用を視野に入れて新たに考案した「SMA-BCON ブーム」について紹介する。

小型・超小型衛星の形状は、本衛星との相乗りや射出機構の制約から立方体が一般的であり、ま

た衛星内部はミッション・バス機器で満たされデ・オービット機構を搭載するスペースが確保できないことを前提となる。そのため SMA-BCON ブームは衛星の外周に配置されると想定し、収納時の変形部（四角形の頂点部）にのみコンベックス形状の形状記憶合金（SMA）を適用し、四角形の辺に沿った直線部分は軽量化ブームとして設計した。これにより軽量化と展開力のロスが解決されると考えた。また形状記憶合金の形状回復力を用いて展開が行われるため、加熱量を制御することで展開力制御もかくなる。以上をコンセプトとして考案した SMA-BCON ブームにおいて、実験室規模の概念モデルを製作し、展開実験を行うことで概念検証を行った。

7 SMA-BCON ブームの概念モデル設計・製作

7.1 SMA-BCON ブームの概念モデル

SMA-BCON ブームの概要を図 12 に示す。変形部には Ni-Ti 合金の SMA を使用し、変形しない直線部にはアクリルの板材（板厚：3mm）を肉抜きして使用した。SMA はコンベックステープのように曲率断面を有する板材として形状記憶されている。今回用いた SMA の変態温度は約 60 度である。SMA とアクリル板は両面テープとカプトンテープで固定した。SMA とアクリル板の接合部寸法がブーム全体の曲げ剛性に影響を与えることから、自重を用いた簡易的な曲げ・ねじり試験により結合部の長さ、幅の寸法は決定した。SMA の加熱はニクロム線を用いた。高温接着性に優れた金属用接着剤で SMA の内壁にニクロム線を一筆書きの波状に接着した。また展開時の温度を計測するため、SMA 表面にシートタイプの熱電対を取り付けた。それらセンサーも含め組紐によって被覆することで SMA-BCON ブームの概念モデルを製作した。製作後の SMA-BCON ブームを図 13 に示す。

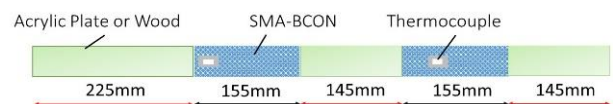


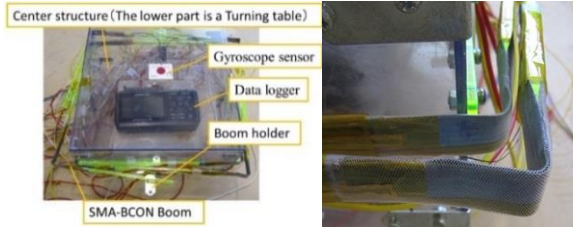
図 12 SMA-BCON ブームの概念図



図 13 製作後の SMA-BCON Boom

7.2 収納部の製作と展開構造物の概念モデル

収納部は 1 辺 30cm の正方形のボックスとし、塩ビ板（板厚：3mm）で製作した。展開力によるボックスの回転運動の影響を考慮し、ボックス底面にベニヤ板とスラストベアリングを用いて回転テーブルを設置した。ボックス内には熱電対用の計測ユニットとジャイロセンサーを設置した。製作した展開構造物の概念モデルを図 14 に示す。



(a) 実験装置の概要 (b) ブーム収納状態

図 14 SMA-BCON ブームの展開実験モデル

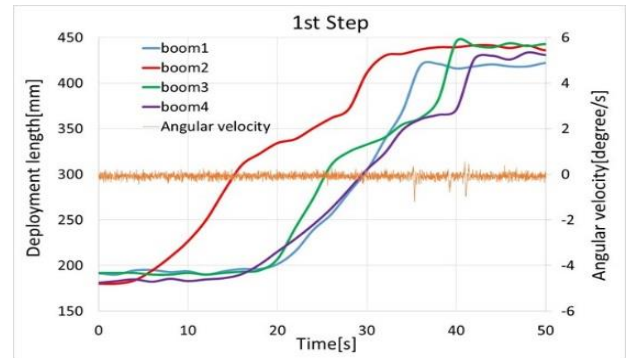
8 SMA-BCON ブームの展開実験

8.1 SMA-BCON ブームのみによる展開実験

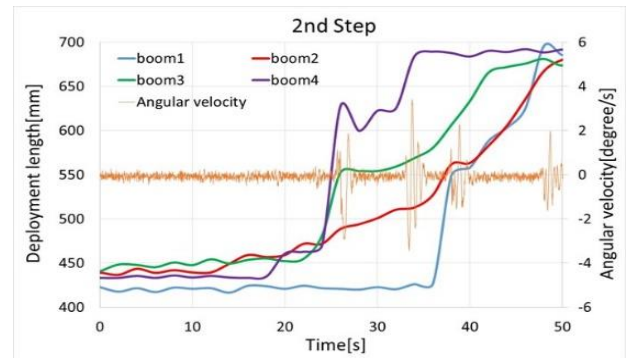
7 章で述べた概念モデルを用いて展開実験を行った。図 12 にあるように、1 本のブームに SMA は 2 か所あるため 2 段階の展開となる。ブームは全部で 4 本あるため、SMA を加熱するニクロム線は全部で 8CH だが、直流電源の CH 数の上限から 4CH によって電力を供給した。ニクロム線と直流電源は並列に接続した。展開実験は、3 種類の供給電圧、電力を用いて行った。直流電源との配線方法、実験条件を表 3 に示す。また自重の影響を考慮し、展開時はひもでブーム先端を吊って実験を行った。展開実験の代表例として、10 [V] の電圧をそれぞれのニクロム線に供給して展開させた Case 2 の結果を図 15 に示す。また図 16 に、展開時の SMA の温度変化を示す。図 15 において、横軸は時間、左縦軸はボックス中心からブーム先端までの距離、右縦軸にはジャイロセンサーで計測した中心構体の角速度を示している。

Case 1 は各所におけるニクロム線の抵抗値の違いを考慮して、ニクロム線に流れる電流が約 1 [A] に

なるように電圧を調整して展開させた。Case 2 は 10 [V] の一定電圧を供給し、Case 3 では 10 [W] の一定電力をニクロム線に供給した。それぞれの場合において、図 15 のように各ブームの展開長の実線が重なっている場合は同期展開、重ならない場合は非同期展開である。非同期展開の場合、ブームの展開時反力により中心構体が振動し、中心構体に角速度が生じていることが示されている（図 15 (b)）。図 15 (a) においては、ブーム長が短いため反力が小さいことも原因ではあるが、赤線で示した Boom 2 以外が同期的に展開しているため、展開完了時の反力が小さくなったと考えられる。



(a) 1段階目 展開



(b) 2段階目 展開

図 15 SMA-BCON ブームのみの展開実験結果
(供給電圧：10V)

これらの考察は Case 1, 2, 3 のすべてに共通した結果である。また図 16 の温度変化を見ると、1 段階目の展開において Boom 3（緑色の実線）が、2 段階目展開において Boom 4（青色の点線）の温度が急激に高くなっている。その影響として温度が急上昇した 20 秒後以降、Boom 4 のみ他のブーム

表 3 ブームのみの展開実験における供給電圧、電力値

		1段階目		2段階目	
		Boom 1,2	Boom 3,4	Boom 1,2	Boom 3,4
供給電圧または電力	Case 1	6.3 V	8.0 V	7.6 V	7.3 V
	Case 2	10 V	10 V	10 V	10 V
	Case 3	10 W	10 W	10 W	10 W

より先に展開している。各ブームの温度変化に差が生じた原因としては、ニクロム線と直流電源の接続不良、またはニクロム線の接触によるショートなどが考えられるが、特定はまだできていない。

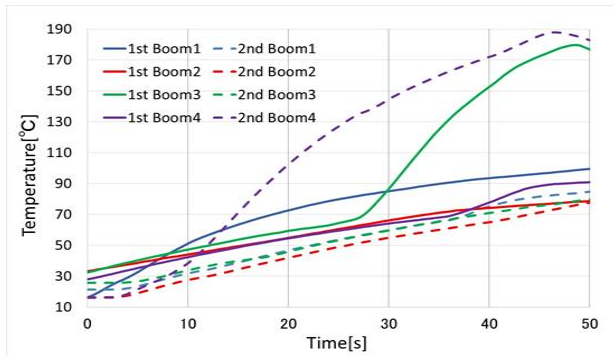
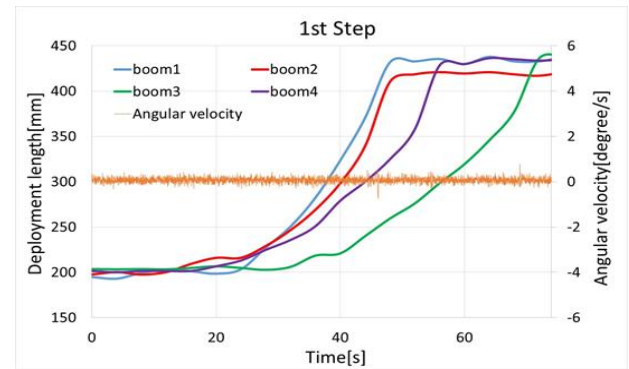


図 16 展開時の SMA の温度変化 (供給電圧: 10V)

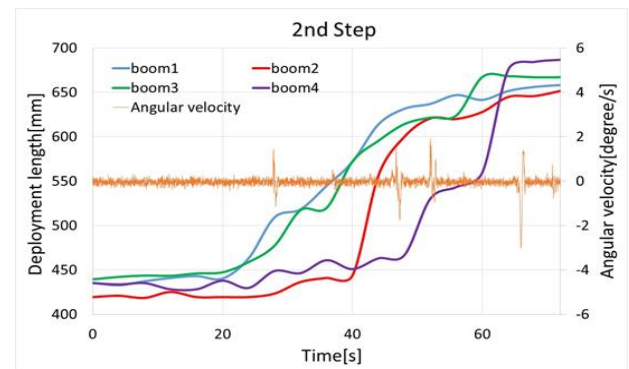
8.2 ブーム間をケーブルで繋いだ場合の展開実験
各ブームの非同期展開は、ブーム間に張られた膜面を介して同期展開に近づくと考えられる。そこで膜面を模擬したケーブルをブーム間に張り、非同期展開時に生じる張力の影響について展開実験により確認した。ブーム間に張るケーブルの本数 (1, 2, 3 本の 3 パターン) をパラメータとして実験を行った。そのためニクロム線に供給する電力は一定とし、各ニクロム線に 1 [A] の電流が供給されるように設定した。ブーム間に 3 本のケーブルを張ったパターン 3 の展開挙動を図 17 に、また実験結果を図 18 に示す。

図 18 と図 16 の比較より、ブーム間をケーブルでつなぐことで 4 本のブームの同期性が向上したと考えられる。また展開の同期性はブーム間を結ぶケーブルの本数が増すごとに向上した。特に図 18 (b) の Boom 2 (赤色) において、隣り合う Boom 1

(水色) の展開が先に行われたことにより、Boom 2 の展開も同調したと考えられる。その挙動が図 17 (e), (f), (g) においても示されている。Boom 4 (青色) においては、Boom 3 から張力が与えられケーブルが張った状態になっているが、展開の初期状態にその作用が働かなかったために展開の終盤で Boom 3 に引き寄せられて急激に展開したと考えられる (図 18 (b) 50 ~ 60 [s])。



(a) 1 段階目 展開



(b) 2 段階目 展開

図 18 展開実験結果 (3 本のケーブルの場合)

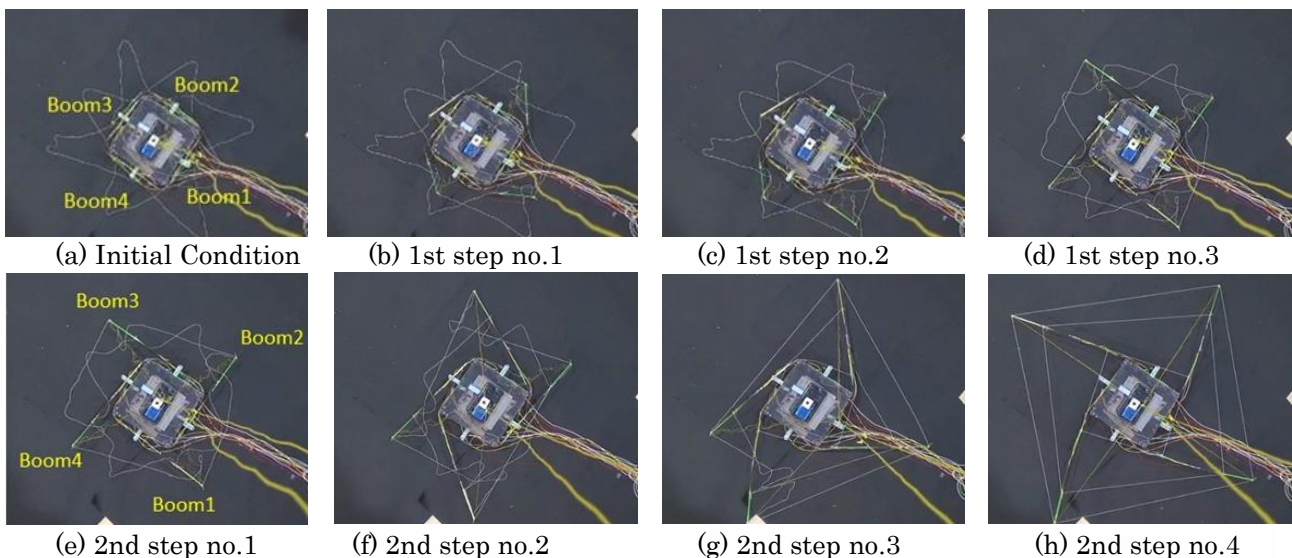


図 17 各ブームの展開挙動

9 SMA-BCON ブームに関する研究のまとめ

形状記憶合金の形状回復力を用いた展開力制御可能な BCON ブームとして, SMA-BCON ブームを提案した. 曲率を有する SMA 板材を 2 枚組み合わせ, その外周を組紐で被覆することで SMA-BCON ブームの概念モデルを製作した. また SMA-BCON ブームの利点を活かせる四角形中心構体の外周に収納した展開構造物の概念モデルを製作し, 展開実証を行った. ニクロム線による SMA の加熱により, 収納状態から SMA-BCON ブームは展開し, 各ブームの展開同期性と展開挙動について考察した. また膜面を模擬したケーブルをブーム間に張ることで, ブーム間の展開速度の差が緩和され, 同期展開が促進されることも明らかになった. SMA の均等加熱と温度制御は今後の課題である.

10 おわりに

近年の宇宙構造物における高精度化と大型化の課題に対して, 展開宇宙構造の観点から重要となる伸展ブームに着目した 2 つの研究について成果を示した.

Bi-STEM ブームについて, 接触を考慮した非線形静解析によって, Bi-STEM の静的形状を取得した. また得られた Bi-STEM 解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行い, 自由減衰振動の変位履歴を

取得した. 内外シェル間摩擦係数が Bi-STEM の振動周期や対数減衰率に及ぼす影響について解析的に考察し, 摩擦係数依存性の影響が大きいことが明らかとなった. 今後は, Bi-STEM の力学特性を詳細かつ体系的に検討可能な数学モデルの構築が課題である.

次に既存の組紐被覆コンベックステープブームの新たなタイプとして提案した SMA-BCON ブームについて, 概念モデルの設計・製作と展開実験により概念検証を行った. 展開実験を通じた概念実証には成功した. SMA の加熱方法, 加熱による形状回復力の制御, また各ブームが同期展開するための制御方法などは, 今後の課題である.

文献

- (1) Ken Higuchi et al.: Design and Evaluation of an Ultra-light Extendible Mast as an Inflatable Structure, AIAA 006-1809, SDM, USA, (2006.5).
- (2) Ken Higuchi et al.: Verification of Practical Use of an Inflatable Structure in Space, Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol.7, No.ists26, pp.Tc7-Tc11, (2009).
- (3) Yoshiro Ogi et al.: Effect of Attachment Errors of Flexible Appendages on the Spin Axis of a Rigid Body, Aerospace Technology Japan, Vol.10, No.ists28, pp.Pc_7-Pc_12, (2012.3).
- (4) <http://www-civ.eng.cam.ac.uk/dsl/research/sak/>
- (5) 渡邊秋人, 他, 「組紐を被覆した伸展構造物の検討」, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2007, 2012 年 10 月, 別府.
- (6) 渡邊秋人, 他, 「組紐被覆ブームの軽量化検討」, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2013 年 10 月, 米子.

Surface Shape Measurement by Grating Projection Method in Aerospace Structures

Ken HIGUCHI^{*1*2}, Motoharu FUJIGAKI^{*3}, Takayuki SHIOKAWA^{*4},
Naoko KISHIMOTO^{*5}, and Takashi IWASA^{*6}

(Received 28th November 2014, Accepted 22nd January 2015)

Abstract

To improve the accuracy of the grating projection method of a surface shape measurement method without contact, several attempts are proposed and verified. A whole-space tabulation method (WSTM) is demonstrated to measure a translucent glittering metallic mesh of a parabolic antenna for a radio astronomy satellite. A transference method of the grating projection method is proposed to measure a glossy polymer film often used in space structures. An extrapolation method is proposed to measure a larger object than the reference planes. A pre-calibration can be used to adjust the measured value to the real values. The extrapolation method and the pre-calibration are demonstrated to measure a displacement of a wing of a developing airplane under loading.

Keywords: Surface Shape Measurement, Grating projection method, Whole-space tabulation method, Translucent metallic mesh structure, Polymer membrane structure, Aircraft structure

1 INTRODUCTION

Precise large aerospace structures have been required for future and contemporary aerospace mission. Especially, space structures need to be measured in situ on orbit precisely. Even in the case of the development phase of them on the earth, they have to be measured repeatedly within the rigorous accuracy requirement. They are often membrane structures or metallic mesh structures due to the requirements of light-weight and compactness during the transportation. Airplane surface also consists of flat planes and curved planes, and the large surface shape and the displacement under loading have to be measured easily with high precision.

A photogrammetric measurement using grating projection method^{1),2)} is a prospective candidate to satisfy such requirement. The grating projection method can measure the three-dimensional coordinates of an object by a pixel-to-pixel basis. So, the method can provide the surface shape of the object with a greatly high spatial resolution. The effectiveness is to investigate by measuring several aerospace structures in this paper.

2 MEASUREMENT PRINCIPLE

2.1 General principle of grating projection method and Whole-space tabulation method used for mesh measurement

Optical methods for performing surface profile measurements have been extensively studied^{3),4)}. A grating projection method is often used as a technique to measure the shape of an object without contact. Several phase analysis methods for grating projection method have been proposed⁵⁾⁻⁷⁾.

The calibration method is important for accurate shape measurement. Therefore, several methods that use a reference plane or planes for calibration have been proposed for accurate shape measurement⁸⁾⁻¹²⁾.

*1 Muroran Institute of Technology, College of Design and Manufacturing Technology

*2 Muroran Institute of Technology, Aerospace Plane Research Center

*3 Wakayama University, Faculty of System Engineering

*4 Wakayama University, Graduate student.

*5 Setsunan University, Faculty of Science and Engineering

*6 Tottori University, Faculty of Graduate School of Engineering

Some of the authors also proposed a whole-space tabulation method (WSTM)¹³⁾⁻¹⁵⁾ that uses reference plane repeatedly. This method excludes lens distortion and the intensity warping of the projected grating in measurement results theoretically.

In this study, the authors applied the WSTM to measure a translucent metallic mesh object. The specimen is an extendible large-scaled antenna used for radio astronomy satellite ASTRO-G, which is a space radio telescope in Japan. A grating pattern naturally transmits the translucent mesh object. The unnecessary transmitted grating pattern is taken by the camera, too. The transmitted grating pattern image and the reflected grating pattern from the surface of the object are superposed, and this causes measurement errors. This chapter describes an optical setup that avoids this problem.

Figure 1 shows the principle of the calibration of the grating projection method. Figure 2 shows schemata of the calibration tables of z coordinates from phase q , used in the WSTM. The phase interval of the table elements is chosen according to the required resolution of the coordinates. The coordinate of each table element is produced by interpolation.

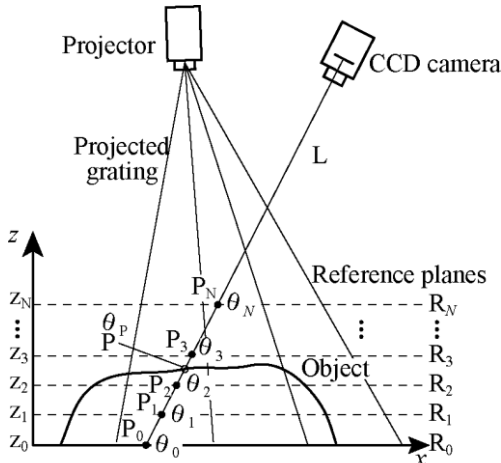


Fig. 1 Principle of the calibration method using whole-space tabulation

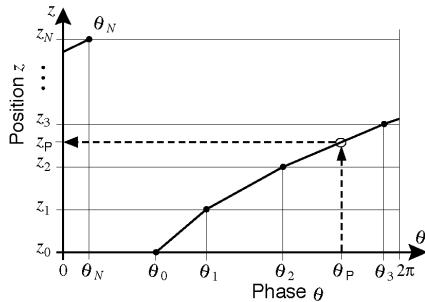


Fig. 2 Schema of calibration tables used to z -coordinates from phase q

The phase shifting method using Fourier transform (PSM/FT)¹⁵⁾ is useful for analyzing the phase of a projected grating for the following reasons.

- 1) The phase can be obtained from the change in brightness at a point regardless of the shape of a 3-D object.
- 2) The original pattern of an object does not influence the phase.
- 3) The accuracy is high because of the elimination of noise including that in high frequency components.

To expand measurable range, phases are applied unwrapping method¹⁶⁾.

2.2 Optical setup of mesh object

Figure 3 shows the optical setup of the measurement system. The distance from the camera to flat plane is 2,300 mm. The distance from the camera to the projector is 1,300 mm. The backlight is a switch for the fixed 2-D grating. When the switch is turned off, the fixed 2-D grating disappears. When the switch is turned on, the fixed 2-D grating appears. One of the purposes of the experiments was to confirm the measurement precision of the 90% light-permeable object. Phases are obtained even if the coordinate is out of measurable range on the back wall. Distinguishing the thing from the range where phase can be measured on the background is not possible. Using these phase distribution, wrong coordinates coexists with right coordinates. Figure 4 shows the panel setting for measurements of translucent object. The shadow of the panel avoids the background associated with using the panel.

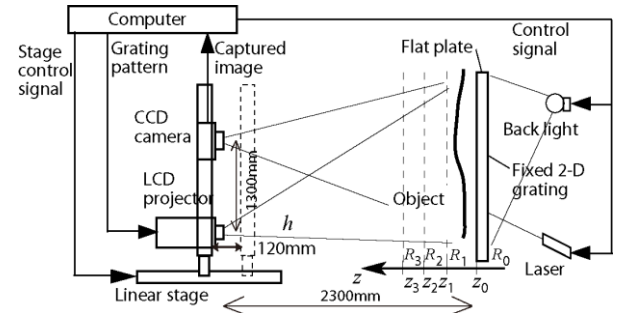


Fig. 3 Optical setup

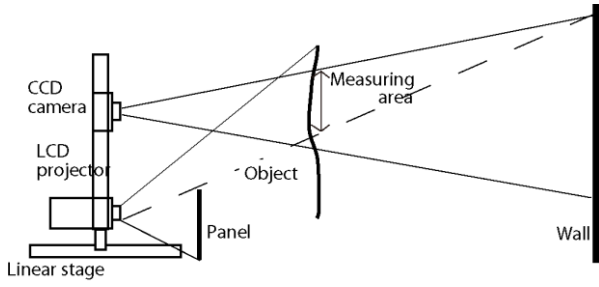


Fig. 4 Panel setting for measurement of translucent object

2.3 Shape measurement of mesh object with step model

Figure 5 shows a sample mesh object with known step distance. Figure 6 shows a step height distribution of the step mesh model. The red rectangular areas on each step in Fig. 6 are analysis areas. Images are thinned out from a size of 1600 x 1200 pixels to a size of 400 x 300 pixels. The table elements in the WSTM are divided into 1,200 elements, each 125 mm in size. Table 1 shows height distribution chart of the step mesh model. Table 1 shows the comparison of the z distribution at marker position on the mesh surface measured by a laser displacement meter. The translucent metallic mesh can be measured by the grating projection method.

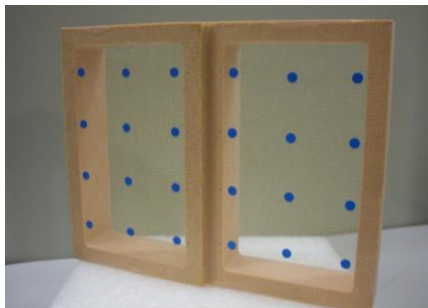


Fig. 5 Mesh model with known step

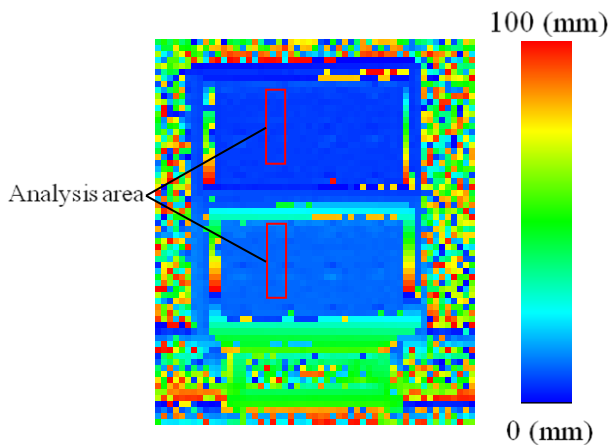


Fig. 6 Height distribution image of Fig. 5

Table 1 Comparison of height between proposed method and a laser displacement meter

	Grating Projection Method with WSTM		Measured by Laser Displacement Meter	
	1st Step	2nd Step	1st Step	2nd Step
Average Height	0.05	5.29	0.00	4.96
Standard Deviation	0.28	0.31	0.07	0.06
Step Difference	5.24		4.96	

Unit[mm]

2.4 Shape measurement of mesh parabolic antenna

A parabolic antenna used for a satellite is made of a translucent metallic mesh. The precise measurement of the profile irregularity of the parabolic antenna surface is important.

The aim of this experiments is to measure the mesh parabolic antenna. Figure 7 shows the mesh parabolic antenna object. Figure 8 shows a gratings image of the translucent and glittering metallic mesh parabola. Figure 10 shows an analytical photographic image of a parabolic mesh antenna. Figure 10 shows the phase distribution of Fig. 8. This phase distribution was obtained by PSM/FT with 10 and 16 pitches. Figure 11 shows a 3D model of the image featured in Fig. 8. Figure 12 shows a height distribution image of Fig. 8 by color. Figure 13 shows height distribution shown as lines A, B, C illustrated in Fig. 12. The x position of the bottom line ranges from -750mm to 750mm. The size of sample mesh and radio wave test model is 1.5m x 1.5m. Line A shown in Figs. 12 and 13 is upper area of antenna. Line B shown in Figs. 12 and 13 is middle area of antenna. Line C shown in Figs. 12 and 13 is neat to the bottom of the antenna. Measurement accuracy of this experiment is almost the same as experiment of section 2.3. Because of the optical setup of the measurement system is the same as experiment of section 2.3. Figure 14 shows height distributions comparison of a laser displacement meter to WSTM of the mesh parabolic antenna object.



Fig. 7 Parabolic mesh antenna for radio wave test model for ASTRO-G satellite

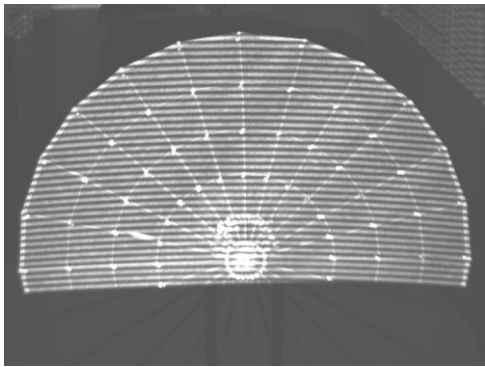


Fig. 8 Grating image of the mesh antenna

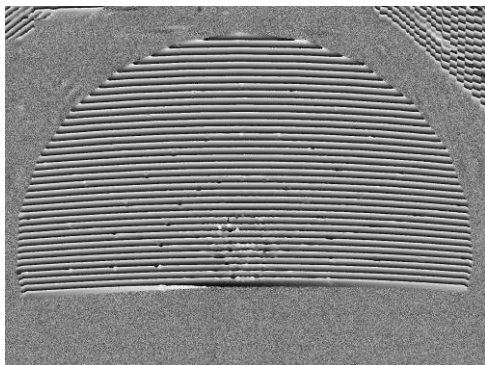


Fig. 9 Phase distribution

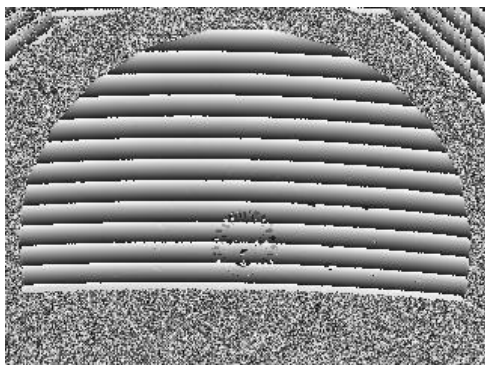


Fig. 10 Unwrapped phase distribution

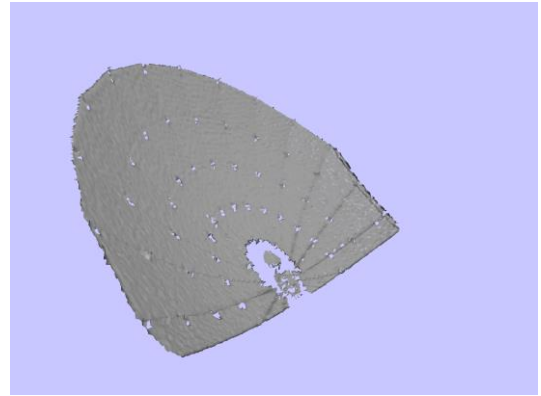


Fig. 11 3D-model of Fig.7

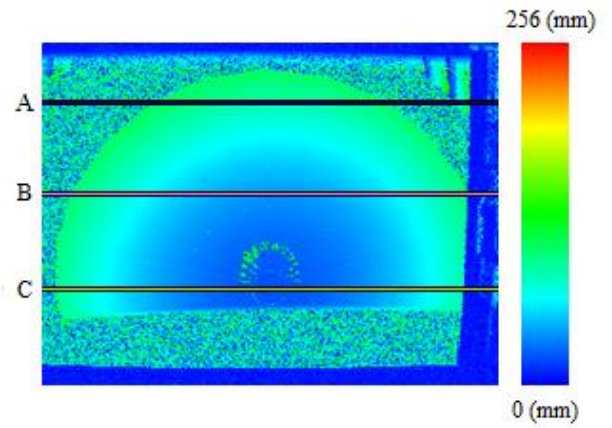


Fig. 12 Height distribution coloring image of the parabola

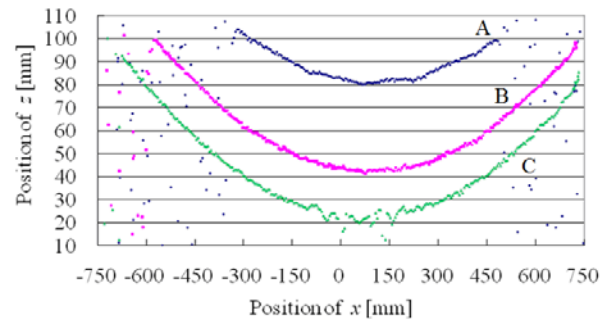


Fig. 13 Height distribution along lines A, B, and C in Fig.12

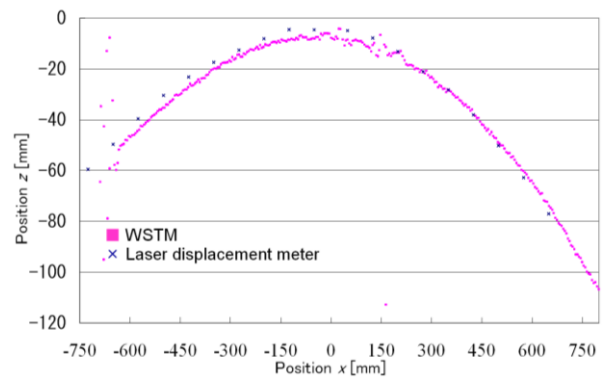
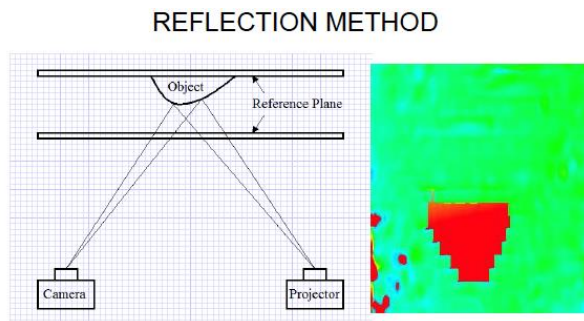


Fig. 14 Height distributions compare laser displacement meter and WSTM

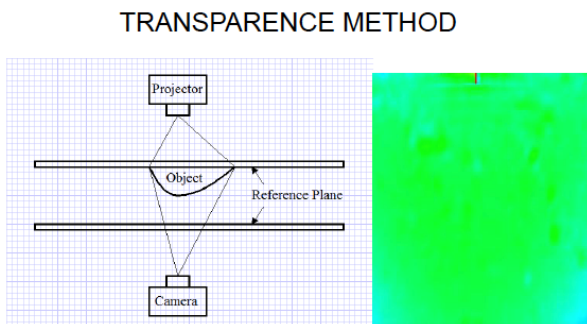
3 TRANSPARENCE METHOD TO MEASURE GLOSSY FILM

Surface shape measurement by an optical method without contact should be applicable for a glossy surface, because space membrane structures are made of polymer film in many cases, and the surface is generally reflective and lambent. Grating projection method needs to light the measurement object by a projector, and the reflected light is photographed, so the gloss reflection of polymer film can be the cause of measurement error. The trial to utilize the grating pattern of the transmitted light through the object film is named here as ‘transparency method’ as against the normal ‘reflection method.’

A surface shape of a suspended rectangular polyimide film is measured to utilize the transmitted light to prevent the gloss effects for the measurement. Polyimide is mostly used film material in space structures. Figure 15(a) illustrates the apparatus set-up and the measurement result of the usual reflection method, and figure 15(b) shows the apparatus set-up and the measurement result of the proposed transparency method. The induction of glossy part in the reflection method is avoided and the whole area can be measured successfully by the proposed transparency method.



(a) Usual reflection method

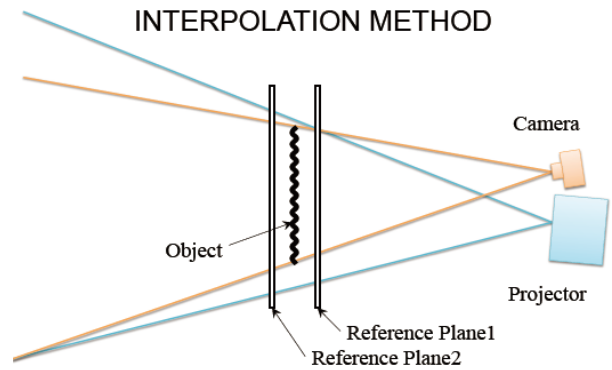


(b) Proposed transparency method

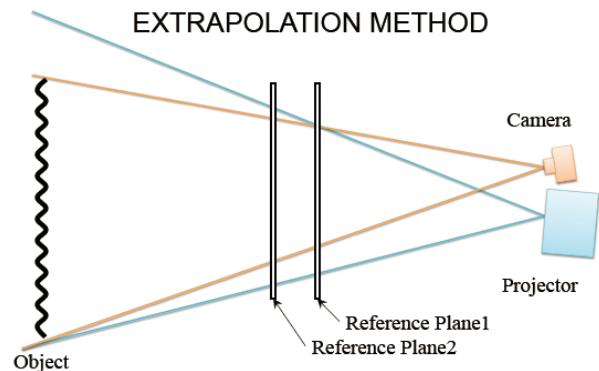
Fig. 15 Measurement setup of glossy film

4 EXTRAPOLATION METHOD TO MEASURE LARGE SURFACE

In the case of a grating projection method, a measurement object has to be set between two reference planes, and the imaginary three-dimensional coordinates arise between the reference planes. The coordinate values are calculated by a linear interpolation. Therefore, the size of the measurable region is within the size of the reference planes. In the case that a large space structure has to be measured, the constraint condition that the reference plane must be larger than the measurement object should be prevented in the practical usage in orbit. The grating projection method needs two reference planes in principle, so an idea to put the measured object at the back of the two reference planes, and the three-dimensional coordinates of the object is calculated in an extrapolative manner. The method to measure the object larger than the reference planes by arranging it at the back of the two reference planes is called here as ‘extrapolation method,’ and the method of usual setup by arranging the measurement object between the two reference planes is called here as ‘interpolation method.’ The difference of the two setups is illustrated in Fig. 16.



(a) Principle of interpolation method



(b) Principle of extrapolation method

Fig. 16 Arrangement of grating projection method

The extrapolation method will be suitable for practical use in space to measure a large structure, however, the measurement accuracy seems to be degraded by the extrapolation. The proposition of the extrapolation method should be accompanied by some sort of accuracy improvement idea. Two improvement strategies are put forward: a geometrical calculation method of coordinate values and a pre-calibration method.

In the case of interpolation method, the coordinate values are calculated by an assumption of linear relation between the phase of the sinusoidal gratings and the object position. This assumption is beneficial, if the distance between the two reference planes is small and the measurement object is set within the two reference planes. The assumption, however, does not hold good, if the linear extrapolation does not work well.

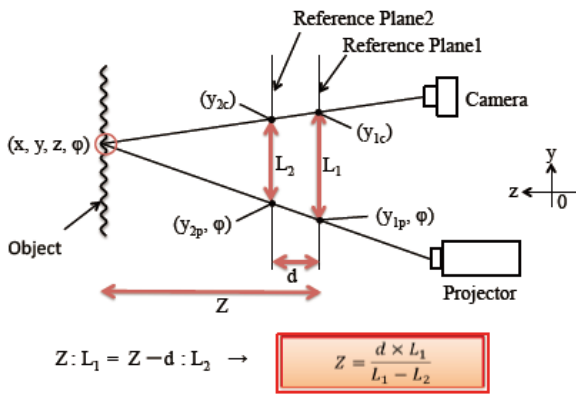


Fig. 17 Geometrical calculation of position of object surface from phase of reflected gratings

A strategy to measure the object position precisely is based upon the geometrical calculation according to the strict definition of position. The coordinate value of object can be determined geometrically, as shown in Fig.17, without any approximation. This is true and applicable even for the object between the two reference planes as usual grating projection method, although usually a linear interpolation calculation to obtain the coordinate values is much easier than the geometrically strict calculation, as long as the linear interpolation can keep good accuracy.

A second improving strategy is the活用application of pre-calibration. In the case of pre-calibration method, each known position is preliminary measured step by step, and the calibration table between the measured values and true values is made. The

measured object surface is calibrated with reference to the calibration table.

Figure 18 shows the correction degree of the pre-calibration values and the geometrical calculation in reference to the true values. The geometrical calculation does not necessarily 必要need the pre-calibration even in the case of the extrapolation method, according to the accuracy requirement. The pre-calibration method, however, is easy to apply without the rigorous geometrical calculation.

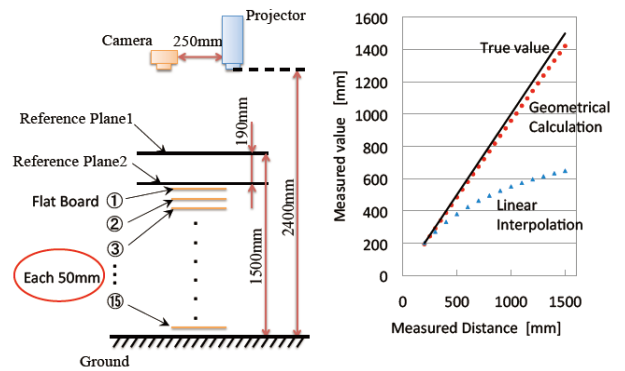


Fig. 18 Pre-calibration and the correction table

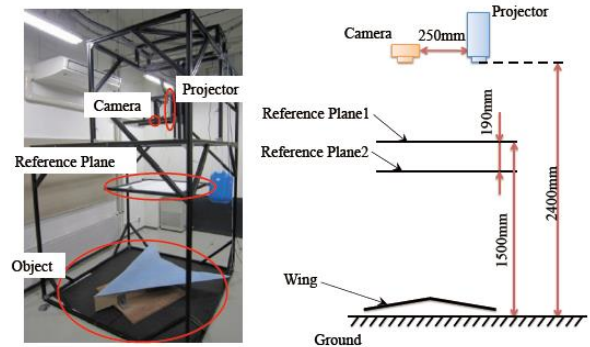


Fig. 19 Measurement example of a large object by the extrapolation method

Figure 19 shows the measurement example: the displacement measurement of a main wing of an aircraft under loading. The aircraft is Oowashi No.1, which is a prototype under development aiming at supersonic flight in Muroran Institute of Technology, Aerospace Plane Research Center (APReC) as shown in Fig. 20. The measured displacement is compared with the true value measured by a slide caliper, as shown in Figs. 21, 22 and table 2. The accuracy is practically good enough.

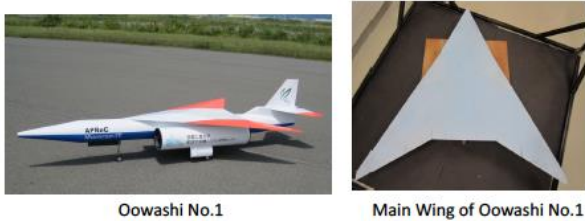


Fig. 20 Oowashi No.1 prototype aircraft

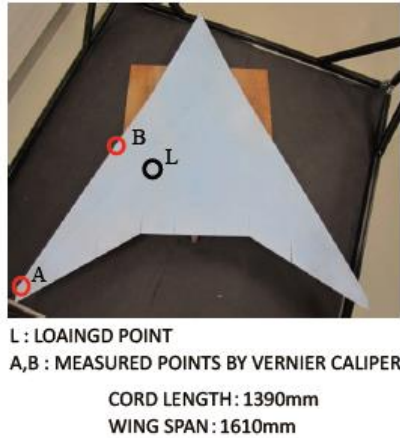


Fig. 21 Measurement points of displacement on the wing of an aircraft

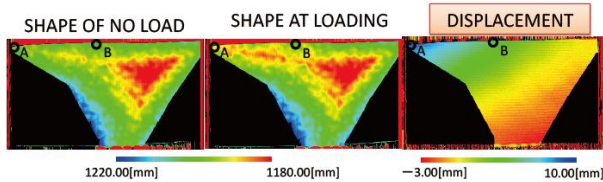


Fig. 22 Measurement results of displacement of a wing under loading as a large plate structure by the extrapolation method

Table 2 Comparison of displacement measurement in Fig.22

	DIAPLACEMENT BY GAUGE [mm]	DISPLACEMENT BY PROPOSED METHOD [mm]	ERROR [mm]
POINT A	9.96	9.36	-0.60
POINT B	5.53	4.94	-0.45

5 CONCLUTIONS

The grating projection method can provide high accuracy to measure 3-D shape of even a translucent and glittering metallic object. In this study, the WSTM was applied to measure precisely the shape of a

translucent metallic mesh antenna of parabolic surface used for a radio astronomy satellite. The effectiveness of this method for shape measurement of such a surface nature object was confirmed in high precision, although the grating projection method was thought to be inappropriate for such an object of a translucent and glittering metallic mesh.

A surface shape of glossy polymer film often used in space structures can be measured by using the proposed transparence method of the grating projection method.

An extrapolation method was also proposed to measure large space structures. The extrapolation method can measure larger object than the reference planes. In this case, two accuracy improvement strategies are proposed. One is a pre-calibration method, and a second is a geometrical calculation method to get the coordinate values without approximation. The extrapolation method, with the geometrically strict calculation and the pre-calibration, was applied to measure the displacement of a main wing of an aircraft under loading.

ACKNOWLEDGMENT

This study was partly funded by Grant-in Aid for Scientific Research by the Japanese Ministry of Education, Science and Culture. This study was also partly funded by ISAS/JAXA's Strategic Research Grant.

REFERENCES

- (1) Tay, C.J., Thankur, M. and Quan, C.: Grating Projection System for Durface Contour Measurement, *Applied Optics*, (2005), **44**, 8, pp.1939-1400.
- (2) Fujigaki, M. and Morimoto, Y.: Shape Measurement with Grating Projection Using Whole-Space Tabulation Method, *Journal of JSEM*, (2008), **8**, 4, pp.92-98. (in Japanese).
- (3) Chen, F., Brown, G. M. and Song, M.: Overview of Three-dimensional Shape Measurement Using Optical Methods, *Opt. Eng.*, **39**-1 (2000), 10-22.
- (4) Tomohiro, S.: Profile Measurement and Analysis Technology Employing Laser Beam, *Japan Science and Technology Agency*, **57**-8 (2006), 559-563.
- (5) Takeda, M. and Mutoh, K.: Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-D Object Shapes, *Applied Optics*, **22**-24 (1983), 3977-3982.
- (6) Asundi, K. and Zhou, W.: Mapping Algorithm for 360-deg Profilometry with Time Delayed Integration Imaging, *Optical Engineering*, **38**-2 (1999), 339-344.
- (7) Sitnik, R. and Kujawinska, M.: Digital Fringe Projection System for Large-volume 360-deg Shape Measurement, *Optical Engineering*, **41**-2 (2002), 443-449.

- (8) Zhou W.-S., Su X.-Y.: A Direct Mapping Algorithm for Phase-measuring Profilometry, *Journal of Modern Optics*, **41**-1 (1994), 89-94.
- (9) Asundi, A. and Wensen, Z.: Unified Calibration Technique and its Applications in Optical Triangular Profilometry, *Applied Optics*, **38**-16 (1999), 3556-3561.
- (10) Su, X. Song, W. Cao, Y., and Xiang, L.: Phase-height Mapping and Coordinate Calibration Simultaneously in Phase-Measuring Profilometry, *Optical Engineering*, **43**-3 (2004), 708-712.
- (11) Ha, T., Takaya, Y., and Miyoshi, T.: High-precision On-machine 3D Shape Measurement Using Hypersurface Calibration Method, *Proc. SPIE*, 5603 (2004), 40-50.
- (12) Yen, H. N., Tsai, D. M., and Yang, J. Y.: Full-field 3-D measurement of solder pastes using LCD-based Phase Shifting Techniques, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, **29**-1 (2006), 50-57.
- (13) Fujigaki, M. and Morimoto, Y.: Shape Measurement with Grating Projection Using Whole-Space Tabulation Method (in Japanese), *Journal of JSEM*, **8**-4 (2008), 92-98.
- (14) Fujigaki, M., Takagishi, A., Matui, T., Morimoto, Y.: Development of Real-Time Shape Measurement System Using Whole-Space Tabulation Method, SPIE International Symposium, *Proc. SPIE* 7066, (2008), 706606.
- (15) Morimoto, Y. and Fujisawa, M.: Fringe Pattern Analysis by a Phase-shifting Method Using Fourier Transform, *Opt. Eng.*, **33**-1 (1994), 3709-3714.
- (16) Asai, D., Miyagi, T., Fujigaki, M. and Morimoto, Y.: Expansion of Measuring Range by Phase Unwrapping of Shape Measurement with MEMS Scanner Grating Projector (in Japanese), *Journal of JSEM*, **10**-1 (2010), 74-81.
- (17) Takayuki SHIOKAWA, Yoshiyuki SHIOJI, Motoharu FUJIGAKI, Ken HIGUCHI, Naoko KISHIMOTO, Yoshiharu MORIMOTO and Akihiro MASAYA: *5th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, 4-7 November, 2010, Kyoto, Japan.

航空宇宙構造分野における格子投影法による表面形状計測

樋口 健^{*1*2}, 藤垣元治^{*3}, 塩川貴之^{*4}, 岸本直子^{*5}, 岩佐貴史^{*6}

概要

航空宇宙構造分野の表面形状計測に有利と思われる格子投影法の適用分野拡大と高精度化を目指していくつかの提案を行い、それらの試みを実際の計測に適用し、精度検証した。まず高精度化のために全空間テーブル化手法を用いた。適用例として、光学計測には困難と思われる、透過性が大きくかつ金属光沢のある金属メッシュでできた衛星搭載電波望遠鏡パラボラ面に適用し、その精度検証を行ったところ、満足する高精度計測ができた。樹脂フィルムは宇宙構造物に多用されるが、光沢があるため、投影した格子の反射光を撮影する格子投影法では光沢の部分はエラーとなり計測できない領域となる。投影した格子の透過光を撮影することにより、光沢がある樹脂フィルムの形状を計測できることを示した。格子投影法の計測対象物の大きさは基準面の大きさに制約されるが、座標位置の算出に基準面間の内挿の代わりに基準面外へ外挿を行うことにより、基準面より大きい対象物を計測できる。ここで、外挿に伴う計測精度劣化を補償するため、近似を用いない厳密な座標値取得方法を適用し、また真値をテーブル化しておき計測値と比較する手法を適用し、外挿法においても高精度に計測する手法を提案した。適用例として、室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センターで開発したオオワシ1号機の主翼の荷重変位関係を得る実験に用い、実測値との比較を行った。

キーワード：表面形状計測，格子投影法，全空間テーブル化手法，透過性金属メッシュ構造，高分子膜面構造，航空機構造

*1 室蘭工業大学もの創造系領域, *2 室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター, *3 和歌山大学システム工学部, *4 和歌山大学大学院修了, *5 摂南大学理工学部, *6 鳥取大学大学院工学研究科

学 術 論 文

楳法華村における「漁具」、「漁法」、「魚種」、「魚加工」に 関連した方言語彙について

橋本 邦彦*

Dialectal Words Related to “Fishing Tools”, “Fishing Methods”, “Fish Names” and “Fish Processing” in *Todohokke*

Kunihiko HASHIMOTO*

(原稿受付日 平成 26 年 6 月 27 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

The purpose of this paper is to elucidate the details about dialectal words referring to “fishing tools”, “fishing methods”, “fish names” and “fish processing” used in *Todohokke*, which is located in the eastern region of the *Oshima* Peninsula. The words have been collected by our fieldwork, some books of the local fishing industry and a couple of dictionaries of the *Hokkaido* dialect. Each item concerned includes a dialectal word in *katakana* letters, the meaning with brief comments, the example sentences, the recorded places and other sources. It is revealed that the dialectal words of *Todohokke* have unique characteristics closely related to the kinds of fish, distinguished from those of the western region of the peninsula.

Keywords : *Todohokke*, *Oshima* Peninsula, dialectal words, fishing, ecological condition

1 はじめに

「旧楳法華における伝統的漁業・造船に関する語彙調査」(平成 23 年度科学研究費補助金(課題番号:23520540))の最終年度にあたり、2013 年 8 月 28~29 日に旧楳法華村に該当する地区(現在は函館市)で、風、潮流、波などの自然現象関連語彙及び漁具、魚種、魚加工等の漁業活動に関わる語彙の使用状況が、現役の漁業従事者を協力者として実地調査された¹⁾。この内、自然現象関連語彙は、橋本(2014)にまとめられている。一方、

漁業活動に係る 87 語彙については、データ整理をする中で、これまで考慮の外にあった興味深いものが多数存在することに気付いた。それは、タコ漁とイカの加工処理に関連した語彙であった。そこで、この 2 つの事項の不確かな点や細目についての所見を求めるために、2014 年 2 月 22~23 日に再度現地に赴き、3 名の調査協力者との面談を実施した。本稿は、2 回にわたる調査及び面談で得られたデータや情報に基づいて、主に、漁具、漁法、魚種、魚加工に係る語彙をテーマ別に分類し、それぞれに意味、用法、用例、特記事項等を記すことを目的としている。語

* 室蘭工業大学 ひと文化系領域

彙の全体像が示されることで見えてくる実態について、新知見を交えての所見も述べていきたい。

2013年8月の実地調査と2014年の所見・確認面談は、次のような形で行われた。

A. 実地調査

- 実施日：2013年8月28日（水）、29日（木）
- 実施場所：函館市富浦町 田中末廣・美枝子ご夫妻宅
- 調査協力者：田中末廣氏（昭和10年生まれ；78歳；漁師）
田中美枝子氏（昭和17年生まれ；71歳；漁師）
- 調査者：塩谷亨、島田武、橋本邦彦（いずれも室蘭工業大学教員）
- 調査項目：漁業関連の方言語彙：風、潮、漁具等の名称

B. 所見・確認面談

- 実施日：2014年2月22日（土）、23日（日）
- 実施場所：函館市富浦町 田中末廣・美枝子ご夫妻宅、及び函館市新八幡町ガソリスタンド事務所
- 面談協力者：田中末廣氏（昭和10年生まれ；78歳；漁師）
田中美枝子氏（昭和17年生まれ；71歳；漁師）
小市光子氏（昭和17年生れ；71歳；ガソリスタンド経営）
- 調査者：塩谷亨、島田武、橋本邦彦（いずれも室蘭工業大学教員）
- 所見・確認項目：魚種、漁具、漁法等の名称

この面談で確認された語彙は全部で110語を数える。昨年8月の調査で得られた87語に面談を通して新たに23語が加わったことになる。

第2節では、「漁具」・「漁法」に、第3節では、「魚種」・「魚加工」に関連した語彙を、それぞれ扱う。第4節の結びにおいて、この調査の意義と今後の研究への展望を述べたい。

なお、第2節と第3節での表記法は、次の通りである。

- 1) 語彙はアイウエオ順に掲げて、カタカナ表記とする。
- 2) []で品詞を記す。
- 3) < >で語彙の採録地を記す。
- 4) ()で引用文献を記す。

- 5) ■で他の文献からの関連事項の記述を引用して記す。
- 6) #で調査協力者から得られた知見等を記す；出所が田中末廣氏からの場合はTS、田中美枝子氏からの場合はTM、小市氏からの場合はKを付す。
- 7) *で著者のコメントを記す。

参考までに、調査対象となる楸法華を含む下海岸地方の位置を示す地図を挙げておく。



図1：渡島半島簡略地図²

2 「漁具」・「漁法」関連語彙

2.1 「使う」回答語彙

調査協力者が「使う」と回答した語彙は、全83語中55語(66%)であった。

- (1) アシ[名詞]：流し網、刺し網の網。
- (2) アシタナ〜アバタナ[名詞]：漁網の下縁部分の手網（たな）のこと。
- (3) アツイ[形容詞]：ニシンの群来が非常に多く接岸した状況を言う。
#TS:楸法華ではイワシやホッケに使用する。
■「今日の群来アツイゾ」<余市>（石垣 1928: 28）
- (4) アツノリ[名詞]：建網の胴網に乗網したニシンが適量以上に多いこと。
#TS：ニシン以外の魚種にも使用する。
■<余市>（石垣 1983: 29）
- (5) アバ[名詞]：建網に付ける浮き木。刺し網、流し網、地曳網、ニシン刺し網でも用いる。
- (6) アバリ[名詞]：網を梳いたり、編んだり、修理したりする時に使う木製の針のようなもの。網の目に応じて大中小あり、材質も竹、鯨のヒ

ゲ、合成樹脂等がある。

■網づくりの用具 (『青森県の漁具 1975: 16』)

- (7) **アミアライ**[名詞]: 使用する網には塩分が多く含まれ、振り子も付着している。これらのものを海水より真水に入れて取り除くこと。2, 3 日乾燥させ、翌年春の操業時まで保管する。
- (8) **アミオコシ**[名詞]: ニシンが乗網した時や、潮変わりの時など、船頭の号令で起こし船が網を手繰っていくこと。
#TS: ドラムで巻く。ニシン以外の魚種でも用いる。
 ■ 定置網に魚(ニシン又はサケ)が乗った(入った)時や、潮変わり(潮が強く流れること)時等に、船頭の合図で起こし船の担当(10~15人)の漁夫が胴網(胴網)を手繰って魚を一方に追い込み漁獲すること。石狩浜では近年でもサケ定置網で行われている。(吉岡 2003: 6)
- (9) **アミサヤメル**[連語動詞]: 網が絡まってつば状になったものを解きほぐす仕事。<瀬棚>
 ■アミオサヤメル: 網を清める。網を整理すること。Cf. サヤム: 穢れを清める。(吉岡 2003: 9)
- (10) **アミオロシ**[名詞]: ①新調した網を初めて使用すること。②網漁初めの祝祭。
 ■網下。(吉岡 2003: 7)
- (11) **アミサス**[連語動詞]: 漁網を海に入れる。
 ■1「朝、アミサシテ昼にはあげられる」(石垣 1983: 33)
 ■2 アミヲサス: 特に、ニシン漁やサケ漁等の刺し網で投網する際には、「おい、夕方風になったらアミサシに出るぞ」などと使った。(吉岡 2003: 9)
- (12) **アンカ**[名詞]: 錨³。
 * 英語 anchor「(船の) 錨」に由来する。
 ■1 風のある時にコンブのあるところから船が流されないようにするために使う。(川内谷 1977: 153)
 ■2 アンカオロス(比喻): ゆっくり落ち着く。
 「あまりあちこち遊んで歩かないで、このへんでアンカオロセよ」<戸井>(石垣 1983: 35)
- (13) **イサリ**[名詞]: タコを獲る道具。針金を曲げて針状にし、錘に鉛を使用する。潮上から潮下(または、風上から風下)へ漁具を流し、タコがかかると浮きが沈んだり、流れが止まったりする。潮の流れが止まったり、風のない時には操業できない。餌にサメをつけた。
#TS: 漁師が色鮮やかなビニルやひも、プラ

スティック板などを利用して独自に製作する。

■鹿部や下海岸地方で使用する。(『郷土史探訪Ⅲ』 1982:12)

- (14) **イサリヒキ**[名詞]: タコ獲り。
 ■「今日はイサリヒキが出た」<増毛>(石垣 1983: 40)
- (15) **イロヲミル**[連語動詞]: 魚群を見る。ニシンやイワシは海面に浮く魚なので、海の色で群来がわかる。
 ■1「ニシンが来るころになると、沖がかりしてイロヲミルのに真剣だ」<余市>(石垣 1983: 46)
 ■2 海水の色を見て、ニシン、イワシ、サバ、サケ、マス等の群来と個体の種別をすることからできた語彙。(吉岡 2003: 14)
 ■3 イロミ〜エドコミ: 漁に出て、船上でクキ(群来)を専門に見つける人、もしくはクキを見ること。(菊平 1992: 5)
- (16) **オキアゲ**[名詞]: 漁場で網に入った魚を汲みあげ、陸に運んで廊下または魚坪に入れる一連の作業。建網、刺し網漁共に行う。
#TS: テツアミ(綴網)を使用する。
 ■「そうしてこんどさーオキアゲする」<楯法華>(石垣 1983: 63)
- (17) **オキドメ**[名詞]: 部落の漁師全員が出漁を中止すること。
#TS: どの地域においても使用する。
 ■オギドメと濁ることもある。「オキドメは部落に不幸がある時などにする」<松前町白神>(石垣 1983: 63)
- (18) **オッパイパリ**[名詞]: イカ釣り用漁具。
#TS: 針がぷっくり膨れている形状からこの名が付いた(膨れは一つだけである)。市販されていた。
 ■イカ釣り道具の一種。(石垣 1980: 63、1983: 67)
- (19) **ガス**[名詞]: 海にかかる霧。オランダ語起源と言われている。
 ■「ほんとにガスのかからないとき、少ない」<楯法華>(石垣 1983: 81)
- (20) **カタガル**[自動詞]: 傾く。
カタゲル[他動詞]: 傾ける。
 ■「船がカタガラナイようにしてね」<楯法華>(石垣 1983: 83)
- (21) **カップガエル〜カップガル**[自動詞]: ひっくり返る。
カップガエス〜カップガス[他動詞]: ひっくり

り返す。

■「船がカップガエル」＜戸井＞（石垣 1983: 88）

- (22) **カップトル**[連語動詞]: 磯などで転んで着物をぬらす。

■「磯はすべるから気をつけれ。カップトルぞ」＜戸井＞（石垣 1983: 88）

- (23) **カトメル**[動詞]: 海底に降ろした錨が何かに引っかかる。

#TS: アンカ (anchor、錨) が海底に着いた時に、アンカキクと言う。

■「船が錨をカトメだんたつもの」＜榎法華＞（石垣 1983: 90）

- (24) **カワス**[動詞]: 方角を変える。岬を回る。迂回する。

■「白神灯台をカワセバ波がなくなる」＜松前・白神＞（石垣 1983: 98）

- (25) **クキ**[名詞]: 群来。魚（ニシン、イワシ、ハタハタ、ヤリイカなど）が大群をなして接岸し、産卵、放精すること。または、海での魚の大群の状態を表す。

■エドコとも言う。（菊平 1992: 5）

(15)■3 を参照のこと。

クギル[動詞]: 群来る。＊榎法華の発音。

■「この空模様では、そろそろクギルンデないか」＜小樽・忍路＞（石垣 1983: 111）

- (26) **コマドリ**[名詞]: はえ縄の針をはずすこと。また、それをする人。

■船内に揚げた魚を針からはずす役。（『乙部町史 上巻』 2001: 160）

- (27) **ゴロ**[名詞]: 船を陸上に巻き上げる時、船底に入れる円筒形の木製のローラー。

■1 コロとも言う。（石垣 1983: 139）

■2 1.5m 位から大小あり。直径 10~18cm の丸木。用材は堅木（ナラ、カエデ、アサダなど）である。（吉岡 2003: 49）

- (28) **シバリ**[名詞]: ①海藻採集具。②タコを獲る道具。（石垣 1983: 161）

■1 コンブ拾いや海中に沈んだ物を引き上げる道具。（吉岡 2003: 58）

■2 シバキ: ガモメコンブやシオコンブを採るときに使う道具。（川内谷 1977: 154）

#TS: エビなどが一杯入ったかごが海に落ちたとき、引っかけて取る道具。

- (29) **ジャソワラ**[名詞]: タコ、カレイ、ツブガイなどの獲れる、海底が小砂利の場所。

■ジャグとも言う。石狩前浜周辺にはない。

（吉岡 2003: 60）

- (30) **ジョロコバリ**[名詞]: イカ釣り針の一種。針がかんざしのようにたくさん付いているところから命名された。

■榎法華周辺で使われる。（石垣 1980: 63）

- (31) **#TS: ショッポ**[名詞]: イカ漁に用いる錘。落下傘状の形をしている。

- (32) **#TS セナワ**[名詞]: 石をひもで縛って海に沈め、コンブを養殖する道具。

■1 はえ縄の方言で、日本海沿岸部で使用。（『青森県の漁具』 1975: 24）

■2 はえ縄の部位を示す方言。ギバ、タチモノとも呼ぶ。（『榎法華村史』 1989: 570）

■3 瀬縄。タラ釣り用具。結糸（いわいと）5 枚、長さ 150 尋ぐらいのものを 10 枚ごとに 1 本付ける。（『南茅部町史 上巻』 1992: 804）

- (33) **タコバコ**[名詞]: 材料はブナ材。腐食を防ぐため、コールタールを使用することもある。箱は磯船で 2~3 日海中に投下。現在では 15~20 日位で引き上げる。縄（ロープ）は稲わらを編んだものを使用した。丈夫にするため、特殊な編み方が用いられた。コールタールに浸けたり、化学繊維のトワインを使用。

■1 『郷土史探訪Ⅲ』 (1982: 11-12)

■2 タコとりの箱。＜南茅部・臼尻＞（石垣 1983: 194）

■3 石狩浜ではタコ漁は生業ではなく、わずかに定置網漁等で混獲される程度である。（吉岡 2003: 72）

- (34) **タコカラヅリ**[名詞]: はえ縄漁のこと。

#TS: 釣れた魚にタコが付いてくるためにこのように呼ぶ。

■『郷土史探訪Ⅲ』 (1982: 11)

- (35) **テアミ**[名詞]: 軀編へ魚を導く網。定置網の垣網のこと。

■1 石垣 (1983: 216)

■2 石狩浜では手網と呼称するのが主流。魚種にもよるが、長さ 200~300 メートル、海岸にもよるが 500 メートルに及ぶものもある。（吉岡 2003: 80）

- (36) **テンテンヅリ**[名詞]: 一本釣り。マス釣漁法の一種。

#TS: オンコの木、エナメル、ナンダッパリ、ケッパリ（毛鉤）を付ける。

■1 他にイカ、ソイ、ヤナギノマイ、タラなど深みで生息する魚類の釣り漁法。全道一円の海岸部で使用。（吉岡 2003: 84）

- 2 単にテンテンとも言う。＜楳法華＞（石垣 1980: 78、1983: 224）
- 3 鍾付の遊泳板に疑似餌針を数本つなげた仕掛けで釣る北海道独特の漁法。（『乙部町史上巻』 2001: 161）
- (37) トチペル[動詞]: 出口をふさぐ。
 - 「魚が逃げないように網の口をトチペル」＜楳法華＞（石垣 1983: 230）
- (38) トンボ[名詞]: イカ釣り用具で、イカを引っかける針の一種。天秤の端に道糸を付け、針各一本を付ける。海中に入れシャクリを繰り返すことによって本体がトンボが舞っているように見えることから名づけられた。道南から西海岸一体で使用。
 - 1 イカを引っかける針の一種。＜楳法華＞（石垣 1983: 239）
 - 2 明治初期に考案。握り木へ2本の竿頭を開いて挟み、それに適当な長さの釣糸を付けた。イカが深みにいる時に、水面近くに呼び上げるのに使用。（『楳法華村史』 1989: 619）
 - 3 イカが深場にいる時に使用。北陸地域の漁民から伝えられた。泊では昭和25年頃まで用いられた。（『海と船と漁労の記録～六ヶ所村泊地区～』 2002: 7）
 - 4 石狩本町地区から余市、岩内沖に出漁してイカ付けし、海底に回遊するイカを釣り上げる時に使用した。イカが浮いてきたらハネゴで操業した。（吉岡 2003: 90）
- (39) ナワウズ[連語動詞]: はえ縄を海中に入れる。
 - ＜南茅部＞（石垣 1983: 245）
 - #TS: タラ釣りで使用する。
- (40) #TS: ナワサヤメ[名詞]: はえ縄の後始末のこと。
- (41) ナワサヤメル[連語動詞]: はえ縄の後始末をする。
 - 1 「2人でね、ナワサヤメテいた」＜楳法華＞（石垣 1983: 245）
 - 2 延縄漁の行われているところで、漁から帰って網ざるに針を整理（サヤメル）して乾燥させ、次の漁の準備をすること。（吉岡 2003: 92）
- (42) #K&TS: ニハイドリ、サンバイドリ[名詞]: イカがマンセン（満船: 大漁）の時に船に入りきれないため、一度帰港して獲ったイカをおろし、再度沖に出て漁をする形態のこと。
- (43) ノリコ[名詞]: 他人の船に乗り込むイカ釣り漁師。道南の鹿部周辺で使用される。
 - 1 「船のない漁師は、よその船のノリコにな
- ってイカつけた」＜鹿部＞（石垣 1983: 256）
- 2 日本海側のイカ付け場所周辺（岩内、小平）でも用いられる。石狩浜ではアイノリ（相乗り）と呼称している。（吉岡 2003: 98）
- (44) ハイカラ[名詞]: 魚釣り道具の一種。サバ釣り用、タコ釣り用がある。
 - #TS: 楳法華ではイカ釣りに使用。
 - 1 「縄で釣るよりもあのハイカラでばかり釣った」＜松前・白神＞（石垣 1983: 257）
 - 2 針に色物を付けること。主として道南の松前周辺で使用された。厚田浜では古老の間でタコ釣りの一本針に赤い布をつけて漁をしていた。（吉岡 2003: 99）
- (45) ハエナワ[名詞]: タコ空釣りはえ縄漁業。(34) 参照のこと。
 - バック縄とも言う。針は自家製の二本針（普通の針と同形のものを二本背中合わせにしたもの）を使用。エサはカジカ、サメなど。年間を通して行われるが、特に、秋が最盛期である。（『郷土史探訪Ⅲ』 1982: 11）
- (46) バッケナワ[名詞]: タコ漁の仕掛け。
 - #TS: ハエナワとは針が異なる。
 - #K: タコ箱漁より以前の漁獲法である。ただし、田中末廣氏は、両者は同時に行われていたと語っている。なお、小市氏はバケナワと発音していた。
- (47) ハネゴ[名詞]: イカ釣り道具の一種。イカが海面近くに浮いているときに使用。海底（深淵）にいるイカはトンボで釣る（(38)参照のこと）。
 - 1 「イカはえさをつけないでハネゴでひっかけるのさ」＜楳法華＞（石垣 1983: 266）
 - 2 ハネゴとも言った。（『楳法華村史 1989: 187, 619』）
 - 3 木製（桐）で、把持する部分からは、15センチ位から40センチ程度の弾力のあるタケヒゴが2本出ており、その先端に40～50センチの針、またはイカ針各1本をつけたもの。（吉岡 2003: 102）
- (48) ハヤスケ[名詞]: 木製の竿。先端に鉄製のカギが付いていて、磯船を操ったり、網や浮きを引き寄せるのに使う。＜余市＞（石垣 1983: 269、吉岡 2003: 104）
 - #K&TS: イカ漁具。二股に分かれている、イカを釣る仕掛け。
 - ニシン漁の刺し網で使用した。（類家 2007: 76）
- (49) #TS: バンプリ[名詞]: 網を降ろす順番のこと。

- (50) フグロ[名詞]: 袋網の略語。〈楸法華〉(石垣 1983: 281)
#TS: 地曳網でフグロに魚(イワシ)を追いかつこと。
- (51) **#TS: フナマワリ[名詞]: 8月10日の楸法華の祭りで、新しく購入した船を八幡神社の周りで3回まわすこと。**
- (52) **#TS: プラモラウ[連語動詞]: 船の5尺のマスひとり分をあてがわれる。**
- (53) ホーライダス[連語動詞]: 網に入った魚を手違いなどから海岸に捨てる。
#TS: 楸法華では、細かい魚を捨てることをホレダスと言う。
- (54) ボンデ[名詞]: 網やはえ縄、タコ箱などの海上標識。〈余市〉(石垣 1983: 304)
 ■北洋の鮭鱒流し網、はえ縄、タコ縄、スケトウ縄などの沖合漁業の海上標識で、ボンデンとも発音する。(吉岡 2003: 116)
- (55) ヤス[名詞]: タコ漁の道具。磯(岩場)や浅海で使用する、主に三本ヤス。〈沼尻〉(『郷土史探訪Ⅲ』1982: 10)
- (56) ヤメ[名詞]: はえ縄に付ける釣糸。
 ■1 はえ縄の枝糸。(『楸法華村史』1989: 570)
 ■2 はえ縄に下げる支網。津軽海峡沿岸部で用いる。(『青森県の漁具』1975: 24)
 ■3 網や釣糸に使う綿糸。「太いやメをつけてやったろう」〈松前・白神〉(石垣 1983: 339)
- (57) ワク[名詞]: 沖で魚を集める杢網の略。
#TS: フクロとも言う。
 ■ニシン漁場の建網で、起し船で網起こしして、来たニシンを入れておく袋。西海岸を中心とする漁場で使用する漁具の一つで、網は巾着状になっている。(吉岡 2003: 137)

2.2 「聞いたことがある」回答語彙

調査協力者が「聞いたことがある」と回答した語彙は83語中6語(7%)であった。

- (58) アガシ[名詞]: 灯り。光。
 ■1 舵を取る人の前方が見えなくなるので、陸に船を入れる時には、必ず、アガシ(灯火)を消した。これは、イカ釣り漁船の操作法の一つである。(石垣 1980: 73)
#TS: イワシ地曳網で使った。
 ■2 マネを揚げる: 魚見船(磯船か持符船を使用)に乗った船頭・下船頭(オヤジ)、経験のある漁夫が沖で魚群を認めた時に、旗や松明

(マツプシ: 恵山で取れる五葉松)を振って網船に沖に出よう合図すること。イワシの地曳網漁で行った。

(『楸法華村史』1989: 602、石垣 1980: 26、橋本 2013: 72)

- (59) タテコミ[名詞]: 建網を海に仕掛けること。ニシン、サケ、マス漁などを定置に施設すること。〈石狩浜、厚田浜〉(吉岡 2003: 73)
- (60) ツリカ[名詞]: 釣り漁の時に手(指)にはめる釣り革。〈南茅部〉(石垣 1983: 215)
 ■1 道南地方の南茅部周辺で使用されていたが、石狩浜では一本釣りの漁はないので、使用されていない。(吉岡 2003: 79)
 ■2 「ツリカ(釣革)はいて、ツリメダリ(釣り前垂り)あでで」、「ツリカ(釣革)ちょいとはき腕巻きまいて」(『鱈釣り口説』『南茅部町史 上巻』1992: 850, 852)
- (61) ツリメダリ[名詞]: 釣り漁の時に身に付ける前掛け。前掛けがメダリに転訛。〈南茅部〉(石垣 1983: 216)
 ■(60)■2 参照。
- (62) ヤドイウル[連語動詞]: 前借金を受け取って雇い漁夫となる。漁期間雇用契約を結んで出稼ぎに行くこと。
 ■1 「おれもヤドイウツて出稼ぎに行く」〈楸法華〉(石垣 1980、1983: 336)
 ■2 ヤトイウル: 語源は、自分らの労働を売ることからの方言である。青森県野辺地方言に見られる。(吉岡 2003: 131)
- (63) ワゴ[名詞]: 魚を獲る大ダモ。松前地方の方言。
 ■1 「イワシをワゴでとったんだもの」〈松前・白神〉(石垣 1983: 355)
 ■2 石狩本町地区ではこの呼称は用いないものの、ゴリ、カワエビ、ワカサギなどの小魚を掬う漁具として使用していた。(吉岡 2003: 138)

2.3 「使わない」回答語彙

調査協力者が「使わない」と回答した語彙は83語中22語(27%)である。

- (64) アカダマ[名詞]: 沖止めの印。
 ■山上で直径1m位の赤い球を上げて、沖止めであることを知らせた。〈奥尻〉(石垣 1983: 21)
- (65) アグリ[名詞]: イワシを獲る網。アグリ網の略。楸法華周辺で使用していた。

- 1 「あんたもアグリやってあったかな」＜楸法華＞（石垣 1983: 23）
- 2 キンチャクアミ（巾着網）とも言う。石狩浜では 1938 年、1939 年まで石狩湾でイワシ漁を行っていたが、この漁法ではなく、定置網と流し網漁であった。（吉岡 2003: 3）
- (66) **アゲ**[名詞]: ①魚群の通過する上空に海鳥の群れ飛ぶ現象。②網を結う時、または大きく破れて修理する時に使う、編む目に合わせた木製の道具。
- ①厚田浜ではニシン漁期、沖合にニシンの群来を追ってゴメ（カモメ）が群れて飛ぶ様子が見られ、漁師は「明日あたり、浜さニシン群来るぞ」と言って、競って投網した。
- ②ニシン網でもサケ網でも、自家製で使っていた。（吉岡 2003: 3）
- (67) **アミタデル**[連語動詞]: 漁網を設置する。
- 1 「村で最初にアミタデタのはだれだろう。」＜楸法華＞（石垣 1980: 33）
- 2 **アミタテ**[名詞]: 網入れとも言う。建て網漁場で漁網を海中に入れること。または、その作業を言う。石狩浜や厚田浜では、ニシン、サケ、マスなどの建網を海に入れることをアミタテ（アミイレ）と呼ぶ。（吉岡 2003: 8）
- (68) **アミタキブネ**[名詞]: 網を積んで待機する船。＜南茅部＞（石垣 1983: 33）
- 1 ニシンの接岸を待って陸に網を積んで待機しておく船。主として建網場で三半船を使用する。（吉岡 2003: 8）
- 2 網を海に入れる時は、網をきちんと整えて積んでいく船。オゴシフネ（起こし船）と兼用する。大定置経営。＜南茅部・古部＞（川内谷 1977: 157）
- 3 **アミヲタク**[連語動詞]: 船の中央、すなわち胴の間に網を積み込む。（『楸法華村史』 1989: 602）
- (69) **アミツケスル**[連語動詞]: 網を直す。＜広尾＞（石垣 1983: 33）
- (70) **アワダマ**[名詞]: 魚が集まって渦を巻いているところ。
- ハナアブ**[名詞]: 魚群が吐き出す水泡が浮上すること。（『楸法華村史』 1989: 602）
- # **TS**: 楸法華では、単に**ウズ**と言う。
- (71) **イワシバ**[名詞]: イワシがよく獲れる漁場。道南では下海岸一円で使用。
- 1 「その当時はほれ、イワシバあったろうし」（石垣 1983: 46）
- 2 明治時代イワシの主要漁業地は、道南東部、特に下海岸であった。（『恵山町史』 2007: 775）
- (72) **オキマモリ**[名詞]: ニシン漁場で沖の建網の中を監視する人。船頭か老年の熟練者があつた。（石垣 1983: 63、吉岡 2003: 22）
- (73) **オクバシヨ**[名詞]: 松前、江差から見て神威岬以北の漁場のこと。明治・大正期頃まで使用。（石垣 1983: 64、吉岡 2003: 22）
- (74) **オツネン**[名詞]: 冬の期間。越冬を意味する。
- 1 「オツネンだけだよ。裁縫習いにいったの」＜楸法華＞（石垣 1980、1983: 67）
- 2 漁場では、正月が来ても帰宅しないでいる漁夫のことを言っていた。（吉岡 2003: 22）
- 3 **オツネンヤトイ**[名詞]: 12 月頃から冬の期間一杯ニシン場に雇われた漁夫。主として、番屋に起居し、親方の家屋の除雪をしたり、薪割りや山仕事をして漁期を迎える仕度をしていた。（吉岡 2003: 22）
- (75) **カガル**[動詞]: （船が）停泊する。
- 「家の前の浜に船が一隻カガッていた」＜楸法華＞（石垣 1983: 78）
- (76) **カクアミ**[名詞]: ニシン建網の一種。
- (77) **カグラサン**[名詞]: 移動式の人力船巻き上げ機。木製で、船に積載する。ニシン漁の盛んな西海岸で使用。
- 1 「船はみなカグラサンで巻いたものさ」＜松前・白神＞（石垣 1983: 79）
- 2 北海道では、特にニシン漁業が盛んであった西海岸各漁場で船を巻き上げる時に、またはニシンのナヤバ（木架場）のない場所では、高いところに鉄索で巻き上げるが、その動力を人力のカグラサンで上げた。（吉岡 2003: 25-26）
- 3 船を浜へ上げるための巻揚げ機。カグラサンの中心の回転する部分をボウズと呼び、棒を通す穴が 2 か所あいている。穴は上下にずれて交差している。差し込んだ棒を大勢で巻き上げる作業は家族ぐるみの仕事だった。（『青森県の漁具』 1975: 38）
- (78) **コシビキ**[名詞]: 網や船を引く時、腰に板を当てて、手でつかんで引くやり方。
- 1 「あの頃、船ひっぱるのに、馬まきでなくコシビキであつた」＜楸法華＞（石垣 1983: 130）
- 2 石狩浜では地曳網を敷く時に使用するが、例年 1 月、2 月石狩川の氷下地曳網によるワカサギ漁で使用した。（吉岡 2003: 46）

- (79) サグリ[名詞]:漁法の一つで、しゃくりのこと。
#TS: 楸法華では、「キンコさ魚を落とす」と言う。

■1 「昔は網のない漁師はサグリを使ってホッケを引っかけて獲ったもんだ」<松前・白神> (石垣 1983: 145)

■2 大群して岸寄りする魚を綿糸に針のようなものを付けて、しゃくって魚を獲る漁法。石狩浜ではこの漁法はないが、タラの一本釣りなどで使われている。タコ漁で行われている。(吉岡 2003: 51)

- (80) サンヤ[名詞]: ①タコの異名。②漁船を陸上に引き上げるのに用いる縦巻きのロクロ。

■1 石狩浜、厚田浜で②はボウズと言う。(吉岡 2003: 56) (77)■3 参照。

■2 東津軽郡平館村では、小舟を巻き上げるものをカサギノボウズという。カグラサンとは区別した。(77)参照。(『青森県の漁具』 1975: 38)

- (81) スド[名詞]: 地曳網または大謀網などの最奥の魚だまり。または袋網。シドとも言う。

■1 昭和初期にイワシ漁で用いた漁具で、小さな地曳網の一種。(『楸法華村史』 1989: 598, 611)

■2 スド(シド) マワシ網漁: イワシの地曳網の操業の時、大網からもれるイワシが多いため、大網の後方に差回してこの魚群を漁獲する小網漁のこと。(『南茅部町史 上巻』 1992: 968)

■3 サケの地曳網、サケの定置網などの最も奥の魚だまりのこと。(吉岡 2003: 66)

- (82) ソエマギ[名詞]: イカ釣り具の一種。針先以外の部分を綿糸で巻いてあるもの。

■1 「ソエマギに針二本つけてね」<楸法華> (石垣 1980: 59)

■2 ソイマギ: 道南の楸法華周辺で使用。石狩浜でも 8 月に余市沖で用いられた。(吉岡 2003: 69)

- (83) ソゴヤマデ[名詞]: イカ釣りの道具でヤマデの一種。底に回遊しているイカを釣る仕掛け。鯨の黒いひげを鋸で引いて 2 本鉛に付ける。イカさおのように 2 尺くらいに 2 本をついだ。道南地方では沖に行ってもイカが釣れなくなった時に使用した。

■1 「イカがだんだん獲れなくなれば、ソゴヤマデというのを使ったもんだ」<楸法華> (石垣 1980: 59)

■2 積丹周辺を中心としたイカ付け場ではト

ンボを使用した。(吉岡 2003: 70)

2.4 「漁具」・「漁法」関連語彙についての所見

以上、3 名の調査協力者により「使う」、「聞いたことがある」、「使わない」と回答された 83 の語彙を、主要な文献から引用した関連事項と合わせてまとめたのであるが、ここから判断できるいくつかの所見を、楸法華を中心とする渡島半島東岸部方言に焦点を当てて述べることにする。

- 1) 同じ語彙が地域によって異なる魚種に適用される場合がある: (3)アツイ、(4)アツノリ、(8)アミオコシは、渡島半島西岸部でニシンについて用いられるのに対し、楸法華ではイワシやホッケなどニシン以外の魚種でも使用している。同じように、(44)ハイカラ、(48)ハヤスケも、松前などの西岸部ではサバ、タコ、ニシンの仕掛けであるが、楸法華ではイカ釣り用の漁具となっている。反対に、(36)テンテンヅリは楸法華では専らマス釣りで使われるのに対し、道内その他の地域では、深みに生息する多くの魚種に適用されるようである。これは、楸法華で漁獲される主要な魚種と西岸部等で漁獲される魚種との違いに起因すると考えられる。興味深いふるまいをする語彙に(32)セナワがある。通常、楸法華を含む東岸部だけではなく青森県でも「はえ縄(の部位)を示す方言」と説明されているのに、調査者協力者の田中末廣氏は「コンブを養殖する道具」との回答をしている。本来、はえ縄で使用されたものが、コンブ養殖にも用いられるようになり、タラ釣りに他の漁法が使われることで、適用対象が異なるようになったのかもしれない。
- 2) 橋本(2012: 9-12)で言及したように、楸法華ではイカ漁に関連した語彙が豊富である: (18)オッパイパリ、(30)ジョロコパリ、(31)ショッポ、(38)トンボ、(42)ニハイドリ、サンバイドリ、(43)ノリコ、(44)ハイカラ、(47)ハネゴ。このうち、(31)と(42)の語彙は他の文献に記載されておらず、今回の調査で初めて存在が知られた。また、(18)は橋本(2012: 11)には「針の種類。詳細は不明」との記述となっていたが、調査協力者の田中末廣氏の証言によって針の形状から名づけられた市販の道具であったことを突き止めることができた。
- 3) タコ漁に関わる語彙が多く見出される: (13)イサリ、(14)イサリヒキ、(28)シバリ、(33)タコバ

コ、(34)タコカラヅリ、(45)ハエナワ、(46)バツケナワ、(54)ボンデ、(55)ヤス。『楳法華村史』(1989)に代表される東岸部地域の郷土史にはタコの漁獲についての言及はあるものの、詳細な解説は施されて来なかった。例外的に、砂原町教育委員会・砂原町文化財調査委員編集『郷土史探訪Ⅲ』(1982: 10-12)に漁具の図や写真を付してのかなり丁寧な説明が掲載されている。実は、現在の楳法華で最も換金性の高い漁獲物がタコであり、漁で占める割合も高い。調査協力者の田中末廣氏及び小市氏から提供された情報で着目すべきものが2点ある。1つは、『郷土史探訪Ⅲ』(1982: 11)で(45)ハエナワを「バツケナワ」とも言うとしているのに対し、田中氏が(46)バツケナワで、「ハエナワとは針が異なる」と述べている点である。もう1つは、ハエナワとバツケナワの漁獲法の時系列における順序である。田中氏は両者が同時に行われていたと語っているのに対し、小市氏はバツケナワがハエナワより以前に使用されていた仕掛けであると主張している。どちらが事実であるのかについては、今後の調査に委ねたい。因みに、吉岡(2003:72)によれば、日本海側の(したがって、北海道西岸部の)石狩浜ではタコ漁は生業ではなく、定置網等で混獲される程度であった。ここでも語彙の多寡や内容が漁獲物の種類に依存して決まってくることがわかる。今日の楳法華では、タコは大部分イサリを用いて捕獲されるようで、田中氏より自作のものを見せていただいた。

- 4) その他「使う」回答語彙で、新たに採集したものが6語ある：(23)カトメルとの関連でアンカキク、(40)ナワサヤメ、(49)バンフリ、(51)フナマワリ、(52)ブヲモラウ、(57)ワクとの関連でフクロ。また、語形の違う語彙として(53)ホーライダス〜ホレダス(楳法華)がある。
- 5) 「聞いたことがある」回答の語彙の中で、(58)アガシと(62)ヤドイウルは、石垣(1980)の楳法華における聞き取り調査で採録されたものである。この調査は、明治34年、大正9年、昭和17年生まれの3人の漁師に、戦前・戦後の漁の様子や村の生活を語り合う談話から成っている。当然、ある時期まで使用されていたはずであるが、漁の形態の変化によって伝聞的な体験にとどまっているものと思われる。同じく、(60)ツリカ、(61)ツリメダリも、東岸部下海岸に位置する南茅部で採録された語彙であるので、

楳法華でもかつて使用された可能性が高い。一方、(59)タテコミ、(63)ワゴは松前、石狩浜などの西海岸部の語彙であるので、調査協力者が使わないのは理解できるが、聞いたことがあるというのは、漁師同士のもしくは漁活動での何らかの交流の結果によるのかもしれない。「聞いたことがある」理由が、使用していたが指示対象がなくなったためであるのか、本来の使用者との接触によるものなのかの2つのタイプがあるのではないだろうか。

- 6) 「使わない」回答語彙にも指示対象が使用されなくなったために、もはや調査協力者の世代に受け継がれなくなったものが多数存在する：(65)アグリ、(67)アミタデル、(68)アミタキブネ(アミヲタク)、(71)イワシバ、(74)オツネン、(75)カガル、(78)コシビキ、(81)スド、(82)ソエマギ、(83)ソゴヤマデ。漁業関連語彙は指示対象が失われると一挙に消失する傾向がある。イワシ漁とイカ漁は明治期より楳法華を含む東岸部地域で盛んであったが、それは漁法や漁船の変遷も頻繁であったことを意味している。以前用いられたものが別のものに変われば、前者を表す語彙は急速に人々の記憶から失われていく。
- 7) 「使わない」回答語彙には同じ内容を示すのに、別の語彙を使用する場合が存在する：(70)アワダマ〜ウズ(楳法華)、(79)サグリ〜キンコ(楳法華)。隣接する地域であっても、語彙の形態に違いが見られるのであれば、比較方言語彙研究の必要性が益々高まるであろう。
- 8) 「使わない」回答語彙には明らかに渡島半島西岸部及び石狩浜・厚田浜に限定されたものがある：(64)アカダマ、(66)アゲ、(72)オキマモリ、(73)オクバシヨ、(76)カクアミ、(77)カグラサン、(80)サンヤ。その多くがニシン漁に関連している。漁業方言語彙が漁獲される魚種と密接に関係していることがわかる。

3 「魚種」・「魚加工」関連語彙

このグループには、イカ、イワシ、タコなどの魚種と、その加工に関わる語彙が占めている。調査語数は27語である。

3.1 「使う」回答語彙

23語(85%)が「使う」と回答された。数値が高い

のは、本調査で初めて得られた語彙の数が多かったためである。

- (84) **アガイガ**[名詞]: 鮮度が落ちて赤くなったイカ。
 <楫法華> (石垣 1983: 20)
- (85) **#K: イカゴロカコー (イカゴロ加工)** [名詞]:
 イカゴロをゆでて油をとること。この油はチャッカー船の燃料として用いた。
- (86) **#K: イカノシ**[名詞]: スルメイカの加工法。
 イカのみみ (耳) を歯で噛んで広げ、イカのアシ (足) の先をアグド (かかと) で踏んで延ばす。アルバイト仕事で、1枚につき5円もらえた。
- (87) **エビリ**[名詞]: 砕いた魚粕を乾かすために広げたり、固まった魚粕を砕くために使用する道具。歯の短い熊手状のもの。<余市> (石垣 1983: 57、吉岡 2003: 17)
 ■ニシン粕を広げるために使用した。(類家 2007: 77)
- (88) **オガバシヨ**[名詞]: 玉粕 (胴で圧縮した円筒形の魚粕) の干場。作業所。
 ■1「機械設備はあるけれどオガバシヨが無い」<楫法華> (石垣 1983: 62)
 ■2 道南の楫法華周辺では「オガバシヨ」と濁るが、石狩浜では「オカバシヨ」と濁らず発音する。(吉岡 2003: 20)
- (89) **#TM: カッパイガ**[名詞]: スルメにするのに天気が悪くて干すのに時間がかかり、捨てるようなイカ。アガイガ (84参照) とも言う。
 ■#K: 干しイカが雨に打たれて湿ったもの。鮮度が落ちる。
- (90) **#K: カナガス**[名詞]: イカを削ってできるカンナ屑 (カンナガラ) 状のもの。
- (91) **カマタギ**[名詞]: イワシ釜をたくこと。魚粕製造のために大釜に魚を入れてたくこと。(石垣 1983: 93、吉岡 2003: 32)
 ■1 **#TS: 釜**は各家庭にあり、使用しない時には風呂として利用した。
 ■2 **#TS: ホッケ**でも粕を製造した。
- (92) **シボリ**[名詞]: **#TM: スルメ加工**で、さお掛けしたイカのこと。
 ■スルメ加工で、夕方まで干して水が切れると、6尺の棒にイカの足を結んで、2日間干して乾燥させる作業のこと。(『海と船と漁労の記録～六ヶ所村泊地区～』 2002: 8)
- (93) **#TS: シヤガ**[名詞]: メヌキ (魚の一種) のこと。
- (94) **#K, TS, TM: ジューボシカワグチ**[名詞: 屋号]: 大きな網元の漁師で、イワシ粕加工を営んでいた。楫法華中学校の山側に家が、海側に釜があった。
 ■「ジューボシカワグチッテノー、デーケークヤッテタンダ (十星川口ってねえ、大規模にやってたんだ)」(橋本・島田・塩谷 2012: 80)
- (95) **#K: センゾゴヤ**[名詞]: 釜を置いて魚粕と油を取る製造小屋。
- (96) **#TS: ドロダコ**[名詞]: ヤナギダコのこと。
- (97) **#K: ナヤガケ**: スルメ加工でイカを干す乾燥場。浜近くの海中に杭を打って、その上に設置した。
 ■ナヤ (木架): 身欠きニシン加工時の乾燥場。(石垣 1983: 244、吉岡 2003: 92)
- (98) **ハセ**[名詞]: スルメ加工時に用いる用具。木の棒を立てて縄を張ったもの。これにイカを干す。(『海と船と漁労の記録～六ヶ所村泊地区～』 2002: 8、**#TM**)
- (99) **ハセガケ**[名詞]: スルメ加工時にハセにイカをきれいに並べて干すこと。(『海と船と漁労の記録～六ヶ所村泊地区～』 2002: 8、**#TM**)
- (100) **ハネダシ**[名詞]: 海に地杭を立てて物置を作り、海岸と地上とを連絡した建物。(石垣 1983: 266)
 ■1 **#K: 海中に杭を打って作ったナヤガケ用の土台となる場所** ((97)参照)。
 ■2 建物は岸边に近い所に作られていた。近海では銭函周辺や厚田浜の嶺泊などで見られる (吉岡 2003: 103)
- (101) **ヘエ**[類別詞]: イカを数える単位。
 ■1 **#TS: ハイ～パイ**とも言う。
 ■2 「ハネゴだと一度にイカを二ヘエずつあげるんだからね」<楫法華> (石垣 1980: 61)
- (102) **ボッツ**[名詞]: タコの胴の部分。一見、頭のように見えるので、ボッツ (帽子) と言う。<南茅部> (石垣 1983: 300)
- (103) **#TM: ホガキイガ**[名詞]: スルメイカで飴色に粉をふいている良質のイカ。
- (104) **#TS: マダコ**[名詞]: メスのタコ。
ソーダコ[名詞]: オスのタコ。
ミズダコ[名詞]: 上記二つの総称。
 ■タコは1パイ、2ハイと数える。
- (105) **#TM: ヤリダシ**[名詞]: 浜に杭を立てて高くしたイカを干す場所。
- (106) **ヨイイガ**[名詞]: 前夜水揚げしたイカ。(石垣 1983: 344) ➡ **アサイガ**[名詞]: 朝のイカ。

いきがよくて刺身用に最適。(石垣 1983:24)

■ヨイイガ:ムズラ(スバル)の出からアオ(シリウス)の出までに獲れるイカ。

アサイガ:アオ(シリウス)の出から以後に獲れるイカ。(菊平 1992:5)

3.2 「使わない」回答語彙

この語彙は、わずか4語(15%)であった。

(107) **イカブスマ**[名詞]:スルメ作りの過程で、イカを戸外の干場にかけ並べた光景。襖に見立てた初秋の風物詩。＜余市、美国、古平＞(石垣 1983:38、吉岡 2003:11)

■スルメ加工で用いられる。現在ではほとんど生で出荷されるが、かつては随所にイカブスマが見受けられた。(『郷土史探訪Ⅲ』1982:8)

***青森でもイカ干しの風景は一般的であるがイカブスマの呼び方は報告されていない。**
(『青森の漁具』1975:25 参照)

(108) **カドイワシ**[名詞]:ニシンのこと。カドとも言う。

■1 **カド**[名詞]:ニシンの古名。青森では乾脂物(かんせきぶつ)をカド、生魚をニシと言う。
(吉岡 2003:31、石垣 1983:90)

■2 **バカイワシ**[名詞]:建網で取れるニシンの幼魚。漁業調整規則で獲ることが禁止されていたが、噴火湾では経営のためこれを目的に定置網を建て込んだ。(『郷土史探訪Ⅰ』1979:19) ***「イワシ」とすれば、規則違反にならなくなるからなのか。**

(109) **ボンボンニ**[名詞]:イカの内臓と足を取ってゆでる加工法。(『郷土史探訪Ⅲ』1982:8)

#TM:ボンボンヤキ:イカゴロをつけたまま焼く調理法⁴。

(110) **マイ**[助数詞]:魚粕を加工する際に用いる釜の数え方。

■「家の前ばかりで12マイの釜あった」＜榎法華＞(石垣 1980:27-28、1983:305)

3.3 「魚種」、「魚加工」関連語彙についての所見

以上、3名の調査協力者により「使う」、「使わない」と回答された27の語彙を、主要な文献から引用した関連事項と合わせてまとめた。調査語彙の中で「聞いたことがある」と回答されたものはない。3.1節と3.2節から判断できるいくつかの所見を次に挙げたい。

- 1) 「使う」回答語彙のうち12語が従来の文献や方言辞典/事典に掲載されておらず、今回の調査で得られた新知見である。イカ加工に関する語彙の数が非常に多い:(85)イカゴロカコー、(86)イカノシ、(89)カップイガ、(90)カナガス、(97)ナヤガケ、(103)ホガキイガ、(105)ヤリダシ。その他にも、(84)アガイガ、(92)シボリ、(98)ハセ、(99)ハセガケ、(100)ハネダシ、(101)ヘエ、(106)ヨイイガを加えると、イカに関連する語彙は14語を数える。『榎法華村史』(1989:618-619)によると、榎法華では江戸時代からヤマデを用いたイカ釣り漁法が行われており、明治時代に入ってトンボ、ハネゴ等の漁具が考案されるとともに、磯船、持符船、川崎船と漁船も大型化していった。イカ漁が榎法華、恵山、南茅部の下海岸地域だけではなく、同じ東岸部の砂原でも盛んであったことが、語彙の豊富さの理由である。イカ加工語彙は、調査協力者の経験に裏付けられているので、集中的に調査すれば、さらなる語彙が発見できる可能性を秘めている。流通システムが発達し、ほとんどのイカが生のまま出荷される現在、イカ加工の語彙は記憶からどんどん失われていつている。
- 2) 同じ語彙ではあるが適用対象の異なるものがある。(87)エビリ、(88)オガバシヨ、(91)カマタギ、(97)ナヤガケ(ナヤ)は、西岸部では主にニシン粕の製造に用いられたのに対し、東岸部ではイワシ粕の加工用具を指す。時に、ホッケで粕を取ることも行われていたようである((91)■2の田中氏談)。これは、渡島半島の西岸部、すなわち日本海側のニシン漁、東岸部、すなわち太平洋側のイワシ漁と、漁獲される魚種を異にしているためである。また、(100)ハネダシは、石垣(1983)、吉岡(2003)とも建物を指す名称であるのに対し、小市氏の説明では、ナヤガケをする場所を示している。地域による語彙と指示対象のずれは、方言語彙比較研究にとって、興味深い事例を提供する。
- 3) タコの呼び名は、従来あまり注目されてこなかった:(96)ドロダコ、(104)マダコ、ソーダコ、ミズダコ。第2節で言及したように、榎法華ではタコ漁が盛んであることから、漁師の関心の高い魚種であり、漁法の名称と同様、種類、部位、加工などでも知られていない語彙のある可能性がある。
- 4) (107)イカブスマ、(109)ボンボンニはイカの加工処理の語彙であり、東岸部の隣接する砂原で

使用されていたにもかかわらず、少なくとも現在の假法華では使われていないようである。もっとも、同様の加工処理は假法華にも存在するはずなので、別の呼び方があるのかもしれない。

- 5) 助数詞の(110)マイは、石垣(1980)の明治及び大正生まれの漁師からの聞き取り調査の中で出てきた語彙である。イワシの釜たきが廃れたことで語彙も失われたと考えられる。

4 むすび

当初予定していた調査語彙は 87 語であったが、調査終了後には 110 語になった。3 名の調査協力者とのやり取りの中で、実際に製作された漁具の提示を受けながら、自らの体験を語ってもらったことが、貴重な収穫物を手にできた要因と思われる。第 2 節と第 3 節で取り上げた語彙調査から、3 つの共通特徴が観察される。

- 1) 生態学的条件：橋本(2014)で指摘したように、方言語彙は使用される地域の地理的位置づけや地形上の特有性に依存する。これは、波、潮、風などの自然現象だけではなく、漁獲される魚種にも当てはまる。伝統的な漁業という観点から、渡島半島東岸部地域はイワシとイカが、一方、西岸部地域ではニシンが主要な捕獲対象魚であった。どちらも大量に獲れるのとあしが早いために、流通の側面から魚粕やスルメ加工等として処理された。生態学的条件は魚種を選択し、それに伴う加工処理の仕方を決定し、それぞれの指示対象の呼び名を作り上げていくのである。また、西岸部地域でニシンに用いられている語彙が、東岸部地域ではイワシやイカ、ホッケ等に適用されている場合もある。
- 2) 漁業形態の変遷：漁船、漁法や漁具などの漁獲手段は、比較的短い期間で変化する。同じ魚種の漁であっても漁船が変わり、漁法と漁具が変われば、以前使用されていた語彙はごっそり忘れ去られる。たとえば、橋本(2012: 9-12)には 24 語のイカ釣り漁具・漁法関係の語彙が假法華で使用されたものとして挙げられているが、今回の調査でその大半が「使っていない」または「知らない」と回答されている。漁業形態の変遷

と共に語彙は世代間で引き継がれず忘れ去られていくのである⁵。

- 3) 隣接地域の接触：1)で指摘したように、同じ語彙が地域によって意味内容や指示対象を異にする場合、どちらが借用元でどちらが借用先であるのかが問題となる。今のところそれを判断する決定的な証拠はないが、かなり昔から渡島半島西岸部と東岸部両地域の漁師間に接触があったことは確かである。橋本・島田・塩谷(2012: 81-87)で現在の北方領土への出稼ぎの様子が当時 80 歳代の元漁師によって詳細に語られているが、焼玉エンジンを搭載した小型船でかなり自由に海上を行き来していたようである。北海道内だけではなく、津軽海峡を隔てた青森県との接触も考慮に入れる必要があるだろう。第 2 節及び第 3 節に記載された(6)アバリ、(38)トンボ、(56)ヤメ、(62)ヤドイウル (ヤトイウル)、(77)カグラサン、(92)シボリ、(98)ハセ、(99)ハセガケの 8 語が青森県でも使われている。青森県沿岸部、特に北東部では假法華と同様にイカ、タラ、コンブ漁が盛んであるので、地域間の接触・交流を介してかなりの程度共通語彙の見つかる可能性がある。

本調査を通してイカ加工に関連する語彙を収集することができた。これに関しては従来体系だった調査・研究がなされてこなかったので、経験者の記憶の鮮明なうちに更にできるだけ多く集める必要がある。また、主要な収穫物であるコンブ関連の語彙の収集が手つかずの状態にある。コンブ漁は、渡島半島海岸部全域で行われているばかりか、青森県沿岸部でも盛んである。今後の調査で、共通部分と地域差の見られる部分を明らかにしなければならぬだろう。漁業に関わる方言語彙の調査・研究は、比較方言語彙の視点を踏まえつつ、海を隔てた隣接地域にまで広げていくことで、実りある成果が期待できる分野なのである。

謝辞

本調査研究は、平成 23 年度科学研究補助金（課題番号：23520540）の交付を受けて実施された「旧假法華村における伝統的漁業・造船に関する語彙調査」

及び平成 26 年度科学研究補助金（課題番号：26370523）の交付による「渡島半島東岸部と西岸部における伝統的な漁業関連方言語彙の比較調査」における研究成果の一部を公にしたものである。語彙の使用状況や使用例、その他貴重な情報提供に協力して下さった調査協力者の田中末廣・美枝子ご夫妻と小市光子氏に心からの感謝を申し上げたい。また、共同研究者として全面的に支援して下さい室蘭工業大学塩谷亨氏、島田武氏並びに三村竜之氏に謝意を表したい。もちろん、本稿の誤り等の責任は、著者ひとりに帰すものである。

注

- 1 聞き取り調査の際に使用した語彙リストは、2000 年から継続的に実施された実地調査で収集した楳法華周辺の方言語彙のうち、漁業に関連した語彙を「漁具」、「漁法」、「魚種」、「魚加工」の категорияごとに整理して作成した。なお、語彙情報を補うために、石垣(1983)並びに『楳法華村史』(1989)など文献に挙げた町村史を参照した他、特に、西海岸に特有の語彙と思われるものは、類家(2007)と吉岡(2003)を参考にした。
- 2 出典は、<http://www.sekaichizu.jp>、2014/12/19 による。
- 3 砂原町教育委員会の編纂した『郷土史探訪Ⅲ』(1982: 9)にアンカが掲載されているが、指示物はまったく異なる。「イカ釣りにかぎらず、沖合に出て漁をするとき、暖房用具として使用された。中に炭火を入れ、手を暖めるなど暖をとるのに用いられ、材質は、焼き物で出来ている。」いわゆる暖房用具の行火のことである。
- 4 ボンボンヤキ（ポップヤキ）はお祭りの屋台や観光地の店先で売られている焼きイカを指す。一方、ボンボンニは、『郷土史探訪Ⅲ』(1982: 8)によると、スルメ加工、ノシイカ加工と並ぶイカ加工法の一つであるが、詳細は不明である。ボンボンヤキが個別的に調理・販売されるのに対し、ボンボンニはある程度大量に製造・出荷されていたと考えられる。査読者の指摘にあった「共通部分『ボンボン』に何かイカに関係した意味があるのか」については明確に答えることができない。おそらく、形状に由来する命名かと推測できるが、今後の調査に委ねたい。
- 5 2014 年 9 月にせたな町北桧山区（渡島半島西岸部）で実施された聞き取り調査で、調査協力

者の西田栄氏も、イカ釣りほど変化の著しい漁法はなかった旨の発言をしている。

文献

- 青森県立郷土館（編）、『青森県の漁具 青森県民俗資料図録 第2集』、1975、青森県立郷土館。
- 石垣福雄、『北海道（昭和 55 年度）各地方方言収集緊急調査 文字化原稿：楳法華村』、「1. いわし漁全盛のころ；2. 楳法華の祭り；3. いかつり漁法の今昔；4. 漁船の変化；5. 漁業後継者の問題」未公開原稿、1980、1-89（通しページ）。
- 石垣福雄、『北海道方言辞典』、1983、北海道新聞社。
- 恵山町史編纂室（編）、『恵山町史』、2007、函館市恵山支所。
- 乙部町史編さん審議会、『乙部町史 上巻』、2001、乙部町。
- 川内谷繁三、「南茅部の漁業語彙」、小野米一（編）、『北海道漁村方言の研究・南茅部のことばと生活』、1977、147-160、北海道教育大学旭川分校国語教室。
- 菊平和子（編）、『ほっかいどう語 - 主として道南の浜ことば』、自費出版。
- 砂原町文化財調査委員（編）、『郷土史探訪Ⅰ』、1979、砂原町教育委員会。
- 砂原町文化財調査委員（編）、『郷土史探訪Ⅲ』、1982、砂原町教育委員会。
- 楳法華村（編）、『楳法華村史』、1989、楳法華村。
- 橋本邦彦、「渡島半島東岸部の漁業関係の語彙」、『北海道言語文化研究』第 10 号、2012、23-37。
- 橋本邦彦、「渡島半島東岸部の漁業及び海事関係の語彙について」、『室蘭工業大学紀要』第 62 号、2013、69-80。
- 橋本邦彦、「楳法華における「風」及び「潮」・「波」に関連した方言語彙について」、『北海道言語文化研究』第 12 号、2014、3-23。
- 橋本邦彦・島田武・塩谷亨、「楳法華の漁業について」、『室蘭工業大学紀要』第 61 号、77-88。
- みちのく北方漁船博物館（編）、『特別展 海と船と漁労の記録～六ヶ所村泊地区～』、2002、みちのく北方漁船博物館。
- 南茅部町史編纂室（編）、『南茅部町史 上巻』、1992、南茅部町。
- 類家直人（編）、『復刻版松前古老百話・白神』、2007、松前古老百話・白神復刻実行委員会。
- 吉岡玉吉、『北海道日本海漁撈漁具用語事典』、2003、自費出版。

サモア語、タヒチ語、ハワイ語の名詞的小辞の対照研究

塩谷 亨^{*1}

A Contrastive Study of Nominal Particles in Samoan, Tahitian, and Hawaiian

Toru SHIONOYA ^{*1}

(原稿受付日 平成 26 年 6 月 27 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

In this paper, nominal particles, especially prepositions and articles, in Samoan, Tahitian, and Hawaiian are examined. Since Polynesian languages derived from a common proto-language, they have many cognate nominal particles. This paper attempts to compare the usage between cognate prepositions and articles in order to illustrate similarity and difference among them. In doing so, the predicate use of each preposition/article and the co-occurrence of prepositions and articles are investigated with focusing on four groups of cognate prepositions and two groups of cognate articles. This paper shows the neutral case preposition 'o (<*ko) and the ablative preposition *mai* (<*mai) are distinct from other prepositions in that they can form a predicate noun phrase in all three languages and that they do not take a tense-aspect marker, which is essential to many types of predicate phrases.

Keywords : Polynesian languages, Nominal particles, Prepositions, Articles

1 はじめに

1.1 分析対象言語

ポリネシア諸語は起源を同じくする同系言語のグループであり、南太平洋を中心として、一部北太平洋まで含めた広い海域に分布している。お互いに広大な海により隔てられているにもかかわらず、ポリネシア諸語同士は文法的・語彙的に類似性が強い。本稿では、ポリネシア諸語のうち、北部に位置するハワイ語、東部に位置するタヒチ語、西部に位置するサモア語と、地域的に離れている三つの言語を取り上げる。ハワイ語はマルケサス語群、タヒチ語はタヒチ語群、サモア語はサモア・域外ポリネシア語群と、それぞれ、ポリネシア諸語内の異なる下位グループに属している。本稿は、

地域的にも離れていて、系統的にも異なる下位区的に属するこれら三つのポリネシア諸語を対照することにより、ポリネシア諸語の全体像に近づこうと試みるものである。

1.2 ポリネシア諸語の基本文構造

ポリネシア諸語の典型的な語順は<述語 - (主語) - (その他)>である。このうち<述語>は必須要素である。<述語>は名詞句又は動詞句のいずれかであり、<主語>及び<その他>はいずれも名詞句である。以下、例文及び表中では、サモア語、タヒチ語、ハワイ語をそれぞれ S、T、H と略記する。

(1) 述語名詞句 — 主語名詞句

(S) 'O Malia $\emptyset$ lona igoa.

(T) 'O Māria $\emptyset$ tona i'oa.

^{*1} 室蘭工業大学 ヒと文化系領域

- (H) ‘O Malia $\emptyset$ kona inoa.
 (無格) マリア (主/絶対格) 彼女の 名前
 「彼女の名前はマリアです。」

例(1)は「彼女の名前はマリアです。」という文をサモア語、タヒチ語、ハワイ語の三つのポリネシア諸語でそれぞれ表したもので、名詞句が<述語>になる例である。文は外来の人名「マリア」を含む四つの単語で構成されている。このうち、三言語で形式的に完全に一致している文頭の無格の前置詞‘o はもちろん同系である。無格の前置詞‘o は述語名詞句に付加される他、トピック名詞句にも付加されたり、主格・絶対格のように明示的な格表示がない名詞句にも付加される場合がある。いずれの場合でも、特定の格を表示することはないので、無格の前置詞と呼ぶ。また、音韻的に対応している所有形 lona~tona~kona「彼女の」と名詞 igoa ~i‘oa ~inoa「名前」も、いずれも同起源の単語である。

また、単語の配列が完全に一致していることからわかるように、これら三つの文は、文法的にも同じ構造をもつものとして分析される。尚、主格又は絶対格の名詞句は $\emptyset$ でマークされている。

上記の(1)では‘O Malia/ ‘O Māria がそれぞれ述語名詞句であり、 $\emptyset$ lona igoa / $\emptyset$ tona i‘oa / $\emptyset$ kona inoa がそれぞれ主語名詞句である。名詞句及び動詞句はそれぞれ名詞、動詞を中核とし、それに、様々な小辞が付加されて形成される。小辞とはそれ自体が単独では動詞句や名詞句を形成することが出来ず、必ず名詞又は動詞に伴って用いられる語類である。(1)では述語名詞句冒頭の無格の前置詞‘o が小辞に属する。

- (2) 述語動詞句 — その他の名詞句
 (S) ua alu atu i Patanarama.
 (完了) 行く(方向) ~に パダンアラム
 (T) ‘ua reva i Padanarama.
 (完了) 発つ ~に パダンアラム
 (H) ua hala aku la i Padanarama.
 (完了) 去る(方向) (指示詞) ~に パダンアラム
 「(彼が)パダンアラムに行った。」創世記(28:7)

例(2)は旧約聖書の同じ個所のそれぞれの言語での翻訳である。本稿では、聖書からの引用については、他の文献とは異なり書物名(章:段落)のように表記する。いずれの言語でも、動詞句が<述

語>になり、<主語>が省かれ、後ろに<その他>の名詞句が続いている。述語動詞句はいずれの言語でも、完了の指標 ua~‘ua で始まっているが、これも音韻的に対応する同起源の単語である。この完了の指標 ua~‘ua も小辞である。

1.3 ポリネシア諸語の三種類の小辞

ポリネシア諸語には様々な機能や意味を持った小辞が存在するが、本稿では、Milner (1966:xxvii) により示された三つの分類を用いる。

(3) ポリネシア諸語の小辞の分類

- (a) 名詞的小辞: 名詞の前後に付加される。冠詞、前置詞などを含む。
- (b) 動詞的小辞: 動詞の前後に付加される。時制・アスペクト指標などを含む。
- (c) 一般的小辞: 名詞的小辞とも動詞的小辞とも共起できる。強調辞等副詞的なものを含む。

例(1)の無格の前置詞‘o が名詞的小辞、例(2)の完了指標 ua~‘ua が動詞的小辞の例である。一般的小辞の例としては、例(2)のサモア語とハワイ語の例で動詞の後ろに付加されていた方向詞 atu~aku がある。方向詞は、おおまかにいうと、「近づく、遠ざかる、上方へ、下方へ」等の方向性の意味を添える小辞であり、例(2)のように動詞の後ろに付加されるほか、名詞の後ろにも付加される。例(2)で用いられた atu~aku は、「遠ざかる」方向性を示す方向詞であり「(ここから離れて) パダンアラムに行った」という意味を表している。

1.4 本研究の考察対象

1.4.1. 名詞的小辞

本稿では三つのタイプの小辞のうち、名詞的小辞に焦点を当てる。ポリネシア諸語の名詞的小辞は、名詞に前置されるものと、後置されるものに分類される。名詞に前置されるものには、前置詞、冠詞、複数指標の三つが含まれ、名詞に後置されるものには、集合指標(人間を表す名詞に後置して、「~達、~とその仲間」のような意味を表す)、呼格(「~さん・~よ」のような呼びかけで用いる)の二つが含まれる。

(4) ポリネシア諸語の名詞句の構造

前置詞-冠詞-複数指標 -名詞-集合指標-呼格

このうち、前置詞と冠詞は全てのポリネシア諸語が持っている。

前置詞-冠詞 - 名詞
 (5S) i le lagi
 (5T) i te ra'i
 (5H) i ka lani
 ～に (定) 天
 「天に」

また、名詞に後置される呼格も多くのポリネシア諸語で見られる一般的なものであり、今回の分析対象である三言語共に持っている。

(6S) Vili e!
 ヴィリ (呼格)
 「ヴィリよ！」
 Mosel & Hovdhaugen (1992:193)
 (6T) E Terii ē!
 (呼格) テリイ(呼格)
 「テリイよ」 Lazard & Peltzer (2000:201)
 (6H) Ē pua ē!
 (呼格) プア(呼格)
 「プアよ！」 Elbert & Pukiui (1979:147)

例(6S,6T,6H)はいずれも人名の後ろに呼格が付加されている。タヒチ語とハワイ語では名詞の前にも呼格の前置詞として同形の e/ē が付加されている。尚、Mosel & Hovdhaugen (1992:193)は呼格の e を名詞的小辞ではなく接尾辞と分析している。

一方、複数指標と集合指標はタヒチ語とハワイ語には見られるが、サモア語には見られない。

(7T) E mau 'oire ato'a anei ...?
 (不定)(複数) 町 ～も (疑問)
 「(いくつかの) 町もありますか。」
 Saint-Exupéry (2006:52)
 (7H) He mau mea maika'i nō na'e.
 (不定)(複数) もの 良い (強調)
 「実に良いものだ。」 Beckwith (2007:9)
 (8T) E 'aiū mā!
 (呼格) 赤ん坊 (集合)
 「おーい、赤ん坊たち。」 Saint-Exupéry (2006:24)
 (8H) Ē Kipunuiaiakamau mā,...
 (呼格) キプヌイアイアカマヌ (集合)

「おーい、キプヌイアイアカマヌ達...」
 Fornander (1916-1917:123)

例(7T,7H)では複数指標 mau が名詞の前に置かれている。例(8T, 8H) では複数指標 mā が名詞の後に置かれている。

ここまでの比較の結果をまとめると次のようになる。

	前置			後置	
	前置詞	冠詞	複数指標	集合指標	呼格
S	○	○	×	×	○
T	○	○	○	○	○
H	○	○	○	○	○

(9)名詞的小辞の有無

以上のように、タヒチ語とハワイ語は一致しているのに対して、サモア語は複数指標と集合指標がない点で他の二言語と異なっている。

ハワイ語はマルケサス語群、タヒチ語はタヒチ語群と異なる下位区分に属しているが、この二つの語群は共に東部ポリネシア諸語という上位区分に属しており、サモア語と分岐した後に生じた変化を共有しているため、このように、サモア語には見られない共通の要素がハワイ語とタヒチ語に見られる場合がある。

本稿では、名詞的小辞のうち、多くのポリネシア諸語が同起源の形式を共有している前置詞と冠詞について論じる。その中でも、以下の表(10)と(11)に示すように、Clark (1976)によりポリネシア祖語まで遡れると指摘され、三言語で同系と認められる5セットの前置詞と、2つの冠詞を今回の分析対象とする。明示的な形式を持たない $\emptyset$ は除外する。

祖語	意味	S	T	H
* $\emptyset$	主格/(S)絶対格	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
*e	行為者格/(S)能格	e	e	e
*i / *ki	対格/所格/与格	i ~'i	i	i
*mai	起点「～から」	mai	mai	mai
*a/*o	所有「～の」	a/o	a/o	a/o
*ko	無格	'o	'o	'o

(10)祖語まで遡れる前置詞一覧

上の表中で(S)を付したのはサモア語の能格型格表示で用いられる場合の意味である。サモア語は他

動詞の一部で能格型の格表示を持つ。対格/所格/与格の前置詞は元々 *i / *ki の二つであったのが、言語によっては一つの形 i に統合され、結果として前置詞 i は多機能になっている。

祖語	意味	S	T	H
*te	定	le	te	ke/ka
*sa	不定	se	e	he

(11)祖語まで遡れる冠詞一覧

これらはいずれも元々同系であったとされる小辞である。従って、それらを対照することにより、元々同じであったはずの意味・用法がどのように変わっていったかが示されると期待される。

1.4.2 対照する項目

Clark (1976)でも指摘されているように、ポリネシア祖語まで遡れる名詞的小辞のそれぞれの表す意味については大きな差はない。そこで、本稿では、意味ではなく、文中での機能と、共起関係的に絞って対照を行う。

文中の機能としては、述語用法に着目する。既に例(1)でも見たように、ポリネシア諸語においては、動詞句だけではなく、前置詞や冠詞が導く名詞句が述語になる場合がある。しかしながら、全ての言語で、全ての前置詞又は冠詞が述語名詞句を導けるわけではない。そこで、それぞれの言語でどの前置詞あるいは冠詞が述語を導くのか分析する。

Mosel & Hovdhaugen (1992:406)がサモア語について指摘しているように言語によっては、前置詞あるいは冠詞が導く名詞句をあたかも一つの動詞のように扱い、本来は動詞に付加される動詞的小辞である時制・アスペクト指標を用いて、擬似動詞句のような形で述語として用いる場合がある。

(12S) ‘Ua i luga le lā.
(完了)(所格)上 (定) 太陽
「太陽が昇った。」 Milner (1966:115)

‘ua は例(2)でも登場したが、完了を表す時制/相指標の一つで、動詞的小辞に属するものである。例(12S)では前置詞 i が導く名詞句 i luga 「上に」が動詞のごとく扱われ、その前に動詞的小辞の一つである時制指標 ‘ua (完了)が付加されて擬似動詞句のような形で述語をなしている。これについても、

どの言語のどの前置詞あるいは冠詞でこのような用法があるのか分析する。

もう一つの対照の視点である共起関係については、どの前置詞がどの冠詞と共起するのかについて分析する。

1.4.3 分析に用いたデータ及びその表記法

今回の分析対象言語のうち、ハワイ語では現在純粋なネイティブスピーカーから生の言語データを収集するのは極めて困難な状況にあるが、幸い、19世紀半ば以降に正書法が確立し多数の文献資料が残されている。そこで、条件を統一するため、今回の分析データを専ら文献資料から取った。

今回用いた資料には、聖書及びキリスト教関連文献 {文献一覧の(2)、(4)、(5)、(22)}、伝説・民間伝承・歴史・物語 {文献一覧の(3)、(8)、(9)、(10)、(11)、(14)、(17)、(18)、(19)、(21)}、及び、それぞれの言語についての先行研究である辞書及び文法書 {文献一覧の(1)、(7)、(12)、(13)、(15)、(16)}が含まれる。

表記法はそれぞれの言語において、最も一般的に用いられている正書法により表記する。尚、表記中に用いられている記号 (‘) は声門閉鎖音を表すものである。又、ポリネシア諸語の正書法において用いられるものではないが、例示の都合上、明示的な形式を持たない形態を表記する必要がある場合に、ゼロ記号 (∅) を用いて表した。

2 前置詞が導く名詞句の述語用法について

2.1 名詞句として

2.1.1 サモア語

サモア語においては、無格の前置詞 ‘o と起点の前置詞 mai が述語名詞句を形成している例がある。以下、本節では、述語名詞句を下線で表記する。

(13S) ‘O le ulu lenei.
(無格)(定)パンノキ これ
「これはパンノキだ。」

Steubel & Herman (1987:11)

(14S) Mai lēfea nu‘u ‘ea ‘oe ?
(起点) どの 村 (疑問) あなた
「あなたはどの村からですか。」
サムエル記下(15:2)

例(13S)と(14S)では、‘o le ulu 「パンノキだ」と Mai

lēfea nu‘u ‘ea 「どの村からですか」がそれぞれ前置詞に導かれる述語名詞句となっている。

2.1.2 タヒチ語

タヒチ語においても、無格の前置詞‘o と起点の前置詞 mai が述語名詞句を形成している例がある他、所有の前置詞 o/a が述語名詞句を形成している例もある。

- (15T) ‘O te taote tei haere mai.
(無格)(定)医師 (関係詞)来る (方向)
「来たのは医師です。」
Lazard et Peltzer (2000:35)
- (16T) Mai Huahine mai te mau ‘orometua.
(起点) Huahine (方向)(定)(複数) 教員
「教員達はフアヒネ島からです。」
Lazard et Peltzer (2000:192)
- (17T) O Tama terā fare ‘āpī.
(所有)Tama あの 家 新しい
「あの新しい家は Tama のです。」
Lazard et Peltzer (2000:193)
- (18T) A rāua terā fa‘a‘apu.
(所有)彼らあの 畑
「あの畑は彼らのです。」
Lazard et Peltzer (2000:194)

例(15T)-(18T)で、それぞれ下線部が前置詞に導かれる述語名詞句である。

2.1.3 ハワイ語

ハワイ語においては、無格の前置詞‘o と起点の前置詞 mai が述語名詞句を形成している例がある他、所/与/対格の前置詞 i が述語名詞句を形成している例もある。

- (19H) ‘O ke ana ka hale o kekahi po‘e...
(無格)(定)洞窟 (定)家 (所有) ある 人々
「ある人達の家は洞窟だ。」 Malo (1987:82)
- (20H) Mai Hawai‘i mai nei au,...
(起点)ハワイ (方向) (指示詞) 私
「私はハワイからです。」
Fornander (1918-9:567)
- (21H) I he au, i uka, i kai, ...?
(所格)どこ 私 (所格) 山方 (所格) 海方
「私はどこに？山方に、海方に...」
Fornander (1918-9:141)

例(19H)-(21H)で、それぞれ下線部が前置詞に導か

れる述語名詞句である。

2.2 擬似動詞句として

2.2.1 サモア語

サモア語においては、所有の前置詞 a/o と所/与/対格の前置詞 i/i が時制/相指標の付加を伴って述語を成す例がある。

- (22S) E a Feleti le ta‘avale.
(未完了)(所有) Faleti (定) 車
「車はファレティののです。」
Mosel & Hovdhaugen (1992:408)
- (23S) Sā i Apia lo mātou tinā...
(過去)(所格)Apia 私たちの 母
「私たちの母はアピアにいた。」
Mosel & Hovdhaugen (1992:408)

例(22S)で、所有の前置詞 a が導く名詞句 a Faleti「ファレティの」が動詞句のように扱われ、前に動詞的小辞に属する未完了の時制/相指標 e が付加され、述語を成している。例(23S)でも、所格の前置詞 i が導く名詞句 i Apia「アピアに」が動詞句のように扱われ、前に動詞的小辞に属する過去の時制/相指標 sā が付加され、述語を成している。

2.2.2 タヒチ語

タヒチ語においては、明示的に＜時制/相指標＋前置詞＋名詞＞という形で述語名詞句を導く例は見られなかったが、その代りに、未来における場所等を表す ei、現在における場所等を表す tei、過去における場所等を表す i という三つの小辞が述語名詞句を導く。これらの形については、Lazard et Peltzer (1991:21)が、ei と tei は未完了の時制/相指標 e、現在の時制/相指標 tē と前置詞 i がそれぞれ結びついた形であるとの分析を提示し、Ross (1976:35)は、マオリ語の同様の小辞について、i は*i(過去)と前置詞 i が、tei は*tee(現在)と前置詞 i がそれぞれ結びついた形であるという分析を示した。これらを総合するとタヒチ語の三つの形 ei、tei、i はそれぞれ次のように分析される。

ei (未来の場所)	未完了 e と前置詞 i が融合
tei(現在の場所)	現在の tē と前置詞 i が融合
i (過去の場所)	完了の i と前置詞 i が融合

(24)タヒチ語の小辞 ei、tei、i

この分析はこれらの小辞の意味を適切に説明する

ことができる。

(25T) Ei te ta'ata tia'i ra
(未完了-所格)(定) 警備員 (指示詞)

te tāvirī

(冠詞)鍵

「鍵は警備員にあるだろう。」

Lazard et Peltzer (2000:43)

(26T) Tei te fare ta'u tipi
(現在-所格)(定)家 私のナイフ

「私のナイフは家にある。」

Académie tahitienne (1986:433)

(27T) I te fare nei te taote.
(完了-所格)(定) 家 (指示詞) (定) 医師

「医師は家にいた。」

Lazard et Peltzer (2000:43)

上記の例で、それぞれ(24)で示したように、前置詞の前に時制/相指標が付加されているとすると、いずれも、前置詞 *i* が導く名詞句が動詞句のごとく扱われ、動詞的小辞に属する時制/相指標を付加した擬似動詞句として述語を成していると分析される。

2.2.3 ハワイ語

ハワイ語においては該当する例は見つからなかった。上述のタヒチ語の例文は、主に、存在文的な意味の例文である。ハワイ語は、Elbert and Pukui (1979:54)が指摘しているように、前置詞述語文に限らず、存在を表す文においては時制/相指標と共に起しない傾向がある。

3 冠詞が導く名詞句の述語用法について

3.1 名詞句として

3.1.1 サモア語

サモア語では該当する例は見つからなかった。

3.1.2 タヒチ語

タヒチ語においては、不定冠詞 *e* が導く名詞句が述語を成す。

(28T) E manu terā.

(不定) 鳥 あれ

「あれは鳥だ。」 Lazard et Peltzer (1991:36)

例(28T)では、不定冠詞 *e* が導く名詞句 *e manu* 「鳥だ」が述語となっている。

3.1.3 ハワイ語

タヒチ語と同様、ハワイ語においても、不定冠詞 *he* が導く名詞句が述語を成す。

(29H) He kumu 'o Pua.

(不定) 教師 (無格) Pua

「プアは教師だ。」 Elbert & Pukui (1979:156)

例(29H)では、不定冠詞 *he* が導く名詞句 *he kumu* 「教師だ」が述語となっている。

3.2 擬似動詞句として

3.2.1 サモア語

サモア語においては、Mosel & Hovdhaugen (1992:404)が不定冠詞、特に単数、に時制/相指標が付いて、「~のようだ」のような意味を表す述語となる例を挙げている。

(30S) Ua se va'a tū matagi.

(完了)(不定) 船 立つ 風

「風に立つ船のようだ。」

Mosel & Hovdhaugen (1992:404)

例(30S)では、不定冠詞 *se* に導かれる *se va'a tū matagi* 「風に立つ船」が動詞句のように扱われ、前に完了の時制/相指標 *ua* が付加されて、疑似動詞句として述語を成している。

定冠詞の導く名詞句に時制/相指標が付加される例は見られなかった。

今回の分析対象ではないが、不定冠詞単数以外に、不定冠詞複数の前に時制/相指標が付加され疑似動詞句として述語を成している例があった。

(31S) Ua ni solofanua po'a e pepeti

(完了)(不定)馬 雄の (未完了)太った

i lātou

(人称) 彼ら

「彼らは太った牡馬のようだった。」

エレミヤ書(5:8)

例(31S)では、不定冠詞複数 *ni* が導く名詞句 *ni solofanua po'a e pepeti* 「太っていて雄の複数の馬」の前に完了の時制/相指標 *ua* が付加されて、疑似動詞句として述語を成している。

3.2.2 タヒチ語

タヒチ語においては該当する例は発見されなか

った。

3.2.3 ハワイ語

ハワイ語においては該当する例は発見されなかった。

4 前置詞と冠詞の共起について

4.1 サモア語

サモア語においては定冠詞 *le* と不定冠詞 *se* は全ての前置詞と共起する。以下、本節では該当する前置詞句を下線で表記する。

- (32S) ‘a e talia e le tamaita‘i,
そして(未完了)受け入れる(能格)(定)婦人
「そして、婦人が(それを)受け入れて...」
Kramer (1995:31)

- (33S) E lē iloa fo‘i
(未完了)(否定)知っている も
e se tagata...
(能格)(不定) 人
「人は誰も知らない。」
Steubel & Herman (1987:48)

- (34S) Na oso i lalo le tama
(過去)飛ぶ(所格)下 (定) 子供
mai le solofanua,...
(方向)(定) 馬
「子供が馬から飛び降りた。」
Mosel & Hovdhaugen (1992:147)
- (35S) mai se tusi a Iosefa Samita
(起点)(不定)手紙(所有)Iosefa Samita
「Iosefa Samita の手紙から (の引用)」
The Church of Jesus Christ of Latter-day
Saints (2007:47)

- (36S) ‘O le Tala o le Taua o le Uso
(無格)(定)話 (所有)(定)戦い(所有)(定) 兄弟
「兄弟の戦いの話。」 Kramer (1995:29)

- (37S) se mavaega a se Ali‘i Sili
(不定)遺言 (所有)(不定)領主 高位の
「高位の領主の遺言」 Henry (1980:115)

- (38S) ma tu‘u i le tanoa
そして 置く (所格)(定) ボウル
「そしてボウルの中に入れる。」
Kramer (1995:22)

- (39S) ...sui i se tanoa ‘ava, ..
ミックスする(所格)(不定)ボウル カヴァ
「カヴァ(サモアの伝統飲料)用ボウルで(カ

ヴァを) ミックスする。」 Kramer (1995:554)

- (40S) ‘O le Tala o le Taua o le Uso
(無格)(定)話 (所有)(定)戦い(所有)(定) 兄弟
「兄弟の戦いの話。」 Kramer (1995:29)

- (41S) ‘O se ā lā lou mana‘o?
(無格)(不定) 何(疑問) あなたの 望み
「あなたの望みは何ですか。」 Moyle (1983:284)

4.2 タヒチ語

タヒチ語においては、定冠詞 *te* は全ての前置詞と共起するが、不定冠詞 *e* はどれとも共起しない。

- (42T) ‘Ua hāmani-hia e te tamuta
(完了)作る-(受身)(行為者)(定) 大工
tō matou fare.
私たちの 家
「大工が私たちの家を作った。」
Lazard et Peltzer (2000:66)

- (43T) mai te matahiti 1825 mai
(起点) (定) 年 (方向)
「1825 年から」 Musée (2001:8)

- (44T) ‘O te fare o te ‘orometua terā.
(無格)(定)家 (所有)(定) 教師 あれ
「あれは教師の家だ。」
Lazard et Peltzer (2000:175)

- (45T) ‘Ua haere ‘o Petero i te fare.
(完了)行く (無格)Petero (所格)(定) 家
「ペテロは家に行った。」
Lazard et Peltzer (2000:64)

- (46T) ‘O te fare o te ‘orometua terā.
(無格)(定)家 (所有)(定) 教師 あれ
「あれは教師の家だ。」
Lazard et Peltzer (2000:175)

下線部で示すように、定冠詞 *te* は全ての前置詞と共起している。一方、不定冠詞 *e* が共起する例は見られない。

4.3 ハワイ語

タヒチ語と同様、ハワイ語語においても、定冠詞 *ka/ke* は全ての前置詞と共起するが、不定冠詞 *he* はどれとも共起しない。

- (47H) Ke ‘aina maila e ka manu.
(現在)食べる-(受身)(方向) (行為者)(定)鳥
「鳥によって食べられている。」

Elbert & Pukui (1979:146)

(48H) mai ka wā kahiko mai, ...

(起点)(定) 時 昔の (方向)

「昔から...」 Beckwith (2007:149)

(49H) ka hale o ke ali'i

(定) 家 (所有)(定) 領主

「領主の家」 Elbert & Pukui (1979:136)

(50H) Ua makemake au i ka hale.

(完了)欲しい 私(対格)(定) 家

「私は家が欲しかった。」

Elbert & Pukui (1979:98)

(51H) O ke ali'i nō ia.

(無格)(定) 領主(強調) 彼

「彼がまさに領主だ。」

Elbert & Pukui (1979:132)

このように、定冠詞は三つの言語で今回調べた全ての前置詞と共起するのに対して、不定冠詞はサモア語では全ての前置詞と共起するが、ハワイ語とタヒチ語では不定冠詞は前置詞と共起しない。

前節で述べたように、タヒチ語とハワイ語において、不定冠詞には述語を導く用法がある。そのことが、不定冠詞が付いた名詞句について、他の名詞句とは異なる制約を引き起こしている可能性がある。

5 考察

5.1 前置詞が述語名詞句を導く場合

今回調べた6セットの前置詞のうち、*i/*kiに由来する前置詞、*a/*oに由来する前置詞、*maiに由来する前置詞、*koに由来する前置詞が、いずれかの言語で述語名詞句を導く用法を持っている。その中でも、無格の前置詞'oと起点の前置詞 mai と他の前置詞との間に大きな断絶が見られた。無格の前置詞'oと起点の前置詞 mai はいずれの言語でも、述語名詞句を導くという機能を持っている。

	所有 (a/o)	所/与/対格 (i/i')	起点 (mai)	無格 (o)
S	TA+P+N		P+N	
T	P+N	{TA+P}+N (融合形)		
H	該当無し	P+N		

{N:名詞、P:前置詞、TA:時制/相指標}

(52)前置詞が述語名詞句を導く時の形式

所有と所/与/対格の前置詞については、言語によって様々であるが、サモア語ではそれらの両方について<時制/相+前置詞>という形を用いたのに対して、ハワイ語では、<時制/相+前置詞>という形が一切なかった点が対照的であった。一方、タヒチ語では、所/与/対格を<時制/相+前置詞>の形式で、所有を<前置詞>のみという形式で用いるという点で、サモア語とハワイ語の中間的な様相を呈していると言える。

5.2 冠詞が述語名詞句を導く場合

定冠詞については、いずれの言語でも、述語名詞句を導く例が見られなかった。

	定冠詞	不定冠詞
S	該当無し	TA+A+N
T		A+N
H		

{N:名詞、A:冠詞、TA:時制/相指標}

(53)冠詞が述語名詞句を導く時の形式

不定冠詞については、サモア語では、冠詞だけでは述語名詞句を導くことはないが、時制/相指標を前に付加することで述語をなすことがあり、一方、タヒチ語とハワイ語では、不定冠詞だけで述語名詞句を導くことができる。

5.3 前置詞と冠詞の共起

三つの言語全てにおいて、今回調べた全ての前置詞と定冠詞が共起する。一方、不定冠詞については、サモア語では全ての前置詞と共起するが、タヒチ語及ハワイ語では不定冠詞はどの前置詞とも共起しない。ここでも、サモア語と他の二つの言語の間に大きな差が見られた。

6 結び

6.1. まとめ

前置詞の中でも、無格の前置詞'oと起点の前置詞 mai は三つ全ての言語で、名詞述語を導くことができ、その際には、時制/相指標は付加されないという点で一貫していた。しかしながら、その他の前置詞については、1) 述語名詞句を形成できるか否か、更に、2) 形成できる場合には時制/相指標の付加が必要か否か、という二つの点で多様性を示していた。

このようなことから、ポリネシア諸語の前置詞については、述語形成機能をもつ前置詞と述語形成機能を持たない前置詞の二種類を区別するのが適当と思われる。前者は、前置詞に述語形成機能があるため、＜前置詞+名詞＞の形で述語をなし、後者は、それ自体には述語形成機能がないため、述語形成機能をもつ時制/相指標を付加し＜時制/相指標+前置詞+名詞＞の形で述語を成す。

以下に、今回の分析対象となった前置詞について、述語形成機能の有無の一覧を示す。それ自体述語形成機能があるものは+、時制/相指標の付加により述語を形成するものは(+)、そもそも述語を成さないものは－で表す。

	S	T	H	述語に なりにくい ↑↓ なりやすい
e	—	—	—	
a/o	(+)	+	—	
i/i	(+)	(+)	+	
mai	+	+	+	
‘o	+	+	+	

(54) 今回の分析対象前置詞の述語形成機能

このように、最も述語になりやすい前置詞‘o と mai から、最もなりにくい前置詞 e まで、述語になりやすさの連続体が見された。このうち無格の‘o はその主たる機能が述語名詞句を導く機能であり、最も述語に成りやすいのは当然のことである。それ以外の前置詞については、場所や方向などを表す前置詞 mai/i/i が、純粋に文法的な機能を表す e/a/o よりも述語になりやすいという傾向が示されている。これは、純粋に文法的な機能を表す前置詞よりも副詞的な機能を表す前置詞の方が、意味的に独立性が高く、従って、述語となりやすいということを示唆しているとも考えられる。

サモア語の不定冠詞はそれ自体では述語を導く機能もなく、様々な前置詞と共に起ることから、より不定冠詞的であると言える。述語を導く場合には時制/相指標の付加により、擬似動詞句として用いられる。一方、タヒチ語とハワイ語における不定冠詞は、前置詞との共起ができないことから、もはや冠詞としての性質は希薄となり、むしろ述語名詞句の形成という機能が強くなっている。実際、Académie tahitienne (1986)、Lazard et Peltzer (1991) 及び (2000) のように、近年のタヒチ語の分析では、e は不定冠詞ではなく、全く独立の範疇として扱われている。

6.2. 今後の課題

タヒチ語の所/与/対格の前置詞 i が述語名詞句を導く場合に用いられる三つの形式 ei、tei、i の存在は示唆的である。これらの形が Clark (1976:35) や Lazard et Peltzer (1991:21) が示した分析のように、それぞれ、時制/相指標と前置詞の融合形であるなら、同様の説明が、タヒチ語とハワイ語の不定冠詞にも適用できる可能性がある。

すなわち、元々はサモア語の不定冠詞のように述語形成機能を持たない純粋な冠詞であったタヒチ語とハワイ語の不定冠詞に、述語を導く機能を持つ何らかの時制/相指標、或いは、同じく述語を導く機能をもつ無格の前置詞‘o などの機能が融合した、として説明が可能と思われる。

このような分析によれば、タヒチ語とハワイ語の不定冠詞が、時制/相指標や前置詞と共に起らないことがうまく説明される。Shionoya (2009) ではハワイ語の不定冠詞 he は元々の不定冠詞と無格の前置詞‘o の機能が統合したとして分析していたが、今回、もう一つの可能性として、時制/相指標、例えば、未完了の e 等の機能が不定冠詞に統合したという分析の可能性が示された。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C) 「ポリネシア諸語における様々な小辞の機能・用法に見られる差異について」(課題番号: 25370455 研究代表者: 塩谷亨) による研究成果の一部である。また、二名の匿名の査読委員の方々から貴重なコメントを頂いた。この場を借りてお礼を申し上げたい。

文献

- (1) Académie tahitienne. 1986. Grammaire de la langue tahitienne. Papeete: Fare Vanaa.
- (2) American Bible Society. 1993. Baibala Hemolele. New York.
- (3) Beckwith, Martha W. 2007. Kepelino's Traditions of Hawaii. Honolulu: Bishop Museum Press.
- (4) Bible Society in the South Pacific. 1969. O le Tusi Paia. Suva.
- (5) Bible Society in the South Pacific. 1997. Te Parau a te Atua. Suva.
- (6) Clark, Ross. 1976. Aspects of Proto-Polynesian Syntax. Linguistic Society of New Zealand
- (7) Elbert, Samuel H. and Mary K. Pukui. 1979. Hawaiian Grammar. Honolulu: University of Hawaii Press.
- (8) Fornander, Abraham. 1916-1917. Fornander Collection of Hawaiian Antiquities and Folk-Lore. Vol. 4.

- Honolulu: Bishop Museum Press.
- (9) Fornander, Abraham. 1918-1919. Fornander Collection of Hawaiian Antiquities and Folk-Lore. Vol. 5. Honolulu: Bishop Museum Press.
- (10) Henry, Alii Felela Fred. 1980. Talafaasolopito o Samoa. Apia: Commercial Printers. Translated into Samoan by Faifeau T. K. Faletose.
- (11) Kramer, Augustin. 1995. The Samoa Islands. Vol.1. Honolulu: University of Hawai Press. Translated by Theodore Verhaaren.
- (12) Lazard, Gilbert et Louise Peltzer. 1991. *Predicates in Tahitian*. Oceanic Linguistics Vol.30 No.1, 1-31.
- (13) Lazard, Gilbert et Louise Peltzer. 2000. Structure de la langue tahitienne. Paris: Peeters.
- (14) Malo, Davida. 1987. Ka Mo'olelo Hawai'i. Honolulu: Kapiolani Community College.
- (15) Milner, G. B. 1966. Samoan Dictionary. London: Oxford University Press.
- (16) Mosel, Ulrike and Even Hovdhaugen. 1992. Samoan Reference Grammar. Oslo: Scandinavian University Press.
- (17) Moyle, Richard. 1983. Fagogo: Fables from Samoa. Auckland: Auckland University Press
- (18) Musée de Tahiti et des îles. 2001. Tahiti 1842-1848. Punaauia: Musée de Tahiti et des îles
- (19) Saint-Exupéry, de Antoine. 2006. Te tamaiti ari'i iti. Translated into Tahitian by John Faatae Martin. Papeete: Haere Po.
- (20) Shionoya, Toru. 2009. *Hawaiian he as a prenominal / verbal particle*. Language and Linguistics in Oceania Vol.1, 1-12.
- (21) Steubel, C. and Brother Herman. 1987. Tala O le Vavau. Auckland: Pasifika Press.
- (22) The Church of Jesus Christ of Latter-day Saints. 2007. Aoaoga A Peresitene O Le Ekalesia Iosefa Samita. Salt Lake City: The Church of Jesus Christ of Latter-day Saints. A PDF version downloaded on Jan. 1, 2014.

研 究 報 告

デンマーク語における副次強勢の起源について

三村 竜之^{*1}On the Origin and Development of
Secondary Stress in DanishTatsuyuki MIMURA^{*1}

(原稿受付日 平成 26 年 6 月 27 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

This study aims at empirically examining the origin and the historical development of secondary stress in morphologically simple words in Danish. There have been few remarks made on the diachronic aspect of the stress contour of those simplexes, and I will argue that the 'primary-secondary' stress pattern of those words has been historically developed from the 'weak-primary' pattern which those simplex words originally had as the result of accent change based on the following three grounds: i) documented records found in the literature and several dictionaries compiled around the late 18th and 19th centuries; ii) data from other Scandinavian dialects; iii) free variations of the two stress patterns, 'primary-secondary' and 'weak-primary', found in the present-day Danish. From the above argument, it will be concluded that all of those simplex words are etymologically loanwords with 'weak-primary' stress pattern, and their original primary stress is supposed to have moved to the initial syllable in accordance with the native Nordic/Germanic stress pattern; thus, the secondary stress in the present stress pattern is a surviving trace of the primary stress in an archaic 'weak-primary' pattern.

Keywords: Danish, secondary stress, late 18th and 19th centuries, stress shift, Sandnes Norwegian

1 序

1. 1 本研究の背景と目的

デンマーク語は、英語やドイツ語などその他のゲルマン諸語と同様に、ストレスアクセントの言語であり、語は主強勢を担う音節を必ず一つ有する。ほとんどの単純語（単一の形態素からなる語；形態素境界を内在しない語）は主強勢を一つ有するのみであるが、主強勢の他に副次強勢も有し、全体として「主強勢+副次強勢」という強勢の型を有する単純語も、僅かではあるがデンマーク語に存在することが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。

この「主強勢+副次強勢」という型は、実は複合

語において典型的に観察される強勢型であり（第 2.1 節を参照）、従って、この点で「主強勢+副次強勢」という型を有する単純語は、その形態論的な特性に反する韻律的振る舞いを示すという意味で極めて特異であると言える。

このような「主強勢+副次強勢」という型を有する単純語を、これまで筆者は「韻律的複合語」と呼んできたが（第 2.2 節を参照）、この韻律的複合語の特異性の背後に存在するであろう史的側面に関しては、管見に及ぶ範囲では、これまで言及してきた先行研究は皆無に等しい。そこで本稿では、17 世紀から 18 世紀にかけて編纂並びに出版された研究書や辞書における記録資料や、筆者自身が行ったフィールドワークを通じて採取した一次資料をに基づいて考察を行い、韻律的複合語に現れる「主強勢+副次

^{*1} 室蘭工業大学 ヒト文化系領域

強勢」という型が史的变化の結果産み出されたものであると推定することが可能であることを主張する。

1. 2 デンマーク語について

1. 2. 1 概要

デンマーク語は、英語やドイツ語と同じくインド・ヨーロッパ語族のゲルマン語派に属し、ノルウェー語やスウェーデン語、アイスランド語、フェロー語(Faroese)とともに北ゲルマン(ノルド)諸語を成す。

話者人口は、自治権を有する領土であるフェロー諸島とグリーンランドを除く、いわゆる「本土」に相当する国土に限定すると、2014年1月の時点で約560万人(出典: <http://www.statistikbanken.dk>)と推定される。

なお、公用語としての位置付けではないが、国境を接するドイツ連邦共和国の北部にも話者が確認されている。また、かつてデンマーク王国の支配下にあったアイスランド共和国では1999年まで第一外国語(必修科目)として位置づけられていたため、デンマーク語を解する人々は(アイスランド語とデンマーク語の類型論的な類似性の低さを考慮すると)比較的多いと言えよう。

1. 2. 2 デンマーク語のアクセント

既に触れたように、デンマーク語はストレス(強さ/強弱)アクセントの言語である。従って、語は必ず主強勢を担う音節を一つ有する。

デンマーク語のストレスアクセントは、例えば *Áugust*「アウグスト【人名】」と *augúst*「八月」の対や、*billard*「ビリヤード」と *billiárd*「千兆の」、*stándard*「基準」と *standárt*「旗」のような対が示すように、いわゆる「弁別的機能」は有するものの、語中の主強勢の位置の違いのみで知的意味が弁別される最小対の例は極めて少なく、従ってデンマーク語のストレスアクセントの弁別力は極めて低い。むしろ、デンマーク語のストレスアクセントは、機能的には、語に一ヶ所存在する主強勢が語のまとまりを明示する、換言すれば主強勢の数が語(厳密にはアクセント上のまとまり、あるいは「アクセント単位」)の数を明示する働き(伝統的な用語では「頂点表示機能」)を有していると言えよう。

ゲルマン祖語やノルド祖語から受け継いだ、いわゆる固有語は、基本的に一音節語ないし二音節語であるため語中の主強勢の位置は高い確率で予測可能であるが、(特にロマンス系の)外来語や多音節語も

考慮に入れると、主強勢の位置は必ずしも規則による一般化が可能ではなく、飽くまで傾向性を指摘できるに過ぎない。その一方で、語の主強勢の位置は、語の長さ(音節数)を問わず、必ず後ろから数えて三つ目までの音節の何れか(末尾音節、次末音節、前次末音節)にのみ置かれる⁽³⁾。

デンマーク語では、英語などその他のゲルマン語と同様に、強勢の所在と当該音節の構造(音節量)との間には緊密な相関関係が存在し、短母音開音節構造を有する音節(CV音節)は強勢を担う音節としては不適格である⁽⁴⁾。

1. 3 本研究の資料

本稿において引用する資料は、先行研究のものを除き、全て筆者がフィールドワークを通じて採取した一次資料である。

本研究の対象である「韻律的複合語」、つまり「主強勢+副次強勢」という型を伴う単純語の資料は、2005年から2009年にかけて断続的に行ってきたフィールドワークを通じてその一部は既に採取済みであった。その後、資料の補充と拡充を目的として、発音辞典(Molbæk Hansen (1990); 見出し語41102語を収録)を基に作成した47項目からなる調査票を用いて、2013年に再び実地調査を実施した。

本研究に関わる資料の採取の際に尽力して下さったインフォーマントは以下の方々:

(1) a. Martin Graugaard Hause 氏(男性)

1980年ユトランド半島(Jylland)北西部 Struer の生まれ

b. Lise Schou 氏(女性)

1962年 Jylland 南西部の Esbjerg の生まれ。20歳頃にコペンハーゲン(København)に移る。

c. Evi Egholm 氏(女性)

1973年 Jylland 北部の Lemvig の生まれ。生後間もなくフューン島(Fyn)のオーデンセ(Odense)に移り19歳まで同地に居住の後、Københavnに移る。

なお、2013年の調査ではインフォーマントはEgholm氏のみである。

(1)に示した方々は、皆、いわゆる「地方出身者」に相当する方々である。しかし、実際の調査において教えて下さった発音は各々の出身地の方言的特徴を幾分かは窺わせるものの、報告された語それ自体はKøbenhavnの方言を基盤とするいわゆる標準方言のものと差異は確認されなかった。以上から、本研究で扱うデンマーク語は、いわゆる地域共通語的な

表 1: デンマーク語における接辞と強勢型に及ぼす影響 (Mimura 2009: 209)

	Inflectional	Derivational		
Prefix		<i>be-: bestíge</i> <i>er-: erkénde</i>		<i>af-: áftale</i> <i>sam-: sám tale</i> <i>und-: úndtage</i> <i>u-: úheld</i> <i>mis-: místænke</i>
Suffix	<i>-ede: lúkkede</i> <i>-en: avísen</i> <i>-e: húse</i> <i>-e: økonómiske</i> <i>-er: génnemser</i> <i>-t: normált</i>	<i>-skab: ágteskab</i> <i>-dom: álderdóm</i> <i>-hed: rígtighed</i> <i>-agtig: dámeagtig</i> <i>-ig: kúnstig</i> <i>-som: vóldsom</i>	<i>-isk: européisk</i> <i>-sk: japánsk</i> <i>-er: europáer</i> <i>-ig: uhéldig</i> <i>-lig: misúndelig</i> <i>-som: opfíndsom</i>	<i>-itet: humanítét</i> <i>-ist: telefoníst</i> <i>-eri: bagerí</i> <i>-isme: marxísme</i> <i>-agtig: barnágtig</i>
	Stress-neutral		Stress-shifting	Stress-bearing
			Stress-affecting	

変種と捉えて差し支えないと言える。

2 デンマーク語における副次強勢と語構造

2.1 複合語と派生語

これまでの筆者の調査から、デンマーク語における副次強勢には、以下に示す三種類の語においてのみ現れることが確認されている: (i) 複合語、(ii) 派生語、(iii) 単純語の一部 (いわゆる「韻律的複合語」)。

まず複合語における副次強勢について詳しく見ることにする。デンマーク語の複合語は、品詞の別や構成要素の数、複合語内部の構造(「右枝分かれ構造」か「左枝分かれ構造」)の別を問わず、原則的に以下に示す規則により複合語全体の強勢型を導くことが可能である⁽⁵⁾:

(2) 複合語アクセント規則

The primary stress of the first immediate constituent appears as the primary stress of a whole compound, and the secondary stress of a whole compound is derived from the primary stress of its second immediate constituent.^{*2}

つまり、複合語における副次強勢とは、(いわゆる「直接構成素」に分析した際の) 後部要素 ([A[BC]] という内部構造であれば BC が、[[AB]C] という内部構造であれば C がこれに相当) が単独形で有する主強勢が複合語のレベルにおいて実現したものである、と

言うことができる。

続いて、派生後形成における副次強勢について概観する。デンマーク語の派生接辞には接頭辞と接尾辞の二種類があり、それぞれ、語幹の強勢型や派生語全体の強勢型に作用する働きの点から、以下に示す三つのグループに分類される(表 1 を参照⁽⁵⁾; 表の黒塗り部分は該当する接辞が存在しないことを示す) :

- (3) a. 語幹の主強勢に影響を与えない接辞 (stress-neutral affixes)
- b. 語幹の主強勢を語幹内部で移動させる接辞 (stress-shifting affixes)
- c. 自身で主強勢を担う接辞 (stress-bearing affixes)

上述の二つの「種類」(接頭辞か接尾辞か) と三種の「機能」から論理的に導かれる六種類の接辞の内、デンマーク語には五種類が存在し、その内、「語幹の主強勢に影響しない接尾辞」の一部のみが派生語全体の副次強勢を担う。以下に具体例を示す⁽⁵⁾ (ハイフンは形態素境界を示す; 以降、強勢を担う音節の母音を大文字で、また主強勢を担う音節の母音はさらにアクセント記号を付して表わすことにする; また必要に応じて[:]にて長母音を示す) :

- (4) a. (i) *betÁl-bA[:]r* 「支払可能な」
cf. *betÁle* 「支払う」
- (ii) *mÉnneske-hEd* 「人類」
cf. *mÉnneske* 「人間」
- (iii) *vÍden-skAb* 「科学」
cf. *vÍden* 「知識」

*2 具体例は前掲拙論、あるいは三村(2008: 294-295)⁽²⁾等を参照されたい。

- b. (i) *bÁ[:]rn-lig* 「子供っぽい」
 cf. *bÁ[:]rn* 「子供」
 (ii) *befrí-else* 「解放」
 cf. *befrí* 「解放する」

なお、上記 (4a) に示した派生接尾辞は、全て完全母音(full vowels)を有する重音節構造を有している点に注意されたい(軽音節構造や曖昧母音を有する (4b) の接尾辞と比較されたい)。(4a) に示した接尾辞は全て副次強勢を有しており、その調音上のエネルギー(intensity)は (4b) に示した接尾辞に比べて強いと推定されるが、さらに、(4a) に示した接尾辞は自身の構造的特性(音節構造、分節音の性質)からも聴覚的な卓立が産み出されていると考えられる。その結果、(4a) に示した接尾辞は (4b) に示した接尾辞よりも一層際立った卓立、いわば副次強勢を有していると知覚されるのではないか。

2. 2 単純語における副次強勢: 韻律的複合語

2. 2. 1 資料

前節にて概観した複合語と派生語はいずれも複数の形態素が関与する事例であったが、デンマーク語には単一の形態素からなるいわゆる単純語においても副次強勢の現れる例が確認されている。具体例を以下に示す:

- (5) a. *ÁrbEjde* 「仕事、働く」
 b. *ÁhOrn* 「楓」
 c. *ÁlkohOl* 「アルコール」
 d. *blÝAnt* 「鉛筆」
 e. *gÚitAr* 「ギター」
 f. *hÁngAr* 「飛行機の格納庫」
 g. *kÁviAr* 「キャビア」
 h. *kÓbOlIt* 「コバルト」
 i. *pÁradIs* 「楽園」

上に示した単純語は、筆者が韻律的複合語と呼ぶ⁽²⁾ものの具体例である。韻律的複合語は、単純語でありながら複合語や派生語においてむしろ典型的である副次強勢を有するのみならず、副次強勢が常に主強勢に後続する「主強勢+副次強勢」という複合語的な強勢型を有する点で特異である(これらの単純語を韻律的複合語と名づけた所以はここにある)。

見出し語として 41102 語を収録する *Molbæk Hansen* の発音辞典⁽⁶⁾から筆者が韻律的複合語と判断し、調査項目として抽出したのは 47 語。その内、インフォーマントから「(よく)知っている」や「実際に使用する」との報告を受け、かつ「主強勢+副次強勢」という型を確認することができたものは、全部で 42 語であった(稿末の表 2 を参照されたい)。

2. 2. 2 副次強勢の認定基準

ここで、韻律的複合語が真に副次強勢を有しているのか、換言すれば、韻律的複合語は「主強勢+副

次強勢」という型ではなく「主強勢+無/弱強勢」という型を有しているのではないのか、と疑問視する向きもあるかもしれない。この疑問に対して、筆者は以下の 3 つの点をもって韻律的複合語が「主強勢+副次強勢」という型を有すると判断する:

- (6) a. 主観的音声観察により得られる聴覚的卓立
 b. 音節量や母音の種類(完全母音か否か)
 c. 複合語に準ずる韻律的振る舞い

まず一点目の「聴覚的卓立」に関して。例えば、二音節語 *blÝAnt* 「鉛筆」では、主強勢を担う第一音節 *bly-* との比較(主観的音声観察)から第二音節 *-ant* の聴覚的な卓立の度合いが弱く、従って強勢の程度が低いと判断することは可能であるものの、*-ant* の強勢が「無/弱強勢」である可能性は未だ残される。そこで、例えば同じく二音節語である *dÁto* 「日付」と比較することで、*blyant* の第二音節 *-ant* が第一音節 *bly-* よりも卓立の度合いが弱く、しかしながら、*dato* の第二音節 *-to* よりも卓立の度合いが高いことが明らかとなり、ここから *-ant* が副次強勢を担っていると判断する。

続いて、副次強勢を担う音節の構造的特徴に関して。先述の「卓立」を聴覚的に捉える上で幾らか寄与していると考えられるが、副次強勢の有無を判断する上で手掛かりとして、音節量や完全母音か否かの別など当該音節の構造的特徴にも着目する。そもそもデンマーク語では、音節が強勢を担うには「非軽音節」(CV 音節以外)でかつ「完全母音」を含むという二つの制約を満たす必要がある。この点から、例えば *dÁto* の第二音節 *-to* や *hÁndel* 「貿易、取引」の第二音節 *-del* が「無/弱強勢」とであると判断するという点では *blÝAnt* の第二音節 *-ant* も *dÁto* の第二音節 *-to* や *hÁndel* の第二音節 *-del* に通ずるが、*-ant* が音節量と母音の種類の点で上述の制約を満たしているがために、副次強勢を担うと判断することができるのである。

最後に、複合語との類似性に関して。(5) に示した単純語は韻律的に複合語に通ずる振る舞いを示すことがあり、この点から複合語と同じく「主強勢+副次強勢」という型を有すると判断することができる。例えば、末尾強勢(oxytone)の語を前部要素とする「右枝分かれ構造」([A[BC]])の複合語を形成する際、後部要素である複合語は強勢の衝突を避けるリズム上の制約により、「主強勢+副次強勢」から「無/弱強勢+副次強勢」という型へと交替を示す⁽²⁾。

- (7) a. *ÓplUkker* 「栓抜き」(～*-oplUkker*)
 e.g. *’ØloplUkker* 「ビール瓶の栓抜き」
 **’ØlOplukker* (cf. *’Øl* 「ビール」)
 b. *Údkllp* 「切り抜き」(～*-sudkllp*)
 e.g. *avÍsudkllp* 「新聞の切り抜き」
 **avÍsUdklip* (cf. *avÍs* 「新聞」)

同様の交替現象は、後部要素が韻律的複合語の場合にも観察される⁽²⁾:

- (8) a. *ÁlkoHol* 「アルコール」 (~-*alkoHol*)
e.g. *ætÝlalkohOl* 「エチルアルコール」
(*ætÝl* 「エチル」)
cf. *drÍkkeAlkohol* 「飲料用のアルコール」
(*drÍkke* 「飲み物」)
- b. *ÁrbEjde* 「仕事」 (~-*arbEjde*)
e.g. *speciÁlarbEjde* 「熟練を要する仕事」
(*speciÁl* 「特別な」)
cf. *hjÉmmearbEjde* 「宿題」 (*hjÉmme* 「家庭」)
- c. *blÝAnt* 「鉛筆」 (~-*blyAnt*)
e.g. *kÚlblyAnt* 「木炭鉛筆」 (*kÚl* 「木炭」)
cf. *l'ÆbeblYant* 「リップペンシル」
(*l'Æbe* 「唇」)

仮に同じく末尾強勢の語を前部要素とする複合語であっても、例えば *flÁske*「瓶」のように副次強勢を持たない語が後部要素である場合は強勢型の交替は起こらない（**ØlfÁske*「ビール瓶」；cf. **ØlfaskE*）。以上から、韻律的複合語の強勢型が「主強勢+無/弱強勢」ではなく「主強勢+副次強勢」という型であると結論づけることができる。

* * *

なお、英語においては、例えば *encyclopÉdia* 「百科事典」の様に、主強勢を担う音節にさらに音節が幾つか先行する場合は、リズム上の制約から単純語においても副次強勢が現れるが(例えば Fudge (1984: 31)⁽⁷⁾)、筆者のこれまでの観察ではデンマーク語において類例は確認されておらず、また管見に及ぶ範囲では類似する現象について言及した先行研究もない(デンマーク語音声学並びに音韻論を包括的に扱った Basbøll (2005)⁽¹⁾ やストレスアクセントを詳細に扱った Basbøll (1995)⁽⁸⁾ や Hansen and Lund (1983)⁽⁹⁾ にも言及はない)。

また、筆者は、デンマーク語において音韻論的に有意な強勢の「段階」は「主強勢」と「弱/無強勢」の二段階（つまりは、強勢の「有無」の区別のみ）であると考える⁽²⁾。確かに、*UndergrundsbAnestatiOn*「地下鉄の駅」([[[under grunds] bane] station])のような比較的長い複合語においては、三つ目の構成要素 *bane* の音節-*bA*-に見られるように第三強勢を観察する（聞き取る）ことが可能である。また更に長い複合語においては更に強さの度合いの低い強勢を観察することが可能かもしれない。しかしながら、これらの度合いの低い強勢は原則的には全て複合語の内部構造から導くことができると筆者は考える。

むしろ、純粹に物理音声学的な見地に立てば、強勢の段階は無数に設定しうるものであると考えるが、

果たしてその内の幾つまでを音韻論において区別し
かつ利用するかは個々の言語（の分析）により異な
りうるものである。従って、デンマーク語において
も第三強勢や第四強勢といった低い段階の強勢も観
察は可能であるという事実は認めるものの、語を特
徴付けるアクセントとして真に有意味な区別は強勢
の「有無」の区別、いわば主強勢と無強勢の二種類
の区別のみであると筆者は考える。

3 韻律的複合語における副次強勢の起源

3. 1 アクセント変化

デンマーク語音韻論における韻律的複合語の位置付けに関して、筆者は既に私見を公にしてきたが⁽²⁾、なぜこれらの単純語が韻律的には複合語に準ずる振る舞いを示すのかという点に関しては、未だ疑問のままであった。また、**Basbøll (2005)**⁽¹⁾のように、これらの単純語の共時的な位置付けに関して言及する先行研究は僅かに存在するものの、その史的背景に関して言及した先行研究は管見に及ぶ範囲では皆無に等しい。

このような背景を鑑みて、筆者はデンマーク語における韻律的複合語の強勢型の史的変遷について考察する。文献資料における過去の時代の強勢型に関する記録やデンマーク語と深い親縁関係にある言語（方言）の共時的資料、デンマーク語内部における強勢型の併用の三点を論拠として、韻律的複合語が元来は「無／弱強勢＋主強勢」という型を有していたが、史的变化の結果、主強勢の左方向への移動が生じ、現在の「主強勢＋副次強勢」という型を有するに至ったと主張する。

以下、個々の論拠について詳しく述べていくことにする。

3. 2 文献資料から

既に述べた通り、筆者が韻律的複合語と呼ぶ単純語の強勢型の史的変遷に関して言及した先行研究は、管見に及ぶ範囲では皆無に等しい。しかしその一方で、Lars Brink ら⁽¹⁰⁾によると、これらの単純語（の一部）がかつてどのような強勢型を有していたかに関して、1700 年代から 1800 年代に出版された研究書や辞書、あるいは著者や編纂者が 1700 年代（1690 年代末も含む）から 1800 年代の生まれである研究書や辞書に記録が残っているという。

Brink らが言及する文献は以下の十点。なお、参考までに、著者や編纂者の出生年と出生地も示す:

- (9) a. Broberg, S. (1882). *Manuel de la Langue Danoise (Dano-norvégienne): a l'usage des*

- etrangers*. Copenhagen: A.-F. Føst & Fils.【1822 年 Ringkøbing の生まれ】
- b. Christiani, Emil (1888). *Rim-ordbog over en Del af de i det Danske Tale- og Skriftsprog Brugelige Ord*. Kjøbenhavn: G. E. C. Gad. [Reprint. Nabu Press, 2012] 【1817 年 Sjælland 東部の Køge の生まれ】
- c. Danske sprog- og litteraturselskab (1919- 1956). *Ordbog over det Danske Sprog*. København: Gyldendal. 【以下 ODS と略す】
- d. Høysgaard, Jens Pedersen (1747). *Accentueret og Raisonerede Gramatica*. København: 出版社不詳. [Reprinted in Henrik Bertelsen, ed. (1920). *Danske gramatikere* 4. København: Gyldendal, pp. 129-488. 【1698 年 Århus の生まれ】
- e. Jespersen, Otto (1906). *Modersmålets fonetik*. København og Kristiania: Gyldendal. 【1860 年 Jylland 東部の Randers の生まれ】
- f. Meyer, Ludvig Beatus (1837). *Kortfattet Lexicon over Fremmede, i det Danske Skrift- og Omgangssprog Forekommende Ord, Kunststudtryk og Talemaader, tillige med de i Danske Skrifter Meest Brugelige Fremmede Ordforkortelser*. 出版地、出版社不詳. [Reprint. *Meyers Frem-medordbog*. København: Gad, 1998] 【1780 年ドイツの Gandersheim の生まれ】
- g. Michelsen, C. A. (1890). *Ekko af Dansk Talesprog*. 出版地、出版社不詳. 【1842 年 Jylland 北部の Thisted の生まれ】
- h. Mikkelsen, Kristian (1911). *Dansk Ord-føjningslære med Sproghistoriske Tillæg: Håndbog for Viderkomne og Lærere*. København: Lehmann & Stages Forlag. 【1845 年 København の生まれ】
- i. Sandfeld, Kristian (1923). *Sprogvidenskab: en Kortfattet Fremstilling af dens Metoder og Resultater*. Aanden udgave. København: Gyldendal. 【1873 年 Jylland 南の Vejle の生まれ】
- j. Verner, Karl Adolf (1903). *Afhandling og Breve*. 出版地、出版社不詳. [Reprint. Nabu Press, 2011] 【1846 年 Århus の生まれ】

上記の文献のうち、実際に筆者が参照可能であったものは次の九点: Broberg (1882), Christiani (1888), ODS, Høysgaard (1747), Jespersen (1906), Meyer (1837),

Mikkelsen (1911), Sandfeld (1923), Verner (1903)。

筆者がフィールドワークより採取した 42 項目の韻律的複合語の内、かつ第一音節以外の音節に主強勢を有していたことが文献に記されているものは以下の 12 語 (言及のある文献名も併せて記す):

- (10) a. *asfÁlt* 「アスファルト」: Christiani, Verner, ODS
 b. *billÁrd* 「ビリヤード」: Broberg, Christiani, Meyer, Mikkelsen
 c. *dirÉkte* 「直接的な」: Christiani, ODS, Jepsersen
 d. *februÁr* 「二月」: Broberg, Christiani, Meyer, Mikkelsen
 e. *feminÍn* 「女性的な」: Christiani, Høysgaard, ODS, Sandfeld
 f. *guitÁr* 「ギター」: Broberg, Christiani, Meyer, Mikkelsen
 g. *hangÁr* 「飛行機の格納庫」: Broberg, Christiani, Meyer, Mikkelsen
 h. *januÁr* 「一月」: Broberg, Christiani, Meyer, Mikkelsen
 i. *kaviÁr* 「キャビア」: Broberg, Christiani, Meyer, Mikkelsen
 j. *maskulÍn* 「男性的な」: Christiani, Høysgaard, ODS, Sandfeld
 k. *objÉkt* 「物体」: Michelsen
 l. *subjÉkt* 「主題」: Michelsen

ここで注意すべきは、筆者が採取した韻律的複合語の全てがここで言及した文献資料に記録されているわけではないという点である。従って、(10) に示したものを除く韻律的複合語に関しては、飽くまでも、同様に第一音節以外の音節に主強勢の置かれる型をおそらく有していたであろうと推察するに過ぎない。しかしながら、韻律的複合語の一部が、その歴史においてかつて第二音節以降の音節に主強勢を有しており、そして現代に至る過程において主強勢が第一音節へと移動したという事実は、ここで引用した文献資料から明らかであると言えよう。

3. 3 同系等の言語 (方言) の資料から

既に言及した通り、過去の強勢型が文献資料に記録されている韻律的複合語はごく一部であり、従って、その他の韻律的複合語に関しては同様の史的变化を同じく経たと推察するに過ぎない。しかし、デンマーク語と親縁関係にあり、かつノルド語の古い特徴を比較的色濃く残していると推定される言語や方言から採取した共時的資料との比較を通じて、(文献資料において言及のある語も含めて) 韻律的複合

語のかつての強勢型を推定することが可能となる。

ここでは、ノルウェー語南西部方言の一つである Sandnes (サンネス) 方言^{*3} を取り上げる。Sandnes 方言は、例えばデンマーク語においては「共性 common gender」へと融合してしまった「男性 masculine」と「女性 feminine」という文法性のカテゴリーが未だ保持されており、音韻的にはデンマーク語において曖昧母音(schwa; /ə/)へと収束した屈折語尾に/a/や/e/、/o/等の区別を保持するなど、種々の面でノルド語の古語の特徴を残している。

筆者の採取したデンマーク語の韻律的複合語 42 語の内、Sandnes 方言において通時的に対応する(換言すれば同一起源)と推定される単純語は、これまでの調査で 19 語採取された。以下に示すように、19 語の内の 15 語はデンマーク語の韻律的複合語とは異なり「無/弱強勢+主強勢」という型を有している(Sandnes 方言は音韻論的に有意義な音調(いわゆるピッチアクセント)を有する言語⁽¹¹⁾であるが、音調の標記は割愛する)：

- (11) a. *alibí[:]* 「アリバイ」
 b. *alkohÓl* 「アルコール」
 c. *arbÉid* 「仕事」
 d. *biljÁrd* 「ビリヤード」
 e. *dirÉkte* 「直接的な」
 f. *februÁr* 「二月」
 g. *feminín* 「女性的な」
 h. *gitÁr* 「ギター」
 i. *hangÁr* 「飛行機の格納庫」
 j. *januÁr* 「一月」
 k. *kaviÁr* 「キャビア」
 l. *maskulín* 「男性的な」
 m. *paradís* 「楽園」
 n. *satÝr* 「風刺」
 o. *sellerí[:]* 「セロリ」

上に引用した語の内、特に以下の 9 語はデンマーク語において対応する語が文献資料にも記録されており、注目に値する: *biljard*, *direkte*, *februar*, *feminin*, *gitar*, *hangar*, *januar*, *kaviar*, *maskulin*。この点から、おそらく上記の 9 語を除く他の全ての語に関しても、デンマーク語においてはかつては第一音節以外の音節に主強勢が置かれていたのではないかと推定することが可能である^{*4}。

*3 Sandnes 方言や本稿において引用する Sandnes 方言の資料に関しては三村(2014)⁽¹¹⁾を参照されたい。

*4 デンマーク王国領グリーンランドの首都(州都)ヌーク(Nuuk)では、土着の言語であるグリーンランド

3. 4 型の併用(ゆれ)から

筆者の唱える主強勢の移動を裏付ける第三の論拠として、現代デンマーク語における強勢型の併用(いわゆる「ゆれ」)を挙げることができる。言語変化の速度が個人間や世代間で差異が見られるとするならば、変化を遂げた新しい形と変化を遂げる前の古い形が同一の言語社会において併存する可能性は十分にあり、従って、ある形式の併用やゆれは言語変化の傍証として捉えることが可能である。

筆者の調査で採取された 42 個の韻律的複合語の内、以下の 7 個に「第一音節に主強勢のある型(新しい型)」と「第一音節以外の音節に主強勢のある型(古い型)」の併用が観察されている：

- (12) a. *Álibí[:]* ~ *alibí[:]* 「アリバイ」
 b. *hÁngA[:]* ~ *hangÁ[:]* 「飛行機の格納庫」
 c. *kÓbOlt* ~ *kobÓlt* 「コバルト」
 d. *ÓbjEkt* ['objekt] ~ *objEkt* [ɔb 'jekt]
 (~ [ɔb 'dʒekt]) 「物体」
 e. *sÚbjEkt* ['subjekt] ~ *subjEkt* [sub 'jekt]
 (~ [sub 'dʒekt]) 「主題」
 f. *tÁamÍ[:]* ~ *tamÍ[:]* 「タミル語」
 g. *ÚrbA[:]* ~ *urbÁ[:]* 【日刊紙名】 ~ *urbÁ[:]* 「上品な」

なお、*objekt* と *subjekt* に関しては、古い型であると推定される強勢型を伴うと、おそらく借入元の言語であると考えられるフランス語的な[dʒ]を用いた発音にもなりうる点は注目に値する。また、*urban* のように強勢型の差異に付随して語義にも差異が見られる場合もある点に注意されたい。

3. 5 過去の主強勢の痕跡としての副次強勢

以上、筆者が韻律的複合語と呼ぶデンマーク語の一部の単純語が、主強勢の左方移動という史的变化を経て、かつての「無/弱強勢+主強勢」という強勢型から「主強勢+副次強勢」という型を有するに至ったであろうことを論じてきた。

ここで、現在の強勢型における副次強勢の位置付けが、未だ問題点として残る。というのも、単に

語の他、入植者の言語の一つであるデンマーク語も併用されている。ヌークには、第 3.2 節にて引用した文献資料が編纂されたと推定される時期とほぼ同時期(あるいはそれ以前)に、デンマークやノルウェー南西部から入植が始まっているため、言語地理学に基づき経験的に推察すれば、現在のヌークにおいて話されているデンマーク語には当時の強勢型が残存していると推定される。しかしながら、2013 年 8 月に筆者が実施した調査では、そのような古い強勢型は確認されなかった。

主強勢が左方向へ移動したのであれば、かつての「無/弱強勢+主強勢」という型から「主強勢+無/弱強勢」という型へと変化しても不思議ではないからである。

そこで筆者は、現代の強勢型における副次強勢がかつての主強勢の名残として現れている、という解釈を提案する。かつての主強勢を担っていた音節は、韻律上は主強勢を失いはするものの、分節音のレベルでは主強勢を担っていた段階での構造を保持している。既に述べた通り、デンマーク語では強勢を担っている音節には音節量の点で制約があり、かつての主強勢を担っていた音節が保持する構造は強勢を担うに十分なものである。従って、この音節に強勢が置かれることは構造的に見て然るべき帰結であると言えることができるが、注意すべきは語は既に主強勢を一つ有しているという点である。既に言及した通り、主強勢は語（厳密には「アクセント単位」）に一つ存在することで語を韻律的に特徴付ける働きを果たすが、韻律的複合語の場合も、左方に移動したと推定されるものの、主強勢は既に存在しており、語全体を韻律的にまとめる働きをしている。従って、かつての主強勢を担っていた音節は、構造的には主強勢を担い得るものの、既に主強勢が存在している以上、主強勢を新たに担うことはできず、しかしながらその構造的強さ故に強勢は担うことが可能であり、結果として主強勢よりも度合いの低い副次強勢を担っていると考えられる^{*5}。

4 まとめと今後の課題

4.1 まとめ

以上、本稿では、筆者がデンマーク語において韻律的複合語と呼ぶ単純語の強勢型の史的側面について考察してきた。1700年代から1800年代にかけて出版された文献資料や親縁関係にある言語（方言）との比較、さらにはデンマーク語内部における強勢型の併用を論拠として、韻律的複合語が古くは「無/弱強勢+主強勢」という型を有していたが、その歴史の変遷の過程において「主強勢の左方移動」とアクセント変化を被ったと推定した。また、韻律的複合語において観察される副次強勢は、かつての主強勢を担っていた音節の卓立が保存された結果現れたも

のであると結論づけた。

4.2 今後の課題（その1）：アクセント変化の要因と類推的水平化

本研究では、共時的に韻律的複合語と位置づけられる一連の単純語がかつては第一音節以外の音節に主強勢を有していたが、現代に至る過程において第一音節へと主強勢が移動した、というアクセント変化の存在を主張した。

では、このようなアクセント変化は一体どのような要因で生じたのであろうか。古い強勢型と文献資料に関して言及した Brink ら⁽¹⁰⁾は、事実の記録に関してのみ言及しており、変化の要因に関してはまったく言及していない。そこで筆者は、アクセント変化の要因として「固有語のアクセントとの類推的水平化(analogical leveling)」を提案したい。

実は、これまで韻律的複合語と位置づけてきた単純語は、語源的には全て外来語である（低地並びに高地ドイツ語などノルド諸語以外のゲルマン諸語からの借入語もここに含む）。おそらくデンマーク語に借入された段階では第一音節以外の音節に主強勢を有していたが、デンマーク語に浸透するとともにその使用頻度が高まるにつれて、第一音節に主強勢を有する固有語の強勢型に合わせたものと考えられる。

なお、Jørgen Rischel (1969)⁽¹²⁾に倣い「固有語」を「【筆者補注: 700年頃から1350年頃にかけての】「古デンマーク語」から受け継いだ語と限定すれば、「固有語」は一ないし二音節の単純語と二音節以上の複合語を含めて全て第一音節に主強勢を有する語と捉えることができる。

第一音節以外の音節に主強勢を有しながら時代の経過とともに第一音節へと主強勢が移動する変化の傾向性は、複合語に関しては複数の研究者により指摘されている。例えば Axel Kock (1886)⁽¹³⁾によれば1700年代以前のデンマーク語の複合語は後部要素に主強勢を有するものが多く、時代が下るにつれて単純語（固有語）との類推から第一要素に主強勢の現れる傾向が強くなったという。

また、Eli Fischer-Jørgensen (2005: 4-6, 390-441)⁽¹⁴⁾は、現代デンマーク語において後部要素に主強勢を有する複合語が前部要素に主強勢を置いて発音される傾向があることを指摘しているが、筆者の調査でも同様の傾向性を確認することができた。(14)に示す複合語は Aage Hansen (1956)⁽¹⁵⁾など標準語の規範的な発音を扱った研究書において頻繁に引用される例であるが、先行研究の記述に反し、筆者のインフ

*5 本節において筆者が展開した議論に関して、査読者の一名から、他言語において類似する現象が確認されれば筆者の議論の論拠となりうる旨、ご指摘をいただいた。今後、他言語の調査も進め、明らかにしていきたい。

オーマントからは一貫して前部要素に主強勢を置く型が報告された（音声表記は割愛する）：

- (14) a. *gr'ØnlAngkål* 【デンマークの伝統料理、付け合わせに用いる】 cf. *grønĹngkål*
 b. *kĹlvenYresteg* 【デンマークの伝統的肉料理？】 cf. *kalvenYresteg*
 c. *stĹftAmtmand* 「知事、長官」【現代では用いられない官職名】 cf. *stiftĹmtmand*

以上、現代デンマーク語においては主強勢を第一音節（複合語であれば前部要素）に置く傾向が時代とともに強まりつつあると考えられ、第一音節に主強勢を有する典型的事例である固有語の強勢型に合わせる形で韻律的複合語もかつての主強勢を移動させたのだと推察することができる。

今後は、デンマーク語の語彙全体の中で第一音節に主強勢を有する語の割合を算出するなど、統計的数値を用いて類推的水平化の妥当性について検証していく必要がある。

4. 3 今後の課題（その2）：アクセント変化のメカニズムと変化の起こり易さ（難さ）

現代のデンマーク語には、*arbejde* や *kobolt* の様に筆者が仮定するアクセント変化を受けた（あるいはその途中段階にある）と考えることのできる語の他に、*porcel'Ĺn* 「陶器」や *balalĹjka* 「バラライカ【楽器】」のように第一音節以外の音節に主強勢を有する語（つまりはアクセント変化を受けていないと推定される）語も存在する。では、本研究で提案したアクセント変化には、語によってその適用のし易さに差異があるのだろうか。

そこで筆者は、亀井孝ほか (1966: 174)⁽¹⁶⁾における「群化」や、上野善道 (2002: 176, 186)⁽¹⁷⁾の「アクセントの意味表示機能」や「アクセント群化」という概念から着想を得て、語彙は意味や音形などの点から「グループ化」(grouping; Gruppierung: cf. Max Wertheimer (1923)⁽¹⁸⁾) され、そのグループとしてのまとまりが一種の「縛り」となってアクセント変化を妨げる（場合によっては促す？）のではないかと仮定する。

事実、デンマーク語においては「人名」や「アルファベット頭文字語」といった語の属性に対応して特定の強勢型が観察される⁽¹⁹⁾。また、同様の傾向はノルウェー語 Sandnes 方言や、第一音節に主強勢を置く傾向が著しく高いとされるアイスランド語においても観察される⁽²⁰⁾。従って、語が属するなんらかのグループがある特定の強勢型と対応関係にあり、

それがアクセント変化にも関与しうると仮定することは極めて妥当であろう。

では、「韻律的複合語」のアクセント変化にはいかなるグループ化が関わっているのだろうか。以下、現時点で筆者が仮定する2つのグループ化について概観する。

4. 3. 1 語源意識や馴染みの度合いに基づくグループ化

第4.2節の(14)では、伝統的に第一要素以外の構成要素に主強勢が置かれる複合語が、話者によっては第一要素に主強勢の置かれる型で発音されうることを指摘した。これは、複合語の具体的に指し示す物が古いなどの理由から話者にとっての馴染みの度合いが低く、おそらく（音声ではなく）文字を通じて習得した語であるがために、その他の複合語との類推から複合語アクセント規則を適用してしまったためであると考えられる。

筆者は、同趣の類推現象が韻律的複合語におけるアクセント変化にも作用しているのではないかと考える。つまり、元来は外来語であり第一音節以外の音節に主強勢を有していた語が、話者の中で語源意識が薄れるとともに馴染みの度合いが高くなり、結果として固有語に特徴的な第一音節に主強勢のある型で発音するようになったのではないだろうか。

事実、韻律的複合語の多くは外来語とはいえ、低地ドイツ語や高地ドイツ語からの借入語が多く、フランス語やラテン語起源の借入語と比べると話者にとっての馴染みの度合いは高いと思われる。このことは、*avĹs* 「新聞」、*buffĹt* 「ビュッフェ」や *komplimĹnt* 「賛辞」、*soldĹt* 「兵士」、*sĹsĹn* 「時期、シーズン」などフランス語起源の語が第一音節に主強勢を有していない事実からも裏付けられよう。

4. 3. 2 音形に基づくグループ化

例えば *fysĹk* 「物理学」や *lingvistĹk* 「言語学」、*matematĹk* 「数学」などは一様に最終音節に主強勢を有しているが、末尾の音連続が全て *-ik* という点で共通している。また、*kantĹne* 「食堂」、*maskĹne* 「機械」、*rutĹne* 「決まりきった仕事」、*UkrĹne* 「ウクライナ」などは一様に次末音節(penultimate syllable)に主強勢を有しているが、末尾の音連続が全て *-ine* という点で共通している。

このように、筆者の唱えるアクセント変化を受けていないと推定される語は音形の点でグループを形成しており、このグループとしてのまとまりがアクセ

セント変化の適用に抗う力として作用しているとは考えられないだろうか^{*6}。

その一方で、グループ化がアクセント変化を促したのではないかと考えられる事例もある。既に本稿で引用した *gÚitAr*, *hÁngAr*, *jÁnuAr*, *kÁviAr*、またこれらに準ずる *fÉbruAr* 「二月」や *c'Æsar* 「カエサル」などの語は、全て *-a[ː]r* という音連続を末尾に共有する点でグループを成すと言えるが、この場合はアクセント変化を経ていると推定される。おそらく、*-a[ː]r* という音形を有するある語に起こったアクセント変化が、同一の音形を有する（つまり同一のグループに属する）他の語にも伝播し、全体としてアクセント変化を被ったとは考えられないだろうか（ここから、*vikÁ[ː]r* 「代理」の様に同一の音形を有しながらも未だ第一音節以外の音節に主強勢を有する語も、おそらくいずれはアクセント変化を受けるのではないかと推定される）。

語の「グループ化」がアクセント変化の適用を妨げるのかあるいは促進するさせるのかに関しては今後の研究を俟たざるを得ないが、いずれにしても、音形に基づくグループ化がアクセント変化に何らかの形で関与していることは明らかではないだろうか。

語彙のグループ化の概念をもって全てのアクセント変化を説明できるわけではなく、また未だ様々な課題を残す概念ではあるが、アクセント変化を説明する上で有益であり、また何らかの形でアクセント変化に関与していると推定することは妥当であろう。

今後は、デンマーク語にはいかなるグループ化があり得るのか^{*7}、またグループ化以外にアクセント変化の起こり易さに関与する要因はないか（例えば、主強勢の移動先、つまりは現在の主強勢を担う音節の構造や音節量など）、広く様々な要因を探索していく必要がある。

また、本研究で参照した文献資料からは韻律的複合語の過去の強勢型を窺い知することは可能であって、いつ頃現在の強勢型へと変化したかに関しては読み

取ることができない。参照すべき文献の範囲を広げるとともに、韻律的複合語の語源も考慮に入れながら、本発表で唱えるアクセント変化の発生時期も明らかにする必要がある。

謝辞

本稿は、国立国語研究所共同研究プロジェクト「日本語レキシコンの音韻特性」第3回研究発表会（2013年11月22日：神戸市外国語大学）において行った口頭発表並びに配布資料の内容に加筆と修正を加えたものである。同口頭発表に有益なコメントをくださった窪田晴夫教授、上野善道教授、三間英樹教授、及び聴衆諸氏に心よりお礼を申し上げる。

また、本研究の資料の一部は、デンマーク王国領グリーンランドの首都（州都）ヌークにおいて実施したフィールドワークにより採取した（2013年8月）。同実地調査は「室蘭工業大学21世紀科学研究費」（種目A）による資金援助を受けて実施した。佐藤一彦室蘭工業大学学長、並びに同研究費の審査に携わった方々にこの場をお借りしてお礼を申し上げる。

引用文献

- (1) Basbøll, Hans (2005). *The Phonology of Danish*. Oxford: Oxford University Press.
- (2) Mimura, Tatsuyuki (2008). “Prosodic compounds and the interpretation of secondary stress in Danish.” 日本音韻論学会編. 『音韻研究』第11号. 東京: 開拓社, pp. 19-26.
- (3) Mimura, Tatsuyuki (2003). “Stress accent in Danish.” 『東京大学言語学論集』22, pp. 259-291.
- (4) Mimura, Tatsuyuki (2004). “Aspects of Danish syllable structure.” 『東京大学言語学論集』23, pp. 159-202.
- (5) Mimura, Tatsuyuki (2009). *Issues in Danish Word-Prosody: A Synchronic Description*. 未刊行博士学位請求論文: 東京大学.
- (6) Molbæk Hansen, Peter (1990). *Dansk Udtale (Udtaleordbog)*. København: Gyldendal.
- (7) Fudge, Erik C. (1984). *English Word-Stress*. London: George Allen & Unwin.
- (8) Hansen, Erik and Jørn Lund (1983). *Sæt tryk på: syntaktisk tryk i dansk*. København: Lærereforeningernes Materialeudvalg.
- (9) Basbøll, Hans (1995). “Degrees of stress in Danish: primary, secondary and tertiary.” Eds., Jørgen Rischel, H. Basbøll. *Aspects of Danish Prosody (RASK Supplement Vol. 3)*. Odense: Odense University Press, pp. 21-47.
- (10) Brink, Lars, Jørn Lund (1975). *Dansk Rigsmål 2: Lydudviklingen siden 1840 med særligt henblik på sociolektterne i København*. København: Gyldendal.
- (11) 三村竜之 (2014a). 「ノルウェー語 Sandnes (サンネ

*6 なお、*fysik* などの事例は、「学問の名称」といった「意味に基づくグループ化」が働いている可能性もあると考えられる。後述の注7も参照されたい。

*7 例えば「意味に基づくグループ化」。「キリスト教」にまつわる語は第一音節以外の音節に主強勢を有するものが多く、宗教が持つ保守的な性格が関与しているとは考えられないだろうか。

- ス) 方言における音調のアクセント論的解釈]. 『室蘭工業大学紀要』第 63 号, pp.77-91.
- (11) 三村竜之 (2014a). 「ノルウェー語 Sandnes (サンネス) 方言における音調のアクセント論的解釈」. 『室蘭工業大学紀要』第 63 号, pp.77-91.
- (12) Rischel, Jørgen (1969). “Morpheme stress in Danish.” *Annual Report of the Institute of Phonetics, University of Copenhagen* 4, pp. 111-144.
- (13) Kock, Axel (1886). “Historiska anmärkningar om dansk akcentuering.” *Arkiv för nordisk filologi* 3, pp. 42-82.
- (14) Fischer-Jørgensen, Eli (2001). *Tryk i ældre dansk: Sammensætninger og afledninger*. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Historisk-filosofiske Meddelelser 84. Copenhagen: C. A. Reizel.
- (15) Hansen, Aage (1956). *Udtalen i moderne dansk*. København: Gyldendal.
- (16) 亀井孝, 河野六郎, 柴田武, 山田俊雄 (1966). 『言語史研究入門』(日本語の歴史 別巻). 東京: 平凡社.
- (17) 上野善道 (2002). 「アクセント記述の方法」. 飛田良文, 佐藤武義編. 『現代日本語講座 第 3 巻 発音』. 東京: 明治書院, pp. 163-186.
- (18) Wertheimer, Max (1923). “Untersuchungen zur Lehre von Gestalt II.” *Psychologische Forschung* 4, pp. 301-350.
- (19) 三村竜之 (2007). 「デンマーク語アルファベット関連語彙の音韻論」. 『東京大学言語学論集』26, pp.1-20.
- (20) 三村竜之 (2014). 「アイスランド語ストレスアクセント試論」. 『日本言語学会第 148 回大会予稿集』, pp. 158-16.

表 2 韻律的複合語一覧 (付: 文献資料における記録の有無、対応する Sandnes 方言の資料)

韻律的複合語		文献記録	Sandnes 方言における主強勢の位置	
			第一音節	第一音節以外
1.	ádvènt 「降臨節」		ádvènt	—
2.	ágèns 「主体」		—	—
3.	áhòrn 「楓」		áhorn	—
4.	álibì~alibí 「アリバイ」		—	alibí
5.	álkohòl 「アルコール」		—	alkohól
6.	ámboìlt 「鉄床」		—	—
7.	árbèjðe 「働く、仕事」		árbeid	arbéid
8.	ásfált 「アスファルト」	有り	—	—
9.	blýànt 「鉛筆」		blýant	—
10.	bíllàrd 「ビリヤード」	有り	—	biljárd
11.	Césàr 「カエサル【人名】」		—	—
12.	dírèkte 「直接的な」	有り	—	dirékte
13.	léksiòn 「辞典」		léksikon	—
14.	fébruàr 「二月」	有り	—	február
15.	féminìn 「女性的な」	有り	—	feminín
16.	gúitàr 「ギター」	有り	—	gitár
17.	hángàr~hangár 「格納庫」	有り	hángar	hangár
18.	ímplicìt 「暗黙の」		—	—
19.	Íràk 「イラク」		—	—
20.	Íràn 「イラン」		—	—
21.	jánuàr 「一月」	有り	—	január
22.	káviàr 「キャビア」	有り	—	kaviár
23.	kéfir 「ケフィア(発酵飲料)」		—	—
24.	kóbolt~koólt 「コバルト」		—	—
25.	lómviðe 【海鳥の一種】		—	—

26.	<i>mártÿr</i> 「殉教」		—	—
27.	<i>máskulín</i> 「男性的な」	有り	—	<i>maskulín</i>
28.	<i>nápalm</i> 「ナパーム弾【焼夷弾の一種】」		—	—
29.	<i>páradís</i> 「楽園」		—	<i>paradís</i>
30.	<i>Pórtugál</i> 「ポルトガル」		—	—
31.	<i>óbjèkt</i> ~ <i>objékt</i> 「物体」	有り	—	—
32.	<i>prásèns</i> 「現在時制」		—	—
33.	<i>própolis</i> 「プロポリス」		—	—
34.	<i>sártÿr</i> 「風刺」		—	<i>satÿr</i>
35.	<i>séllerì</i> 「セロリ」		—	<i>sellerí</i>
36.	<i>stándàrd</i> 「水準」		—	—
37.	<i>súbjèkt</i> ~ <i>subjékt</i> 「主題」	有り	—	—
38.	<i>súltàn</i> 「スルタン【イスラム教国の君主】」		—	—
39.	<i>támìl</i> ~ <i>tamíl</i> 「タミル語」		—	—
40.	<i>úràn</i> 「ウラン」		—	—
41.	<i>úrbàn</i> 【新聞名】 ~ <i>urbán</i> 「洗練された」		—	—
42.	<i>yóghùrt</i> 「ヨーグルト」		—	—

【研究ノート】

原発問題によせて——計算合理性と人格適合性

二宮公太郎^{*1}, 関大輔^{*2}On the Problem of Nuclear Power Generation
—— Calculation Rationality and Personality SuitabilityKohtaroh NINOMIYA^{*1}, Daisuke SEKI^{*2}

(原稿受付日 平成 26 年 6 月 27 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

If developed nations, under the condition that the “nuclear military technology” exists, act in “global economy” according to “calculation rationality” as the behavioral principle, then the nuclear power generation appears necessarily. However, it is possible for us to force “calculation rationality” to bear some “personality suitability” —— to abandon nuclear power generation —— from the standpoint of “rationality based on personal values”.

Keywords : nuclear power generation, nuclear military technology, global economy, calculation rationality, personality suitability, rationality based on personal values, personality rationality

1 問題

1.1 基本的関心——先の論文との繋がり

本『紀要』62号に登載された先の研究ノート「近代性の内部矛盾と合理性の危機」は、近代以降の生産活動が市場経済において「計算合理性」に従って動いてきたこと、それが「生活世界」の破壊を必然的に惹き起こしてきたこと、を主張した。その際に同研究ノートは、この計算合理性に対置して、新たな合理性の秩序として「人格合理性」とでも呼ばれるべきものを示唆した。

人間の生命・身体・心の平穏といった人格的価値を互いに尊重し合おうとする態度は、歴史を貫いて、人間が素朴に日常の生活を送る世界の内に、確実に生きて働いている。そしてそれらの人格的価値は、相互に関係し合いながら一つの合理的な体系を成しているはずである。「倫理」が生まれてくるのもここからである。いま、この人格的価値の体系を形成する原理的な合理性のことを、我々は「人格合理性」と呼ぶことに

しよう。

計算合理性は、あまりに強く現代の理性を支配しており、あまりに広く現代の世界を覆い、あまりに深く現代の世界に浸透しているので、これの内へと「人格合理性」が入り込むこと——経済に倫理を！——は、極めて難しい。先の研究ノートでも、このことに関しては全く何の展望も有ち得なかった。

原子力発電は、核の軍事利用技術が存在するという条件のもとで、経済を支配する「計算合理性」が「グローバル経済」という国際的枠組みの中で機能すれば、必然的に現われてくる現象である。

これに対して、ドイツで起こったことは、「人格合理性」が計算合理性の内へと入り込む、典型的な一つの「型」を示している。「反原発」の市民運動は、放射線の危険から生命・健康を守ること、放射能に怯える生活から心の平穏を取り戻すこと、といった素朴な欲求に発している。それは実は、人格的価値の尊重という思想に裏打ちされており、その根拠をまさに「人格合理性」の内に有している。この「反原発」の思想が政権の思想へと高まったとき、「脱原発」が実現した。

しかし計算合理性は「打倒」されたのではない。将来における原子力発電の全廃を前提した上で、再生可

*1 室蘭工業大学特任教授

*2 豊浦町役場

能エネルギーの分野へのシフトを含む、新しい「計算合理性」へ移行することになるのである。それは、原子力発電の存在に関する限りで「人格合理性」を一部取り込んだ、新しい計算合理性である。「人格合理性」は、その限りで計算合理性へ入り込む。このことを計算合理性のほうから見れば、その限りで計算合理性は、「人格適合性」を具有することになるのである。このように、一定の範囲で「人格合理性」に合致するようになった計算合理性の性格を、我々は「人格適合性」と呼ぶことにしよう。

1.2 現象学から——科学応用の疎外

科学は、「生活世界」——我々が普通に生活している日常の世界——から生まれる(図1参照①)(注1)。しかし科学は、数学の適用による形成ということに自分を一面化し、その結果、本来の生まれ故郷である「生活世界」との繋がりを忘れてしまう。科学のハイマート喪失、これが、フッサールの指摘する科学の「危機」である。

しかし、これは生活世界に対する科学の観念的な関係である(図1②)。フッサールは、生活世界に対する科学の実質的な関係における「危機」にまでは、論を進めなかった。

実質的な関係とは——

科学は、「応用」されることを通して生産活動によっ

て現実化される(図1③)。生活世界に対する科学の実質的な関係は、基本的にはこうして成立する(図1④)。

現代において生活世界には、計算合理性が実際にはかなり深く浸透している。しかし、人格的価値を無条件で尊重する思想は、現代にあっても、生活世界の中で確実に生きて働いている。あらゆる時代を貫いて、この生活世界の内にこそ、人格的価値の合理的な体系——人格合理性の体系——は、その底に厳然と流れているものなのである。

この人格合理性からすれば、人間の生産活動は、本来、自分と他者を含む社会全体のため——現代のように世界中が交流するような状況では、人類のためと言ってもよい。——に為されるはずのものである。

しかし、生産活動は、近世以降、市場経済という形態において遂行され、ここでは計算合理性が支配する(図1⑤)。市場経済は、計算合理性を行動原理として、自己のために利益を上げることが基本的な関心として形成される形態である。この形態のもとでは、或る人間の経済活動が他の人間の人格的価値を尊重して為されるか否かは、偶然的なものとなる。だから、例えば、或る人間たちによる穀物の証券取引が、他の国の他人たちを餓死に追いやりたりすることも起こる。このように、実質的に人格的価値を害するような行為も、計算合理性だけから見れば、正当な経済行動として罷り

通るということになる。その限りで、計算合理性を行動原理とする市場経済は、本来あるべき生産活動から見れば、一つの「疎外された」形態であると言える(図1⑥)。

他方、科学は、本来、人類の幸福に資するべきものである。しかし、疎外された生産活動の内では、科学は、「疎外された」応用形態を取ることにならざるを得ない(図1⑥)。その際には、応用された科学が生活世界へ利益を及ぼすか害を及ぼすかは、偶然的なものとなる。

原子力発電は、まさにこれである。

1.3 四つの観点

本研究ノートでは、まず、核の軍事技術が存在するという条件下で、先進諸国が計算合理性を行動原理としてグローバル経済に臨めば、原子力発電は必然的に現われる、という見通しのもと、三つの観点に従って、歴史を追いながら原子力発電の問題を考えて行く。しかし次に、先述のとおり、人格的価値に基づいた合

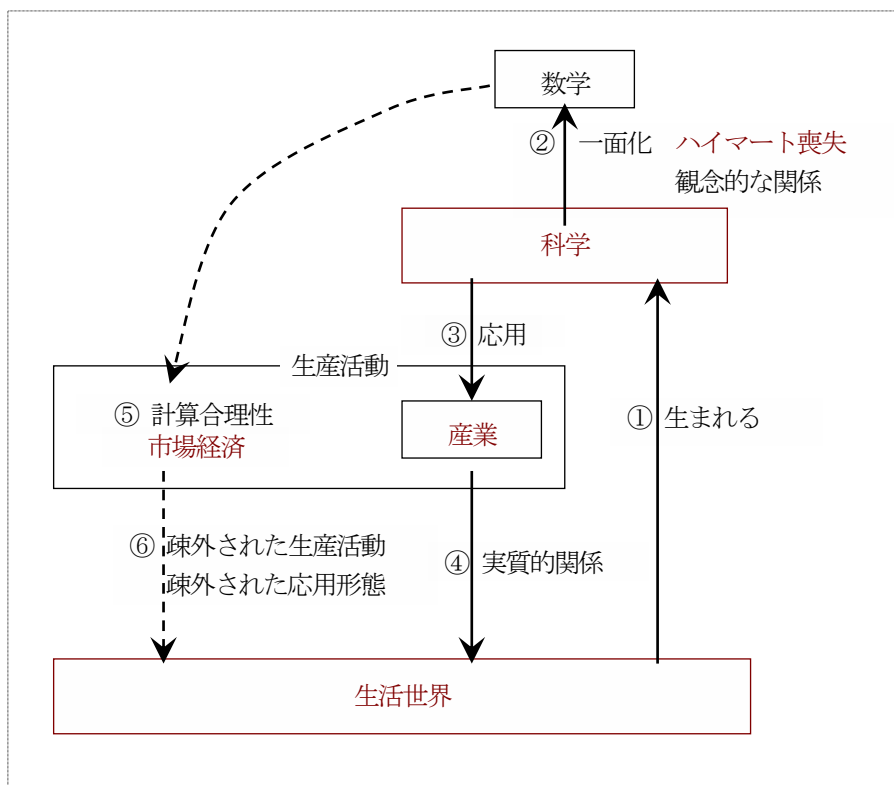


図1：科学と生活世界

理性の立場から、計算合理性の内に、一部ではあるが人格適合性を有たせることができるということを、四つめの観点から指摘する。

第一の観点：軍事的本質

原子力発電をテーマに考える場合、特に軍事的な観点は外すことができない。ごく初期、イギリスやフランスが黒鉛炉を導入した際、核兵器製造との間で原子力発電は互いに転化され得るものであり、実際に転化された。アメリカが“Atoms for Peace”を提唱したことの裏にも、軽水炉の由来や隠された意図の内に、原子力の軍事利用や核軍拡との関係が潜んでいる。

第二の観点：計算合理性

「計算合理性」は、先の研究ノートから引き続き問題関心であるが、これについて本研究ノートでは、特に原子力発電に即して把握する必要がある。二つの段階がある。一つには、自国産業へ安価な電力を提供するというのが、基本的な契機である。建設・運営の低コストさが盛んに主張されたが、このことには欺瞞が潜む。他方、黒鉛炉から軽水炉への導入の流れは、実際に経済的効率の違いに由来している。もう一つは、他国へ技術ないしプラントを輸出して外貨を稼ぐことである。このことは、発注ブームが去ったあとのアメリカや、現在のフランスや日本で、原子力産業が動機としたことであり、或いは動機としていることである。

第三の観点：グローバル経済

この計算合理性は、第二次世界大戦後は「グローバル経済」という国際的枠組みの中で機能する。グローバル経済は、「ブロック経済」が第二次世界大戦を誘発したことへの「反省」から生まれた国際経済の理念だが、先進諸国が競争しつつ世界を支配するという本質は変わらない。ブロックからモザイクへ形態が変化したに過ぎない。従って、同様の二面性が在る。「先進国どうしの競争」という側面を原子力発電に引き付けて言えば、アメリカの核技術独占に対するイギリスの反発や、国の存立を賭けたフランスの原子力政策に、それは現われる。原子力技術競争とは別の意味でも、すなわちドイツでは脱原発後の再生可能エネルギー政策として現われもする。「先進諸国による世界支配」という側面は、先進諸国だけが原子力技術を有するということを基に、特にOPEC諸国に対する牽制や途上国への技術・プラントの輸出として現われる。

第四の観点：人格合理性

「人格合理性」は、計算合理性一般に対する一般的な意味では、戦争から免れて平和の内に生きることや、自ら生み出した価値の正当な還流を受けること等を要素として含むが、特に原子力発電との関係では、放射

線により生命や健康を侵されないことや、放射能に怯えず安心して生きられること等が、要素として重要である。

2 黒鉛炉の導入

2.1 イギリス——核兵器から原子力発電へ

原子力発電は、導入の経緯を見れば、その軍事的本質がよく分かる。イギリスがその典型である。

アメリカの核独占によってウラン濃縮技術を遮断されたイギリスが採用したのは、黒鉛炉を用いて核兵器向けプルトニウムを生成することであった。黒鉛炉は、中性子を減速(注2)するために黒鉛を用いるもので、核分裂性のウラン235を濃縮せず、非分裂性のウラン238を大部分含んだ天然ウランを、そのまま反応させることができる。

核分裂を起こしたウラン235は、高速中性子を発生し、非分裂性のウラン238がこれの照射を受けるとウラン239(元素番号92)になる。これは、β崩壊して元素番号93・ネプツニウム239(注3)に変わり、さらにもう一度β崩壊すると、核分裂性の元素番号94・プルトニウム239に変化する(次ページ図2参照・過程B)。黒鉛炉は、このプルトニウム239を高純度で——共に生成されるプルトニウム240を余り多く含まない状態で——生成することができ、これが原子爆弾(プルトニウム爆弾)の原料となる。このように黒鉛炉は、まさに核兵器を製造するために各国で開発されたもので、現在でも軍事用原子炉は、この黒鉛炉が主流である。

イギリスは、1952年に核実験を成功させる。

ウラン235を核分裂させる際の制御技術は、戦争中にウラン爆弾を開発する過程で得られたものである。他方、核分裂で発生する熱に対して炉内を冷却する必要があるが、その際に吸収された熱をただ発散させてしまえば、単に兵器用プルトニウムが作られるだけである。しかし、その熱で蒸気を発生させてタービンを回せば、電気を起こすことができる(図2・過程A)。

こうしてイギリスは、既に有っていた軍事用プルトニウム生成炉に発電システムを取り付けるだけで、1956年、世界初となる商業用の原子力発電所を完成させた。黒鉛炉においては、核兵器と原子力発電とは、まさに直結しているのである。

2.2 フランス——原子力発電から核兵器へ

フランスにおける開発は、イギリスにおけるのと同様に原子力発電の軍事的本質を示すものであるが、ただ、イギリスとは逆の経過を辿る。まず原子力発電が

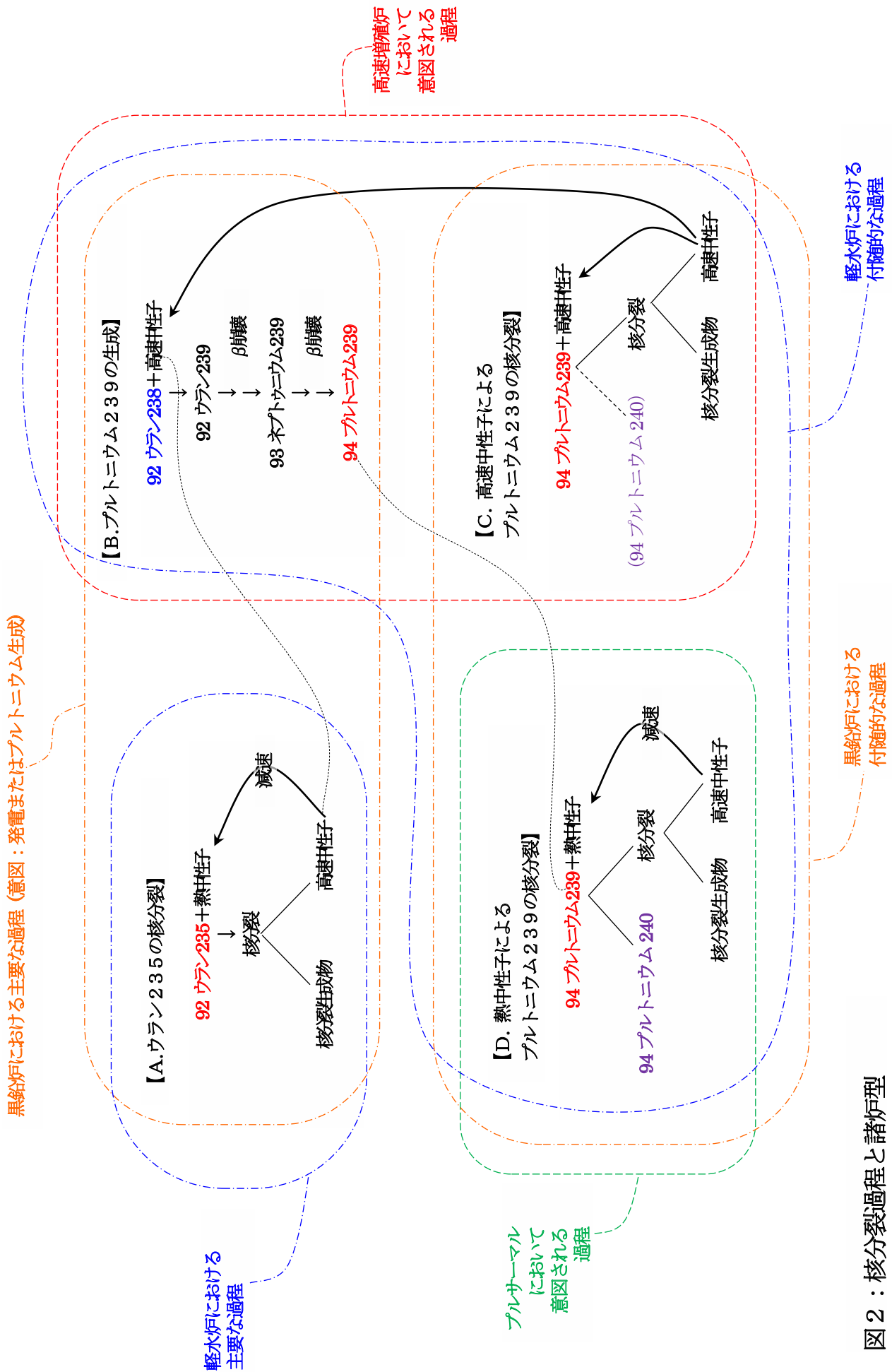


図2：核分裂過程と諸炉型

導入され、これが更に軍事用プルトニウムの生成へ転用される。

国土をドイツに蹂躪され、第二次世界大戦で戦場となったフランスにとって、この荒廃から立ち直り、経済を復興することが、第一の課題であった。ドイツには、豊富な石炭があった。イギリスでは、やがて北海油田が発見されて利権を得るが、その前でも石炭はあった。フランスには、その石炭すら無かった。自前のエネルギーは何も無かったのである。グローバル経済を生き抜くためにフランスが取ったエネルギー政策が、必然的に原子力発電であった。

開発に当たって、アメリカのウラン技術独占から、フランスでも、ウラン濃縮を要しない黒鉛炉を採用するしかなかった。48年に早くも臨界を達成したのち(図2・過程A)、さらに開発を続け、56年に最初の実用炉で運転を開始した。

他方でフランスは、54年ディエンビエンフーでの軍事的敗北、56年スエズ動乱での外交的敗北等から、核兵器を有つことの必要性を痛感するようになる。

発電用黒鉛炉から核兵器用のプルトニウムを得るためには、幾つかの手順や技術が必要である。発電用にウランが核分裂させられたのちには、プルトニウムのほか、未反応のウランや多様な核分裂生成物が「燃料棒」(注4)の中に残される。これらのうちからプルトニウムのみを取り出す再処理の過程、従ってその技術が、まず必要である。また、核兵器の原料となるのはプルトニウム239だが、反応が進み過ぎるとプルトニウム240も生成され(図2・過程D)、これは核爆発を阻害する。再処理により分離できるのは、あくまでもプルトニウム239とプルトニウム240の混合物であり、これらからプルトニウム239だけを「濃縮」するということは、殆ど不可能である。従って、プルトニウム239の純度が高い段階で「燃料棒」を取り出さなければならないが、軽水炉とは違って黒鉛炉では構造上これが可能となっている。発電効率を少し犠牲にするだけで、黒鉛炉からは、高純度の兵器級プルトニウム239が得られるのである(図2・過程B)。

このようにして、発電用黒鉛炉は、核兵器用プルトニウムの生成に転用される。イギリスでは黒鉛炉の軍事用から産業用への転換が為されたが、フランスでは黒鉛炉の産業用から軍事用への転換が為されたのである。

フランスでは既に56年から再処理工場が稼働しており、59年に兵器級プルトニウムを取り出すことに成功、更に60年に核爆発実験に成功した。

3 軽水炉の普及

3.1 “Atoms for Peace”

53年12月アイゼンハワーの国連演説は、基本的には軍事核の国際管理を提唱するもので、「国連のもとに国際原子力機関(IAEA)を設置する。各国は、この国際原子力機関にウランや核分裂物質を供出する。この国際原子力機関は、供出された物質の保管・貯蔵・防護を行なう。」という提案であったが、これの内に、「アメリカは、核分裂物質が平和目的に利用されることを促進する(平和利用のために核分裂物質を提供する)。」という趣旨のメッセージが含まれていた。

IAEAのほうは、1957年創設時には、核物質や原子炉は当事国間で直接に移転され、同機関は軍事転用防止のみを行なう、ということになったが、最後の「平和目的」の部分が大きな意味を帯び、この政策が“Atoms for Peace”と呼ばれることとなった。

3.1.1 経済的利益

“Atoms for Peace”は、まさにアメリカの経済的利益にとって必要であった。

アメリカの核兵器政策は、ウランウム爆弾からプルトニウム爆弾へと、大きく方針が転換されていた(注5)。ウラン235は自然界に極めて稀少であるのに対して、プルトニウム239は、非分裂性のウラン238から幾らでも人工的に生成することができる。原理的に言わばウランの埋蔵量と同じくらい手に入れることができるのである。しかも、時は既に水爆開発の時代である。ウランは、核兵器の材料としては、既に完全に時代遅れになっていたのである。

アメリカは余剰の濃縮ウランを大量に抱えていた。しかも、アメリカはウラン濃縮技術を独占している。この独占は、しばらくは続くだろう。それに加えて、濃縮したウランでなければ機能せず、しかも経済効率の極めて高い軽水炉を、ちょうど開発したところである。アメリカには、軍産共同体と国の利益のために、余剰の濃縮ウランを旨く——損をしないように、むしろ儲かるように——処理し、同時にウラン濃縮の技術と、濃縮ウランを「燃やす」(注4)軽水炉の技術を、アメリカが世界をリードする形で活用する必要があった。そうすれば一石二鳥にも三鳥にもなる。こうしてアメリカは、ウラン濃縮技術を独占しつつ、濃縮ウランと軽水炉技術を世界へ売り込む、という政策に打って出るのである。

3.1.2 由来の軍事性

軽水炉は、もともと、原子力潜水艦の動力炉として、アメリカによって開発されたものである。

黒鉛炉は大きすぎ重すぎて潜水艦の動力炉には為し得ない。軽水（普通の水）を中性子減速に使うことによって全体を小型軽量化し、艦船の揺れに影響されない加圧水ループをいったん原子炉に通して熱を取り出すのが、ウェスティングハウス (Westinghouse) 社が開発した加圧水型軽水炉である。

50年、アメリカは潜水艦用動力炉の開発計画をスタートさせ、ウェスティングハウスに開発を担当させていた。この技術は演説時には既に完成しており、アメリカはこれを陸上の発電炉へ転用すればよいだけであった。「平和のための」原子力技術として推奨された軽水炉も、もとは軍事技術だったのである。

しかも軽水炉は、天然ウランでは働かず、核分裂性のウラン235の濃度を高めたものでなければ稼働できない(図2・過程A)。このための濃縮技術は、ウラン爆弾を作る過程に使われるものである。軽水炉は、その「燃料」もまた、軍事由来のものなのである。

3.1.3 反核意識の稀釈

このように、軽水炉原発は「燃料」も技術も軍事由来のものであったが、“Atoms for Peace”は、その隠された意図においても、或る軍事的な意味を有っていた。核兵器に対する世界中の忌避意識を稀釈すること、これが“Atoms for Peace”の大きな狙いでもあった。

時は「東西」が厳しく対立する時代、4年前に中国で革命、さらに朝鮮でようやく休戦に漕ぎ着けた直後である。「階級闘争」が、まさに国際政治の舞台へと次元を高めていた時代だったのである。核軍拡競争を仕掛けることによって、ソ連を経済的に破綻させようとする思惑もあったであろう。自ら核軍拡を進めるためには、世界中に広がっている核兵器に対する嫌悪・反感を稀釈する(薄める)こと——「核は、決して恐ろしいものではありませんよ!」と、世界中に思わせること——が、必要だったのである。

「核兵器はプルトニウムで、ウランは発電へ」という使い分けの方針が、アメリカでは出来上がっていた。一方でウランを使って平和の使者のように振る舞いながら、他方でプルトニウム(や重水素)を使って堅固に武装する、これがアメリカの戦略であった。

3.1.4 対ソ連包圍

そしてもう一つ、“Atoms for Peace”の軍事的本質は、さらに鋭い政治的な効果を伴っている。

東西冷戦は、或る力学的な効果を先進資本主義諸国に強いる。各国は互いに覇を競いながらも、社会主義国の力を削ぐためには「団結」しなければならない。ソ連は、同じ年8月に水爆実験を成功させていた。その

ような時代、“Atoms for Peace”のもう一つ大きな狙いは、敗戦国ドイツや日本に原子力技術の開発を「解禁」し、こうして先進資本主義諸国による対ソ連包圍を完成させることである。

軽水炉は確かに、黒鉛炉ほど直接には核兵器との関連を有さない。軽水炉でもプルトニウム239——核分裂性——は生成されるが(図2・過程B)、同時にプルトニウム240——不規則に自発分裂を起こし本格的な核爆発を阻害する——も多く生成される(図2・過程D)。このような低純度のプルトニウムは、核兵器には適さない。実際、軽水炉のこの面が、「平和のため」として大いに宣伝されたのである(注6)。

しかし、ウラン濃縮技術は、いつまでもアメリカが独占し得るものではない。軽水炉の普及は、ウラン濃縮技術の開発を動機付ける。そして、発電向けの低濃縮から核兵器向けの高濃縮までは、程度の差しかない。敗戦国もまた、ウラン爆弾を作ることが「できる」能力を有するようになる。

それだけではない。ドイツや(特に)日本も、「燃料リサイクル」を口実に高速増殖炉を目指すところまで、何時かは技術を進めるだろう。高速増殖炉は、軽水炉で生成される僅かなプルトニウム239を天然ウランと一緒に「燃やす」ことにより(注7)、それよりも多くのプルトニウム239を、しかも高純度で、生成することができる(図2・過程C・過程B)。兵器級プルトニウムを最も効率よく生成することが「できる」のである。

この、核兵器を作ることが「できる」ということが、ソ連にとって大きな政治的脅威となる。“Atoms for Peace”政策は、冷戦時におけるアメリカの国際的軍事戦略の重要な一環でもあったのである。

3.2 “Atoms for Peace”に対する各国の動向

3.2.1 アメリカ——発注ブームへ

“Atoms for Peace”の提唱国として、アメリカは産業用原子炉の建設を急ぐ。演説直後の54年1月に原潜のほうはノーチラスが完成。しかし産業炉ではイギリスに遅れること1年、57年12月に加圧水型軽水炉を完成・稼働させる。

他方、遅れを取ったジェネラルエレクトリック (General Electric) 社は、軽水炉を地上専用に簡便化し、原子炉を満たした減速材としての水に、同時に冷却材としての役割りをも兼ねさせ、直接これを沸騰させるという、沸騰水型軽水炉を開発した。60年6月に沸騰水型の原型炉を完成させる。

以後アメリカでは原発の発注ブームが起り、これはオイルショックのころまで続く。

3.2.2 フランス——いち早く導入

“Atoms for Peace”を受けて、フランスは、いち早く軽水炉を導入した。アメリカは濃縮ウランと軽水炉技術を輸出するという、大国だけが取り得る経済戦略を立てたのに対して、フランスでは、もっと基本的な別の意味での計算合理性が働いた。黒鉛炉に比して軽水炉は極めて経済効率が高い。これに着目するのは、計算合理性が最もストレートに機能した結果である。この決断が、後にフランスが原子力大国へと成長する要因の一つとなる。同じ戦勝国でも、後述するイギリスとは大きく異なる点である。

60年、軽水炉（加圧水型）を計画、アメリカから濃縮ウランと技術を受け入れることとする。アメリカが描いた“Atoms for Peace”の筋書きに、まさに絵に描いたような仕方で従う姿勢であった。62年に建設開始、64年に臨界を達成したのに続き、67年に最初の軽水炉（加圧水型）が運転を開始する。黒鉛炉は71年に運転を開始した炉を最後に完全に絶え、以後に計画された商業炉は、すべて加圧水型軽水炉である。

フランスが軽水炉を導入したのは、実はもう一つ理由があった。フランスは、原子力で動く軍事艦船を計画していたのである。動力炉としては軽水炉以外にはあり得ない。しかも、フランスが導入した技術は加圧水型のみであり、建設した発電所も、艦船に搭載した場合に揺れに耐えうる加圧水型のみである。ドイツが加圧水型・沸騰水型いずれをも開発したのと、対照的である。フランスの原子力発電技術は、常にその軍事利用を睨んでいたと言える。軽水炉でさえ、その軍事的本質は消えることが無いのである。

3.2.3 イギリス——アメリカに対抗

グローバル経済は、先進国間の競争という側面を有っている。原子力発電の分野では、イギリスの行動に、その典型が見られる。

イギリスは、“Atoms for Peace”の誘いを拒絶した。底にあるのは、マンハッタン計画に協力したにも拘わらず、核技術を独占したアメリカに対する不信感である。これに対抗して、イギリスは、独自に開発したプルトニウム爆弾の実験を前年に成功させていたし、“Atoms for Peace”演説の時点で、黒鉛炉の開発を通して、原子力発電の技術においてアメリカを既に凌駕していた。アメリカに自国の原子力政策を牛耳られることを嫌い、自ら開発した黒鉛炉を以って、グローバル経済において勝負することに出たのである。

イギリスは、自国の原子力技術を輸出産業に育てることを目指す。初期の黒鉛炉（マグノックス炉）が経済

効率の点で劣っていたのを補うため、改良型黒鉛減速炭酸ガス冷却炉を開発し、64年の新規計画では、これを次世代の原子炉として推進することを決める。しかし、黒鉛炉の効率の悪さは如何ともし難く、軽水炉との競争に敗れる。

3.2.4 ドイツ——持ち前の技術力

“Atoms for Peace”はドイツにとって、敗戦国として禁じられていた原子力技術がようやく解禁されたことを意味する。いよいよ戦勝国に伍して、技術先進国としてのステータスを獲得しつつ、グローバル経済に主体として登場することができる。それは、まさに国の名誉・威信に関わる問題でもあった。ドイツがこれを歓迎しない訳は無い。

ドイツにおける原子力発電開発の特徴は、敗戦国として、核兵器との関連が完全に断たれていた、ということである。このことは、ドイツにとって二つの意味で幸運なことであった。ほかの一つは後述するとして、一つは、イギリス・フランスが核兵器のために黒鉛炉を捨て切れなかったのに比して、ドイツは初めから軽水炉に集中、軽水炉一筋に、沸騰水型、加圧水型、何れをも精力的に試し得た、ということである。

戦勝国に遅れて出発し、黒鉛炉に関してはイギリス・フランスに先んじられたとは言え、軽水炉に関しては横一線であった。ドイツは、持ち前の技術力で、急速に開発を進める。62年に実験炉で発電に成功、67年に初の商業原子炉が運転を開始する。当初はアメリカ企業からのライセンス契約に頼ったとは言え、国産化もドイツは早かった。ジーメンス（Siemens）社はウエスティングハウスから、アルゲマイネEG（Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft）社はジェネラルエレクトリックから、それぞれ軽水炉技術を導入していたが、69年には、アメリカ企業に対抗して、二社共同でクラフトヴェルク・ウニオン（Kraftwerk Union）社を設立、以後、原子炉建設を完全に国産化した。

3.2.5 日本——一大キャンペーン

アメリカにとって、原爆の被害国である日本に原子力発電を導入させることは、世界中の反核兵器意識を稀釈するうえで、特別の意味があった。全国を渡り歩く原子力博覧会など、一大キャンペーンが展開された。日本では実業家・正力松太郎や政治家・中曽根康弘が呼応した。

他方で、卑劣な欺瞞も伴った。広島や長崎の残留放射能については、ひた隠しにされたままであった。“Atoms for Peace”演説の翌年に起きた第五福竜丸の水爆実験被曝についても、アメリカは同じ態度を採った。この一大キャンペーンに、反対運動の声はかき消

され、世論は誘導され、すっかり丸め込まれた。その効果たるや、原水協でさえ「原子力は平和のためにこそ……」を方針に取り入れるほどであった。

日本は、“Atoms for Peace”を受け容れた後も、「国産」と言えるほどの原子力発電技術を開発しなかった。設計技術は基本的に外国企業に依存しており、これは、ドイツと大きく異なる点である。

最初に導入したのはイギリスの黒鉛炉（66年運転開始）、次はアメリカ・ジェネラルエレクトリックの軽水炉（70年運転開始）である。以後は、ウエスティングハウス設計の加圧水型、ジェネラルエレクトリック設計の沸騰水型が続く。

導入初期には、ジェネラルエレクトリックが発案した「ターンキー契約」——一定の価格で建設・臨界までを製造企業が請け負い、発電事業者はマニュアル運用する——が重宝がられた。その後に着したのが「ロックダウン方式」——アメリカ企業が設計し製作した部品を日本メーカーが組み立てる——であった。

4 オイルショックへの対処

4.1 OPECと先進諸国

4.1.1 OPECの逆襲

60年のOPEC設立は、先進諸国メジャーの利権に大きな打撃を与えた。メジャーに安く買い叩かれていた石油を自分たちへ取り戻そうとする資源ナショナリズムの始まりである。第4次中東戦争は、直前の数年間に中東の産油国が相ついで石油資源を国有化しているところに起こった。資源ナショナリズムが高まっているときだったのである。73年10月、OPECは、イスラエル支援国に対する石油禁輸とアラブ非友好国に対する段階的石油供給削減を決定するとともに、メジャーとの交渉を打ち切り、原油公示価格の大幅引き上げを一方的に決定した。それはまさに、先進諸国による世界支配に対する中東産油国からの反撃であった。その後、OPECは加盟国の原油価格を総会で決定することになる。先進諸国による世界支配は、ここに大きく揺らぐことになるのである。

4.1.2 原子力発電による先進諸国の世界支配

オイルショックにより、どの国もスタグフレーションが深刻化し、実際には電力需要が減少した。原子力発電の推進・強化が、直ちに産業に役立つ訳ではない。原子力発電の推進・強化は、長期的に先を見越した政策に他ならない。

OPECが決めた高値の石油のせいで自国の産業が

落ち込むのを目の辺りにした先進諸国は、自国の産業が如何に中東の産油国に依存しているかを痛感したことだろう。そして、このようにして中東の産油国に自国の経済が牛耳られることを、苦々しく思ったに違いない。

原子力発電の推進・強化は、本質的には、これに対抗するための政策、先進諸国がその世界支配を保つための政策に他ならない。世界の生産力は、途上国の成長を含めて、将来的に高まる一方である。エネルギーは、長期的に見て稀少化する。だから、「先進国には先進国に相応しいエネルギーを」ということなのだろう。原子力発電は、先進諸国にしかない技術である。これによれば、その限りで自前のエネルギーを確保することができ、更には石油の価格を牽制することさえ可能である。独占するこの技術の推進・強化こそが、先進諸国による世界支配にとって必要だったのである。

4.2 オイルショック後の各国の動向

4.2.1 ドイツ——推進と反原発

(1) 国による推進

オイルショックに対してドイツが取った措置は、一つには石炭産業を見直し、これを保護することである。グローバル経済における競争は、まずはエネルギーの自給率を維持することを強いるのである。

もう一つが、当然ながら、原子力発電の開発を加速することである。73年には、オイルショック（10月）の前に既に3基が発注されていたが、直後は、74年に2基、75年には4基と、矢継ぎ早に発注が為された。

技術的にも、ドイツは極めて高度のところまで進んでいる。プルサーマル(図2・過程D) (注8)が実用として広く普及。「MOX燃料」(注9)が、既にオイルショック前から3基に装荷、オイルショック後に12基に装荷された。高速増殖炉も、79年に実験炉の運転を開始し、85年には原型炉がほぼ完成された(稼動は州政府が認可せず)。

(2) 市民による反原発運動

その一方で、86年のチェルノブイリ事故以後、特にドイツに顕著に、原発の歴史に新たな要素が現われる。反原発の市民運動である。

ドイツは、地理的特性としてソ連とフランスの間に存在し、市民たちは、万が一生じる核戦争への恐怖を格別に強く感じてきたので、反核意識を強く有ちやすいという傾向が、背景にあった。そんなところへ、現実にチェルノブイリ事故が発生した際に、スウェーデンを廻って自国に放射性物質が降ってくる、という体験をする。

ここに必然的に高まってくる反原発思想は、経済的な計算合理性とは違うところに根拠を有っている。科学技術による「便利な生活」の恩恵ということとも別の次元から、この思想は起こってくる。実際に生命や健康に対する危険を惹き起こした放射能を忌避すること、それに怯えず安心して生活したいという欲求、からである。生命・健康・安心、これらの人格的価値は、まさに日常の生活世界の内に生きて働いている人格合理性の重要な要素であり、反原発運動は、この源泉からその思想を汲んでいるのである。この人格的な合理性こそが、計算合理性を行動原理とする経済活動に対して倫理性を注入することできる、唯一つの要素である。

4.2.2 フランス——急速な推進

オイルショックは、フランスが採ってきた原子力重視政策の正しさを確信させるものとなった。フランスには、ドイツのような石炭も、イギリスのような石油利権も無い。特に誇るべき工業分野も無い。原子力産業の育成は、まさにグローバル経済を生き抜くための国家戦略となって行く。

74年、フランス政府は、原子力発電利用拡大を基本方針として決定する。これに基づき、新たに39基が着工され、これらの炉は77年から88年にかけて運転を開始することになる。フランスは、全発電量のうち原子力発電によるものが占める割合を、オイルショック時には8%だったものから、80年に24%、90年に75%へと、急速に高めて行く。

この間、81年には、ウエスティングハウスがフラマトム (Framatome) 社から資本を引き揚げるという事態が生じたが、むしろこれを機会に、フランスは加圧水型炉の国産化へと向かう。さらに86年には、高速増殖炉スーパーフェニックスを稼働させるに至る(もともと、事故続出により98年に閉鎖)。

このようにして、フランスの原子力発電は、それ自体で産業として育ってきた。

4.2.3 イギリス——グローバル経済での「敗北」

1964年に北海油田が発見されていた。これへの開発投資を促進することで、イギリスはオイルショックに対処した。どの国もエネルギーの自給率を高めることがグローバル経済に臨む基本姿勢である。イギリスはむしろ、石油の輸出国になって行く。

原子力発電のほうでは、ようやく78年になって、軽水炉導入を決定する。しかし、イギリスの元々の最終目標は、ウランではなくプルトニウムを「燃料」とする高速増殖炉であった。軽水炉は、再処理によりプルトニウムを取り出す手段に過ぎない。同時に再処理は、

ウランの枯渇を見越して、成長産業になるという目論見もあった。

こうしてイギリスは、一方で原子力発電から再処理産業の育成へとシフトし、他方で高速増殖炉の開発に賭ける。しかし、ウラン新鉱の発見により再処理産業は伸びず、高速増殖炉は事故の発生から開発を断念する。

黒鉛炉についても、再処理についても、高速増殖炉についても、イギリスでは、合理的であるはずの計算が常に裏目に出ていた。原子力産業の分野において、グローバル経済での「敗北」の一つの姿を、ここに見ることができる。

4.2.4 アメリカ——発注ブームの終焉

アメリカでは、オイルショックの次の年に発注が在ったのを最後に、発注ブームは終焉した。ドイツやフランスとは対照的である。

重要な原因の一つとして、市民による反原発運動に対して、政府が安全基準を高度化したことが在る。これにより建設費が高騰し、競争力を失ったのである。建設費用の増加分を電気料金へ転嫁してはならないというアメリカの制度も関係した。廃炉・事故処理等の費用を隠す欺瞞を犯してまで建設コストの低さを売り物にしてきた原子力発電が、当の「虎の子」の建設コストで、計算合理性を貫くことができなくなったのである。実はここに、原発終焉の一つの型がある。これについては後述する。

4.2.5 日本——アメリカの受け皿

日本では、オイルショック以前に着工されていた原子力発電所が次々と完成、発電を開始する。これに加えて政府も推進方針を取り、74年には、発電事業者課税して受け入れ自治体への交付金に廻すこと等内容を「電源三法」を成立させる。75年には、アメリカ・イギリスに次ぐ発電量に達する。

アメリカでは、発注ブームは去り、既に着工されたものの建設は続くにしても、アメリカのメーカーは、国内では原子力産業に対して将来への展望が抱けない、という状況であった。そんなとき、日本では、国産といっても「ノックダウン方式」が続いていた。ジェネラルエレクトリックやウエスティングハウスからすれば、アメリカにおいて原子力産業の成長が不調に陥っていたときに、原子力発電推進を決めた日本は、まさにその良い受け皿になっていた訳である。

軽水炉に関して自前の技術開発をするようになったのは、75年から進められた三次にわたる「改良標準化」計画においてであった。ジェネラルエレクトリック設計炉の改良や、沸騰水型・加圧水型それぞれの改

良型の開発が、企てられることになる。

5 二つの方向

2002年は、原子力発電の歴史にとって、一つの時期を画する年となった。

ドイツとフランスは、軽水炉に関する限りほぼ同時に開発をスタートし、技術的に肩を並べるように原子力発電を推進してきた。89年には、フランス・フラマトムとドイツ・ジーメンスが、欧州加圧水型炉の共同開発を開始するところまで至ったのである。しかし、その後の歩みは正反対の方向へ向かう。

5.1 ドイツ——脱原発へ

一方で、ドイツでは、98年に社会民主党と緑の党による連立政権が成立し、市民の反原発思想が政治の表舞台に登場することになる。2001年、ジーメンスは、先を見越して原子力部門をフランスのフラマトムへ売却する。2002年には原子力法が改正され、「原子力発電所は32年間の運転の後に順次閉鎖される」ということになり、同時に再生可能エネルギーの普及支援策が導入された。

ジーメンスが総合エンジニアリング企業であったことは、ドイツが脱原発へ政策変更するためには、幸運なことであった。原子力分野から再生可能エネルギー分野へとシフトすることは、比較的スムーズに可能だからである。ジーメンスにすれば、こんどは再生可能エネルギー分野で世界をリードしようとする戦略を立てることになる。

敗戦国ゆえに核兵器開発との関連が絶たれていたことも、脱原発にとっては幸いであった。戦勝諸国が原子力発電を核兵器開発と結び付けていたのとは違って、ドイツは、NATOを通じて「核の共有」を受けることに頼りつつ、原子力発電を終わらせるためには、言わば身軽だったと言える。自前の核兵器開発を断念する姿勢を取ったのは、日本とは大きく違うところである。

福島第一原子力発電所の事故のあと、ドイツでは、こんどは保守政権によって脱原発が再確認された。2010年に運転期間を12年間延長していたのを改め、2011年7月には、最も古い8基を閉鎖、運転中の9基も2022年までに段階的に閉鎖することを決定した。

5.2 フランス——原発大国へ

他方フランスでは、2001年に、フラマトムがジーメンス原子力部門を買収、社名をフラマトムANPとしたのに続き、これが政府系のコジエマ(Cogema)

社と共同して、原子炉・「燃料」・送電の三部門を傘下に置く持ち株会社アレヴァ(Areva)SAを設立、原子力産業路線を統一的に進める体制が整った。これを受けて、2002年に政府は、次世代炉として欧州加圧水型炉の実用化を目指す、新たな計画を策定する。

全発電量に占める原子力発電によるものの割合は、2006年には約80%に達する。

アレヴァは、その前身がジーメンス原子力部門を買収したことにより、ドイツの原子力技術をも取り込み、いまや原子力産業全般に渡る世界随一の専門大企業へと成長した。

5.3 三大メーカー

アメリカ・日本も、フランスと同じ方向へ向かう。その過程で、世界における原子力産業の寡占化が進む。

ジェネラルエレクトリックは、経営危機を越えて技術を堅持している。

東芝は、2006年ウエスティングハウスを買収したことによって、アレヴァ・ジェネラルエレクトリックと並ぶ世界の三大原子力発電メーカーの一つへと躍り出た。加圧水型軽水炉を開発したウエスティングハウスであったが、“Atoms for Peace”から半世紀、日本メーカーがその技術を手中に収めたことになる。これに対抗するように、2007年には、日立がジェネラルエレクトリックと提携、三菱重工はアレヴァと提携、それぞれ合弁会社を設立した。原発部品では、日本製鋼所室蘭製作所が世界の圧力容器の8割を生産するまでになった。日本はいまや、フランスに次ぐ第二のメーカー大国に成り上がったと言っても過言ではない。

加えて、日本は異常なほど高速増殖炉に執着を有っている。原子力発電の継続をめぐる石破茂の「抑止力」発言(注10)は、高速増殖炉が有れば兵器級プルトニウムを生成することが「できる」ことを、露骨に示したものである。ここで我々は、改めて原子力発電の軍事的本質を強く意識せざるを得ない。

5.4 原発輸出

国内の電力市場が飽和状態になり、さらに発電量がこれを超えれば——原子力発電では危険な出力調整を行なえないことから、フランスのように原発依存率の高い国は、発電超過になりやすい——、電力企業は電力の輸出を目指す。同様に、国内の原子力発電所の市場が飽和状態となれば、原子力産業は、次に外国へのプラント輸出を図る(挙って中国・インドへ。特に日本はベトナム・トルコ等へ)。原子力産業において既に進んでいる寡占化も含めて、19世紀以来、法則のように妥当してきた経済的な力学が、原子力業界

でも働いている。

まさに計算合理性を行動原理とする企業活動がもたらす帰結である。原子力産業に関わる計算合理性は、電力を安価に国内へ提供することだけでなく、原子力発電の技術・プラントの輸出により外貨を稼ぐことを求める。アレヴァ・ジェネラルエレクトリック・東芝は、その意味で最も「成功」した企業である。

しかも、グローバル経済は、先進諸国による世界支配という側面を強く有っている。原子力発電の技術がそのための道具になるということは先述したが、原子力プラントの輸出は、このことを最も強い意味で実現する。

しかし、その分だけ、国内にも輸出先の国にも、大きな問題を残す。

原子力発電プラントの輸出を継続するためには、国内でも原子力発電所を建設し続けていなければならない。国内が脱原発の方針を取っていれば、輸出に必要な技術そのものを維持し得ない。ジーメンスが原子力部門から手を引いたのは、それを知っていたからでもある。原子力産業が経済の内に強固に根をおろし、輸出による利益を見込んだ構造にまで進んでしまった国は、容易に脱原発へ踏み切ることとはできなくなる。フランスや日本は、既にその状態へ至っている。

計算合理性は、安価に電力を提供することを求める。安全基準の高度化に伴う建設コストの高騰により、原子力発電は既に国内では競争力を失っている。計算合理性が負の方向へ働いているのである。それならば、途上国の安い人件費で建設することができるといことなのか。それとも、外国では安全基準を引き下げるということなのか。事故が生じた場合の賠償責任の問題は、メーカーが負わないまま置き去りにするのか。種々の問題を含みながら、核分裂生成物(高レベル放射性廃棄物)だけは、国内でも最終処分の問題を解決できないまま、確実に世界中へ撒き散らされることになる。

6 人格適合性の実現

6.1 ドイツ倫理委員会の報告書

「人間は技術的に可能なことを何でもやってよいわけではない。」——— これは、技術には何らかの倫理的な限界が存在することを宣言した、＜倫理・技術＞マニフェストである。

この基本命題がどのようにして導入されるかを、ドイツ倫理委員会の「報告書」(注11)に即して見よう。

「4. 倫理的立場」と題された項目のなかに、

【引用①】原子力エネルギーの利用やその終結、

他のエネルギー生産の形態への切り替え等に関する決定は、すべて、社会による価値決定に基づくものであって、これは技術的あるいは経済的な観点よりも先行しているものである。未来のエネルギー供給と原子力エネルギーに関する倫理的な価値評価において鍵となる概念は、「持続可能性」と「責任」である。

——— とする記述がある。

ここに言うキーワードの一つ「持続可能性」については、「2. 発端と委託」と題され、連邦政府がこの委員会を設けた趣旨を述べた項目のなかに、

【引用②】ドイツの安全な未来は、環境が損なわれていないこと、社会において正義が成り立っていること、経済が健全であること、という持続可能性の三つの柱の上に成り立つ。これらの原理の上に整備されたエネルギー供給は、国際的競争力を持った経済や、また国内の雇用や生活水準や社会平和にとっての、長期的な基盤である。

——— と記されている。

もう一つのキーワード「責任」については、「4.2 リスクを統合的に判断すること」と題された小項目のなかに次のように述べられていて、そこに先の基本命題が現われる。

【引用③】安全なエネルギー供給を考えていくことは、社会発展の基本的な問いと結びついている。人間は技術的に可能なことを何でもやってよいわけではない、という基本命題は、原子力エネルギーを評価する場合にも考慮されなければならない。とりわけ、技術の結果が「永続的な負荷」という性格を持つならば、批判的な評価は特に重要である。短期的な利益を優先して未来の何世代にも負担を強いるような決定に対しては、社会が責任を負わなければならない、何が受け入れ可能で、何が受け入れ不可能と判断されるべきかを決定していかなければならない。

——— というものである。

以上を模式的に示すと、次ページ図3のようになる。

引用③では、原子力発電は「永続的な負荷」をもたらす技術である」ことを確認し、これの許容可能性は、社会の責任ある評価・判断に服すべきものであることが断言されている。

その評価の際の実質・内容の面は引用②の内語られており、そこでは社会の「持続可能性」として纏められる三つの指標 —— 「環境の保全」「社会的正義」「経済の健全性」—— が挙げられている。

これらのうち、「社会において正義が成り立っている

こと」という指標こそ、評価・判断の倫理的実質を意味しており、倫理的な評価が判断をリードすべきことを表現する指標である。

そして、このようにして為される社会的価値評価・判断は、技術的・経済的観点に先立つことが、引用①において宣言されている。

ところで、いま注意しなければならないことは、引用②のうちで、評価におけるキーワードである「持続可能性」の指標の一つとして、「経済が健全であること」が挙げられていることである。ほかの箇所では、社会による価値決定は「経済的な観点に先行する」こと（引用①）、社会による決定には「短期的な利益を優先して……はならない」

こと（引用③）、が語られている。しかしながら他方で、社会による評価・決定には「経済が健全であること」が指標の一つとなるのである。

ここには、極めて重要な思想が示されている。

原子力発電に関わる政策は、まず、倫理的な評価・判断に従って決定されなければならない。それははっきりしている。

「社会的な正義」には、現実的ないし可能的な放射線に対して、生命・健康・安心といった人格的な価値が十分に保護・保証されること、が含まれている。これらの人格的な価値は、経済的な計算合理性とは別のレベルに基礎が在って、そこから立ち現われてくるものであり、経済的な利益や技術による利便性に優先するものである。それら人格的な価値を経済的な価値と同列に置き、比較考量することは許されない。

そこで、この人格的な価値に準拠して評価し、社会の責任ある判断が、原子力発電を「受け入れ不可能」なものとして決定することはあり得る。

しかしながらその場合であっても、そのあとに出現してくる社会において、「経済の健全性」が傷付けられることが在ってはならない、と「報告書」は言っているのである。実際、来るべき社会の経済構造については、「報告書」の中でも、多くの箇所ですべて極めて細かな配慮が為されている。

ここに想定されているのは、人格的価値に準拠した、

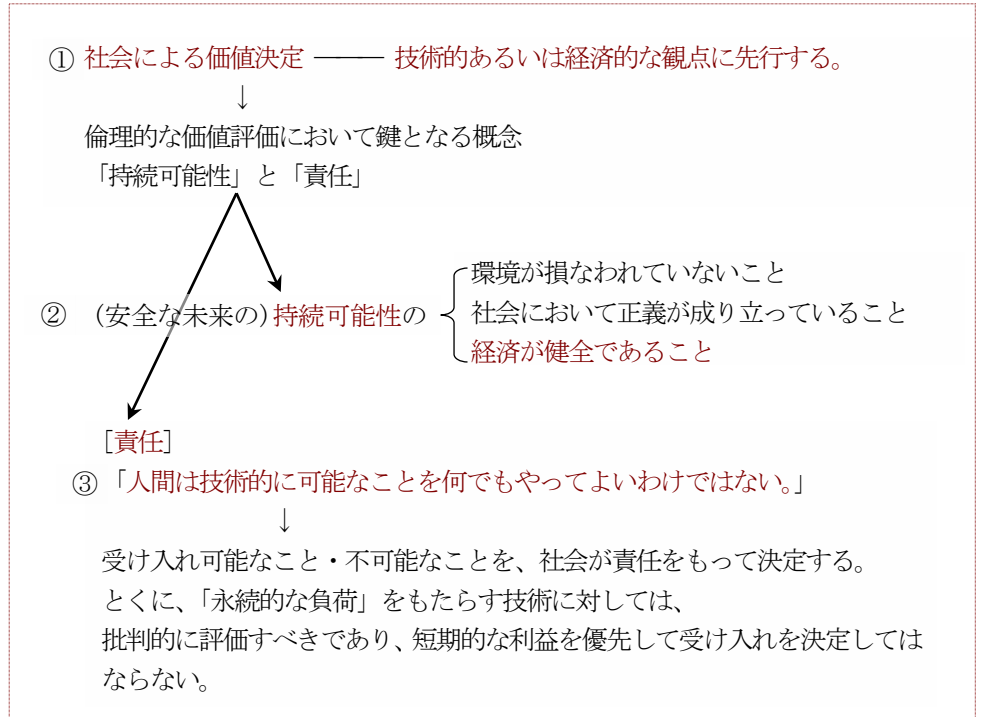


図3: ドイツ倫理委員会「報告書」の重要概念

以前とは異なる、新たなレベルにおける計算合理性である。

6.2 新しい「計算合理性」

ドイツで脱原発が可能となったわけは、極めてはっきりしている。市民の反原発運動を通して、脱原発政策を掲げる政党が政権を取ったからである。その背後には、成熟した環境意識に裏打ちされた国民の世論がある。

計算合理性の考え方からは、石油とのコストの比較、再生可能エネルギーとの安定供給性の比較、原子力産業の経済における重要性、等が主張される。決め言葉が「現在の便利な生活をどうするのか」である。生命・健康・安心といった人格的な価値に対しては、事故の確立は低い、危険は減らすことができる、として、現在の「便利な生活」と安全・安心とを比較考量することを求める。このような主張は結局、現在の産業構造を維持するという発想に立ち、計算合理性のなかをグルグル廻っているだけのことである。しかし計算合理性は、倫理とは基本的に無関係の基盤の上に在る。

反原発の思想は、まったく違った次元に発している。原子力発電に依存しないような新たな経済構造を作ろう、という主張なのである。そしてその根拠を、人格的な価値に準拠した合理性——人格合理性——の内に有っている。倫理の基盤は、この人格合理性の中にしか無い。

いったい何のための経済活動なのか。これまで実際にそうであったように、いったん事故が起きれば、「便利な生活」は根底から覆される。人格こそが「便利な生活」の主体である。生命・健康・安心といった人格的価値は、「便利な生活」と比較考量できるようなものではないのである。

市民の反原発運動は、議会の多数を獲得し、国に脱原発を認めさせることに成功した。このことは、人格合理性に立つ思想が、原子力発電に関する限り、計算合理性一辺倒の思想に打ち克った、ということ意味する。

保守政党とメーカーにとっては、市民たちの運動と世論によって、脱原発へ「追い込まれた」と言ってもよい。

人格合理性は、その限りで計算合理性の内へと入り込むこと——計算合理性の内での自己を実現すること——ができる。

このことを計算合理性の側から見れば、その限りで、計算合理性が「人格適合性」を具有する、ということの意味する。このとき、計算合理性は、もとの計算合理性ではない。人格合理性を一部取り込んだ、「新しいレベルの計算合理性」が現われるのである。

ドイツでは、国も企業も、再生可能エネルギーにより世界をリードするという、グローバル経済を見据えた新たな戦略にシフトすることができた。

もっとも、この新たな戦略を通した新たな計算合理性は、市民たちによって、それへと「強制された」ものとも言える。しかし一般に、国や企業が市民に対して譲歩するのは、人格合理性からする主張が計算合理性の内へとうまく取り込まれ得る場合にのみである。計算合理性が「人格適合性」を帯びて行くのは、多くの場合、このような道筋を辿る。

以上のように、人格合理性が、或る一定の範囲で計算合理性の内に食い込み、そこに「人格適合性」を埋め込む、そして新しい計算合理性が始まる。冒頭で「典型的」と言ったのは、この一連の過程のことである。

しかし元より、これとて、経済活動の全体からみれば一定の部分に限定された話である。

ここで事柄は、計算合理性へと帰って行く。

新しい計算合理性の内部で、ドイツでは再生可能エネルギーが支配的となるであろう。これは、原子力エネルギーが害し得る限りでの人格的価値——生命・健康・安心——が、その限りで保証を回復した姿である。しかし、再生可能エネルギーの利用拡大は、それはそれで産業の内で展開される。そこでは、利潤や雇用などをめぐって企業の論理が再び現われてくる。

そこは、一般の経済的な計算合理性が相い変わらず支配する世界なのである。

それでも、人格合理性の支配する社会が一挙に実現することは、将来おそらく無いであろう。計算合理性の内へ「人格適合性」を刻み込んで行くことは、当面は、このように少しずつ実現して行くしかないであろう。

7 原子力発電の終焉

7.1 市民運動、負の計算合理性

ここまで本研究ノートでは、核兵器技術が存在するという条件の下、先進諸国がグローバル経済という枠組みの中で計算合理性を行動原理としてエネルギー政策を進めれば、必然的に原子力発電は現われるという見方を以て、論を進めてきた。しかしまた、ドイツでは、「人格合理性」に準拠した市民の力が原子力発電を終焉させ、計算合理性に対して部分的にせよ「人格適合性」を有たせることになった、ということも見てきた。

原子力発電という現象は永遠に続くものではなく、原子力発電はいつか必ず消えて行くものである。本研究ノートを閉じるに当たって、ドイツの場合も含めて、原子力発電の終焉ということについて述べておこう。

ドイツのように、反原発の市民運動と世論に押され、脱原発を掲げる政党が政権を獲得することによって、その国の原子力発電は終焉する。市民の主体性が、問題の権力的解決を惹き起こす、という形である。国民の高い権利意識と政治意識を必要とするが、最もドラスティックで、最も望ましい形である。

ドイツの例にまで至らなくとも、市民の反原発運動が政府を動かし、一定の人格的価値に対する配慮を政府に強いることがある。政府は、原子力発電維持の政策を継続するために安全基準を引き上げざるを得なくなる。それは、建設コストを高騰させ、原子力発電の競争力を奪って行く。それまで原子力発電を後押ししてきた「計算合理性」が、「負」のほうに働きだすのである。アメリカで既に起こったことだし、いまま先進諸国で起こりつつある。輸入した途上国でも、原子力発電の危険性が明らかになるにつれて起こってくるだろう。

以上二例は、市民が主体的に関わる場合である。これらは、市民の主体性がそれぞれの程度で、国全体で権力を動かす例である。個別的な発電所に限れば、訴訟により建設や稼働の中止を求めることもできる。市民の反原発運動は、人格的価値に根ざした素朴な感情

に発している分だけ、決して絶えることのない強さを有っているのである。

もっとも、先ほど触れた「負の計算合理性」は、原子力発電に固有のものであり、それ自身で原子力発電は終焉に向かって行く運命にある。

原子力発電を導入した先進諸国で、核分裂生成物が続々と排出され、また耐用年数を過ぎた発電所が次々と廃炉になっている。それにつれて、高レベル放射性廃棄物の処理費用や廃炉費用を、いやでも意識せざるを得なくなっている。故意に建設とランニングの費用だけを計算して「安上がり」を演出してきた欺瞞は、もう通用しなくなっているのである。

他方、再生可能エネルギーによる発電には、「燃料」が要らないという絶対的な利点がある。建設費は、技術開発と大量生産により将来確実に下がってくる。原子力発電は、いずれ再生可能エネルギーとの競争力を失う。

結局、原子力発電の低コストを根拠付けていた「虎の子」の建設費とランニングコストの低廉さは、その根拠を失い、いままで故意に眼を瞑っていた放射性廃棄物処理や廃炉の費用も現実化してくる。原子力発電は、いままでそれを行動原理としてきた当の「計算合理性」が、こんどは「負」の方向へ働くことによって、終焉を迫られるのである。

最終的には、原子力発電はその「燃料」が枯渇する。ウランは、ウラン235はもちろん、さらにウラン238——プルトニウム239の原料——も、所詮は「枯渇エネルギー」である。しかしそれを待っているのは、それまでの間に、ウラン鉱の採掘、ウラン235の濃縮、原子力発電所の稼働、放射性廃棄物の処理、廃炉、等の全ゆる過程で、人々の生命や健康を危険にさらし続け、心の平穏を害し続ける。「人格合理性」に根ざす市民思想と反原発運動は、それを出来るだけ早く終わらせる契機になり得る。「計算合理性」の立場に立ったとしても、いつまでも原子力発電を要めに据える経済構造に頼っているのは、国にも企業にも未来は無い。再生可能エネルギーへのシフトは、出来るだけ早いほうがよい。

7.2 「地球温暖化防止のため」という議論について

最後に、「原子力発電は地球温暖化防止のために必要である」という、よく持ち出される議論について一言しておこう。原子力発電には、思想の面でも「終焉」してもらいたいからである。

これぞまさに「毒を以て毒を制する」類いの議論である。人類が消費する化石燃料エネルギーは、発電だけのものではない。発電に使われるのは、そのほ

んの一部である。その火力発電のうち、これまたほんの一部を原子力発電に変えたとしても、地球温暖化防止に貢献するのは、全化石燃料エネルギーのうち、ほんの数%に過ぎないだろう。その分の二酸化炭素を削減する替わりに、人類の生命や健康を危険にさらし、放射能に対する大きな不安を世界へ与え続ける。現実には事故が起これば、放射能を世界中に撒き散らす。二酸化炭素の「毒」どころではない。放射能という「毒」は人々の生命や健康に対して直接に・しかも強烈に害を及ぼすのである。ほんの僅かの貢献——それくらいならば再生可能エネルギーでも可能である！——のために、桁違いの害悪を流す。己れの大きな「毒」を敢えて隠し、ほんの僅かな「薬」の効きめのみを強調するという欺瞞が、この議論には在る。

更に言えば、何かを主張するためには、そうするだけの資格が必要である。地球温暖化と原発の事故は、共通の根——理性の不完全性——に発している。理性の不完全さが生み出した地球温暖化に、原発の推進を以って対処しようという思想は、その原発を作り出す理性の不完全さに気付かない、実に愚かな思想なのである。地球温暖化を生ぜしめた理性には、己れの不完全さを棚に上げ、原発の推進を以ってそれに対処すると主張する資格など、もともと無いのである。

より本質的には、この議論が拠って立つ思想そのものに大きな誤りが在る。

近世以降の理性は、「自然支配」の思想に立ってきた。産業革命以来、自然を支配し利用し尽してきた結果が、環境破壊であり、地球の温暖化であった。人間は、自然を支配すべきものではなく、逆に人間は自然に「依存」しているのである。「環境」の分野では、そのことにだんだん気付いてきている。

しかし、原子力発電を推進しようとする人たちは、未だにそれに気付いていない。

核分裂物質の陽子・中性子の数と、核分裂によって生成される複数の物質の陽子・中性子それぞれの数の合算を比べれば、後者では中性子の数が減っている。その分だけ「エネルギー」に変化する。分かっているのはその現象だけである。核兵器も原子力発電も、それを「応用」しているだけのことである。しかし、物質という形を有ったものが、どうしてエネルギーという形を有たないものになり得るのか、そのことの「不思議」については、何も分かっていない。現象の本質が何も分からないまま、理性は核分裂の過程を完全に制御でき、それを応用できると、勝手に思い込んでいる。相い変わらず、理性は自然を完全に支配することができ、また支配すべきであると、思い込んでいるの

である。その理性が実は不完全なものだということを忘れて……。『事故は起こったが、我々ならば必ず改良できる。こんどは大丈夫だ。』といった調子である。このような現代理性の楽天性こそが、人類に進むべき道を誤らせることになる。

不完全な理性が自然を支配できるという考え方自体が、初めから誤っているのである。そのことに気付かなければ、人類に未来は無い。

(にのみやこうたろう・哲学)
(せきだいすけ・公共システム工学)

注

- 1 核物理学を含む「高度」な科学も、より基礎的な科学に基づいている。あらゆる科学が、その究極においては、「生活世界」のうちで「源初的」originärに与えられる日常的な経験に端を発し、そこから「理論化」によって形成されてくる、とするのがフッサールの考え方である。
- 2 ウラン235を原子炉内で核分裂させるためには、これに衝突させる中性子を減速する必要がある(本文次ページ図2参照・過程A)。これに対し「制御棒」は、衝突させる中性子の<数>を減らすためのものである。
- 3 ローマ神話に登場する三界の王、ウラヌス・ネプトゥーヌス・プルートーは、太陽系三惑星(当時)の名にもなったが、原子力発電に関わる三つの元素の名にもなった。
- 4 原子炉の中で核分裂させるウラン235やプルトニウム239のことを、よく原子力発電の「燃料」と言ったり、それらを原子炉のなかで「燃やす」と言ったりする。このことには、核分裂を努めて普通の燃焼とあまり変わらないものと見せかけようとする、巧妙な意図を感じる。本研究ノートでは引用符「」を付する。
- 5 日本に対しては両方が使われた。広島に投下されたのはウラン爆弾、長崎に投下されたのはプルトニウム爆弾である。
- 6 高速増殖炉が無ければの話である。なお、それが無くとも、爆発力の弱いものならば作ることができる。さらに、起爆のための爆縮技術が進歩すれば、低純度でもプルトニウム爆弾を作り得る。
- 7 プルトニウム239を原子炉内で核分裂させるためには、中性子を<高速>のまま衝突させたほうが、効率がよい。
- 8 プルトニウム239に<熱>中性子(減速された中性子)を衝突させて核分裂させる発電法。軽水炉でも可能。
- 9 二酸化プルトニウムと二酸化ウランとを混合した「燃料」。
- 10 石破茂・自民党政調会長(当時)は、2011年8月16日の「報道ステーション」や『SAPIO』誌2011年10月5日号で、「日本が核兵器を持つべきだとは思わないが、原子力発電を維持するということは、核兵器を作ろうと思えば一定期間のうちに作ることができるという意味で「核の潜在的抑止力」を保持することになる。これを放棄するべきではない。」という趣旨を述べた。

- 11 日本語訳がWEB上で見られるようになっている。引用はこれに拠る。松本大理・吉田文和 暫定訳、「ドイツのエネルギー転換——未来のための共同事業」。
<https://www.facebook.com/ESKchib/posts/516212768408466>

【補足】本稿執筆時に存在した当URLは、下掲文献(訳者の一人が共同編集)が正規に出版されたことにより、査読対応の時点では閉鎖ないし削除されている。
安全なエネルギー供給に関する倫理委員会 著/吉田文和・ミランダ・シュラーズ 編訳『ドイツ脱原発倫理委員会報告——社会共同によるエネルギーシフトの道すじ』大月書店 2013

文献

注11に記載した文献(本文中に引用)のほか、主要な参考文献および参考資料を掲げる。

【参考文献】(出版年降順)

- (1) 本島勲「原発に依存しないエネルギー政策」『経済』No. 209 pp. 50-62 新日本出版社 2013
- (2) 大島堅一『原発はやっぱり割に合わない——国民から見た本当のコスト』東洋経済新報社 2013
- (3) 若尾祐二、本田宏『反核から脱原発へ——ドイツとヨーロッパ諸国の選択』昭和堂 2012
- (4) 斎藤貴男『「東京電力」研究——排除の系譜』講談社 2012
- (5) 吉岡斉『新版・原子力の社会史——その日本的展開』朝日新聞出版 2012
- (6) 法政大学大原社会問題研究所『日本労働年鑑』第82集 旬報社 2012
- (7) 村上朋子『激化する国際原子力商戦——その市場と競争力の分析』(株)エネルギーフォーラム 2010
- (8) 有馬哲夫『原発・正力・CIA——機密文書で読む昭和裏面史』新潮新書 2008
- (9) リチャード・ドルド、スコット・リドレー『アメリカ原子力産業の展開——電力をめぐる百年の抗争と九〇年代の展望』お茶の水書房 1991

【参考資料】

- (1) 財団法人・高度情報科学技術研究機構(RIST)運営サイト「ATOMICA」(原子力百科辞典)
<http://www.rist.or.jp/atomica/>
(うち特に「海外情勢」エリア内の各国ページ)
- (2) 電気事業連合会の公式サイト
http://www.fepc.or.jp/about_us/index.htm
(うち特に「海外電力関連情報」エリア内の各国ページ)

擬似夜明け療法の覚醒効果

山上佳那^{*1}, 矢島啓大^{*1}, 湯浅友典^{*1}, 相津佳永^{*1}, 千葉武雄^{*2}, 佐々木春喜^{*3}, 三浦淳^{*3}

Effects of Simulated Dawn on the Wakefulness

Kana YAMAGAMI^{*1}, Keidai YAJIMA^{*1}, Tomonori YUASA^{*1}, Yoshihisa AIZU^{*1}, Takeo CHIBA^{*2},
Haruki SASAKI^{*3}, Jun MIURA^{*3}

(原稿受付日 平成 26 年 6 月 27 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

Recently, we have developed the novel apparatus to provide simulated dawn, and suggested that the simulated dawn by our apparatus have the awakening effect. Thus, this study aimed to investigate the effect on the psychomotor performance. Firstly, we have developed the simple calculation application working on the iPad mini (Apple Inc.). Then, we investigated the effects of the simulated dawn by our apparatus and by another on market in comparison with no light on the psychomotor performance. Each period implemented 5 nights. During the whole period, the calculation test with iPad mini and the St.Mary Hospital Sleep Questionnaire was performed immediately after getting up at 6am, and the 24-hour activity was recorded. Simulated dawn by our apparatus minimally improved the calculation test, but this improvement did not reach statistical significance. Other markers did not change. In conclusion, simulated dawn by our apparatus may have some effect on cognitive performance.

Keywords : Dawn simulation, Awakening, Cognitive performance, Calculation, Sleep

1 はじめに

ヒトが眠っている間に、夜明けのように徐々に照度が増す光を人為的に与える治療法を、擬似夜明け療法 **dawn simulation** と呼ぶ。この治療法は、季節性感情障害（「冬季うつ病」とも呼ばれる）に有効であることが多数報告され、メタ解析でもその有効性が確認された¹⁾。その他にも、認知症高齢者の乱れた安静・活動サイクルが改善したという報告や²⁾、フィンランドの一般住民における自覚的な睡眠の質が改善したという報告もある³⁾。副作用については、起床予定時刻前に覚醒してしまうこと⁴⁾以外、報告が皆無であり、極めて安全性の高い

治療法といえる。

擬似夜明け療法は、有効性、安全性が高いにも関わらず、国内外とも、ほとんど普及していない。その理由の一つとして、擬似夜明け療法を効果的に行う光照射装置が市販されていないことが想定される。そのため、われわれは、高い効果が期待される装置とその調光システムを開発し、報告した⁵⁾。図 1 に示すように、半円筒形フレームの内側に白色発光ダイオード(LED)電球を 2 列配置したため、頭の向きに関わらず、必要な照度の光が顔面に照射される。また、3 時間かけて 0 ルクスから 250 ルクスへと夜明けのように照度が上昇する調光プログラムを搭載している。

擬似夜明け療法の作用機序として、睡眠を誘発するメラトニンの分泌抑制⁶⁾や起床後のコルチゾール濃度上昇の増大⁷⁾が報告されている。このことから、朝の目覚めが改善することが期待される。

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

*2 株式会社プラウシップ

*3 室蘭工業大学 ヒト文化系領域



図 1 擬似夜明け療法器 本学で開発した擬似夜明け療法照射器の使用例。最大照度照射時、頭の向きに関わらず、擬似夜明け療法に必要な 250 ルクスが照射される。

われわれは、以前、擬似夜明け療法の覚醒作用を報告した⁸⁾。午前 1 時から午前 4 時にかけて、擬似夜明け療法を 4 晩施行したところ、4 晩目の午前 5 時台の活動量が、1~3 晩目や光照射なしの時期に比べ、有意に増加していた。自覚症状においても、「擬似夜明け療法を続けるうちに二度寝しにくくなった」と述べる被験者が多かった。さらに先行論文においても、擬似夜明け療法は季節性感情障害の覚醒困難 *difficulty awakening* に有効であると報告されている⁴⁾。

現在、国民の 5 人に 1 人が何らかの睡眠障害を抱えているとされている⁹⁾。特に青少年は乱れた生活リズムにより、概日リズム睡眠障害に陥りやすい。現在、睡眠の導入を促す薬物はあるが、起床時の覚醒状態を改善する薬物はない。本研究は、擬似夜明け療法が通常より早い時間に起床するという状況下で、朝の目覚めが改善するか、主観的睡眠状況、ならびに活動量や精神運動機能という客観的指標を用いて検証することを目的とした。

2 対象と方法

まず、精神運動機能を客観的に評価するため、湯浅が iPad mini で動作する計算課題アプリ（以下、アプリとする）を開発した（図 2）。アプリは、隣り合う 2 つのひと桁の数字を足し、答の一の位を入力する検査で、紙媒体の内田クレペリン検査（以下、紙媒体とする）を参考にした。紙媒体は、一桁の数字を連続加算させる心理検査で、意思緊張、興奮、慣れ、疲労、練習という、処理能力の程度や、性格・行動面の特徴を調査するものである。アプリ開発にあたり、被験者の覚醒状態の指標となるか、予備的検討を行った。まず、アプリと紙

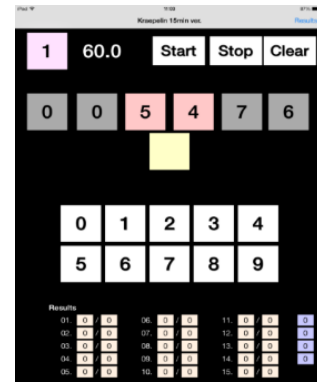


図 2 iPad mini 版計算課題アプリ。

媒体を、1 日 4 回ずつ（起床後、昼食前、昼食後、就寝前）、1 回につき 5 分間の休憩をはさんで 30 分間、各 2 日間、7 人に施行した（ $n=7$ 、以下被験者数を n と表記）。アプリ使用時の正答数の 1 日合計値について、2 日目の結果が 1 日目より有意に良かったため、アプリと紙媒体の各 2 日目の正答数に関して、ピアソンの相関係数を求めた。次に、アプリ使用時の正答数について、検査時間帯の影響があるか、反復測定分散分析（ANOVA）にて検証した（ $n=19$ ）。反復測定 ANOVA は、同じ被験者で 3 回以上試験を繰り返した際の結果（この場合、正答数）について、被験者内因子（同、検査時間帯）の影響を検証する検定である。さらに、アプリで時間短縮が可能であるかを検証するため、30 分間と最初の 5 分間の計算結果について、ピアソンの相関係数を求めた。

次に擬似夜明け療法の覚醒状態への影響を調査した。対象は、心身ともに健康で、午後 9 時以降のアルバイトに従事していない、室蘭工業大学機械航空創造系学科の男子学生 8 名とした。本研究の目的、方法、予想される結果、想定される副作用について説明し、全員より文書による同意を得た。

研究は 2012 年 8 月 12 日から 10 月 14 日にかけて行った。計 3 期とし、各期は 5 晩（6 日間）とした。第 1 期はコントロール期とし、光照射は行わなかった。第 2 期と第 3 期は擬似夜明け療法期で、第 2 期は本学で開発した擬似夜明け療法器（以下、学内器とする）⁵⁾、第 3 期は市販の擬似夜明け療法器である SunRise Clock Portable (BioBrite, Bethesda, MD. 以下、市販器とする) を使用した。学内器は 3 時間かけて 0 lux から 250 lux へと照度が上昇する調光プログラムを搭載している。一方、市販器は、15 分かけて 0 lux から 250 lux（目から 17cm に設置）

へと照度が上昇する仕様になっている。睡眠中はカーテンを閉め、室内灯は消灯または豆電球とし、研究期間中は同一の条件とした。午前6時にアラーム時計で起床することとし、午前6時以前に目覚めた場合も、アラームが鳴るまでは目を閉じたままとした。

入浴中以外の終日、wActiSleep+ Monitor (ActiGraph, Pensacola, FL)を装着し、活動量を記録した。wActiSleep+ Monitorには3軸加速度センサーが内蔵されており、axis-1, -2, -3方向のカウント数が1分毎に自動記録される。得られた結果を1時間毎に3軸の合計を求め、活動量の指標とした。

研究第1期は、午前6時に起床後、速やかに計算課題アプリを5分間行った後、セントマリー病院睡眠調査票をチェックした。セントマリー病院睡眠調査票は過去24時間の睡眠状況を自覚的に評価するもので、睡眠時間、中途覚醒回数、睡眠満足度、起床時眠気などが含まれる。なお、アプリは研究開始前に、5分間ずつ最低10回練習を行うこととした。評価終了後、カーテンを開け、室内照明を点灯した。以後の行動は自由とし、眠い場合は二度寝や昼寝も可とした。就寝時間は特に定めず、研究期間中は、アルコール摂取を禁止した。

研究第2期は、2日目(D2、以下～日目をD～と表記)からD6まで、午前3時～6時にかけて3時間、学内器を用いて光照射を行った。研究第3期は、D2からD6まで、午前5時45分～6時にかけての15分間、市販器を用いて光照射を行った。いずれも午前6時に起床した後は、第一期と同様、計算課題と睡眠状況の調査を行った。

正答数への影響は、反復測定ANOVAで解析した。睡眠状況に対する日数の影響は、Friedman検定で調査した。同検定は、順位尺度など正規分布が仮定できない場合、反復測定で得られた数値に対する影響を調査する検定である。なお、統計学的有意確率(p)を0.05とし、 $p < 0.05$ の場合を統計学的に有意とした。統計解析には、SPSS 22 Statistics Base, Advanced Statistics (日本IBM, 東京)を用いた。

3 結果

まず、アプリと紙媒体による計算課題について、正答数の1日合計値の平均を図3に示す($n=7$)。その結果、アプリ、紙媒体ともに2日目の結果は1日より良かったが、アプリにおいて有意差が認め

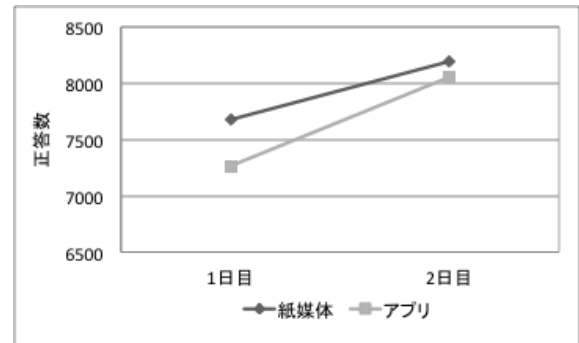


図3 1日目と2日目の比較 平均値を示す。アプリにおいて、1日目と2日目の計算課題結果に有意差が認められた($p=0.02$)。

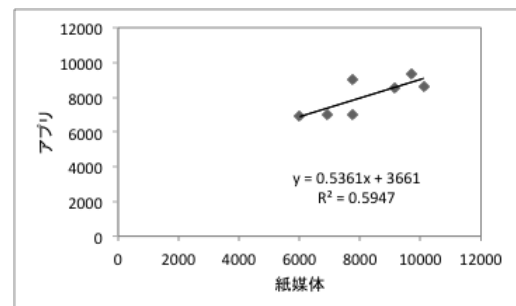


図4 紙媒体2日目とアプリ2日目との相関 正答数の1日合計値の散布図を示した。ピアソンの相関係数 r は0.77で、強い相関がみられた($p=0.04$)。

られた($p=0.02$)。

次に、紙媒体2日目とアプリ2日目とにおける、正答数の1日合計値の相関を検討したところ($n=7$)、ピアソンの相関係数 r は0.77で、強い相関がみられた($p=0.04$) (図4)。したがって、計算能力を調べるためには、アプリは紙媒体と同等の精度があると考えられた。

アプリの結果の日内変動を調査するため、さらに12人の学生にアプリを1日4回、2日間施行した。前述の結果と合わせて解析したところ($n=19$)、1日目に比べ2日目では有意な改善が認められた($p < 0.001$)。そこで、アプリ2日目の結果における日内変動を検討した。起床後・昼食前・昼食後・就寝前の正答数について、Mauchlyの球面性検定の結果、有意であった($p=0.02$)。したがってGreenhouse-Geisserの ϵ 修正による検定の結果、アプリの正答数は時間帯による有意差が認められた($p < 0.001$)。多重比較の結果、起床後は、昼食前、昼食後、就寝前に比べ、有意に低かった(いずれも、 $p < 0.01$) (図5)。

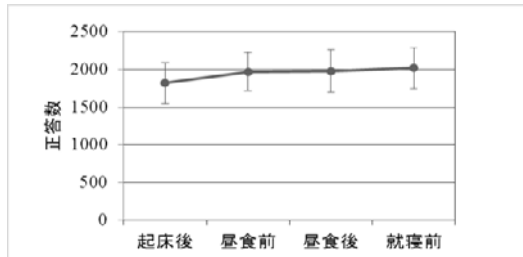


図 5 計算課題正答数の日内変動 平均値±標準偏差を示す。正答数は時間帯により、有意な差が認められた ($p<0.001$)。多重比較の結果、起床後はその他の時間帯に比べ、有意に低かった ($p<0.01$)。

次に、アプリの正答数について、30 分間の結果と最初の 5 分間の結果の相関を調査したところ ($n=19$)、ピアソンの相関係数 r は 0.95 で、強い相関がみられた ($p<0.001$)。このことから、アプリで計算能力を判定する際、最初の 5 分間で評価できると考えられた。したがって、次の研究では、計算課題はアプリ 5 分間とした。

擬似夜明け療法の覚醒効果に関する研究は、被験者 8 人全員が試験を完遂した。各介入（光照射なし、学内器使用、市販器使用）における D2 から D6 までの計算課題正答数の平均値を図 6 に示す。学内器使用時の正答数の平均値は、D3 以降、光なしや市販器使用時よりも高かった。しかしながら、反復測定 ANOVA の結果、被験者内因子（介入）についても、被験者内因子（日付）についても、有意な影響は認められなかった(それぞれ、 $p=0.462$, $p=0.321$)。

次に、各介入の活動量に対する擬似夜明け療法の影響を調査した。6 時台、7 時台、24 時間の活動量を示す (図 7, 8, 9)。反復測定 ANOVA の結果、

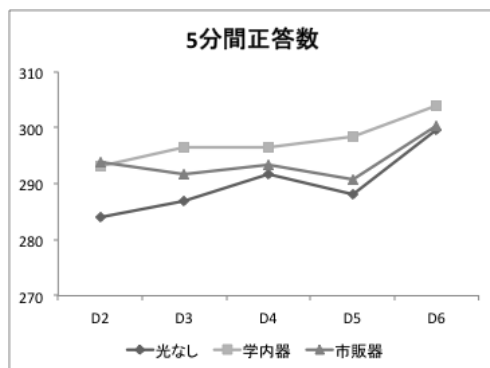


図 6 各介入における正答数 平均値を示す。被験者内因子（介入、日付）は有意な影響を与えていなかった。しかし、微少ではあるが、D3 以降、学内器の正答数が最も高かった。

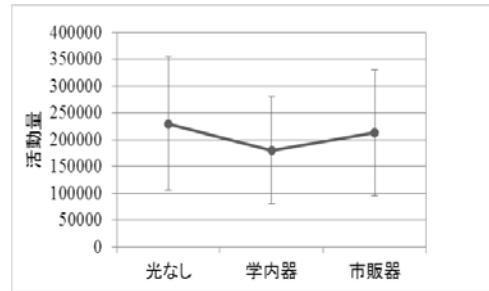


図 7 6 時台の介入別活動量 平均値±標準偏差を示す。介入法による有意差はみられなかった。

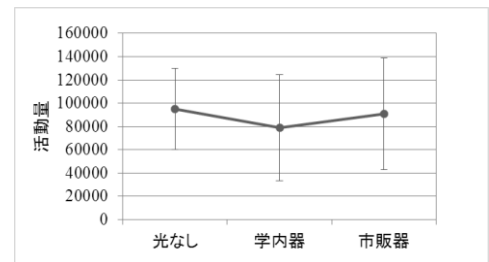


図 8 7 時台の介入別活動量 平均値±標準偏差を示す。介入法による有意差はみられなかった。

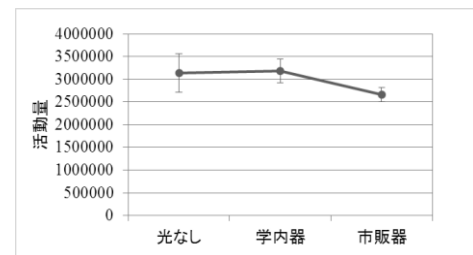


図 9 24 時間の介入別活動量 平均値±標準偏差を示す。介入法による有意差はみられなかった。

いずれも介入法の有意な影響は認められなかった(それぞれ、 $p=0.206$, $p=0.789$, $p=0.392$)。

最後にセントマリー病院睡眠調査票の結果を示す (図 10, 11)。全部で 14 問あるうち、擬似夜明け療法の効果が期待できそうな Q9 と Q10 について解析した。Q9 は「昨夜はどれくらいよく眠れましたか?」という質問で、睡眠満足度を表している。次に Q10 は、「今朝起床した後、どのくらい頭がすっきりしていましたか?」という質問で、起床後爽快感を表している。Q9 と Q10 はいずれも選択肢が 6 つあり、それぞれに数値が割り当てられ (1~6)、数値が高いほど睡眠の質が高い。対応サンプルによる Friedman の順位付けによる変数の双方向分析を行ったところ、全期間を通しての Q9, Q10 の点数に、有意な変化は認められなかった(それぞれ、 $p=0.495$, $p=0.659$)。

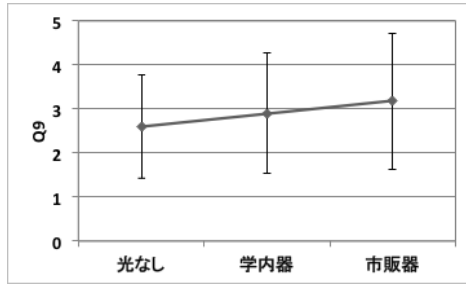


図 10 St.Mary 病院睡眠調査票 Q9 回答 平均値±標準偏差を示す。介入法による有意差はみられなかった。

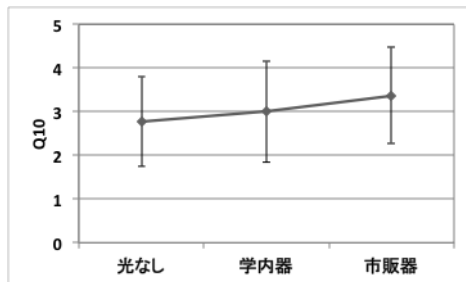


図 11 St.Mary 病院睡眠調査票 Q10 回答 平均値±標準偏差を示す。介入法による有意差はみられなかった。

4 考察

本研究は、本学で開発した擬似夜明け療法器による覚醒効果を、主観的ならびに客観的指標を用いて検証することを目的とした。第一に、覚醒状態を客観的かつ定量的に評価するため、iPad mini 上で動作する計算課題アプリ（以下、アプリ）を開発し、その有用性、妥当性を検証した。第二に、通常よりも早く起床しなければならない状況において、本学で開発した機器による擬似夜明け療法の覚醒効果に関し、主観的ならびに客観的評価を行った。

アプリによる計算結果は、2 日目は 1 日目に比べて、有意に高かった。すなわち、アプリには学習効果があると考え、擬似夜明け療法研究では事前に 5 分間ずつ、最低 10 回練習することとした。次に、アプリ作成の参考にした内田クレペリン検査と本アプリの結果には、強い正の相関が見られた。したがって、アプリは、計算能力を評価する目的においては、内田クレペリンと同様の有用性がある可能性が考えられた。起床後の計算結果は、昼食前、昼食後、就寝前に比べ、有意に劣っていた。このことから、本アプリは、覚醒状態の指標になると考えた。さらに、アプリ 30 分間の結果と最初

の 5 分間の結果には強い正の相関が見られた。したがって、計算能力の評価は、アプリ 5 分間で十分と考え、検査時間の短縮を図った。時間を短縮したことは、さまざまな臨床試験において、被験者の時間的ならびに精神的負担を軽減するという点で、非常に有意義と言える。

次に、午前 6 時に起床するという状況を設定した擬似夜明け療法研究において、学内器使用中は、光なしや市販器使用中に比べ、アプリの結果が改善していた。しかし、改善率は 2.5% 程度であり、統計学的には有意ではなかった。その理由として、擬似夜明け療法の最終照度が 250 ルクスであり、覚醒作用は期待ほど大きなものではない可能性がある。われわれは、別な研究で、高照度光療法後のアプリの結果が、光照射なしに比べ、約 7% 改善し、統計学的に有意であったことを見いだした（未発表データ）。高照度光療法は 1 万ルクスの光を 30 分照射するというものであり、照度が高いほど覚醒作用が強いと考えられる。なお、学内器の後に市販器を使用した。市販器使用時のアプリの結果は光なしと同等であった。このことから、学内器使用時のアプリ結果の改善は、単なる学習効果とは考えられない。

活動量に関しても、擬似夜明け療法の影響は認められなかった。一方、われわれは以前の研究で、擬似夜明け療法 4 日目の朝の活動量が増加することを報告した⁸⁾。この相違に対しては、いくつかの理由が考えられる。1 つ目の理由は、本研究は自宅で施行したが、以前の研究は大学の実験室を使用した。また、今回は午前 6 時に起床としたが、以前の研究では午前 4 時に起床とした。このように、研究環境やプロトコルの違いのため、結果が一致しなかった可能性が考えられる。特に、自宅での研究では、気温、環境音、室内照度、生活習慣など、生活環境が異なり、個人間でのばらつきが大きい可能性がある。また、本研究は、講義のない夏休み中に施行したため、午前 6 時に一旦は覚醒したものの、再入眠したケースがあったことが、活動量から明らかであった。すなわち、覚醒状態を維持、増強するような刺激が足りなかった可能性が高い。以上より、擬似夜明け療法の覚醒効果を確実にするには、光照射終了後も起き続けなければならない、何らかの刺激や動機付けが必要であろう。

睡眠状態については、セントマリー病院睡眠調査票の Q9（睡眠満足度）、Q10（起床後爽快感）に対する影響を調査したが、いずれも有意な影響は

認められなかった。Leppämäki らは、擬似夜明け療法 6 日目以降に自覚的な睡眠の質が改善したと報告しており³⁾, 本研究の介入期間が短かった可能性はある。

以上より、本学で開発した擬似夜明け療法器は、朝の覚醒度を高くする可能性があるものの、その程度は小さく、統計学的有意差が得られなかった。この結果が、擬似夜明け療法自体の効果が弱いことによるのか、実験環境を含めたプロトコルに因るのか、現時点では判断できない。しかし、擬似夜明け療法を行った期間中の計算結果が、光なし期間の結果と比べ、各日ともに僅かながらも上回っていたことから、擬似夜明け療法の覚醒効果は多少なりともあると考えている。そのため、研究環境を統一し、研究遂行状況を管理した上で、再検証する必要がある。

謝辞

本研究は、平成 25 年度室蘭工業大学重点研究経費を受けて遂行した。また、本研究の被験者となった学生諸君に深謝する。

文献

(1) Golden RN, Gaynes BN, Ekstrom RD, Hamer RM, Jacobsen FM, Suppes T, Wisner KL, Nemeroff CB. The

efficacy of light therapy in the treatment of mood disorders: a review and meta-analysis of the evidence. *Am J Psychiatry*, 162 (2005), p656-62.

(2) Fontana Gasio P, Kräuchi K, Cajochen C, Someren Ev, Amrhein I, Pache M, Savaskan E, Wirz-Justice. A Dawn-dusk simulation light therapy of disturbed circadian rest-activity cycles in demented elderly. *Exp Gerontol*. 38 (2003), p207-16.

(3) Leppämäki S, Meesters Y, Haukka J, Lönnqvist J, Partonen T. Effect of simulated dawn on quality of sleep-a community-based trial. *BMC Psychiatry*. 3 (2003), p14.

(4) Avery DH, Kouri ME, Monaghan K, Bolte MA, Hellekson C, Eder D. Is dawn simulation effective in ameliorating the difficulty awakening in seasonal affective disorder associated with hypersomnia? *J Affect Disord*. 69 (2002), p231-6.

(5) 湯浅友典, 三浦淳, 千葉武雄, 佐々木春喜, 相津佳永: 擬似夜明け療法のための効果的照明方法の検討と装置開発. 室蘭工業大学紀要, 63(2013), p 111-115 .

(6) Terman M, Schlager D, Fairhurst S, Perlman B. Dawn and dusk simulation as a therapeutic intervention. *Biol Psychiatry*. 25 (1989), p966-70.

(7) Thorn L, Hucklebridge F, Esgate A, Evans P, Clow A. The effect of dawn simulation on the cortisol response to awakening in healthy participants. *Psychoneuroendocrinology*. 29 (2004), p925-30.

(8) 三浦淳, 湯浅友典, 千葉武雄, 相津佳永, 佐々木春喜. 擬似夜明け療法による生体リズム位相調節の試み. 室蘭工業大学紀要 63, 117-121.

(9) 山寺博史: 睡眠障害のトピックス: 睡眠・覚醒リズム障害について. 日医大誌 68: 344-348, 2001.

教 育 改 善 報 告

児童発達支援施設の見学に表れた学生評定の易変性について

今野 博信^{*1}, 前田 潤^{*2}

Mutability of student's evaluation shown at the visit of Child Development support facility

Hironobu KONNO^{*1}, Jun MAEDA^{*2}

(原稿受付日 平成 26 年 6 月 27 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

The students studying the teacher training course had visited the child development support facility. They had replied the semantic differential method tests about their images of disability three times. The first test was checked before the visiting, the second was immediately after the visiting, and the third was two months after of the visiting. These tests were run for the purpose of class assessment. The second test increased the favorability rating of disability. And some students decreased extremely the favorability rating of disability at the third test. The mutability of student's evaluation has been considered. The students who have the concern for another student's thinking or feel sympathy for person didn't decrease their evaluation at the third test. It is necessary that the class should improve the interest in classmate's thinking.

Keywords : Developmental disorder, Teacher training, Mutability of student's evaluation

1 はじめに

教職科目の一つである「学習・発達論」は、教職員免許状の取得に必要な選択科目であり、発達障害の理解を通して人の学習や発達の多様な実態について理解を深めることを目指している。加えて、単なる知識の習得に留まらずに、教職の場においては発達障害の当事者を含めた目の前の生徒達に対して、具体的な対応策を考えられるような、実践的な力を身につけることも期待されている⁽¹⁾。近年、こうした発達障害への対応が注目されているのは、2005 年の発達障害者支援法施行⁽²⁾、2007 年の特殊教育から特別支援教育への転換⁽³⁾が行われたことの変化が、しだいに定着してきたからと考えられる。この間の文部科学省による発達障害に関わる特別支援教育の事業は、2007 年に「高等

学校における発達障害支援モデル事業」⁽⁴⁾が始められ、2009 年に「発達障害等に対応した教材等の在り方に関する調査研究事業」⁽⁵⁾、2013 年に「発達障害に関する教職員の専門性向上事業」⁽⁶⁾などが実施されてきている。

このような教育に関する場面に限らず、一般社会における発達障害に対する関心も高まってきている。特別な関心のもたれ方としては、少年犯罪や通り魔的犯罪と関係づけられて扇情的に取り上げられる場合があり、こうした偏った知識によって予断をもった形で受講する学生も多い。教育に携わる者として、生徒との関係づくりには裏付けのある知識と体験によって形成された発達障害理解が必要とされる。

今回、室蘭市の児童福祉施設である「子ども発達支援センター(あいくる)」⁽⁷⁾からの協力が得られたことと、学内の「教育方法等改善経費」の事業に採択されたことで、学生による施設見学と施設職員(臨床心理士など)による出張講義など一連の

*1 学泉舎 室蘭工業大学非常勤講師

*2 室蘭工業大学 ひと文化系領域

活動を実施できた。これらの取り組みによって、学生の「障害(発達障害を含む)に対するイメージ」がどのように変化したのかについて、報告することが本稿の目的である。

これらの結果を、今後の授業計画等に活用することは、授業担当者に与えられた課題であると考えられている。さらに、このような総括と公表により、協力施設からより深い理解を得られるようになること、また学生自身にとっても自らの学びを見直す機会となることを期待している。

2 概 要

2.1 施設見学と出張講義

室蘭市子ども発達支援センターでは複数の事業が進められていて、その事業ごとに対象とする子ども達が違っている。今回は、発達に遅れのある就学前の児童を対象とした「児童発達支援」事業を見学したが、就学後から18歳までを対象にした事業についても説明を受けた。パンフレットには「あいくる」という愛称に込められた「愛くるしい子どもたちが集い、たくさんの愛が集まりますように」という思いについて解説されているが、その実際の様子を体験できる見学となった。

児童の発達支援の実際の取り組み状況を見学する意義について、学生向けには次のように説明した。①発達障害については、その特性に配慮した指導や支援が、高等学校生活の場で必要とされていること⁽⁸⁾。②発達障害への配慮や工夫を行うことで教員の授業力・指導力の向上につながる。③授業が全体として分かりやすいものとなり、発達障害のある生徒のみならず、学級・学校全体の学習意欲の増進や学力の向上が期待できること。④発達障害の特性が、人の発達期である幼児期や児童期に顕著に現れること

見学は10月の二日間に、午前午後の2回実施も含めて合計3回実施された。学生からの参加可能日時についての回答を集約し、バスの借上げを手配し大学正門前から、あいくるまでを往復した。各回9名程度が参加した。午前の参観では、教室ごとに行われている朝の会と集団での遊び、個別での遊び場面に立ち会い、その後に施設職員による説明と質疑応答が行われた。午後の参観でも同様に、集団と個別の遊び、帰りの会の様子を見学し、解説と質疑の時間をもった。

見学の約一ヶ月後には、施設職員3名(臨床心理

士など)による出張講義を実施した。絵カードを用いた意思疎通の療育内容や、施設の設立目的や実情などの解説を受けた。

2.2 調査内容

見学の前後と約2ヵ月後の12月の3回、SD法による質問紙調査⁽⁹⁾を行った。対象者は、「学習・発達論」を受講の工学部3年生で、全てに回答を提出した34名(内女子4名)であった。学科別は、建築社会基盤2名・機械航空創造4名・応用理化学19名・情報電子工学9名であった。このうち見学の不参加学生8名(内女子1名)は集計に際して、統制群として扱われた。

質問紙では、障害(発達障害を含む)に対するイメージについて20の形容詞対ごとに、7の評定段階のどこに当てはまるかの評定を求めた。形容詞対については、松村・横川(2002)⁽¹⁰⁾を参考にした。

評定段階は、ネガティブな表現からポジティブな表現まで1点から7点を配点し、中点となる4点は「どちらでもない」と表現されていた。例えば、「明るいー暗い」の項目では、回答者が「とても明るい」を選べば7点とされ、「かなり明るい」を選べば6点、「やや明るい」を選べば5点とされた。

同形式の調査を、見学前の10月上旬(事前:pre)と見学後の10月下旬(事後:post)、約2ヶ月後の12月中旬(追跡: follow-up: f/u と略)の3回実施した。見学に参加しなかった学生にも、回答を求めた。また、質問用紙上では、ポジティブ/ネガティブの表現が左右一方に偏らないようにし、調査ごとに質問の順番を入れ替えることで回答における慣れを回避するように配慮した。

回答に際しては、個人の成績とは関係がないこと、結果は見学の効果を測定評価するために用いられること、また評定結果に関して公表時に個人が特定されることはないことを説明した。

2.3 調査の結果と考察

見学は3回に分けて実施されたので、まず、その日時によって回答内容に偏りがあるかどうかについて調べた。postの回答から質問項目ごとに算出した評価値の平均を用い、3回の見学日時を被験者間要因、20項目を被験者内要因とした3×20の分散分析を行ったところ、有意差は認められなかった。

男女の全体的な差についても、性別を被験者間要因、質問項目を被験者内要因とした2×20の分散分析を行ったところ、性別に関する有意差は認められ

なかった。項目によっては性別の差が生じる可能性は有るので、その都度言及していくことにする。

また、学科の違いによる差についても post の回答を用いて分散分析(学科を被験者間要因、項目を被験者内要因とした 3×20 の要因計画)を行ったが、学科に関わる有意な差は認められなかった。

なお、分散分析と、その後の群間比較検定には、ANOVA4 on the Web⁽¹¹⁾としてインターネット上に公開されているサイトを利用した。

見学日時・性別・学科による有意差は無いと考えられたので、見学参加群として一括して検討対象とした。pre と post と f/u の全時期を通した傾向を把握するために、見学の参加不参加 2 水準(被験者間)、調査時期 3 水準(被験者内)、20 項目(被験者内)の $2 \times 3 \times 20$ の分散分析を行った。3 要因の交互作用が 1%水準で有意となった($F(38,1216)=1.64, p<.01$)。

項目評定の平均値の変化を図 1 に示した。見学後の post 期に、見学参加と不参加の間に有意な差が見られた。ところが、2 ヶ月後の f/u 期になると、見学参加の評定値は下降し、不参加との間に差は見られなくなった。見学参加の有意差は、pre<post と post>f/u と pre<f/u の 3 期間に見られ、不参加の有意差は、pre<post、pre<f/u の 2 期間のみで、post と f/u の間には有意差が見られなかった。このことから、post と f/u との間の変化の仕方に、見学の参加不参加の差が特徴的に表れていると考えられた。

また、分散分析の単純交互作用で、5 項目(明るい・かわいらしい・迷惑でない $p<.05$ / 共感できる・気の毒でない $p<.01$)において、参加不参加と時期の交互作用が有意であった。

こうした項目ごとに見られる反応の違いを検討するために、20 項目の評定傾向を相互に比較すること

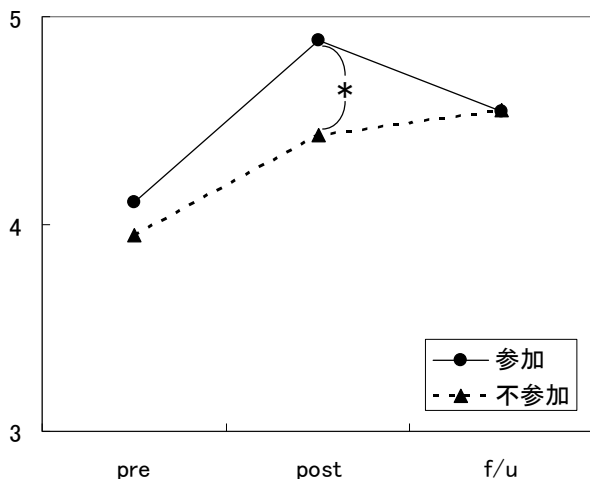


図1 障害イメージ評定の全体的変化 * $p<.05$

にした。3 調査時期のデータを用いて主因子法バリマックス回転による因子分析⁽¹²⁾を行ったところ、5 因子が抽出された。表 1 に、その結果を示した。

表 1 項目ごとの因子分析結果

	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5
明るい	0.77	-0.04	-0.22	-0.25	0.26
陽気な	0.75	-0.14	-0.21	-0.02	0.18
かわいらしい	0.67	-0.36	-0.25	-0.16	-0.04
怖くない	0.56	-0.39	-0.01	-0.28	-0.15
きれいな	0.52	-0.26	-0.26	-0.24	-0.15
安全な	0.35	-0.60	-0.15	-0.13	-0.24
正常な	0.41	-0.57	-0.22	-0.13	-0.15
共感できる	0.00	-0.54	-0.20	-0.34	0.08
役に立つ	0.14	-0.54	-0.14	-0.09	-0.03
身近な	0.21	-0.50	-0.31	-0.36	-0.13
気の毒でない	0.11	-0.26	-0.67	0.02	0.14
幸せな	0.23	-0.19	-0.61	-0.10	0.07
優秀な	0.22	-0.38	-0.51	-0.24	-0.18
手際よい	0.23	-0.01	-0.48	-0.24	-0.26
共生すべき	0.13	-0.26	-0.02	-0.73	0.06
迷惑でない	0.35	-0.22	-0.31	-0.68	-0.01
近づきたい	0.31	-0.41	-0.27	-0.45	-0.34
関わりたい	0.32	-0.26	-0.44	-0.45	-0.28
おだやかな	-0.05	-0.03	0.12	-0.19	-0.73
個性あふれる	0.08	0.11	0.08	-0.15	0.41
負荷量の二乗和	3.06	2.49	2.14	2.11	1.28
寄与率	15.32	12.46	10.70	10.53	6.40
累積寄与率	15.32	27.78	38.48	49.01	55.42

それぞれの因子については、つぎのように命名して、続けての分析を進めた。第一因子は、明るい・陽気な・かわいらしい・怖くない・きれいな、の 5 項目で「外見的な印象」と命名。第二因子は、安全な・正常な・共感できる・役に立つ・身近な、の 5 項目で、「自分自身との距離感」と命名。第三因子は、気の毒でない・幸せな・優秀な・手際よい、の 4 項目で、「評価的な判断」と命名。第四因子は、共生すべき・迷惑でない・近づきたい・関わりたい、の 4 項目で、「相手との関わり方」と命名。第五因子は、おだやかな・個性あふれる、の 2 項目で、「汎用的な修辞」との命名がなされた。

因子 1 の「明るい・かわいらしい」は、分散分析では見学参加と不参加の間で、評価点に有意な差が見られた 5 項目に含まれていた。「明るい」は、見学参加で、4.2→5.7→4.5 と有意に変化したが、不参加での有意な変化はなかった。「かわいらしい」は、見学参加で、4.4→5.8→5.0 と有意に変化し、不参加では有意な変化はなかった。

「陽気な・怖くない・きれいな」の項目でも、見学参加の評価点は pre<post となるが、f/u 期では評価点が下降を示した。不参加では、こうした f/u 期での評

定の下降は見られなかった。因子 1 に含まれる項目については、外見的印象に影響されてイメージが形成されたと推測され得る。

因子 2 の「共感できる」では、不参加による評価が 3.9→3.9→5.3 と f/u 期で有意に上昇した。因子 3 の「気の毒でない」では、不参加による評価が、4.4→4.1→5.1 と f/u 期で有意に上昇した。見学参加におけるこの二つの項目での有意な変化はなかった。

因子 4 の「迷惑でない」では、見学参加による評価が、4.6→5.7→5.1 と有意に変化した。不参加での変化は、4.3→4.9→5.5 となり、pre<f/u で有意に変化した。因子 5 では、見学の参加不参加、調査時期のどの比較でも変化は見られなかった。

見学不参加者における、post<f/u の傾向には、他の学生が見学した際の映像の後日視聴や、施設職員による出張講義を受けた体験などが、効果的に影響したと推測することができる。一方、見学参加者に見られる post>f/u の傾向については、さらに詳しく検討すべき課題となった。とくに、因子 1 で特徴的に見られた、表面的な印象による評価の変化のしやすさ(易変性)についての詳しい分析が必要とされた。それは、内面的な変化を促し、単なる印象にとどまらない深い障害理解への道筋を探ることでもあった。

3 易変性についての分析

3.1 易変性による 3 群の抽出

質問項目ごとの評価結果の差から項目は 5 因子に分類されたが、このうちの第一因子は、「外見的印象」と命名され、明るい・陽気な・かわいらしい・怖くない・きれいな、の 5 項目が含まれていた。これらの因子に関わっては、調査時期による評価結果の変動が大きいことが示されていたので、その変動について詳しく調べ、特徴的な群を抽出することにした。図 2 は因子 1 の 5 項目について平均値を学生別に算出し、post の値から pre の値を減じた数を X 軸に、f/u の値から post の値を減じた数を Y 軸にして個々の評価変化をプロットしたものである。

右下に囲まれているのは、pre から post にかけてポジティブな評価が増加し、post から f/u ではその評価が減少した群である。これを、**易変性大群**と名付けて検討することにした。因子 2 から因子 4 までについても、同様に評価値の差を用いて作図したのが図 3 である。該当の 13 項目を単純平均した値を用いた。因子 5 については、評価結果が時期による変動を示さず、見学の参加不参加による差にも関連しなかつ

たことから、ここでの検討には加えていない。

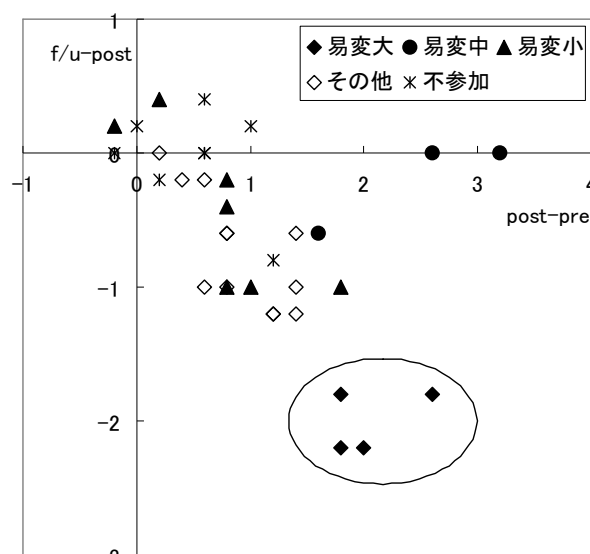


図 2 因子 1 の 2 期間の分布

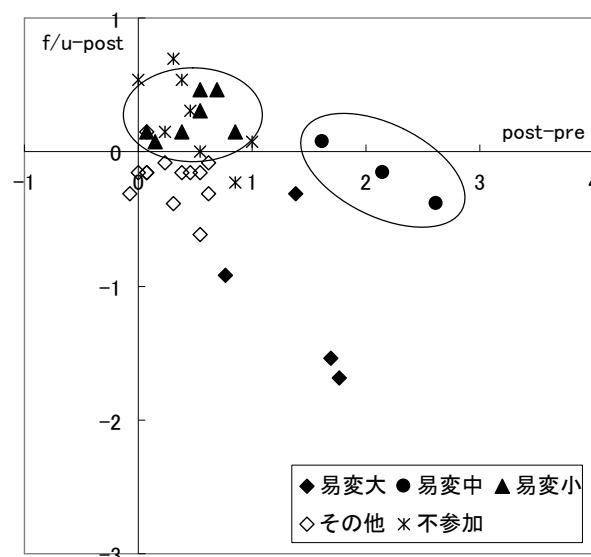


図 3 その他の因子の 2 期間の分布

図 3 の左上には、pre から post にかけても、post から f/u にかけても、評価に大きな変化が見られなかった群が示されている。見学不参加者にはこうした傾向が見られるが、見学参加者の中でとくに post から f/u にかけてポジティブな評価が増加した群を、検討対象にした。この群を、**易変性小群**と名付けた。

図 3 の右上、X 軸にそって斜めに連なる一群が見られる。これは、pre から post にかけてポジティブな評価が増加し、その後の f/u にかけてもその評価が減少しなかった群である。これを**易変性中群**と名付けた。評価の変化のしやすさの差に注目

して3群を抽出し、その評定と因子間の関係について検討した。

なお、この3群ごとの所属学科は、易変性大群では応用理化学3名と情報電子工学1名、易変性中群では応用理化学3名、易変性小群では機械航空創造1名と応用理化学2名と情報電子工学4名であった。対象学生34名の所属学科構成と各群の構成では、有意な差は認められなかった。

3.2 易変性と因子との関連

易変性大群(4名男子のみ)では、因子1とその他の因子との間に差は見られず、postからf/uにかけてポジティブな評定がどの項目でも減少した。図2で右下にプロットされていた群は、図3でも右下に位置している。

postにはポジティブな評定を増加させ、2ヵ月後のf/uでも、大きな減少を見せなかった易変性中群(3名中女子1名)においても、因子1とその他の因子との間に大きな差は見られなかった。図2と図3の両方において、X軸方向では右寄り、Y軸方向では原点の0近くかマイナス(post>f/u)に位置しており、f/uでの変化が無いことを示している。

易変性小群(7名中女子1名)では、因子間による差が見られた。図2では、易変性小の群は特別な集まり方はしていない。これは、因子1に対する特別な反応が見られないことを示している。ところが、図3では、易変性小の群は原点0近くのX軸とY軸のプラスの位置に集まっている。因子2・3・4に対しては、ポジティブな評定をしがちであることを示している。

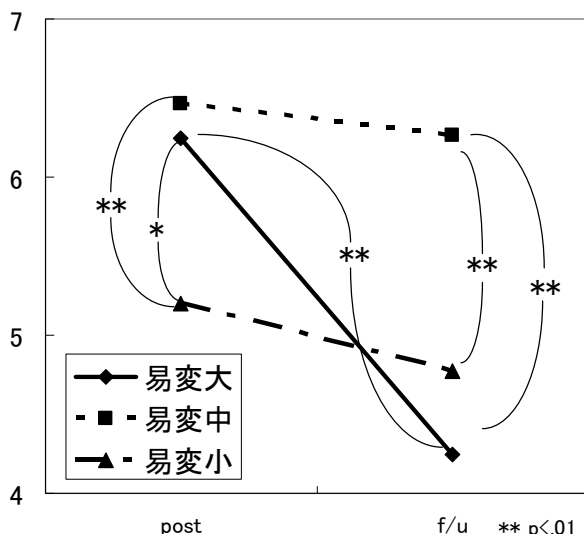


図4 因子1の易変性比較

このような、易変性と因子との関係が、見かけ上のものでなく、統計的に有意な差として認め

られるのかどうかを調べた。因子1と、その他の因子に分けて、易変性の差3群(被験者間)、調査時期3水準(被験者内)、5項目(被験者内)の3×3×5の分散分析を行ったところ、因子1では易変性と調査時期の2要因の交互作用が1%水準で有意となった($F(4,22)=13.47, p<.01$)。

易変性大群は、postからf/uにかけてポジティブな評定が有意に減少し、易変性中群では減少がなかった。易変性大群は、postでは易変性中群との間に差はなかったが、f/uでは易変性中群との間に差が生じて逆に易変性小群との間に差が見られなくなった(図4参照)。preの3群間に差は無く、postにかけて3群ともポジティブ評定が増加した。

その他の因子(因子2・3・4)について見られた変化を図5に示した。因子1の場合と同様に、易変性3群と調査時期2水準と13項目の分散分析をおこなうと、易変性と調査時期の交互作用が1%水準で有意となった($F(4,22)=18.04, p<.01$)。その他の因子の場合でも、易変性大群においては、postからf/uにかけてポジティブな評定は、有意に減少したが、易変性中群においては、そのような有意な減少は見られなかった。preの3群間に差は無く、postにかけて3群ともポジティブ評定が増加した。どの因子においても、pre段階では群間の差は認められなかった。

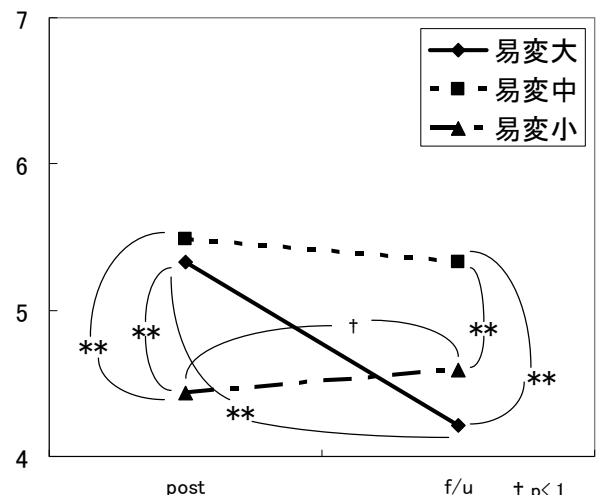


図5 その他の因子の易変性比較

一方で、易変性小群においては、postからf/uにかけての変化で、ポジティブ評定が増加する傾向が見られた($t(22)=1.729, p<.1$)。このことは、易変性小群において、表面的な印象に影響されない自分自身に内在する基準での評定がなされた可能性を示唆している。その基準にそって評定がなされる際には、時間的に間を隔てた場合でも、印象

の希薄化があまり影響せずに、むしろ内的な基準が強化されることも考え得る。そこで、この易変性小群に属する学生の反応を解明するために、見学や出張授業の受け止め方の差を個別に取り上げて、易変性との関係をさらに検討した。

3.3 易変性群ごとの感想の比較

授業では毎回の感想提出の他に、見学と出張講義の後にはミニレポートを2回、中間期の12月末と学期末には1000字程度のレポート提出を2回求めた。これらの中から、ミニレポートと中間・期末レポートの4回分を取り上げ、感想部分に注目して各群の特徴を探ってみた。レポート課題に対する回答部分では、記述は指示された内容に限定されるが、感想の記入は個人の意思に任されている。義務ではなく、書くかどうかも含めて内容に制限はないので、当人の思いが闊達に記されていると見なせる。

中間と期末のレポートに関して特徴的だったのは、易変性大群で感想を書き添える学生がほとんどいなかったことである。見学後と出張授業後のミニレポート提出では、感想を含めての記述が課題であったが、中間と期末レポートでは感想を書くかどうかは任意であった。感想記入の有無が成績評価に関連することはないと説明済みであったが、回答用紙の裏面にまで感想を書き込む例も見られたのに対して、**易変性大群**での感想記入は1例のみであった。

その感想は、中間レポートに書かれたもので、「自分の幼い頃から、障害をもった人とたくさんふれあうことがあったが、この授業を通して、深く知ることができ、少しでも手をかけてあげられればと思う授業だった」と記され、自身の過去の体験との関連づけが見られた。また授業を契機にした今後の他者との関わりを構想する内容になっていた。こうした、過去と未来に言及した記述は、他の感想にもよく見られる内容であった。

表2 感想記入の可能性と実際の記入

易変性	人数	記入の最大	実際の記入
大	4	8	1
中	3	6	4
小	7	14	7

易変性中群では、3名×2回の6回分に対して4例の記入があった。とくに期末レポートには3名全員が感想を記入していた。その中で、中間と期

末の両方で感想記入が見られた例では、中間期に「はじめは障害のことなんて……と思い興味もなかったけれど、どんどん知っていくうちに、興味がわき、支えたいという気が生まれました」とあり、当初あった関心の低さとその後の変化を書き留めている。さらに期末には、「今までやった教職の授業で一番自分のためになった気がします。また、見学にいくなど、こんなアクティブな授業もなかなかないので、すごく印象に残っています。自分が書いたレポートが通信や報告書にのるのは少しはうれしいけど、みんなどんな意見をもっているのか知れる機会ともなり、結果、よかったです」と書き、本人の中で、授業に対する積極的な意味づけがなされたことが読み取れる。また、共に受講した他の学生への関心も述べられている。

この感想は女子学生によって書かれていて、こうした熱意を感じさせる態度などが、評定の結果にも影響している可能性がある。とくに、易変性中群は3名だったので、彼女の評定結果が群全体の傾向を方向づけたと推測できる。その結果は、性別による影響と考えることも可能である。

先に取り上げた易変性大群でも、「少しでも手をかけてあげられれば」という、他者への働きかけの視点が見られたが、この易変性中群では具体的に身近な存在の「他の学生」との関わりが意識化されている。一般論として語られがちな、いざれどこかで出会う誰かへの手助けは、望ましい行動ではあるが、まだ実像を結んでいない抽象的な思いであるのに比べると、他の受講生に向けられた関心は実際の行動に裏打ちされた感想といえる。

易変性小群では、7名×2回の14回分に対して7例の感想記入があった。中間と期末の両方で感想を書いた3名の内の一人は、「誰でも、これから社会人になる上で、障がい⁽¹³⁾をもつ人と関わりを持つ可能性があるのも、教職の授業としてだけではなく、一般の学生も受けていくべき」だと中間レポートに書いた。さらに期末レポートにも、「中間の時のレポートにも書いたが、障がいを持つ人に対するイメージ、考え方が明らかに変わった。(知り得た)知識を他の人に伝えられることができれば、さらに障がいを持つ人が生活しやすい環境を整えていける」という思いを書いていた。

ここで注目すべきなのは、個人として自分の今後のことが展望されているだけではなく、個人から個人へ障害理解が広まっていき社会全体がより良く変化していく可能性について言及されている点である。個人としての自分の変化、これから変

化していく自分の生活について書かれた感想はよく見られるが、獲得した知識を社会一般に浸透させていくことの重要性和、そうして変化していく社会に期待する感想は、そんなに多くない。こうした感想をもてるようになることは、教職専門の授業として想定されていた範囲を超えた広がりや深みに到達しているといえる。

見学と出張講義後の**ミニレポート**について群ごとの特徴を抽出すると、つぎのようになる。まず易変性大群では、施設での見聞や絵カードの講義内容などを詳しく記述する内容が多く見られた。また、施設職員の表情や子ども達の視線に注目して見学した、というような視点をしばった取り組み姿勢の記述や、言葉を交わした子どもが後で職員に聞くと最近初めて言葉が出て来た子だったと教えられ、その子の成長の場に立ち会えたような感動を語る例も見られた。

易変性中群では、**pre**にもっていた障害に対するネガティブなイメージが、見学で大きく覆されたことの記述が多く見られた。小学生の時に障害をもつ友だちが居て一緒によく遊んでいたが、成人式で再会した際にはかつての快活さが失われていたことに触れ、社会生活の場での「風当たりの冷たさ」について感想を述べる例もあった。自分の過去の体験を取り上げる内容は他の群にもよく見られるが、現在の自分との関わりにまで言及する例はあまり多くない。

易変性小群でも、知り得た知識や情報を詳細に記述する内容が多く見られた。自分の体験と結びつけての感想も見られたが、とくに将来自分が教師となった時に、今回の体験をどのように活かしていくか、といった指導者としての視点で書かれた感想が他の群より多かった。こうした、今の自分ではない別な自分を想定して、そこからの見方で目の前の現実を意味づけし直す、という思考が易変性小群の学生の中で行われていた可能性がある。そうであるなら、そうした思考が他の学生間にも共有されていくよう、授業展開などに工夫が必要となる。

4 まとめと展望

児童発達支援施設の見学や施設職員による出張講義で、受講した学生は発達障害などの障害や対応する療育の実情について理解を深めることができた。人の発達や学習の過程は、一様ではなく多種多様な個性が発揮される場であることを、実感

として知ったことが、将来、教職に就いた際の各自の行動を支えてくれるはずである。

しかし、見学と出張講義の受講後に一時的に高まった障害への関心が、あまり長く持続しない一定数の学生達が見られたことも事実であった。こうした、急激に好意的な障害イメージを高め、また2ヶ月後にはその高まりが下がってしまうグループを易変性大群として検討した。急激な好印象の高まり後でもあまり低下しないグループは易変性中群として検討され、初めから大きな変化を見せないが、しだいに障害に対する好印象を高めるグループは、易変性小群として検討された。

易変性大群では、自分の体験を知識として詳細にまとめることをしても、そこに自分を積極的に関係づける思考があまり見られなかった。実際に見たり聞いたりしたことからの思考が中心になるので、過去の自分の障害児と遊んだ体験も、思い出話として語られがちであった。

易変性中群では、予めもっていた自分自身の障害に対するネガティブなイメージが、見学と受講で大きく逆転したことが語られた。さらに、意識が向いた対象が、将来の漠然とした自己像だけではなく、具体的な同じ受講学生だったりした。こうした今現在の状況に対する関心の持ち方が、一度高まった好印象がそのまま維持された原因の一つと考えられた。

易変性小群でも、知識や情報の緻密な記述が見られたが、そうして得られたものを、将来教職の場で活かしていこうとする思いが語られることが多かった。今見えているだけの印象ではなく、立場が変わった視点から見直した現在の印象の違いをとらえた見方であった。

教職科目である「学習・発達論」では、発達障害だけに限定して教育について学んでいるわけではないが、教師として社会から期待されているものの一つとして障害理解があると押さえている。人の成長に立ち合い、その発達と学習を支える役割を果たすには、多様なその発達の実態を理解しておく必要がある。その理解を深めさせ、自分の思いを持続させるには、授業展開にも工夫が求められる。今回の検討から明らかになったのは、他者との関わりを、いかに積極的に実践するかということに集約できると考えている。

具体的な場面に当てはめるならば、見学前から他の学生がどのような「障害イメージ」をもっているかを意識させるなどである。施設職員の仕事に対する思いや喜びの体験などに、関心を向けさ

せることである。さらには、当の子ども達との積極的な交流への動機付けである。そうして、各自の体験で得られた思いを、一緒に体験し合った者同士で共有し合うことである。

自分一人の体験では、思いを持続させることは難しいと考えられる。しかし、共感したり反発し合ったりする共有体験があることで、一つの体験を複数の視点で解釈し直すことが可能になる。こうして一層深められ多義的な価値を与えられた体験が、将来の教職の場や、社会人として生活する場で活かされていくことが期待される。

5 おわりに

今回の見学と出張講義は、室蘭市子ども発達支援センター「あいくる」の皆さん、「教育方法等改善経費」の事業に関わっての大学関係者の皆さん、受講の学生の皆さんのご協力があったて実現が可能となった。それらのご協力には、感謝してもし足りないほどのものがある。そして忘れてならないのは、「あいくる」の子どもたちが見学の学生らを自然に受け入れてくれたことへの感謝である。子ども達が成長していく先の社会が、今よりも少しでも住みよい環境になっているようであれば、教育の場に関わる立場からの責任を果たしたことになるだろう。教育に託された責任は重く、休むことなく働きかけていかなければならないものと考えなければならない。それは、受講した学生一人一人にも、自覚をもってもらいたいと期待するものでもある。

今後の研究の方向としては、もっとていねいに学生の思いを受け止められるような、個別の記録法の検討が考えられる。具体的には個別の態度構造分析(PAC分析)の利用が考えられる。感想文などからたどるのは違い、面談を通じて個人から直接思いを聞き取り、それらを個人間で比較したり、複数回の時期で比較したりすることで新しい気づきが得られると期待できる。

授業の展開に関わっては、受講学生の障害(者)理解を促進し、障害特性に応じた教育を学生自身が構想できるように仕向けるには、表面的な印象を乗り越えた視点が必要になることが示された。今後の教職課程の授業では、こうした受け止め方のできる教師養成を意識して、学生相互の活発な意見交換や明示的で活動的な表現機会を組み込んでいくことが必要となると考えている。

注と文献など

- (1) 今野博信 2012「知識だけではなく行動につなげるための発達障害理解」室蘭工業大学紀要 62 号 153-161
- (2) 文部科学省・厚生労働省 2005「発達障害者支援法の施行について」教育に関しては、「障害の状態に応じ、十分な教育を受けられるようにするため、適切な教育的支援、支援体制の整備その他の必要な措置を講じるものとする」と書かれている。
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/06050816.htm(2014.11.12 現在)
- (3) 文部科学省 2007「特別支援教育について」「特別支援教育」とは、障害のある幼児児童生徒の自立や社会参加に向けた主体的な取組を支援するという視点に立ち、幼児児童生徒一人一人の教育的ニーズを把握し、その持てる力を高め、生活や学習上の困難を改善又は克服するため、適切な指導及び必要な支援を行うもの、と説明している。
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/tokubetu/main.htm(2014.11.12 現在)
- (4) 「高等学校における発達障害支援モデル事業」は、平成 19 年度 20 年度 21 年度と継続して実施された。数十校のモデル校が指定された。
http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/286184/www.mext.go.jp/b_menu/houdou/19/06/07060608/004.htm(2014.11.12 現在)
- (5) 「発達障害等に対応した教材等の在り方に関する調査研究事業」は、平成 21 年度に、「発達障害等のある児童生徒の教科学習等における困難を改善するため、一人一人の障害特性、発達段階、教科の特性などに応じた教材等の在り方、それらを活用した効果的な指導方法や教育的効果等について、実証的な調査研究」するために実施され、指定された 4 団体の成果が報告されている。
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/tokubetu/main/006/1298377.htm(2014.11.12 現在)
- (6) 「発達障害に関する教職員の専門性向上事業」は、平成 25 年度に実施された。教員に対し、発達障害に関する正しい知識の習得・児童生徒への適切な指導・保護者等に対しての十分な説明と理解の獲得などを課題としている。事業は翌 26 年度に、「発達障害の可能性のある児童生徒に対する早期支援・教職員の専門性向上事業」として引き継がれている。
http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/286184/www.mext.go.jp/b_menu/houdou/19/06/07060608/004.htm(2014.11.12 現在)
- (7) 子ども発達支援センター(あいくる)については、室蘭市公式ホームページに説明がある。
<http://www.city.muroran.lg.jp/main/shisetsu/150250aikuru.html>(2014.11.12 現在)
- (8) 文部科学省 特別支援教育の推進に関する調査研究協力者会議 高等学校ワーキング・グループ 2009「高等学校における特別支援教育の推進について」の中で、発達障害のある生徒への指導・支援を充実させるために、次のような手立てを示している。

○発達障害のある生徒が充実した高等学校生活を送るためには、学習面、行動面、対人関係面など、それぞれの場面において発達障害の特性に配慮した指導や支援が必要である。現在、自治体によっては高等学校における発達障害児への対応に関するハンドブック等を作成・活用しているところであり、これらの取組も参考にすべきである。

○ このような配慮や工夫を行うことは、個々の教員の授業力・指導力の向上につながり、授業が全体として分かりやすいものとなることが期待されることから、発達障害のある生徒のみならず、学級・学校全体の学習意欲の増進や学力の向上等にも資するものと考えられる。

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shotou/054/s_hiryu/_icsFiles/afieldfile/2009/11/05/1283675_3.pdf(2014.11.12 現在)

- (9) SD 法による質問紙調査：C.Osgood が開発した特定の事象の一般的な意味次元を量るための測定法で、Semantic Differential 法のこと。「好き－嫌い」などの反対語の対からなる 評価尺度を複数用いて対象を評価する。各評価尺度対に対する 5 段階や 7 段階の両極性の尺度を用い複数の被験者に回答を求め、各評価尺度段階を得点として数値化し、因子分析により評価次元を抽出するのが一般的である。
- (10) 松村孝雄・横川剛毅 2002 「知的障害者のイメージとその規定要因」 東海大学文学部紀要, 77, 103. 用いられたのは次の 20 の形容詞(形容動詞)であった。「明るい・おだやかな・安全な・陽気な・怖くない・かわいらしい・迷惑でない・きれいな・役に立つ・正常な・気の毒でない・手際のよい・身近な・共感できる・個性あふれる・近づきたい・優秀な・関わりたい・幸せな・共生すべき」
- (11) ANOVA4 on the Web : 桐木建始氏(広島女学院大学教授)が作成し公開している。4 要因までの分散分析および多重比較(Ryan 法)の分析ができる。ブラウザ上でそのまま動作するので、インストールは必要ない。

<http://www.hju.ac.jp/~kiriki/anova4/>(2014.11.12 現在)

- (12) 主因子法バリマックス回転による因子分析：変数の間の相関関係から共通因子を求めることで、多くの変数を少数個の共通因子にまとめて説明する手法として因子分析がある。解釈しやすくするために、因子軸を回転させる方法がよく用いられる。バリマックス回転は、因子間に相関がないと想定した直交回転の一つである。今回の分析には、青木繁伸氏(群馬大学教授)が公開している Black Box のサイトを用いた。

<http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/BlackBox/BlackBox.html>(2014.11.12 現在)

- (13) 障がい：「害」の表記を避けた仮名交じり表現がある、という話を講義で取り上げた。また、「障碍」という表記についても説明したが、単に表記の問題ではなく社会全体での受け止め方が変わって差別意識がなくなる必要がある、と感想を書く学生も現れた。

付記：日本教育心理学会第 56 回総会のポスター発表において、本報告の一部を発表した。

図 書 館 委 員

委員長	附 属 図 書 館 長	教 授	空 閑 良 壽
委 員	く ら し 環 境 系 領 域	准 教 授	藤 本 敏 行
〃	も の 創 造 系 領 域	准 教 授	湯 浅 友 典
〃	し く み 情 報 系 領 域	准 教 授	佐 藤 信 也 (紀要編纂部会部会長)
〃	ひ と 文 化 系 領 域	准 教 授	黒 木 場 正 城 (紀要編纂部会委員)
〃	建 築 社 会 基 盤 系 学 科	准 教 授	市 村 恒 士
〃	機 械 航 空 創 造 系 学 科	准 教 授	澤 口 直 哉
〃	応 用 理 化 学 系 学 科	准 教 授	飯 森 俊 文
〃	情 報 電 子 工 学 系 学 科	准 教 授	佐 藤 信 也 (紀要編纂部会部会長)
〃	全 学 共 通 教 育 セ ン タ ー	准 教 授	黒 木 場 正 城 (紀要編纂部会委員)
〃	情 報 メ デ ィ ア 教 育 セ ン タ ー	准 教 授	桑 田 喜 隆
〃	図 書 ・ 学 術 情 報 事 務 室	ユ ニ ッ ト マ ネ ジ ャ ー	結 城 憲 司 (紀要編纂部会委員)

平成27年3月13日 印 刷 (非売品)
平成27年3月13日 発 行

編 集 室 蘭 工 業 大 学
発 行 行
〒050-8585 室蘭市水元町27-1

印 刷 株式会社 日 光 印 刷
室蘭市寿町2丁目3番1号
TEL (0143) 47 - 8 3 0 8

表紙デザイン 目 黒 泰 道

