



室蘭工業大学紀要 第58号 全1冊

メタデータ	言語: eng 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2013-12-12 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/10258/2770

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58号 平成21年 2 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」

まえがき

.....棚次亘弘 1

1. 小型推進エンジンプロジェクトグループ

(1) 反転ファンターボジェットエンジンの研究

.....湊 亮二郎, 竹田広人, 西村宗真 3

(2) LNG ロケットエンジンのメタンコーキング特性に関する基礎研究

.....東野和幸, 杉岡正敏, 小林隆夫, 湊 亮二郎, 丸 祐介, 笹山容資, 大塚雅也,
牧野 隆, 坂口裕之 9

(3) LNG ロケットエンジンにおけるサルファアタック・コーキングに関する基礎研究

.....東野和幸, 杉岡正敏, 小林隆夫, 境 昌宏, 湊 亮二郎, 笹山容資, 大塚雅也,
沖田耕一, 青木賢司, 川島秀人, 東 伸幸 17

(4) ロケット燃焼室におけるニッケル電鍍特性向上に関する基礎研究

.....東野和幸, 駒崎慎一, 笹山容資, 木元健一, 坂口裕之, 石橋利幸 25

(5) 熱分解吸熱反応燃料に関する研究

.....高橋将人, 磯田浩志, 棚次亘弘, 東野和幸, 湊 亮二郎 33

2. 小型無人実験機プロジェクトグループ

(6) 小型超音速飛行実験機の空力特性

.....溝端一秀, 羽田尚太, 工藤摩耶, 笹山容資, 桑田耕明, 丸 祐介, 湊 亮二郎,
棚次亘弘, 新井隆景, 坪井伸幸 39

3. 地上・飛行試験設備支援グループ

(7) サブスケール高速走行軌道装置の試作と走行実験

.....丸 祐介, 宮瀬宗彦, 安田有佑, 棚次亘弘, 溝端一秀 45

(8) 吸込み式超音速風洞におけるスターティングロードの計測と評価

.....湊 亮二郎, 溝端一秀, 桑田耕明 51

CONTENTS

Invited Papers

○Special Articles : Development Study at the Aerospace Plane Research Center

Preface

.....	Nobuhiro TANATSUGU	1
1. Small-scale Jetengine Project Group		
(1)	Study of Counter Rotating Axial Fan Turbojet EngineRyojiro MINATO, Hirohito TAKEDA, Munemasa NISHIMURA	3
(2)	Propulsion Base Technology : Fundamental Study on Coking Characteristics of LNG Rocket EnginesKazuyuki HIGASHINO, Masatoshi SUGIOKA, Takao KOBAYASHI, Ryojiro MINATO, Yusuke MARU, Yousuke SASAYAMA, Masaya OTSUKA, Takashi MAKINO and Hiroyuki SAKAGUCHI	9
(3)	Fundamental Study on Sulfur Corrosion and Coking of LNG Rocket EnginesKazuyuki HIGASHINO, Masatoshi SUGIOKA, Takao KOBAYASHI, Masahiro SAKAI, Ryojiro MINATO, Yousuke SASAYAMA, Masaya OTSUKA, Koichi OKITA, Kenji AOKI, Hideto KAWASHIMA and Nobuyuki AZUMA	17
(4)	Fundamental Study of Improved Nickel Electroforming for the Regenerative Rocket ChamberKazuyuki HIGASHINO, Shinichi KOMAZAKI, Yousuke SASAYAMA, Kenichi KIMOTO, Hiroyuki SAKAGUCHI and Toshiyuki ISHIBASHI	25
(5)	Study on Endothermic FuelMasahito TAKAHASHI, Hiroshi ISODA, Nobuhiro TANATSUGU, Kazuyuki HIGASHINO, Ryojiro MINATO	33
2. Small-scale Jetengine Project Group		
(6)	Aerodynamic Characteristics of a Small Scale Supersonic Flight Experiment VehicleKazuhide MIZOBATA, Syota HADA, Maya KUDO, Yousuke SASAYAMA, Koumei KUWADA, Yusuke MARU, Ryojiro MINATO, Nobuhiro TANATSUGU, Takakage ARAI and Nobuyuki TSUBOI	39
3. Ground and Flight Tests Support Group		
(7)	Experimental Construction and Operation Tests of a Subscale High-Speed Sled Track FacilityYusuke YASUDA, Munehiko MIYASE, Yusuke MARU, Nobuhiro TANATSUGU, and Kazuhide MIZOBATA	45
(8)	Experimental Measurements and Validations of Starting Loads in Indraft Supersonic Wind TunnelRyojiro MINATO, Kazuhide MIZOBATA, Koumei KUWADA	51

投稿論文

○学術論文

- Study on Electric Properties of Gadolinium Nitrate Crystals
.....磯田広史, 川島利器 61
- ローカル・マニフェストのリアリティ ―地方政治変革の潮流―
.....永松俊雄 65
- Blake の *A Vision of the Last Judgment* について
.....安藤栄子 79

○研究報告

- Catalytic properties of metallosilicates
...神田康晴, Ewa JANISZEWSKA, Justyna PAWLESA, Stanisław KOWALAK, 杉岡正敏 89
- グリーン水素製造 (第2報) 金属酸化物担持ニッケル触媒によるメタン分解反応
.....アスマリザ^サ アブトル ヒンティ ガニ, 齋藤真由, 神田康晴, 小林隆夫, 上道芳夫, 杉岡正敏 97
- 北海道内市町村の鳥獣被害への取り組み
.....亀田正人 103
- 北海道稚内市の洪水ハザードマップ作成および避難に関する考察
.....太田典幸 115
- 屋内バイクトレーニング時のトライアスロン熟練者の発汗量と体表面温度の測定
.....森谷直樹, 大平勇一 125

Papers

○Article

- Study on Electric Properties of Gadolinium Nitrate Crystals
..... Hiroshi ISODA and Riki KAWASHIMA 61
- The Reality of What “Local Manifesto” Means in Japan —Current Movements in Local Politics—
..... Toshio NAGAMATSU 65
- On Blake’s *A Vision of the Last Judgment*
..... Eiko ANDO 79

○Research report

- Catalytic properties of metallosilicates
..... Yasuharu KANDA, Ewa JANISZEWSKA, Justyna PAWLESA,
Stanisław KOWALAK and Masatoshi SUGIOKA 89
- Production of Green Hydrogen (Part 2) Methane Decomposition over Metal Oxides-supported Nickel Catalysts
..... Asmaliza binti Abd Ghani, Mayu SAITO, Yasuharu KANDA, Takao KOBAYASHI,
Yoshio UEMICHI and Masatoshi SUGIOKA 97
- Municipalities Tackling Conflicts with Wildlife in Hokkaido
..... Masato KAMEDA 103
- Proposal of Flood Hazard Map and Investigation of Evacuation Countermeasures in Wakkanai, Hokkaido
..... Noriyuki OHTA 115
- Measurements of Sweat Loss and Body Temperature of an Expert Triathlete at Indoor Bike Training
..... Naoki MORIYA and Yuichi OHIRA 125

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」

まえがき

航空宇宙分野の技術は、高い性能と共に信頼性と安全性を追求し、広範な分野の科学技術を統合する高度なシステム技術です。その技術の他分野への波及効果は極めて有用であることから先進各国は航空宇宙分野を国の戦略的な科学技術分野に設定して、科学技術の発展と人材育成の土壌としています。

中でも、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両方に利用することができ、極めて戦略的な基幹システム技術です。これによって、輸送システムに革新をもたらし、地上及び宇宙における人類の活動が飛躍的に拡大する可能性を秘めています。総合科学技術会議は、国家基幹技術の一つに宇宙輸送システム技術を第三期科学技術基本計画に盛り込み、国を挙げて開発に取り組んでいます。

室蘭工業大学では、現在進行中の中期計画及びアクションプログラムにおいて「研究の顔」となる戦略的重点科学技術分野として航空宇宙工学を掲げ、これを実践するため、平成16年度末に「航空宇宙機システム研究センター」を設置しました。

当研究センターでは、「大気中を高速・高々度まで飛行するための革新的な基盤技術を創出する」ことを主たる研究目的にしており、そのための試験設備等のインフラを整備すると共に基礎的な研究から進めています。

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っていて行っている主な基盤研究と試験設備に関する研究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 棚次 亘 弘

反転ファンターボジェットエンジンの研究

湊 亮二郎*1, 竹田 広人*2, 西村宗真*2

Study of Counter Rotating Axial Fan Turbojet Engine

Ryojiro MINATO, Hirohito TAKEDA, Munemasa NISHIMURA

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

The Counter Rotating Axial Fan Turbojet Engine is considered as the propulsion engine for the subscale supersonic unmanned plane, because of its aerodynamic and structural advantages. In the present study, the numerical design and analysis of counter rotating fan are conducted by Streamline Curvature Method (SCM). At same time, the two staged counter rotating turbine is also numerically designed and its aerodynamic performances are evaluated by CFD.

We discussed the system integration of this type of engine based on the results of the analyses of the engine elements

Keywords : Counter Rotating Fan, Turbojet Engine, Supersonic Unmanned Plane

1 序論

現在、室蘭工業大学では、東大、九大、大阪府立大及び JAXA と連携して、小型超音速無人実験機の飛行試験を計画している¹⁾。本試験計画では全長 3 m 程度の機体に、ファン直径 200 mm 以下、推力 140 kgf (= 1.37 kN) 程度の小型ターボジェットエンジンを搭載し、自力離陸して超音速飛行をすることを目標としており、将来的には革新的な航空宇宙機の基盤技術を試験するフライングテストベッドを提

供することを目指している。同機に搭載される推進エンジンは、小型且つ大推力であることが要求されるため、圧縮ファンは小ファン径、高圧力比、高断熱効率、大流量であることが求められる。これらの要求を満たすため、二段の動翼を反転させる反転軸流ファンが考えられる²⁻⁵⁾。反転軸流ファンには空力面、構造面にそれぞれ長所があり、それらを挙げると以下ようになる。

1. 二段のファンが互いに反転するため、下流側ファンの相対速度 (=マッハ数) は通常のファンと比較して大きくなる。そのため機械的なファ

*1 機械システム工学科

*2 大学院博士前期課程機械システム工学専攻

ンの回転周速度を増加させることなく、圧力比を上げることが出来る。

2. 動翼間に静翼がないため、高い圧縮効率を得られる。
3. 二段でファンを構成するため、軸長が短くなり振動制御が容易になる

一方問題点として、二段のファンを反転させるため、二軸タービンか遊星歯車を用いる必要があることと、下流側の第2段ファンの相対速度が大きくなるので、高い相対マッハ数の下で翼の高効率化を達成させなくてはならないといった事項が挙げられる。

小型超音速無人実験機計画では、小型ターボジェットエンジン用反転軸流ファンの設計・試作を進めており、今後回転試験で空力・振動データを取得する予定である。その際、サージ現象の予測やその遷移過程を明らかにすることは、安全な試験遂行に必須事項である。本研究では流線曲率法⁶⁾により小型ターボジェットエンジン用反転軸流ファンの形状設計を行い、CFD解析で1) 定格回転における設計点における空力性能、2) 流量が変化した場合の非設計点性能、3) サージに至る過程と翼間流れの挙動について解析を行った。その解析結果から反転軸流ファンのサージに至る支配因子の解析やサージ防止方法、性能向上について検討を行った⁷⁾。

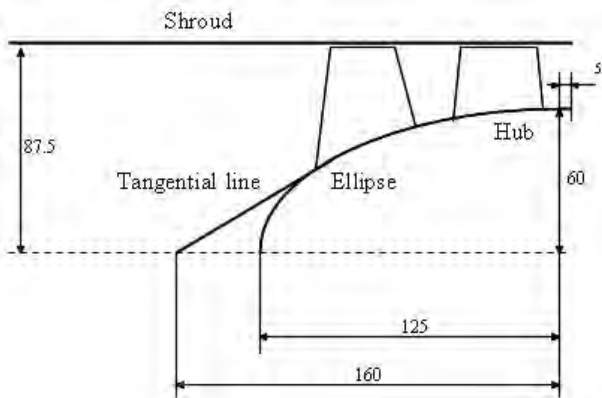
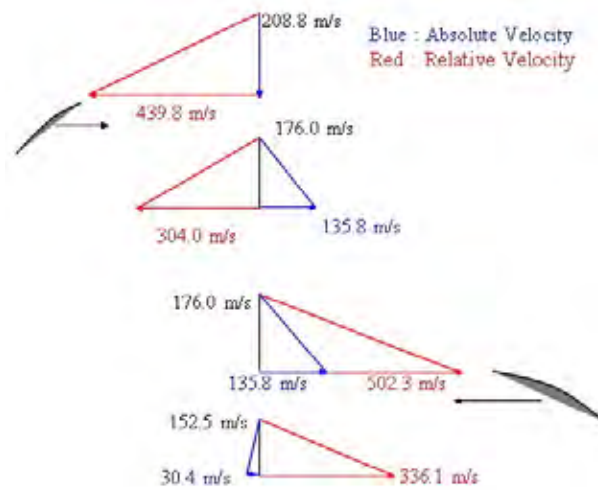


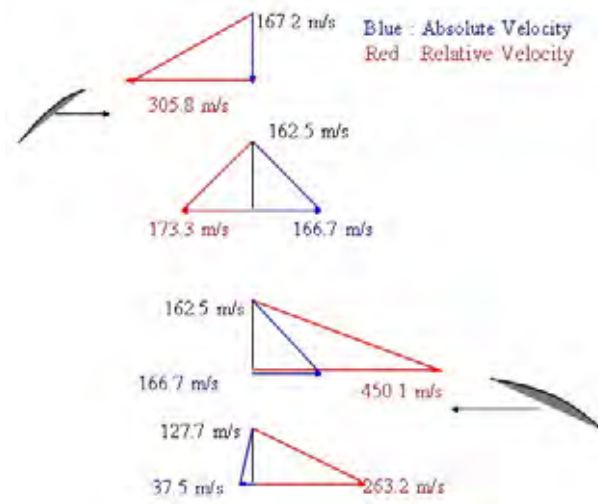
図.1 子午面上でのファン形状

2 反転軸流ファンの形状設計

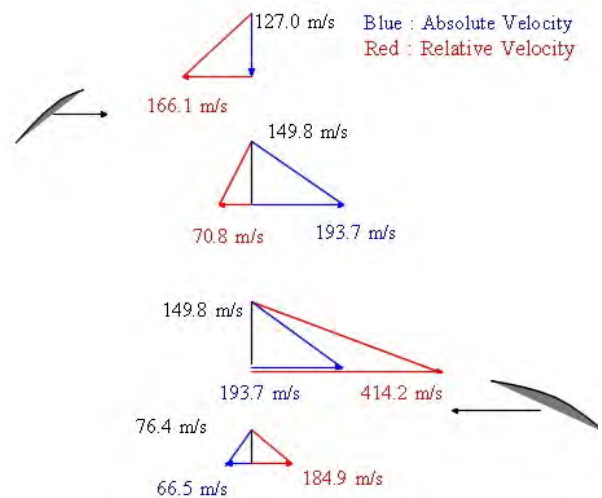
本プロジェクトで開発する小型超音速機用ターボジェットエンジンについて、必要空気流量と圧力比の推算を行ったところ⁷⁾、定格運転時における空



a) チップでの速度三角形



b) 流路中心での速度三角形



c) ハブ部での速度三角形

図.2 反転軸流ファンの速度三角形

気流量と圧力比をそれぞれ 3.6 kg/sec、3.2 となり、ファン径を 175mm となった。この反転軸流ファン全体の圧力比を、第 1 段ファンと第 2 段ファンでそれぞれ 1.87 と 1.70 と配分させ、回転数は、それぞれ 48000 rpm、第 2 段ファンは反対方向に 40000 rpm と設定した。これらの回転数は、第 1 段ファン、2 段ファンの周速はそれぞれ 440 m/sec と 367 m/sec に相当する。この圧力比配分と回転数はファンブレードの構造的な耐久性を加味した上で、Lieblien の拡散係数⁸⁾が制限値内になるように設定した。これらの諸元から、図 1 のように子午面上のハブとシュラウドの形状を与え、ノーズコーン先端を $z = 0\text{mm}$ として原点においた。この形状ではシュラウド側は半径一定とする一方で、ハブ側の半径を後流側で大きくしている。これはシュラウドの製作を容易にすることと、ハブ側の翼負荷を半径流の効果によって低減し、且つ圧縮仕事を大きくするためである。またブレードのチップクリアランスは第 1 段、第 2 段ファン共に 0.5mm と設定した。

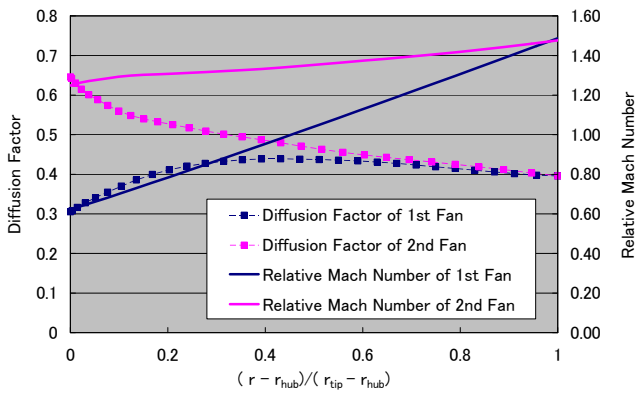


図.3 拡散係数と相対マッハ数の半径分布

反転軸流ファンブレードの形状は、流線曲率法による速度三角形から設計した。詳細な計算方法は参考文献6を参照されたい。またその時のシュラウド、流路中心、ハブにおける速度三角形を図2に示した。図2より第2段ファンの相対速度は、第1段ファンのそれよりもはるかに大きくハブからチップまで超音速になっていることが分かる。これらの速度三角形を基に翼形状を設計したが、翼断面形状は遷音速領域で良好な性能を有するとされる多重円弧

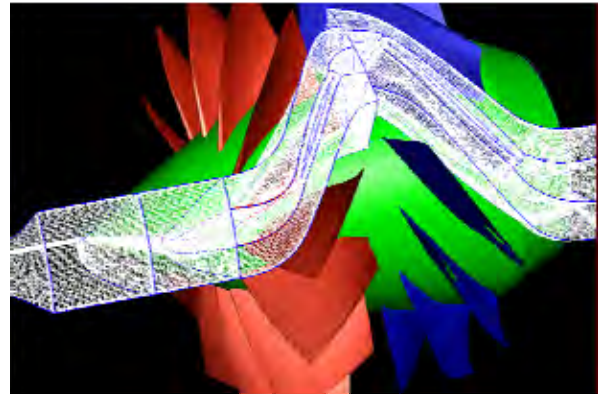


図.4 設計した反転軸流ファンと数値計算用格子

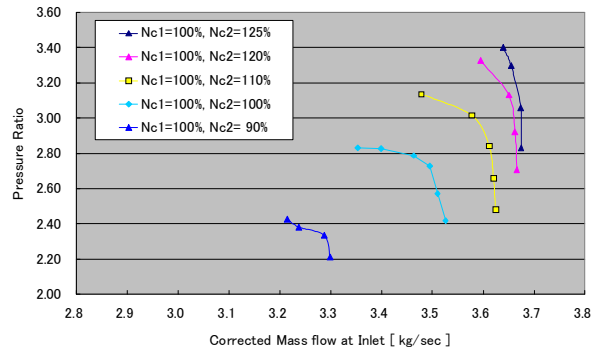


図.5 反転ファン全体の圧力比-流量特性マップ

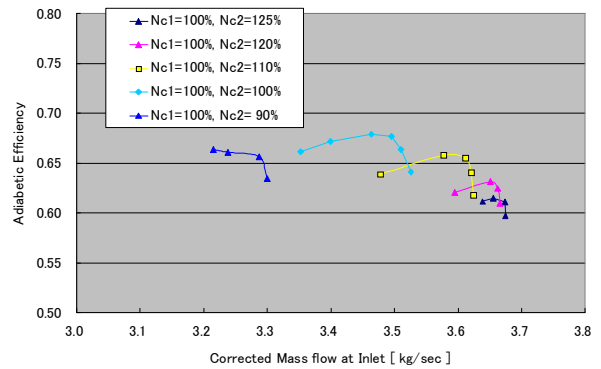


図.6 第1段ファンの圧力比-流量特性マップ

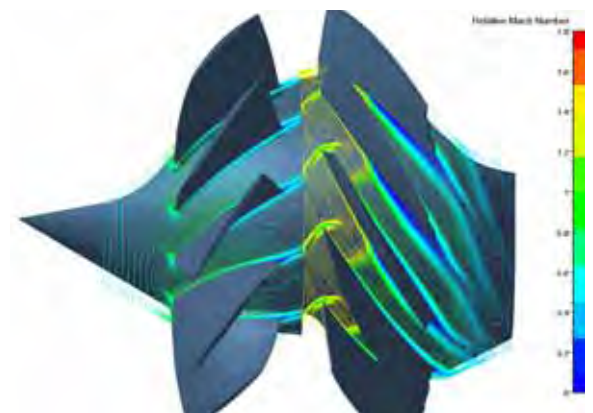


図.7 第2段ファンの圧力比-流量特性マップ

翼(Multiple Circular Arc, MCA)を採用した。

図.3 に Lieblien の拡散係数と相対マッハ数と共に

それらの半径方向分布を示した。Lieblien の拡散係数は、一般的にシュラウドで 0.4 以下、ハブで 0.6 以下が望ましいとされているので、本研究でもこの制限を出来るだけ満たすように、前述の各動翼の圧力比配分や定格回転数を決定した。図 3 から第 1 段ファンの拡散係数は大体制限内に収まっており、相対マッハ数もシュラウド側で超音速、ハブ側では亜音速になっており、典型的な遷音速ファンになっている。しかし第 2 段ファンについては、相対速度がハブからシュラウドまで超音速を優に越えており、拡散係数はハブ側で 0.6 を越えている。この事は第 2 段ファンに関しては、衝撃波による損失と翼の高負荷化に関して、注意しなくてはならないことを意味している。

3 CFD による性能評価

3.1 解析手法

前章の手順で設計した、反転軸流ファンを Numerical International 社のターボ機械専用解析ソフト Fine Turbo により CFD 解析を行った。本解析では Van Leer の制限関数と SymmetricTVD スキームによる二次精度上流差分モデルを組み合わせ解析を行った。乱流モデルには Spalart-Allmaras の一方程式乱流モデルを使用し、計算時間の短縮のため Hirsch のマルチグリッド法⁹⁾を適用し、粗い格子からスタートして細かい格子まで 3 段階に分けて計算を行った。またブレード境界には、mixing plane 条件を適用した。またチップ部を含めた壁面での最小格子幅は y^+ が 1 以下から 3 の範囲に収まるように与えている。流入面での境界条件を地上静止状態 (101.325 kPa, 288.15 K) に設定し、流出面の背圧を任意に変化させることで、圧縮機の流量変化を模擬した。図 4 に設計された反転軸流ファンの 3 次元形状と数値計算用格子を示しておく。

3.2 反転ファンの空力解析結果

反転ファンの空力解析の結果に関して、圧力比とファン効率を図 5 と図 6 にそれぞれ示した。定格回

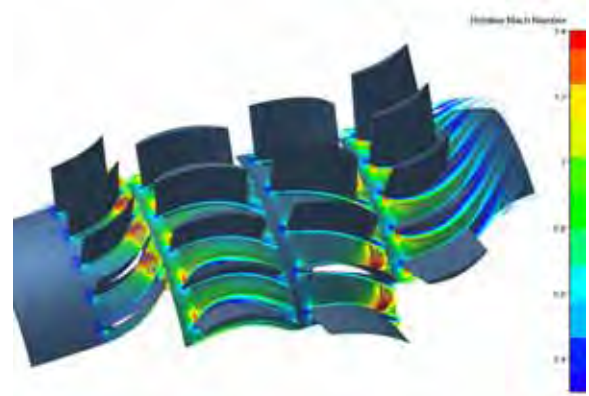


図.8 反転タービンハブ側の相対マッハ数分布

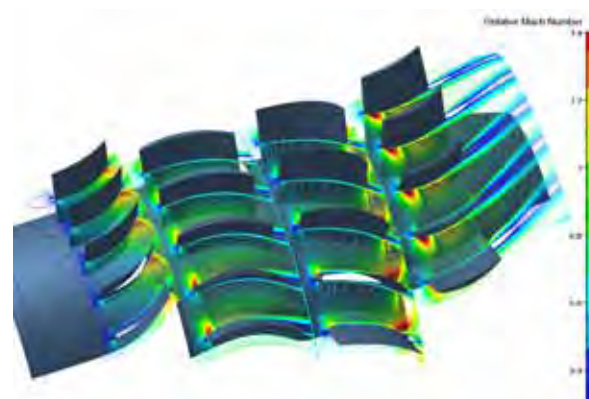


図.9 反転タービン流路中心部での相対マッハ数分布

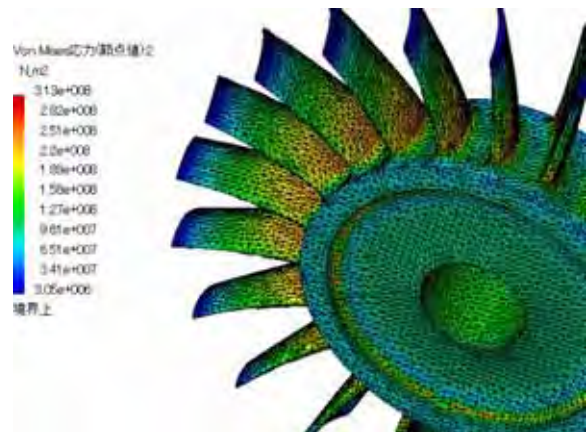


図.10 タービンブレード応力解析結果

転数の状態において、空気流量は 3.48kg/sec とほぼ設計条件と同じ水準であったが、圧力比に関しては 2.8 程度と設計条件よりも低くなっていた。また反転ファン全体のファン効率も 70%弱であった。そのため圧力比とファン効率に関して、より大幅な改善が必要である。第 2 段ファンの回転数を設計回転数より大きくすると、ファン圧力比が向上することが

期待できるが、ファン効率の低下は避けられず何らかの改善が必要である。

図 7 にはハブ付近における相対マッハ数分布を示した。第 2 段ファンの翼列間流れにおいて翼の吸込み面上で境界層が発達していることが分かるが、これは翼列間に存在する垂直衝撃波が一因と考えられる。そのほか翼後縁部で相対マッハ数が低い領域が発達しており、ファンブレードによる形状損失も大きいことが予想される。

今回のファン形状は構造的に成立することを優先したため、空力性能をある程度犠牲にした感がぬぐえない。今後は構造力学と空気力学上の成立性を両立させるようにファンブレード形状を改善する必要がある。

3. 3 反転タービンブレードの設計と空力解析

本研究では、前節の反転ファンを駆動するための反転タービンの設計も進めている。現段階では必要とされるファン動力とタービン通過流量、及び燃焼器条件から速度三角形を設計し、二次元タービンとして形状設計を行った。本来は三次元タービンとしてブレードに捻りを入れたりすることが必要であるが、設計が容易であるため最初に二次元タービンの解析を行い、その結果を踏まえて三次元タービンの形状設計を行い、その数値解析を行った。

解析コードには反転ファンと同様に Fine Turbo を使用し、計算手法もほぼ同じであるが、異なる点は反転ファンの場合は、空気を理想気体として扱って流れ解析を行ったが、タービン流れの解析では、空気と LNG の燃焼ガスとして解析を行った。つまり空気と LNG の化学平衡計算結果から、ガス成分や定圧比熱などの物性値を求め、それを用いて流体解析を行った。

図 8 及び 9 に設計したタービン形状の数値流体解析結果のうち、ハブ部及び流路中心部における相対マッハ数分布を示した。まずハブ側の相対マッハ数分布を見てみると、第一段、第二段のタービン共、吸込み面で流れの剥離が起きていることが分かり、特に第二段タービンではその影響が顕著である。

これらの数値解析結果からタービン効率は第一段タービンで 78%、第二段タービンで 65% であり、反転タービン全体で 75% であった。またタービン動力は第一段タービンで 270kW、第二段タービンで 208kW であった。ファン側の要求ファン仕事から必要タービン動力を求めると第一段、第二段でそれぞれ 300kW、250kW であることから、二次元タービンによるタービン仕事はまだ不足している。これを解決するには、前述のタービン吸込み面での流れの剥離を抑えることが必要と考えられる。剥離流れを改善することで、タービン効率が向上してタービン動力が増加させることが出来る。またタービン作動ガス流量も増加が期待できるので、今後はタービンとファンのパワーバランスを取れるように改善していく予定である。

最後にタービンブレードの応力解析を行ったので、その結果を図.10 に示しておく。応力解析は応力負荷の大きい第二段タービンについて集中的に解析を行った。図 10 からブレード根元の最大 Von Mises 応力値は 310MPa であった。この値は INCONEL などの代表的な Ni 合金が 1000K で 100 時間耐久できる応力レベルであり、本研究で用いられるエンジンのスペックに対して、十分余裕があると考えられる。

今後は、これら二次元タービンの結果をフィードバックさせて三次元タービンの設計に役立てて、空力解析と構造解析の両面からエンジンシステムの成立性を検討する必要がある。

4 結言

現在、室蘭工大航空宇宙機システム研究センターでは、二段反転ファンを用いたターボジェットエンジンの要素及びシステム研究を進めている。

ファン、タービン共に第一次設計段階は終了したが、性能やシステム成立性に関して不十分な点がある。今後は第一次設計段階で明らかになった問題点を踏まえて改善していく必要がある。

参考文献

- 1) 棚次亘弘 “大学におけるもの造り—小型超音速機（エアブリーザーによる空力飛行）” 第35回日本航空宇宙学会総会, 2004, 東京.
- 2) Wilcox, W. W. and Wright, L.C., “Investigation of Two-Stage Counter rotating Compressor I - Design and Overall Performance of Transonic First Compressor Stage”, NACA RM E56C15, (1956).
- 3) Wilcox, W. W., “An Analysis of the Potentialities of a Two-stage Counter Rotating Supersonic Compressor”, NACA RM E52E01, (1952).
- 4) Tran, D. H., “Parametric Study of a Mach 2.4 Transport Engine with Supersonic Through-Flow Rotor and Supersonic Counter-Rotating Diffuser”, NASA TM 2004-213139, (2004)
- 5) Wennerstrom, A. J., “Design of Highly Loaded Axial-Flow Fans and Compressors”, Concepts E.T.I, 2000
- 6) Novak R. A., “Streamline Curvature Computing Procedures for Fluid-Flow Problems”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, Vol.89 , (1967). pp.478- 490.
- 7) Minato, R., Arai, T., Himeno, T., Kobayashi, H., Mizobata, K. and Tanatsugu, N. “Preliminary Analysis of Turbojet Engine at Off-design Condition for Subscale Supersonic Unmanned Plane,” 13th AIAA/CIRA International Conference on Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies, (2005), Naples, Italy., AIAA Paper 2005-3415.
- 8) Lieblein, S., Schwenk, F. C. and Broderick, R. L., “Diffusion Factor for Estimating Losses and Limiting Blade Loadings in Axial- Flow- Compressor Blade Elements.” NACA RM E53D01., (1953)
- 9) Hirsch. C., “Numerical Computation of Internal and External Flows Vol.1 and 2.” John Wiley and Sons. (1988)

LNG ロケットエンジンのメタンコーキング特性に関する基礎研究

東野和幸^{*1}・杉岡正敏^{*2}・小林隆夫^{*2}・湊亮二郎^{*3}・丸祐介^{*4}・笹山容資^{*5}・大塚雅也^{*2}・
牧野隆^{*6}・坂口裕之^{*7}

Propulsion Base Technology: Fundamental Study on Coking Characteristics of LNG Rocket Engines.

Kazuyuki HIGASHINO, Masatoshi SUGIOKA, Takao KOBAYASHI, Ryojiro MINATO,
Yusuke MARU, Yousuke SASAYAMA, Masaya OTSUKA, Takashi MAKINO
and Hiroyuki SAKAGUCHI

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

Liquid Natural Gas (LNG) will be used as propellant of near future space vehicle and rocket engines. Cooling characteristics of engines, especially methane thermal cracking characteristics depend on material candidate for nozzle and chamber cooling passage material temperature. This paper describes these effects on coking and sample analysis method is suggested.

Keywords : LNG, Rocket Engine, Coking

1. 緒言

現在、ロケットやスペースシャトルで使用されている推進薬は RP-1 (ケロシン) 等の炭化水素系燃料や液体水素に大別される。一般的に炭化水素系燃料は低比推力、大推力、高密度でブースター系エンジンに適しており、液体水素は高比推力、低密度であるので上段系エンジンに適している。液化天然ガス (LNG: 主成分は

メタン) は、これら双方の推進薬の中間的な性質を持つ。そのため、機体の小型化や取扱の容易さ、環境への優しさの観点から将来の軌道間輸送機や宇宙往還機の推進薬として注目を集めている。しかし、LNG はその燃焼特性や冷却特性、分解特性、材料への影響、システムの成立性等実用までに様々な課題がある。そこで現在、これらの課題を解決するために基盤技術の研究開発が行われている。また、LNG の主成分であるメタンの推進剤としての有効性を実証するための GX ロケットの研究開発が我が国で進められている¹⁾。

LNG エンジン系では性能向上ならびにエンジン小型化を狙い、ターボポンプ化の研究が行われており、主燃焼器は LNG による再生冷却、ノズルはガスジェネレーターからの排ガスを利用したダンプ冷却が検討されている²⁾。この冷却

*1 航空宇宙機システム研究センター

*2 応用化学科

*3 機械システム工学科

*4 航空宇宙機システム研究センター, 現(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

*5 大学院博士前期課程機械システム工学専攻

*6 (株) IHI

*7 (株) IHI エアロスペース

用メタンは熱分解に伴うコーキング³⁾により、冷却溝の狭窄や冷却性能を低下させるなどの問題の可能性がある。そのため、メタン熱分解反応の挙動や、冷却特性を明確にすることは重要であるが、それらは明確になっていない。

本報では、メタン熱分解特性を解明することを目的とし、実験、ならびに理論解析を実施した。まずメタン自身の熱分解特性を実験によって確認し、次にノズル材料候補である Inconel718 (以下 Inco718), Inconel600 (以下 Inco600), A286 の触媒効果を実験によって確認した。理論解析はメタン自身の熱分解特性について行い、実験結果との比較・検討を行った。これらの結果より、メタン熱分解温度やノズル材料候補の触媒効果による炭素析出量への影響などを明確にした。

2. 実験及び分析

2-1 実験装置

本実験装置の概要を図 1 に示す。本実験では、測定に用いる純メタン (純度 99.99%), 実験前に試料表面を還元する水素, 実験前後の作業中の安全のために流路を置換する窒素が使用される。実験装置へ流入する気体は、切替弁により選択できる。各気体の流量, 及び圧力は圧力調節弁や流量調節弁を用いて調節する。加熱部では、石英管内の気体, 及び試料は電気抵抗炉を用いて所定の温度まで加熱される。本実験では、メタン熱分解反応の挙動やコーキングの様子を検証するため、透明な石英管(内径 20mm, 長さ 1000mm)を用いている。試料 (長さ 10×幅 5×厚さ 0.5mm) はアルミナ製燃焼ポートを石英管に入れ、その中に 10 枚並べられ、電気抵抗炉の中心に設置される。電気抵抗炉下流にあるサンプル採取点は、実験中にガス成分のサンプルガスを採取するために設けている。ドラフタは実験後の排ガスを回収するために設けている。ドラフタに回収された排ガスは大気開放する。

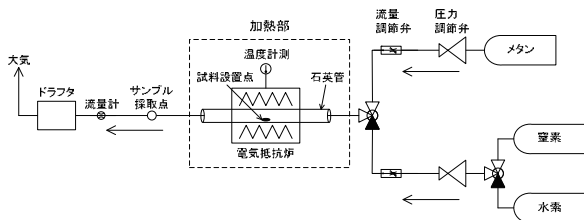


図 1 実験装置概要

2-2 実験内容及び評価

本実験は、メタン自身ならびにノズル材料候補である Inco718, Inco600, A286 の触媒効果についてメタンを一定温度で加熱実験を行う等温実験, および時間と共に温度上昇させる昇温実験を実施した。実験では、メタンと熱分解により発生する水素の体積割合から、メタン熱分解反応の挙動を確認する。メタン熱分解反応の挙動は式(1)で示すメタン転化率により評価する。これは電気抵抗炉下流において、5 分間隔で 0.5ml採取するサンプルガス中に含まれるメタンと水素の体積割合を示す。

$$\text{転化率(\%)} = 100 - \frac{\frac{\text{メタンの AREA}}{\text{メタンの熱伝導度}}}{\frac{\text{メタンの AREA}}{\text{メタンの熱伝導度}} + \frac{\text{水素の AREA}}{\text{水素の熱伝導度}}} * 100 \quad (1)$$

ここで、式(1)の AREA とは、ガスクロマトグラフからの出力であり、メタンや水素それぞれの体積を表している。なお、本実験では熱伝導度型検出器を使用している。

2-3 実験条件

本実験の実験条件を表 1 に示す。本実験では、実験前に試料表面の酸化皮膜を除くため、500°C で水素還元を実施した。また、本実験では、実験の再現性を確認するため、一条件について 2 度実験を実施した。

表 1 実験条件一覧

温度 (°C)	500, 700, 800 (等温実験) 500~850 (昇温実験)
圧力 (MPa)	0.20
流量 (ml/min)	20
試料材質	Inco718*, Inco600**, A286***
実験時間(min)	60 分保持 (等温実験) 40 分で 500°C~850°Cへ昇温

* Inco718: Ni53.5%, Cr19%, Fe18%以下省略

** Inco600: Ni78%, Cr15%, Fe7%

***A 2 8 6: Ni25%, Cr15%, Fe54.9%以下省略

2-4 評価方法

本実験では、メタン熱分解特性を評価するため、実験前後の試料の表面状態や、ガス成分の特定、試料表面に析出した物質の組成を解明するため、表 2 に示す分析を行う。

表 2 分析内容一覧

分析方法	分析項目
外観観察	試料外観を観察
ガスクロマト グラフィー	実験後のガス成分を特定
マクロ・ ミクロ観察	実験前後の試料表面の変化を観察
電子天秤	実験前後で試料の重量変化を調査 (0.1mg まで測定可)
EPMA 分析	試料表面の組成を解明
XRD 分析	試験片内部の結晶構造を解明 (深さ 0~100 μm まで)
ラマン分析	試料表面の析出物の結晶構造を解明

3. 実験結果

3-1 実験結果

メタン熱分解実験結果例を図 2 に示す。(a)は 500°C 等温実験, (b)は 700°C 等温実験, (c)は 800°C 等温実験, (d)は昇温実験である。

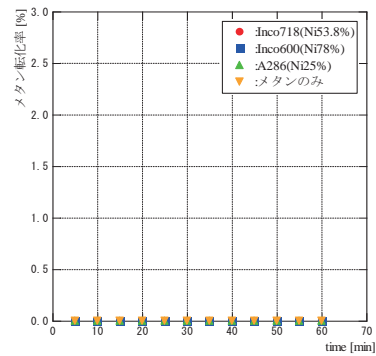
(a)の 500°Cでは, 全条件においてメタン転化率は 0%であり, メタン熱分解反応は見られない。

(b)の 700°Cでは, いずれの試料を設置した場合もメタン熱分解反応が見られた。これから, 700°Cではいずれの試料もメタン熱分解反応を促進させることがわかった。また各試料のメタン転化率を比較した結果, メタン熱分解反応は Inco600, Inco718, A286 の順で盛んに見られた。これから 700°Cでは, メタン熱分解反応に触媒効果を示すニッケル含有量が影響すると考えられる。なお, どの試料も時間経過と共にメタン転化率が減少する傾向が見られた。これはメタン熱分解により試料表面に析出物が付き, 試料の触媒効果が小さくなったためと考えられる。

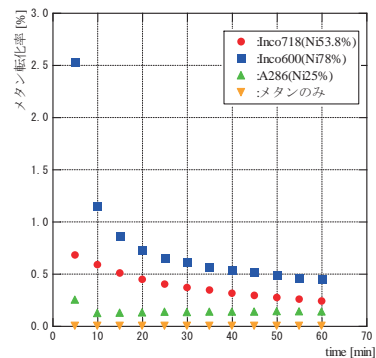
(c)の 800°Cでは, いずれの場合もメタン熱分解反応が見られた。また, 試料を設置した場合のメタン転化率は 700°Cとは異なる傾向を示した。そのため, 800°Cではニッケル含有量はメタン熱分解反応に影響しないと考えられる。

(d)の昇温実験では, メタン熱分解が始まる温度はメタン自身では約 800°C, 試料を設置した場合では約 650°Cであることがわかった。ただし, 昇温実験では, 等温実験と比較してメタン転化率の傾向が異なり, 全体的にメタン転化率が低い値を示している。この理由として, 昇温実験は等温実験と加熱条件が異なり, 昇温中に試料表面に析出物が付き, 試料の触媒効果を減

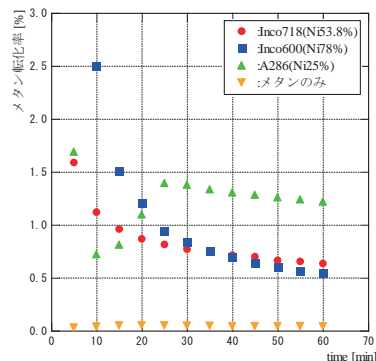
小させたためと考えられる。



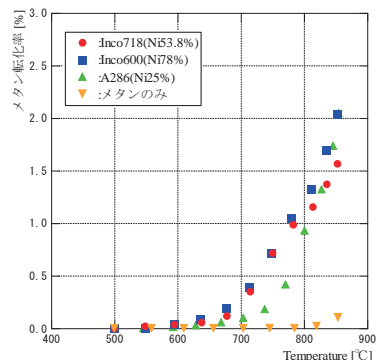
(a) 500°C等温実験



(b) 700°C等温実験



(c) 800°C等温実験



(d) 昇温実験

図 2 メタン分解実験結果

3-2 実験後の様子

図3に実験前後の試料表面観察例として, Inco600 について示す. (a)は実験前, (b)は昇温実験後である. 同図から, 実験後の試料表面は実験前と比較して変色している. これはメタン熱分解による析出物が付着したことが原因であると考えられる. 析出物の組成は分析により解明中である. なお, Inco718, A286 の実験においても同様の結果が得られた.



(a) 実験前 (b) 昇温実験後

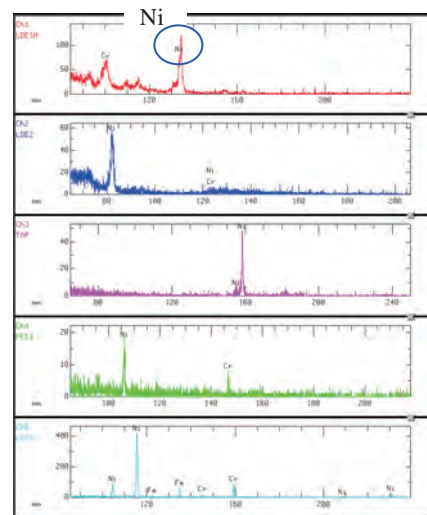
図3 実験前後の試料表面観察

4. 分析結果

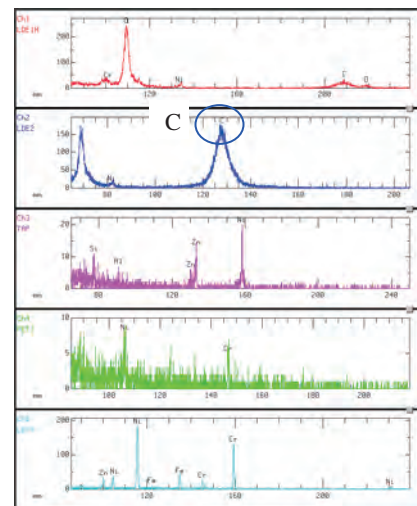
4-1 EPMA 分析

4-1-1 表面組成

本実験では, 試料表面は実験後に黒く変色していた. そこで, 試料表面への析出物の組成を解明するため, EPMA 分析を用いて組成分析を行った. 図4に分析結果の例として, Inco600 の分析結果を示す. (a)は実験前, (b)は昇温実験後の試料の組成である. 同図より, 実験前の試料と比較して, 実験後の試料表面は元素の質量割合の変化や新たな元素の発生が見られた. 特に, 実験前には検出されなかった炭素が昇温実験後には多量に検出されている. この炭素の析出量は実験温度により異なるが 500°C等温実験においても検出されている. なお, Inco718, A286 でも実験前後の試料表面の元素が異なる傾向が見られた. EPMA 分析の結果, 試料表面を変色させた原因は炭素であり, 本実験ではメタン熱分解による試料へのコーキングが発生していることがわかった. また, 炭素の析出量は温度に影響されることがわかった.



(a) 実験前



(b) 昇温実験後

図4 Inco600 EPMA 分析結果

4-1-2 析出厚さ測定

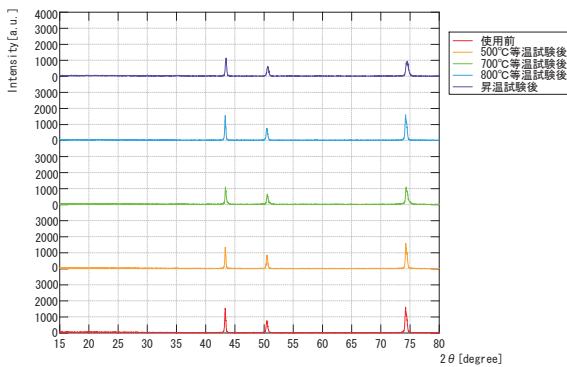
実験により析出した炭素成分の析出厚さ測定のため, 試料断面について EPMA 分析を行った. 表3に炭素成分の析出厚さ測定結果を示す. 同表より, 本実験での最大炭素析出厚さは約 6 μm であることがわかった. また Inco600 の測定結果に着目すると, 炭素成分の析出厚さは最高温度の上昇に伴い増大していることがわかった.

表3 炭素析出厚さ測定結果

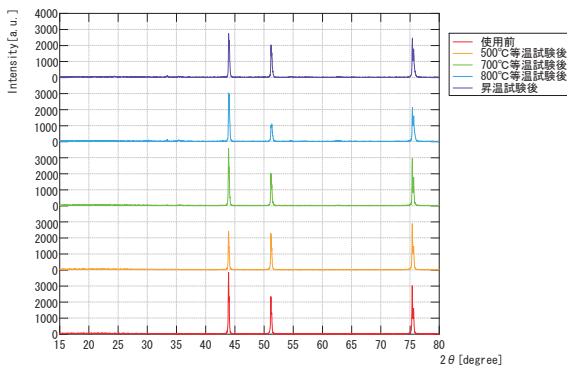
実験条件	析出厚さ(μm)		
	Inco600	Inco718	A286
700°C等温実験	約 2		
800°C等温実験	約 3.5	約 4	約 6
昇温実験(~850°C)	約 3		

4-2 XRD 分析

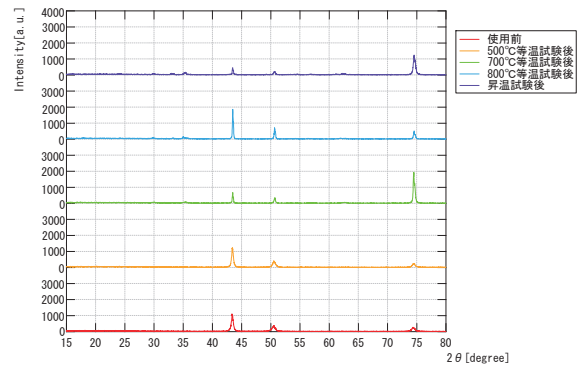
本実験では、実験後試料内部組成は加熱や析出した炭素成分により実験前とは異なる組成を形成している可能性がある。そこで試料内部組成の変化の有無を XRD 分析により確認した。図 5 に XRD 分析結果を示す。同図(a), (b)より、Inco718 や Inco600 金属材料で実験前後試料より検出されたピーク位置や得られたピーク強度の関係がほとんど変化していないことがわかる。この結果、本実験ではどの金属材料においても実験前後試料の内部組成が変化していないことがわかった。また同図(c)より A286 では実験前後試料より検出された 3 つのピーク強度の関係に変化が見られた。この原因として、A286 表面に生成されたと考えられる炭化鉄による影響がある。この結果、A286 では実験前後試料の内部の結晶構造に変化はないが、表面の結晶構造に変化が生じた可能性がある。



(a)Inco718



(b)Inco600



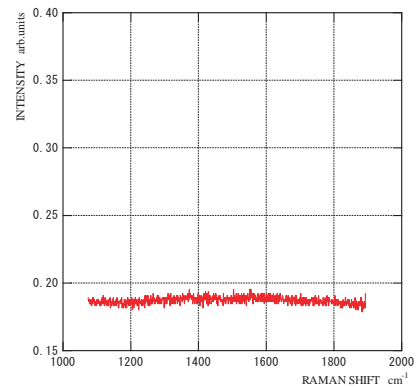
(c)A286

図 5 XRD 分析結果

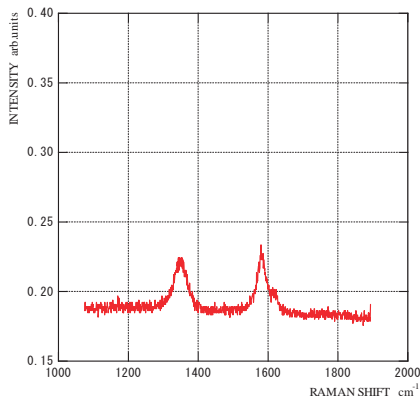
4-3 ラマン分析

試料表面に析出した炭素の結晶構造を解明するため、ラマン分析を行った。図 5 にラマンスペクトルの例として、Inco600 のスペクトルを示す。(a)は実験前、(b)は昇温実験後である。同図より、実験前の試料にはピークが見られないが、昇温実験後の試料にはピークが見られた。このピーク形状から、昇温実験後の試料には熱分解炭素が析出していた³⁾。Inco718 は Inco600 と同様の傾向を示し、A286 はピーク形状から無定形炭素が析出していた。

一方、等温実験後の試料には、Inco718 と A286 では 700°C 以上から、Inco600 では 800°C において無定形炭素が析出した。析出した炭素成分のうち、熱分解炭素は無定形炭素と比較して試験片から剥がれにくく、一方無定形炭素は非常に剥がれやすいことがわかり、実機エンジンでは無定形炭素の剥がれによる影響を注意する必要があると考えられる。この原因として、熱分解炭素は無定形炭素と比較して高温で検出されており、結晶化されるとともに金属との結合が始まっている可能性があると考えられる。



(a) 実験前



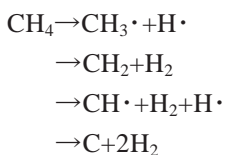
(b) 昇温実験後

図5 Inco600のラマンスペクトル

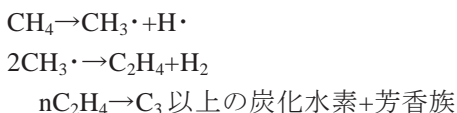
5. 熱分解反応のプロセス

一般的にメタン熱分解反応は以下の様な複雑なラジカル反応機構で進行することが考えられている⁴⁾.

①純メタン自身の熱分解反応



②触媒を用いた場合の熱分解反応



実験, ならびに分析結果から, 本実験では現在まで炭素と水素しか検出されていない. そのため, 本実験でのメタン熱分解反応のプロセスは①の分解反応であるといえる. そのため, 各試料の触媒効果により, メタン熱分解開始温度は促進されたが, 熱分解反応のプロセスはメタン自身の場合と変化しないと考えられる.

6. 理論解析結果

メタンの熱分解開始温度やメタン転化率を理論的に評価し, 高压条件など実験が困難な場合でも, ある程度現象予測を可能にさせるため, 数値解析によるメタン熱分解現象の解析を行った. 化学反応モデルには, GRI-Mec. Ver.3.0を使用した. 考慮した化学種と素反応は, C, H, Oに関わる化合物と N₂と Arを加えた36化学種と,

それらが関与する219素反応で, 窒素化合物や窒素反応は除外した. ただし触媒としての影響は模擬していない.

解析条件は, 温度を700°C, 800°C, 900°Cの3条件として, 圧力を0.1MPaとした.

図6にメタンが0.1MPa下で加熱された時のCH₃・のモル分率の時間履歴を示す. CH₃・はメタンが分解する最初の素反応過程で生成される. 800°C以下では, CH₃・のモル分率の上昇は緩慢で熱分解がなかなか起こらないことを示しているが, 900°Cの時では加熱後約60秒でCH₃・のモル分率が急上昇しており, 熱分解が急速に進んだことが分かる. これらの結果は, メタン自身の熱分解実験の熱分解開始温度の結果と一致しており, 定性的に熱分解開始温度を予測することが可能であると言える. しかし, 熱分解後のガスの化学組成が実験と食い違っているため, 解析精度の向上と適用限界を見極めることが必要である.

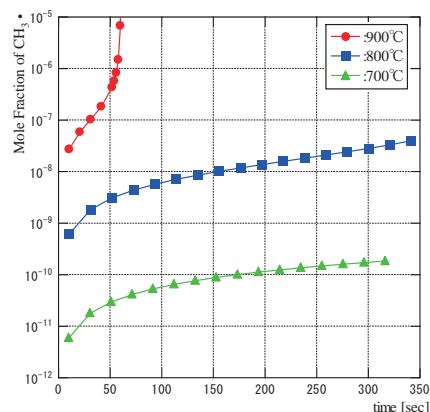


図6 メタン加熱時のCH₃・モル分率時間履歴

7. 結言

本報では, メタン熱分解特性を明らかにするため, 実験, ならびに理論解析を実施した. また, 実験データから分析を行い, メタン熱分解温度やノズル材料候補であるニッケル系金属素材3種の触媒効果による析出温度, 析出量への影響などを評価した. その結果, 現在までに以下のことが明らかになった.

- (1) メタン転化率の挙動より, メタン自身の熱分解開始温度は約800°C, ノズル材料候補であるInco718, Inco600, A286の触媒効果での熱分解開始温度は約650°Cである. また触媒効果はNi含有量に比例していることがわ

かった。

- (2) メタン熱分解により金属試料表面に炭素成分が約 2~6 μm の厚さで析出するが試料内部組成は変化しない。また、A286 では鉄成分と炭素成分が結合し、表面の結晶構造が変化した可能性がある。
- (3) 析出した炭素成分は熱分解炭素と無定形炭素である。熱分解炭素は無定形炭素が加熱され結晶構造が変化し、生成されたと考えられる。
- (4) 本実験条件では、触媒の有無に関わらず検出されたガス成分が同じことから触媒効果の有無に関らずメタン熱分解反応機構は変化しない。
- (5) 理論解析により求めたメタン熱分解開始温度が実験値とほぼ一致することから、メタン熱分解開始温度は理論的に示せる可能性がある。

以上の結果より、本実験範囲ではメタン熱分解に伴うコーキングによる冷却溝の狭窄は見られないと考えられる。しかし、金属材料の触媒効果によりメタン熱分解開始温度は約 150 $^{\circ}\text{C}$ 低下するため、主燃焼器やノズル設計において考慮する必要がある。今後実機環境を模擬した高圧・高流量環境において実験を行い、コーキング特性の評価を行う予定である。

参考文献

- 1)秋元敏男:LNG 推進系飛行実証プロジェクトの開発状況, JAXA ホームページ, 2006.
- 2)LNG 推進系の開発:JAXA ホームページプレスリリース, 2002.
- 3)Giovanetti, A.J., Spadaccini, L.J., Szetela, E.J. ,“Deposit Formation and Heat-Transfer Characteristics of Hydrocarbon Rocket Fuels,”
- 4)吉川正信:ラマン分光法によるダイヤモンド膜の評価, 材料科学 vol28 No3, 日本材料科学会, 1991, pp.133-138.
- 5)市川勝監修:天然ガスの高度利用技術—開発研究の最前線—, NTS 出版, 2001, pp.660-661.

LNG ロケットエンジンにおけるサルファアタック・ コーキングに関する基礎研究

東野和幸^{*1}・杉岡正敏^{*2}・小林隆夫^{*2}・境昌宏^{*3}・湊亮二郎^{*3}・笹山容資^{*4}・大塚雅也^{*2}
沖田耕一^{*5}・青木賢司^{*5}・川島秀人^{*5}・東伸幸^{*5}

Fundamental Study on Sulfur Corrosion and Coking of LNG Rocket Engines.

Kazuyuki HIGASHINO, Masatoshi SUGIOKA, Takao KOBAYASHI, Masahiro SAKAI,
Ryojiro MINATO, Yousuke SASAYAMA, Masaya OTSUKA, Koichi OKITA, Kenji AOKI,
Hideto KAWASHIMA and Nobuyuki AZUMA

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

LNG will be used as a coolant for the regenerative cooling cycle LNG rocket engines. Sulfur Corrosion and Coking phenomena are major problems for the regenerative cooling cycle LNG rocket engines. This paper describes the Sulfur Corrosion and coking characteristics for material candidates for the nozzle and combustion chamber.

Keywords : LNG, Rocket Engine, Sulfur Corrosion, Coking

1. 緒言

近年、液体ロケットエンジンの推進剤の候補として、水素より高密度であるため機体の小型化が可能になる、水素より沸点が高く漏れにくい、ため扱い易く貯蔵性に優れる、炭化水素系燃料であるが燃焼する際に煤がほとんど発生しない、水素より安価である等の理由により、液体酸素、液化天然ガス（以下「LNG」）の組合せに注目が集まっている。

現在 JAXA を中心に進められている LNG を冷却剤とする再生冷却エンジンの研究では、開発リスク低減のため、LNG エンジン特有の技術課

題に対し将来の技術基盤構築も見据えた基礎データの取得が行われている。その重要課題として、LNG 中に微量に含まれる硫黄成分による燃焼室銅合金の腐食(サルファアタック)による問題と、LNG が熱分解する際に煤となって析出する(コーキング)問題が挙げられている。しかし、想定されるエンジン設計範囲(エンジン運転領域)に対しサルファアタック、コーキングによる影響有無、程度を評価するための基礎データが極めて少なく明確な設計指標が得られていない。

そこで本報では LNG を冷却剤とする再生冷却エンジンのサルファアタックならびにコーキングに関し、設計指標に繋がる基礎データを取得するために平成 19 年度に室蘭工業大学と JAXA で実施した共同研究の研究成果を報告する。

サルファアタック実験では LNG 中に含まれる硫黄成分のうち、最も銅合金に対し腐食性が高いと推測されている硫化水素(以下「H₂S」)と LNG 中の主成分のメタンとの混合ガスを用いて、

*1 航空宇宙機システム研究センター

*2 応用化学科

*3 機械システム工学科

*4 大学院博士前期課程機械システム工学専攻

*5 (独)宇宙航空研究開発機構

燃焼室, ノズルスカート, 配管の材料候補である銅合金(SMC, OFHC, OMC), ニッケル合金(Inconel600), ステンレススチール(SUS316)に対するサルファアタックの影響を確認した。

コーキング実験では始めに LNG 中の主成分で熱分解特性が明らかにされているメタン⁽¹⁾⁽²⁾と, メタンとは熱分解特性が異なるプロパンとの混合ガスを用いた LNG 模擬流体の熱分解特性を確認し, 次に燃焼室ならびにノズル材料候補である銅合金 (SMC, OMC), ニッケル合金 (Inconel600, Hastelloy-X) による触媒効果を確認した。

2. 実験及び分析

2-1 実験装置

室蘭工業大学における本実験装置の概要を図 1 に示す。本実験では, 実験ガスとしてメタンと H₂S, 窒素と H₂S, メタンとプロパン, 窒素とプロパン混合ガス, 実験前後の作業中の安全のために流路を置換する窒素が使用される。実験装置へ流入する気体は, 切替弁により選択できる。各気体の流量, 及び圧力は圧力調節弁や流量調節弁を用いて調節する。実験ガス及び試験片は加熱部の電気抵抗炉を用いて所定の温度まで加熱される。本実験では, サルファアタックならびにコーキング現象の挙動や様子を検証するため, 透明な石英管(内径 20mm, 長さ 1000mm)を用いている。電気抵抗炉下流にあるサンプル採取点はガス成分のサンプルを採取するために設けている。ドラフタは実験後排ガスの回収のために設けている。ドラフタに回収された排ガスは無毒化, 無臭化され大気開放する。

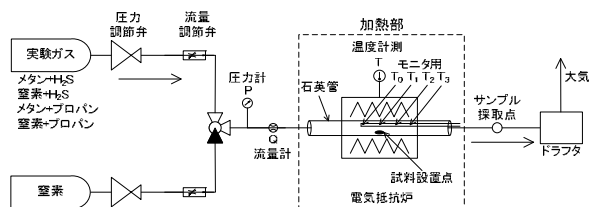


図 1 実験装置概要

2-2 実験内容及び評価

本実験では, サルファアタックならびにプロパン熱分解特性の解明のため, 実験ガスを一定温度で加熱する等温実験, および時間と共に温度上昇させる昇温実験を実施した。実験では,

電気抵抗炉下流において採取するサンプリングガス中の各ガス成分の体積割合より H₂S の減少やプロパン熱分解反応の挙動を確認する。なお, 本実験で用いたガスクロマトグラフはサルファアタック実験では炎光光度検出器を, コーキング実験では熱伝導度型検出器である。

2-3 実験条件

本実験の実験条件を表 1 に示す。表中, 昇温実験はコーキング実験では連続的に昇温し, サルファアタック実験では 50K ごとに約 15 分間等温状態にし, ステップ状に昇温している。

本実験に用いた試験片は試験片に付着した油分を取り除くため, 実験前にアセトン洗浄を施している。また, 本実験では再現性実験を実施した。LNG 中の H₂S 濃度ならびにプロパン濃度は産地により異なるが H₂S は約 1ppm, プロパンは最大で約 3%である。そこで本実験の H₂S とプロパンの混合濃度は LNG 中の濃度を考慮し, さらにサルファ分圧 (H₂S 濃度×圧力) ならびにプロパン分圧 (プロパン濃度×圧力) をエンジン作動状態 (サルファ分圧: 1.07ppm, プロパン分圧 0.98%) と合わせることを考慮し設定した。なお, 混合ガスに用いた純メタン濃度は 99.9%である。

表 1 実験条件一覧

温度 (K)	等温	600, 750 (サルファアタック) 900, 1000, 1100 (コーキング)
	昇温	常温~773 (サルファアタック) 常温~1273 (コーキング)
圧力 (MPa)	0.14~0.20	
流量 (m ³ /min)	20	
試験片材質	SMC*, OFHC, OMC**, SUS316, Inconel600(サルファアタック), SMC*, OMC**, Inconel600, Hastelloy-X(コーキング)	
実験時間	約 4800 秒保持 (等温実験) 最大で約 15000 秒 (昇温実験)	
試験片形状	長さ 10×幅 9/10×厚さ 1/2mm φ 6mm, 長さ 31mm 引張試験片 φ 10mm, 高さ 2mm 熱伝導率片	
プロパン濃度	約 1, 約 3, 約 5 (vol%)	
H ₂ S 濃度	約 0.2, 約 2, 約 10 (ppm)	
電気炉出力	約 1.5kW	

*SMC 主成分: Cu99.13%, Zr0.8%, Cr0.7%

**OMC 主成分: Cu99.12%, Zr0.1%, Cr0.7%

2-4 評価方法

本実験ではサルファアタックならびにプロパン熱分解特性評価のため、表 2 に示す分析を行い、試験片表面状態、ガス成分の特定、試験片表面の析出物の組成、サルファアタックやコーキングの深さ、実験前後の材料強度や熱伝導率を解明した。

表 2 分析内容一覧

分析方法	分析項目
概観観察	試験片概観を観察
ガスクロマト グラフィー	実験後のガス成分を特定
マクロ・ ミクロ観察	実験前後の試験片の変化を観察
電子天秤	実験前後で試験片の重量変化を調査 (0.1mg まで保証)
EPMA 分析	試験片表面の組成を解明
XRD 分析	試験片内部の結晶構造を解明 (深さ約 100 μ m まで)
ラマン分析	試験片表面の結晶構造を解明
カソード還元	硫化物の特定及びその深さを解明
引張破断試験	実験前後の材料強度の変化を解明
熱伝導率測定	析出物による熱伝導率の変化を解明

3. サルファアタック実験評価

3-1 実験結果

サルファアタック実験結果の一例として各材質を用いた昇温実験での H_2S 反応率を図 2 に示す。同図より、 H_2S は実験開始温度である約 300K においてどの材質でも反応率が 50%を超えており、約 400K 以上では 100%に達することがわかった。これより H_2S は常温より金属材料に付着しており、温度上昇と共に吸着量が増大し、約 400K 以上ではガスクロマトグラフでは検出できない濃度まで吸着しているといえる。なお、等温実験では全実験で H_2S 反応率は 100%となり、ガスクロマトグラフでは検出できない濃度まで吸着していることがわかる。

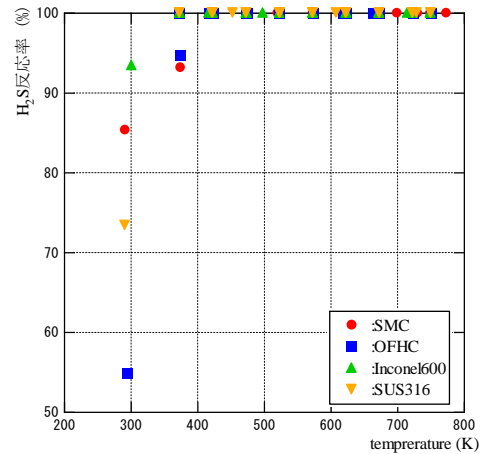


図 2 昇温実験での各材質への H_2S 反応率

3-2 分析結果

3-2-1 組成分析

サルファアタック実験の結果、硫黄成分は金属試験片へ吸着していることがわかった。そこで、試験片の表面組成を解明するため、EPMA 分析を行った。図 3 に EPMA 分析結果の一例として SMC 昇温実験 (H_2S 濃度約 10.7ppm) 後試験片への定性分析結果を示す。同図(a)は SMC 実験前、(b)は昇温実験後の組成を示す。同図より、実験前の試験片と比較して、実験後の試験片表面は元素の質量割合の変化や新たな元素の発生が見られた。特に、実験前には検出されなかった硫黄成分が実験後には検出されている。なお硫黄成分はどの材質の試験片においても検出されており、金属試験片表面への硫黄成分の付着が確認された。

次に試験片表面に確認された硫黄成分が金属試験片と結合しているかを確認するためラマン分析を行った。ラマン分析の結果、SMC、OFHC、OMC では硫化銅、SUS316 では硫化鉄、Inconel600 では硫化ニッケルが確認された。これより試験片表面に付着した硫黄成分は金属と結合し、硫化物を生成していることがわかった。ただし XRD 分析を行った結果、試験片内部構造は変化していないことがわかった。

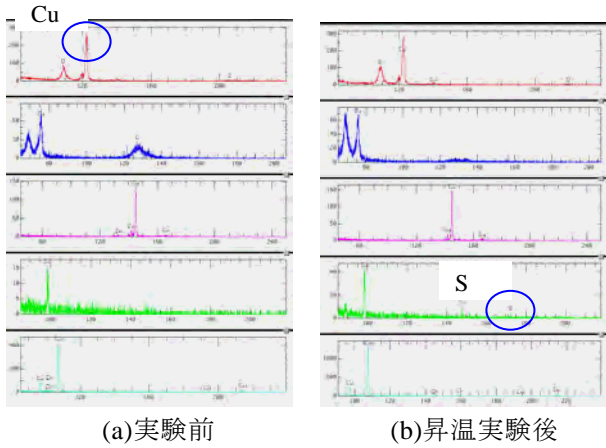


図3 EPMA分析結果 (SMC)

3-2-2 硫化物深さ分析

組成分析の結果、試験片表面への硫化物の生成が確認された。そこで硫化物の生成厚さをカソード還元により測定した。図4にカソード還元の一例としてSMC昇温実験(H₂S濃度約10.7ppm)後試験片について示す。同図横軸は反応時間、縦軸は電位である。硫化銅(Cu₂S)標準試料を分析した結果より、硫化銅(Cu₂S)の電位は-1.1~-1.2V付近であることがわかっている。しかしSMC昇温実験後試験片より得られた電位は-0.8~-1.0付近であり、硫化銅の電位を確認することが出来なかった。この原因として硫化銅が試験片の一部にのみ生成された為、生成された硫化銅厚さはカソード還元の検出限界である10nm以下であったと考えられる。

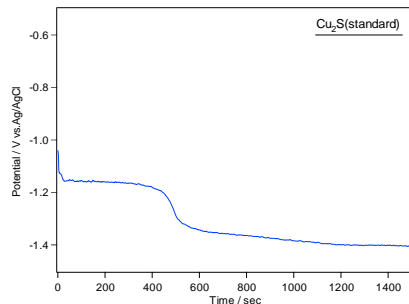


図4 カソード還元結果 (SMC 昇温実験)

3-2-3 材料強度分析

図5に各材質における引張破断試験結果を示す。同図より、実験後試験片の引張強度は実験前と比較してほとんど変化していないことがわかった。これより本実験の範囲ではH₂Sの吸着ならびに硫化物の生成による材料強度の低下がないことがわかった。

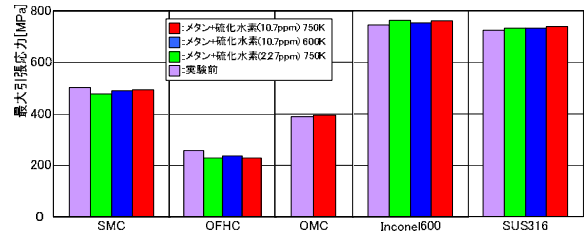


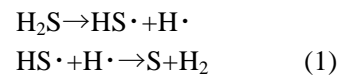
図5 引張破断試験結果

3-3 サルファアタック反応機構

サルファアタック実験ならびに分析結果を踏まえ、サルファアタック反応機構について考察を行った。サルファアタック反応機構は以下に示すように900K未満のH₂Sの吸着と900K以上でのH₂Sの熱分解反応を発端として進むと考えられる⁽³⁾。

図6に900K未満のH₂Sの吸着による反応機構を示す。同図に示すように、硫化水素の吸着による反応機構は硫化水素の吸着後、水素原子が一つずつ剥がれ水素となり、銅表面に残った硫黄と銅の化学反応により硫化銅が生成されることが考えられる。

一方、900K以上ではH₂Sは以下の式(1)で示す反応機構により熱分解反応を起こす。



ここで、H₂S熱分解反応により生成された硫黄成分は銅成分と結合し、式(2)のように硫化銅を生成する。

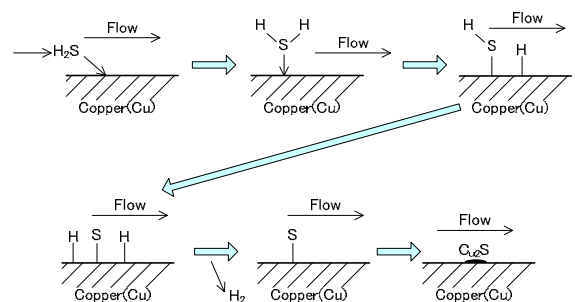
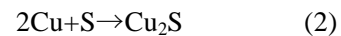


図6 H₂Sの吸着による反応機構⁽⁴⁾

4. コーキング実験評価

4-1 実験結果

図7にコーキング実験の一例として窒素+プロパン(プロパン濃度1%)混合ガスを用いた昇温実験結果を示す。同図は温度変化によるプロパン含有率の変位を表している。同図より、プロ

パン含有率はプロパン単体ならびに SMC では約 800K より、Inconel600 ならびに Hastelloy-X では約 600K より減少していることが見て取れる。また 1000K 以上ではどの実験でもプロパン含有率が 0% である。これより、プロパン単体と比較して約 200K 熱分解開始温度が低い Inconel600 や Hastelloy-X はプロパン熱分解反応に対する Ni 触媒効果が確認されたが、プロパン単体と同じ傾向を示した SMC はプロパン熱分解反応に対する触媒効果がないことがわかった。また、1000K 以上では触媒効果の有無に関らずプロパンはガスクロマトグラフでは検出できない濃度まで減少していることがわかった。

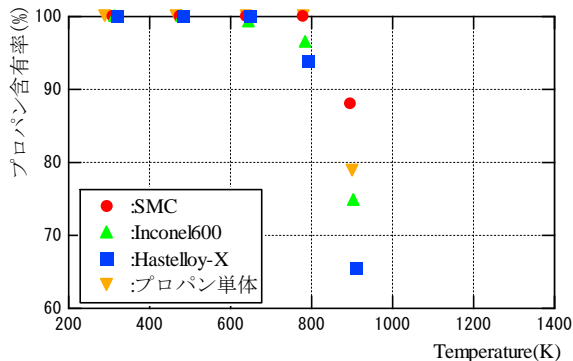


図7 昇温実験結果 (窒素と 1%プロパン)

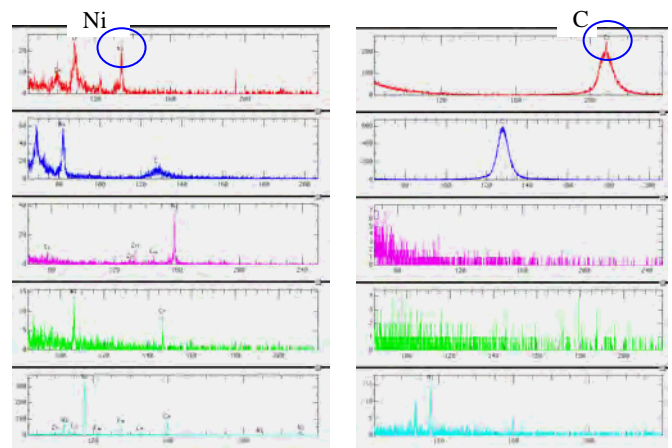
4-2 分析結果

4-2-1 組成分析

コーキング実験の結果、プロパン熱分解反応による試験片表面への析出物が確認された。そこで、析出物の組成ならびに試験片内部構造への影響を解明するため、EPMA 分析、ラマン分析、XRD 分析を行った。図 8 に EPMA 分析の一例として Inconel600 実験結果について示す。同図(a)は実験前を、(b)はメタン+5%プロパンガスを用いた 1000K 等温実験後を示す。同図より、実験前の試験片と比較して実験後の試験片表面組成が変化していることが見て取れる。特に実験前では Inconel600 の組成である Ni や Cr が検出されていたが、実験後試験片では炭素しか検出されていない。これから、プロパン熱分解反応に伴うコーキングによって試験片表面は炭素で覆われたことがわかる。この炭素成分の結晶構造はラマン分析の結果、熱分解炭素と無定形炭素が混在していることがわかった。また、XRD 分析の結果、Inconel600 試験片内部構造は実験前と比較して変化していないことがわかつ

た。これから、プロパン熱分解反応に伴うコーキングにより試験片表面は熱分解炭素または無定形炭素で覆われるが、試験片内部には影響を与えないことがわかった。なお、炭素成分の組成の違いの原因として、昇温実験では昇温中に析出した無定形炭素が 1273K まで加熱されることでその結晶構造が変化したためであると考えられる。

SMC, OMC は Inconel600 と同様の結果となったが、Hastelloy-X では試験片中の鉄成分と析出した炭素成分が結合し、炭化鉄を生成していることが確認された。これより Hastelloy-X では、コーキングは金属内部構造へ影響を与えることがわかった。この原因として Inconel600 の Fe 含有量は 5~10% なのに対して Hastelloy-X は 18% と、Fe の含有量が多いため、Fe の存在が炭素の組織内部への侵食につながるのではないのかと考えられる。



(a)実験前

(b)1000K 等温実験後

図8 EPMA 分析結果(Inconel600)

4-2-2 析出量・析出厚さ分析

組成分析の結果、試験片表面へのコーキングが確認された。そこで光学顕微鏡を用いて炭素成分の析出厚さを明らかにした。図 9 に析出厚さ測定結果例を示す。同図より、析出厚さは触媒効果のない SMC, OMC では最大で約 $10\mu\text{m}$ と小さい。一方、触媒効果のある Inconel600, Hastelloy-X ではプロパン濃度が 3% 以上で大きくなり、最大で約 $442.3\mu\text{m}$ まで達することがわかった。

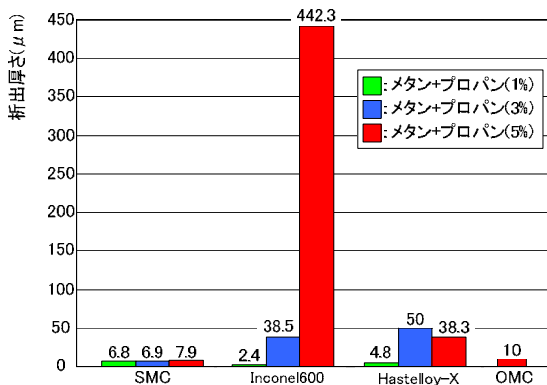
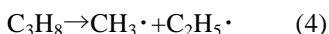
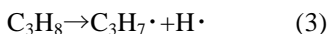


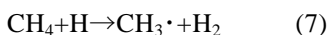
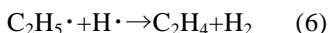
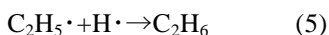
図9 析出厚さ測定結果(1000K 等温実験後)

4-3 プロパン熱分解反応機構

コーキング実験の実験ならびに分析結果より、プロパン熱分解反応機構について考察を行った。プロパン熱分解反応はまず式(3), 式(4)で示す2つの素反応により始まる。

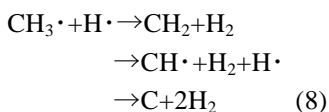


このうち、式(4)の反応は式(3)の反応と比較して結合エネルギーが低く反応速度が早いため $CH_3 \cdot$ や $C_2H_5 \cdot$ が多く生成される。また式(3)の反応も行われており、 $C_3H_7 \cdot$ や $H \cdot$ が生成される。式(3), 式(4)の反応による生成物や実験ガス中に含まれる CH_4 成分は以下に示す式(5), 式(6), 式(7)の反応を示し、分解が進むと考えられる。



このうち、式(5)はエタンの生成を、式(6)はエチレンの生成を、式(7)は $H \cdot$ が存在する環境下でのメタンの熱分解反応の促進を意味する。本試験結果ではプロパンの減少に対して水素やエチレンの増加が確認された。そのため、式(5)~(7)のうち式(6)が活発であると考えられる。また、高温側ではエタンの検出やメタンの減少が確認された。そのため、高温側では式(5)や式(7)が加速されると考えられる。

その後メチルラジカルは式(8)のような脱水素反応を繰り返して、炭素が析出される。



また、反応式(3)と反応式(4)で生成される $C_3H_7 \cdot$ や $C_2H_5 \cdot$ は式(8)と同様の脱水素反応を繰り返して、炭素が析出される。

返し、 C_3 や C_2 が析出される。これら析出物のうち、1000K 以下で確認された析出物は C_3 や C_2 が顕著であり、1000K 以上で確認された析出物は式(8)で示す C と考えている。

5. 結言

本研究では、サルファアタックならびにプロパンコーキング特性の解明のため、実験および分析を行った。実験ならびに分析の結果解明したことを以下にまとめる。

(I)サルファアタック

- (1) ガス中の H_2S は常温より金属に吸着し、本実験の流量・濃度等の範囲内では約 400K 以上においてガスクロマトグラフでは検出できない濃度まで吸着する。
- (2) 実験後試験片表面に硫黄成分が確認された。
- (3) 金属材料表面は硫化水素との結合で硫化銅, 硫化鉄, 硫化ニッケルが生成された。
- (4) 硫化物の厚さは 10nm 以下と推定される。
- (5) 本実験の範囲内ではサルファアタックによる材料強度の影響は見られない。

(II)コーキング

- (1) プロパン熱分解開始温度は触媒効果のない場合では約 800K, Ni 触媒効果がある場合は約 600K である。また、プロパン熱分解開始温度はメタン熱分解開始温度と比較して 300K 程低い。
- (2) ラマン分析の結果より、試験片表面に析出した炭素の組成は熱分解炭素と無定形炭素が混在している。
- (3) Hastelloy-X では析出した炭素と結合し、炭化鉄を生成している。
- (4) 炭素の最大析出厚さは触媒効果のない SMC, OMC では約 $10 \mu m$ であるが, Ni 触媒効果のある Inconel600, Hastelloy-X では約 $442.3 \mu m$ にも及ぶ。

以上の結果より、本実験範囲では H_2S によるサルファアタックの進行は見られないが、コーキングによる冷却溝の狭窄の可能性が示唆された。また、触媒効果によりプロパン熱分解開始温度が約 200K 低下するため、主燃焼器やノズル設計において考慮する必要がある。

ただし実機エンジン環境は高圧，高流量環境である．そのため，本実験と比較して流入する H_2S 総量やプロパン総量が多く，本実験よりも現象が進行する可能性がある．また，本実験では見られないサルファアタックによる硫化物やコーキングによる析出物が剥ぎ取られる現象が生じる可能性がある．そこで，実機エンジン環境を模擬した環境により実験を行い，現象を説明することが次の課題となっている．

参考文献

- 1) 東野和幸，杉岡正敏，小林隆夫，湊亮二郎，丸祐介，笹山容資，大塚雅也，牧野隆，坂口裕之：推進系基盤技術：LNG ロケットエンジンのコーキング特性に関する基盤研究，第 51 回宇宙科学技術連合講演会，2007 年 10 月 29-31.
- 2) K. Higashino, M. Sugioka, T. Kobayashi, R. Minato, Y. Maru, Y. Sasayama, M. Otsuka, T. Makino and H. Sakaguchi “Fundamental Study on Coking Characteristics of LNG Rocket Engines”, AIAA/SME/ASME/ASEE 44th Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 20-23, 2008, Hartford.
- 3) 杉岡正敏：硫化水素の分解による水素の回収，環境触媒ハンドブック，NTS 出版 2003，pp.952-958.
- 4) S. Rosenberg and M. Gage “Corrosion Prevention in Copper Combustion Chamber Liners of Liquid Oxygen/Methane Booster Engines”, AIAA/SME/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference, July 16-18, 1990, Orlando

ロケット燃焼室におけるニッケル電鍍特性向上に関する 基礎研究

東野和幸*¹・駒崎慎一*²・笹山容資*³・木元健一*⁴・坂口裕之*⁵・石橋利幸*⁶

Fundamental Study of Improved Nickel Electroforming for the Regenerative Rocket Chamber

Kazuyuki HIGASHINO, Shinichi KOMAZAKI, Yousuke SASAYAMA, Kenichi KIMOTO,
Hiroyuki SAKAGUCHI and Toshiyuki ISHIBASHI

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

For the regenerative cooling cycle LNG rocket engines, improvement Nickel Electroforming technology and analysis are major problem because of high reliability and low cost at the design and fabrication. This paper describes analysis methods, results and the successful improvement Nickel Electroforming of the stress and strain level at the Electron beam heat zone.

Keywords : Rocket Engine, Chamber, Nickel Electroforming

1. 緒言

ロケット用再生冷却燃焼室における主構成要素である外筒製造方法にはニッケル電鍍を用いて、内筒素材である銅合金に厚づけする方法がありシンプルなため、信頼性確保や再使用などの低コスト化などの観点から望ましい。本研究報告では電鍍の製造面から引張特性の結晶方向依存性やマニホールド装着に伴う溶接の熱影響などの課題に関して、工程改善前後の供試体に

ついて組織分析や不純物の影響評価などを詳細に実施しさらにその機構について考察をくわえたものであり今後設計及び製造時の指針になる。ここで厚づけニッケル電鍍における工程改善点は主に以下の通りである⁽¹⁾。

- (1) 電鍍厚肉における内部応力緩和
- (2) サルファ等のコンタミ成分の削減

本研究では、製造工程の異なる Ni 電鍍電子ビーム溶接継手（改善前材と 3 種類の改善材）について、それらのマイクロ組織と機械的特性を調査し、改善材における溶接継手特性向上の理由を明らかにすることを目的とした。機械的特性については、小型引張試験を室温および液体窒素温度（-196℃）にて行うとともに、スモールパンチ（SP）試験により溶接継手部における強度分布を溶融域、熱影響部、母材（健全部）にわたって調査した。また、溶接施工法の違いによる機械的特

*1 航空宇宙機システム研究センター

*2 材料物性工学科

*3 大学院博士前期課程機械システム工学専攻

*4 (株) IHI

*5 (株) IHI エアロスペース

*6 (株) NEGENT

性の変化さらには溶接性向上の要因を明らかにするため、電鍍柱状晶の結晶成長方向、結晶粒径、不純物元素（硫黄）などの影響について詳細に調査した。

2. 引張特性の異方性に関する分析内容

2. 1 分析概要

改善前材と改善材を対象にして、EBSP（後方散乱電子回折像）による電鍍柱状晶の結晶方位解析を実施した。加えて、改善前材と改善材の溶接継手（熱影響部、健全部）より切出した TEM ディスクサイズの試験片（直径 3mm、板厚 0.25mm）を用いて SP 試験を室温と液体窒素温度（-196℃）にて実施し、両材の継手強度分布を調査した。さらに、Ni 電鍍材の溶接性に及ぼす不純物の影響を調査するために、改善前材および改善材の中に含まれる不純物（硫黄）の量を調べるとともに、EPMA（電子プローブマイクロアナライザー）を用いて硫黄のマクロ分布を調査した。

以下、要約すると次の通りである。

(1) Ni 電鍍材の引張特性の異方性に関する分析

- 1) 電鍍柱状晶の成長方向の特定
- 2) 引張特性の結晶方向依存性の解明

(2) Ni 電鍍材の溶接性に及ぼす不純物の影響に関する分析

- 1) Ni 電鍍材内の不純物（特に硫黄）の含有量の計測と存在状態の調査
- 2) Ni 電鍍材内の不純物の電子ビーム溶接に及ぼす影響についての解明

2. 2 供試材および分析方法

2. 2. 1 供試体

供試材として、4 種類の Ni 電鍍材の電子ビーム（EB）溶接継手ブロック（改善前材、TP11（90°）、TP12（0°）、TP16（45°））と 1 種類の試験片を用いた。改善前材は、EB 溶接の際に割れが入った Ni 電鍍の溶接継手材である。TP11（90°）、TP12（0°）および TP16（45°）は、その後の改良により溶接性を向上させた Ni 電鍍と Inconel718 の溶接継手材であり、それぞれ電鍍面と溶融線の角度が 90°、0°、45°となるように溶接施工している。また、比較のために用いた

試験片（Cu-Ni）は、銅上にニッケルを平行に電鍍した試料である。

2. 2. 2 EBSP 分析

改善材（TP12（0°））と改善前材からの EBSP 分析用試料の切出し状況と分析面を示したものが図 2.1 である。図中の青矢印の断面に対して分析を実施しており、電鍍面（電鍍積層方向）と平行な面を分析した。分析は、Philips 製 XL-30SFEG、テクセムラボラトリーズ製を用い、加速電圧 15kV、測定エリア 90×90 μ m、測定間隔 0.3 μ m/ステップの条件で実施した。

2. 2. 3 マイクロビッカース硬さ試験

4 種類の EB 溶接継手ブロック（改善前材、TP11（90°）、TP12（0°）、TP16（45°））を用いて、溶融線に対して垂直に溶融部から健全部にかけての硬さプロファイルを測定した。測定は、板厚断面に対して、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて、荷重 10N、室温にて実施した。

2. 2. 4 スモールパンチ（SP）試験

図 2.2 に例を示すように、4 種類の EB 溶接継手ブロック（改善前材、TP11（90°）、TP12（0°）、TP16（45°））については、溶融線に対して平行になるように TEM ディスクサイズ SP 試験片（直径 3mm、板厚 0.25mm）をワイヤーカット放電加工により切出した。また、平行試験に対しては、電鍍面と平行になるよう切出した。試験片両面をバフ研磨（1 μ m Al₂O₃）にて鏡面仕上げとした後、SP 試験に供した。

SP 試験は、図 2.3 の試験治具とインストロン試験機を用い、室温および液体窒素温度（-196℃）にて実施した。液体窒素温度下での試験では、デュアー瓶の中に液体窒素を入れ、そこに治具全体を浸すことによって試験を行った。押し込み用ボールとして直径 1mm の鋼球を用い、負荷速度は 0.2mm/min とした。試験片の変形量は荷重線上変位とし、クロスヘッドの移動距離より測定した。

2. 3 実験結果

2. 3. 1 EBSP 分析結果

改善前材は直径 10 μ m 以下の比較的小さな結晶粒で構成されているのに対して、改善材例である TP12（0°）については、10 μ m 以下の小さ

な結晶粒に加えて、 $20\mu\text{m}$ 以上の比較的粗大な結晶粒も多数存在している。

改善前材および改善材 (TP12 (0°)) の結晶方位解析結果を図 2.4 に示す。TP12 (0°) では、結晶が主として[001]方向に大きく配向し成長しているのがわかる。一方、改善前材では[101]方向に配向している傾向も認められるものの、TP12 (0°) に比べランダムである。

2. 3. 2 継手の硬さプロファイル

4 種類の EB 溶接継手ブロックの硬さプロファイルを図 2.5 に例を示す。改善前材では、溶融部 (130Hv 程度) がもっとも軟らかく、熱影響部 (190Hv 程度) でもっとも硬くなっている。多少ばらつきはあるが、改善前材の健全部の硬さは 160Hv 程度である。TP11 (90°) においては、溶融部 (190Hv 程度) がもっとも硬くなっている。熱影響部についてみると、健全部 (160Hv 程度) から溶融線に向かって徐々に硬さが低下しており、もっとも低いところでは 100Hv 程度になっている。TP12 (0°) についても、定性的には同様な傾向が認められる。すなわち、溶融部の硬さ (190Hv 程度) がもっとも高く、健全部 (170Hv 程度) から溶融線に向かって徐々に硬さが低下し、もっとも低いところでは 90Hv 程度になっている。TP16 (45°) についても同様に健全部 (135Hv 程度) から溶融線に向かって徐々に硬さが低下し、もっとも低いところでは 100Hv 程度になっている。

得られた結果をまとめたものが表 2.1 である。健全部の硬さを比較すると、TP16 (45°) の硬さが他の試料に比べ低いのがわかる。また、熱影響部については、改善前材の硬さが他の試料にくらべ高くなっている。

表 2.1 ビッカース硬さ測定結果

	健全部	熱影響部 (最小値)	溶融部
改善前材	160Hv 程度	190Hv 程度	130Hv 程度
TP11 (90°)	160Hv 程度	100Hv 程度	190Hv 程度
TP12 (0°)	170Hv 程度	90Hv 程度	190Hv 程度
TP16 (45°)	135Hv 程度	100Hv 程度	—

2. 3. 3 スモールパンチ試験結果

結果は、表 2.2 に示す小型試験片を用いた引張試験の結果と定性的に良く一致していた。

改善前材においては、溶接時もしくは電鍍時に形成されたと思われる欠陥のところに割れが発生している。熱影響部では、各試料とも試験片中央付近かもしくはそこからわずかに外れた箇所にてマクロな割れが発生し、同様な破壊形態は健全部においても観察された。一方、強度および延性ともに優れていた -196°C の試験片では、中心から 0.3mm 程度離れた相当応力あるいは相当ひずみが集中する円周に沿って割れが生じており、典型的な延性材料の破壊形態を呈していた。なお、破面は、試料、試験片採取位置、試験温度にあまり依存せず、粒内延性破壊を呈していた。各試験片のマクロな割れ発生箇所をまとめ整理したものが表 2.3 である。

各試料で得られた最大荷重 P_{max} 、降伏荷重 P_y 、破断変位 δ_f を試験片採取位置に対してプロットしたものを図 2.6 に示す。 P_{max} 、 P_y 、 δ_f は、それぞれ引張強度、降伏強度、破断延性に対応することが知られている。改善前材のみの結果をみると、硬度が高かった熱影響部において δ_f が小さく延性に乏しいのがわかる。TP11 (90°) については、硬度が低かった熱影響部から健全部に向かって P_{max} と P_y が徐々に増加していく傾向があり、それとは逆に δ_f は少しずつ小さくなっている。TP12 (0°) についても、硬度が低かった熱影響部から健全部に向かって P_{max} と P_y が徐々に増加していく傾向がある。同様に、TP16 (45°) についても、硬度が低かった熱影響部から健全部に向かって P_{max} が徐々に増加していき、それとは逆に δ_f は小さくなっている。このように、一部例外はあるものの、SP 試験特性のプロファイルはビッカース硬さのそれと定性的に良く整合していた。

表 2.2 小型試験片による Ni 電鍍の室温および -196°C での引張試験結果

	引張強度, MPa	破断伸び, %
室温	412~420	25.5~31.3
-196°C	500~505	30.5~32.6

表 2.3 各試験片の割れ発生箇所

	改善前材	TP11(90°)	TP12(0°)	TP16(45°)
室温 熱影響部	中心より少し外れた所	中心	中心より少し外れた所	中心より少し外れた所
室温 健全部	中心より少し外れた所	中心	中心	中心より少し外れた所
-196℃ 健全部	0.3mm 円周上	0.3mm 円周上	0.3mm 円周上	0.3mm 円周上

2. 4 考察

改善材 (TP11 (90°), TP12 (0°), TP16 (45°)) の EB 溶接継手の引張強度が 45°方向の引張でもっとも高くなるのは, 電鍍結晶が[001]方向に大きく配向し成長しているためである. このことは, 表 2.4 に示す Ni 基超合金単結晶例の弾性係数および機械的特性の方位依存性からもわかる. この場合, [001]の弾性係数と引張強度がもっとも低く, $\bar{1}\bar{1}1$ でそれらが高くなる. すなわち, 今回用いた Ni 電鍍 EB 溶接継手の場合も, 引張方向が 90°と 0°での試験は引張強度が低い方向での試験となるため, TP11 (90°) と TP12 (0°) の引張強度が TP16 (45°) に比べ低下することとなる. また, TP16 (45°) の破断伸びが TP11 (90°) および TP12 (0°) に比べ大きいのも, この引張方位依存性のためである.

TP11 (90°) と TP12 (0°) の引張試験においては, 相対的に強度の低い電鍍部で破断する. それに対して, TP16 (45°) は電鍍の強度そのものが比較的高いため, 相対的に低強度である接合部にて破断することになる. ビッカース硬さおよび SP 試験のプロファイル測定の結果を考慮すると, 強度が比較的低かった熱影響部が TP16 (45°) における破断の起点になっているものと想像される.

引張試験結果とは異なり, SP 試験では TP16 (45°) の強度が TP11 (90°) と TP12 (0°) に比べ低い傾向があった (図 2.6). これは, 引張試験での引張方位と SP 試験において応力が作用する方位が異なるのに加え, SP 試験では応力が多軸状態になっているためであると思われる.

表 2.4 Ni 基超合金 ReneN-4 単結晶の機械的特性 (980℃) ⁽²⁾

	0.2%耐力, MPa	引張強度, MPa	伸び, %	絞り, %
[001]	416	573	28.8	41.2
$\bar{1}\bar{1}1$	523	653	36.6	34.8

3. Ni電鍍材の溶接性に及ぼす不純物の影響に関する分析内容

改善前材および改善材の中に含まれる不純物 (硫黄) の量を調べるとともに, EPMA (電子プローブマイクロアナライザー) を用いて硫黄のマクロ分布を調査した.

3. 1 供試材および実験方法

3. 1. 1 硫黄含有量の測定

硫黄の含有量は, 試料を助燃剤とともに溶融し SO₂として硫黄を検出する燃焼赤外線吸収法 (公称検出限界3ppm) によって測定した. 測定は2回実施した.

3. 1. 2 EPMA分析

溶融線近傍, 熱影響部近傍, 健全部の3箇所に対してそれぞれ行った. 分析は日本電子製JXA-8100を用い, 加速電圧20kV, 照射電流500nAの条件のもと実施した.

3. 2 実験結果

測定された硫黄含有量を表3.1に示す. 同表からわかるように, TP12 (0°) では硫黄含有量は検出限界 (3ppm) 以下であったのに対して, 改善前材では260~270ppm も含まれていた.

表3.1 各試料の硫黄含有量測定結果

	1回目	2回目
改善前材	270ppm	260ppm
TP12(0°)	検出限界以下	(2ppm)

3. 3 EPMA分析結果

TP12 (0°) においては, 硫黄の濃化はいずれの領域においても観察されなかった. 一方, 改善前材の溶融線および熱影響部の近傍では硫黄のマクロ偏析が認められ, 偏析箇所に沿って巨視き裂が発生していた. なお, 改善前材の健全部において

は硫黄のマクロ偏析は観察されなかった。

参考文献

3. 4 考察

硫黄含有量測定とEPMA分析の結果より、改善前材の溶接性が劣るのは不純物である硫黄の含有量が多いためであることが示唆された。逆に、硫黄含有量を3ppm以下に減らすことが、溶接性改善に大きくつながることがわかった。ニッケル中の硫黄の最大固溶量は50ppmであり、過飽和の硫黄が含まれていると645℃で硫化ニッケル

(Ni₃S₂) が共晶反応によって析出する。共晶温度よりも十分低い温度においては、この硫黄によって粒界強度が低下し脆化することが知られている。上述したように、改善前材には固溶限以上の260~270ppmもの硫黄が含まれており、硫化ニッケルとして析出した硫黄が溶接性に悪影響を及ぼしているものと推測される。なお、3ppm以下と硫黄含有量が固溶限以下であった改善材

(TP12 (0°)) では、硫化ニッケルは析出しないものと思われる。改善前材の熱影響部において硬度が高く比較的延性に乏しいのが硫黄あるいは硫化ニッケルに起因しているのか否かについては現時点ではわからないが、このような延性低下も溶接性に劣る原因のひとつと考えている。

4. まとめ

改善材 (TP11 (90°), TP12 (0°), TP16 (45°)) の EB 溶接継手の引張強度が 45°方向の引張でもっとも高くなるのは、電鍍結晶が[001]方向に大きく配向し成長しているためである。今後、Ni 電鍍の機械的特性を調査する際には、その異方性に十分注意する必要がある。また、硬度が比較的高かった改善前材の熱影響部は、SP 試験での破断変位 δ_f が小さく、延性に乏しいことがわかった。

改善後について、溶接構造における強度、伸びの向上が図れ、設計製造上のシンプル性からくる信頼性確保や長寿命化等に大きく寄与できる見通しが得られた。

謝辞

本研究の実施にあたっては、室蘭工業大学大学院材料物性工学専攻 1 年・加藤太一朗君、同材料物性工学科 4 年・寺田忠平君の多大な協力を得た。ここに付記して、謝意を表す。

- 1) H. Sakaguchi, T. Makino and T. Ishibasi “Advanced Nichel Electroforming Technology for The Regenerative Thrust Chamber of the Rocket Engines”, AJCPP2008, Mar 6-8, 2008.
- 2) R. V. Miner, R. C. Voigt, J. Gayda, and T. P. Gabb. , Metallurgical Transactions A, Vol. 17A, 1986, p.491.

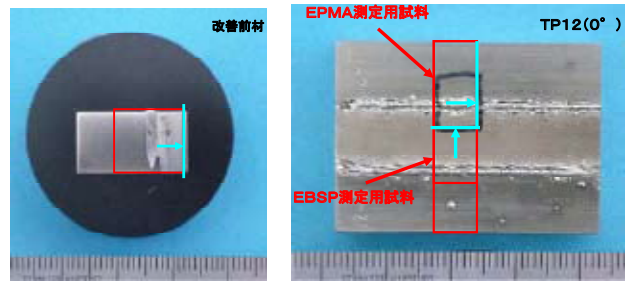


図 2.1 分析用試料の切出し状況と分析面

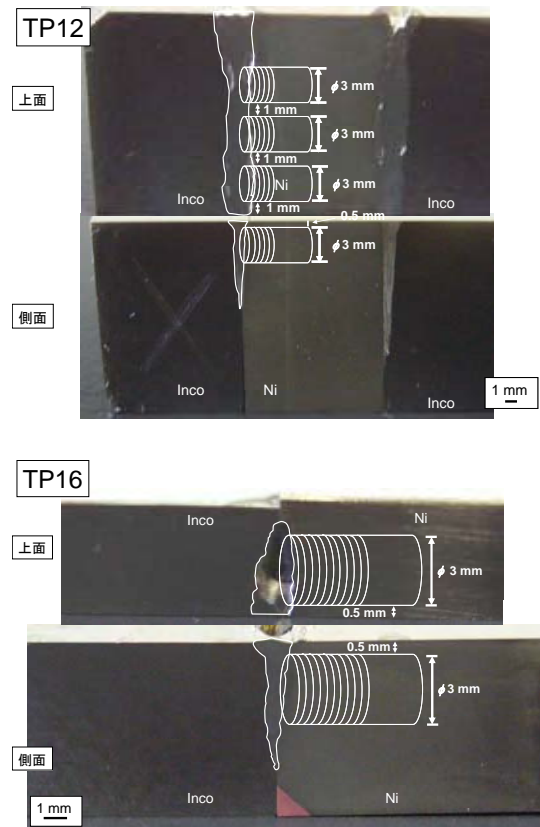


図 2.2 TP12 (0°) と TP16 (45°) の TEM ディスクサイズ SP 試験片の切出し例

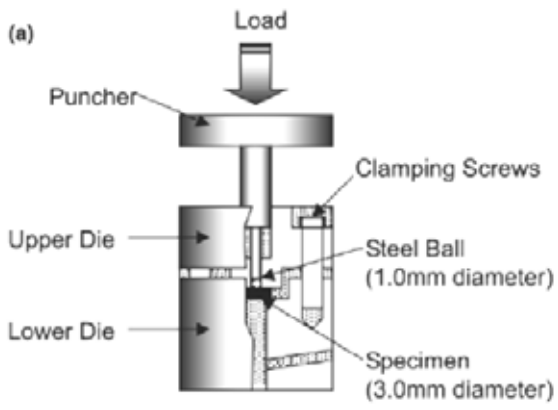
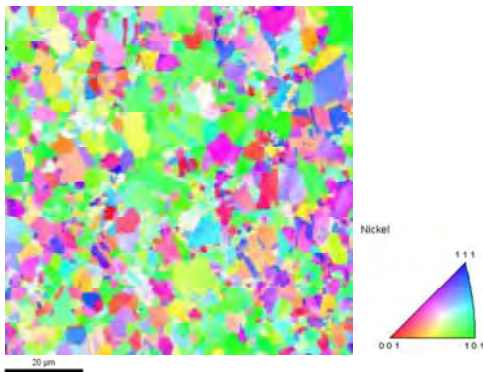
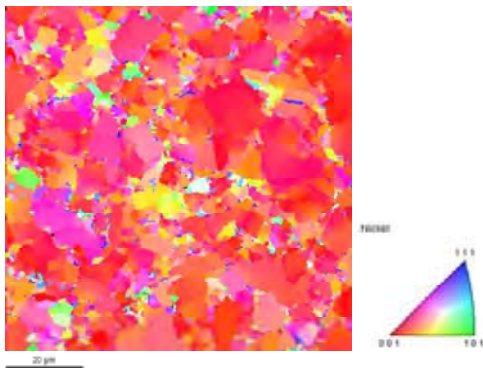


図 2.3 SP 試験治具とインストロン試験機

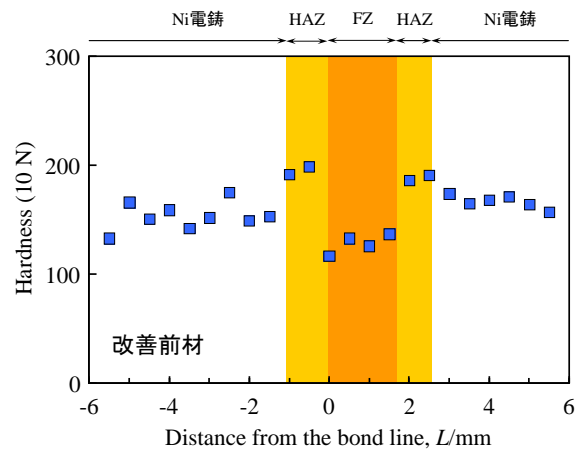


改善前材

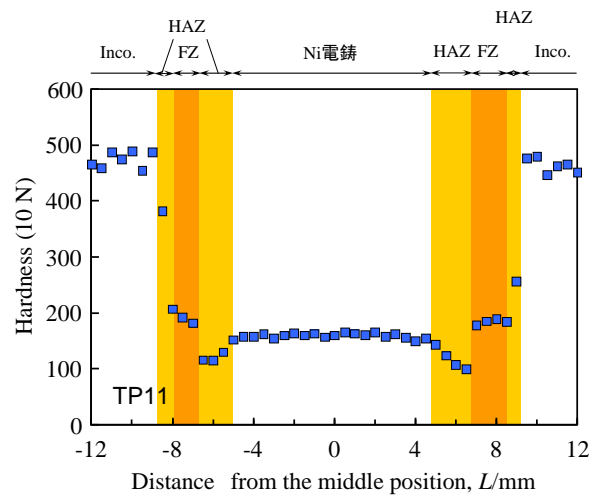


TP12 (0°)

図 2.4 結晶方位解析結果

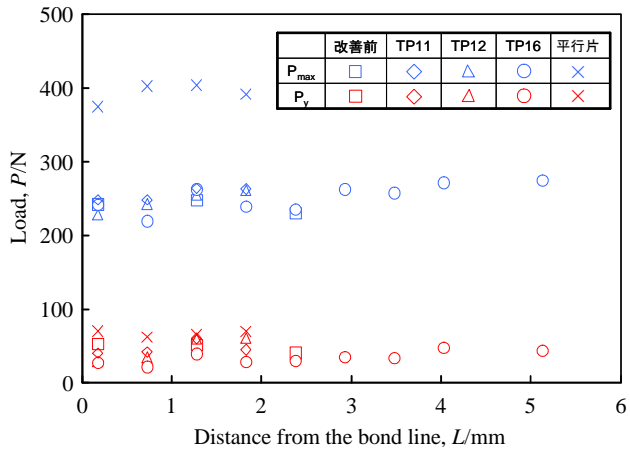


改善前材

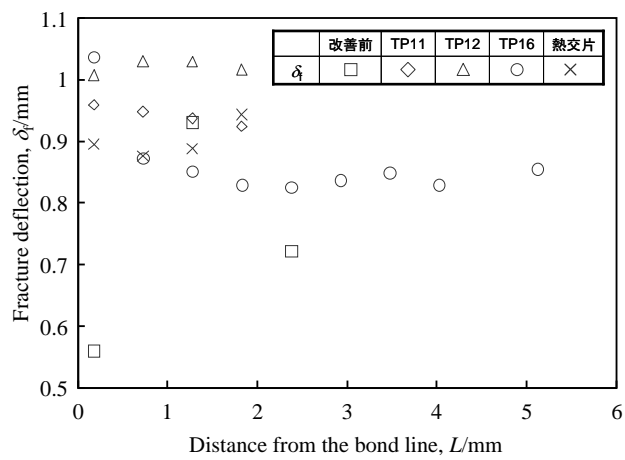


TP11 (90°)

図 2.5 改善前材と TP11 (90°) の硬さプロファイル例



最大加重 P_{max} , 降伏荷重 P_y



破断変位 δ_f

図 2.6 各試料の最大加重 P_{max} , 降伏荷重 P_y
破断変位 δ_f

熱分解吸熱反応燃料に関する研究

高橋将人^{*1}, 磯田浩志^{*2}, 棚次亘弘^{*3}, 東野和幸^{*3}, 湊亮二郎^{*4}

Study on Endothermic Fuel

Masahito TAKAHASHI, Hiroshi ISODA

Nobuhiro TANATSUGU, Kazuyuki HIGASHINO, Ryojiro MINATO

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

This study focuses to the heat absorption measurement of Endothermic Fuel (EF). From the view point of the easy operation, the methanol is chosen as the EF with lower endothermic reaction temperature. The endothermic reaction of methanol is caused at about 573 K by using a nickel catalyst. The experimental apparatus was verified first by water as a working fluid before the experiment using the methanol. The characteristics of the experimental apparatus such as the heat transfer and the pressure loss were obtained by the pre-experiment by using water, although the endothermic reaction is not taken in account at the water experiment. It was made it clear that the heat transfer coefficient of main heater was laid within 80 ~ 120 % of the analytical value by using water. It can be concluded from the pre-experiment using water that the temperature. In addition, the improvement of the experimental apparatus is proposed for the experiment of the methanol.

Keywords : Endothermic Fuel, Endothermic reaction, Heat Absorption Measurement, Methanol

1. 諸言

次世代の完全再使用型宇宙往還機には空気吸込み式エンジンの搭載が計画されており, その燃料として液体水素の利用が注目されている. 液体水素は約 20 K の極低温燃料であること, 比熱が大きいことから冷却としての能力に優れている. しか

し, 極低温, 低密度であるがゆえに貯蔵・運搬など取扱に難点がある.

一方, 熱分解吸熱反応燃料 (Endothermic Fuel ; EF) と呼ばれる炭化水素系燃料は常温燃料でありながら, 700 K 以上の高温環境下で熱分解吸熱反応を示すことが知られている^{(1) (2)}. この熱分解吸熱反応を有する EF を冷媒として利用する再生冷却システムは重要な基盤技術として位置づけられている. しかし, 1)炭化水素の熱分解機構の多くが未解明であり, 吸熱量の定量的な評価が困難であること, 2)熱分解反応によって炭素が析出し燃料の供給や吸熱伝熱特性に悪影響を及ぼすことなどが問

*1 大学院博士前期課程機械システム工学専攻, 現 (株) TAIYO

*2 大学院博士前期課程航空宇宙システム工学専攻

*3 航空宇宙機システム研究センター

*4 機械システム工学科

題として挙げられる^[3].

本研究ではNi触媒のもと約500 Kで熱分解が起こるメタノールを供試液とし^[4], その定量的な吸熱量を測定できる装置を設計・製作する. そこでまず, メタノールを使用する前に水を用いて実験を行い, 得られたデータからメタノールに熱分解がないとした場合の推算を行う.

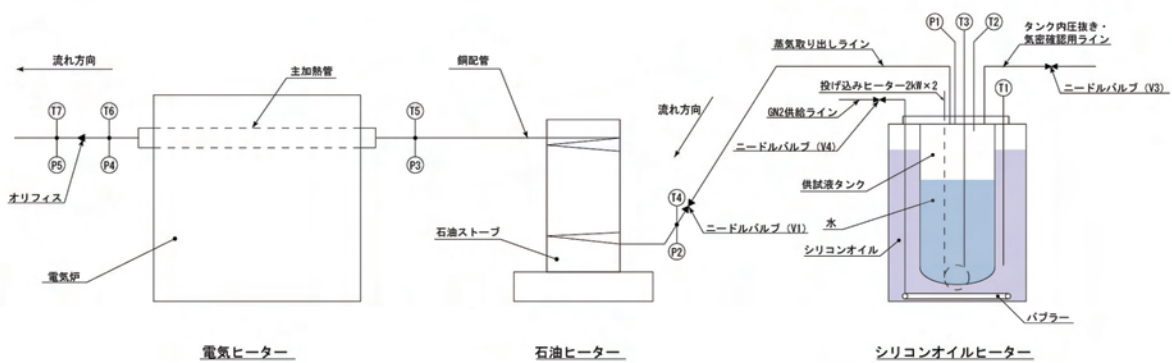
また本論文では, 現在進めているメチルシクロヘキサンを用いた研究についての展望をまとめる.

2. 概要

2.1 実験装置

図2-1の(a)に示す概略図では, 上流側からシリコンオイルヒーター, 石油ヒーター, 電気炉と

なっている. シリコンオイルヒーター内のシリコンオイルタンクに投入している投げ込みヒーター(八光製 BAB1220)は, シーケンサ(キーエンス製 KV-1000)によって設定温度に対してON/OFF制御を行う. また石油ヒーターは, CORONA製 GH-B170F(暖房出力17.4 kW)の石油ストーブと銅配管(石油ストーブ周りの長さ12260 mm, 入口直線部300 mm, 出口直線部320 mm, 計12880 mm)から構成されている. 次に電気ヒーターは光洋サーモシステム製 KTF-050N1を用いている. また主加熱管は, 半径方向に熱電対(チノー製 K型シース熱電対)を挿入することにより, 主加熱管の外側と内側の温度をそれぞれ軸方向に5点ずつ計測できるようになっている.



(a) 実験装置概略



(b) 電気ヒーター



(c) 石油ヒーター



(d) シリコンオイルヒーター

図2-1 実験装置

この計測した温度により式(1)を用いて熱伝達率 α を求める.

$$\alpha = \frac{Q}{(T_{iw} - T_c)\pi dL} \quad (1)$$

また, 理論的に求められる熱伝達率は, 乱流の場合 Dittus-Boelter の式を用いて下記のように表すことができる.

$$\alpha = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda_f}{d} \quad (2)$$

また, その下流に設置したオリフィスによってチョークさせることにより式(3)よりチョーク流量を求める.

$$\dot{m} = \frac{pA_{orifice}}{\sqrt{RT}} c\sigma * \Gamma \quad (3)$$

2.2 解析条件

オリフィスを用いたチョーク流量を算出する際の流量係数は、オリフィス孔の径とオリフィス孔設けた継手の径の比が 0.2~0.4 の範囲にあることと、実際のロケットに使用されているオリフィス形状と同じであり、その際の流量係数が 0.6 であることから式 (3) の流量係数は 0.6 とする。

主加熱管の入口出口温度として、主加熱管端面から 103 mm にある位置の温度とする。また、伝熱区間は主加熱管内外壁温度を計測している区間 (450 mm) と定義する。実際に得られたデータはオリフィスでチョークし、且つ安定している点で評価する。

メタノールを用いる場合の検証・推算は、水を用いる実験により得られる補正係数を用い、各ヒーターでメタノールを加熱することができるか検証する。また、流量をパラメータとし、熱量との関係や主加熱管出口温度について推算する。さらに、主加熱管の出口温度を推算する際に必要な熱量は、主加熱管の目標入口出口温度でのエンタルピ差に流量をかけた値を用いる。

2.3 実験結果及び解析結果

水を用いた場合の実験結果を表 2-1 に示す。

水を用いた実験では、供試液タンク内の圧力は約 350 kPaA となった。そこで、メタノールでの推算を行う際には、メタノールも蒸気圧が約 350 kPaA となる 373.15 K とする。また、図 2-2 にメタノールを用いる場合の推算結果の代表的なものを示す。

2.4 メタノールの場合の推算結果

シリコンオイルヒーターでは、メタノールを 370 K 程度まで加熱することを想定する。水を用いる実験では、シリコンオイルの温度を 410 K まで加熱することで、水を 410 K まで加熱しているため、メタノールの目標温度が 370 K であることから、シリコンオイルヒーターの有用性があるといえる。

次に石油ヒーターは、370 K のメタノール蒸気を 570 K まで加熱することを想定する。水を用いた実験でのエンタルピ差とメタノールの目標温度に対するエンタルピ差を比較すると、水の場合のエンタルピ差とメタノールのエンタルピ差はほぼ同程度であることがわかる。そのため、石油ヒーターを用いてメタノール蒸気を 370 K から 570 K まで加熱することは可能であると言える。

電気炉については、570 K から 620 K まで加熱することを想定する。そこで図 2-2 に示す熱量と流量の関係から、水を用いて行った実験より得られる補正係数を用いることで、メタノールを目標温度まで上昇させるために必要な熱量を水を用いた場合と比較すると、補正係数が 2.7 の場合に水を用いた実験と同程度になっていることがわかる。また、補正係数は 2.7 で最大であることから、メタノールを目標とする 620 K まで加熱することは可能であるといえる。

図 2-3 に電気炉設定温度を 600 °C とした場合のメタノール蒸気の主加熱管出口温度を推算した結果を示す。図 2-3 より流量が増加するにしたがって出口温度が減少することがわかる。また、主加熱管出口温度を 620 K とするためには、電気炉設定温度が 500 °C の場合に約 0.6 g/s、550 °C の場合に約 1.5 g/s、600 °C の場合に約 3.0 g/s の流量とすれば良いことがわかる。このことから電気炉設置温度は流量を増加することで出口温度は減少し、目標とする出口温度に対して適切な流量であるといえる。次に主加熱管内の温度差は、流量が増加するにしたがって直線的に増加する。ここで、主加熱管内の温度差を 5 K とする場合には、約 1.2~3.2 g/s の流量をすると良いといえる。

3. 結言

熱分解反応を伴う吸熱量の測定を目的とし、熱分解温度の低いメタノールの利用を想定した。まず水を用いて実験を行い、熱伝達率等の補正係数を求めた。その結果、流量はオリフィス径が 2 mm の場合約 0.4 g/s、オリフィス径が 3 mm の場合、約 0.9 g/s、オリフィス径が 4 mm の場合では約 1.8 g/s の流量を実現することが示された。熱伝達率については図 3-1 に示すように、実験値は解析値に比べ約 80~120 % の値を示すことが示され、伝熱量の補正係数は 0.84、主加熱管出口温度の補正係数は 1.5~2.7 になることが示された。また、水を用いた実験装置はメタノールを用いた場合でも有用であることが示された。

4. 今後の展望

2009 年、アメリカ空軍と NASA において研究開発されている Endothermic 効果を利用した X-51 機が初飛行を迎える。航空宇宙機システム研究セン

ターとしても現在, JP-7 の組成の 2~3 割を占めるメチルシクロヘキサンを研究対象とし, その冷却特性を把握すべく, パルス式反応装置や少流量実験装置を用いて, 熱分解特性や数値解析を進めている。

ここで, 現在までのメチルシクロヘキサンの研究の成果について記述する。

メチルシクロヘキサンは脱水素反応の場合, 液化メタンや他の EF よりも総吸熱量ははるかに高い値を示すことがわかっており, 私共も熱分解による吸熱量の測定だけではなく, 脱水素反応による吸熱量の測定を試みようとしている。

まず, メチルシクロヘキサンの熱分解反応の特性を把握するために触媒が無い状態で実験を行った。実験ではガラス管を用いて行ったため, ガラス管の限界温度, 約 550 °C では反応させるまでには至らなかった。そこで, ステンレス管を用いて実験を行った結果, メチルシクロヘキサンは約 600 °C で熱分解がはじまり, 約 700 °C までは (C1~C6 等の直鎖状炭化水素) へと結合が切れる分解反応を示すが, 750 °C の温度で加熱すると, 低級炭化水素への熱分解とは別に, 脱水素反応も起こ

ることがわかった。

次にニッケル触媒を用いて実験を行った。その結果, 低い温度から低級炭化水素へと熱分解する反応を活性化させることがわかった。

研究し始めの当初はニッケル触媒を用いることで, メチルシクロヘキサンは脱水素反応を起こすだろうとにらんでいたが起こらなかった。今後は他の金属触媒 (白金等) を用いて脱水素反応を試みる予定である。

5. 参考文献

- (1) He Huang, Louis J. Spadaccini, David R. Sobel, "Fuel-Cooled Thermal Management for Advanced Aeroengines", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, APRIL 2004, Vol.126
- (2) D.H.Petley, S.C.Jones, "Thermal Management for a Mach 5 Cruise Aircraft Using Endothermic Fuel", Journal of Aircraft, Vol.29, No.3, pp.384-389, May-June, 1992.
- (3) L.S.Ianovski, V.A.Sosounov, Yu.M.ShinkHman, "The Application of Endothermic Fuels for High Speed Propulsion Systems", Aiaa paper, ISABE 97-7007, 1997.
- (4) 高活性なメタノール分解触媒の開発, <http://www.techno-qanda.net/dsweb/Get/Document-4941/420901.PDF>, 産業技術総合研究所, 合成化学研究室

表 2-1 水を用いた場合の解析結果

		1	2	3	4	5	6
\dot{m} [g/s]	Exp.	-	0.46	0.39	0.40	0.89	1.76
Q [W]	Exp.	112.96	104.31	115.75	109.84	277.40	485.25
Modification coeff.		-	2.53	2.51	1.45	2.58	2.67
Modification coeff. of T_6		-	0.86	0.82	0.82	0.84	0.85
α	Exp.	-	63.06	51.46	39.37	113.57	202.23
[W/m ² K]	Analysis	-	59.21	50.60	52.01	100.5	173.44
Modification coeff.		-	1.07	1.02	0.76	1.13	1.17

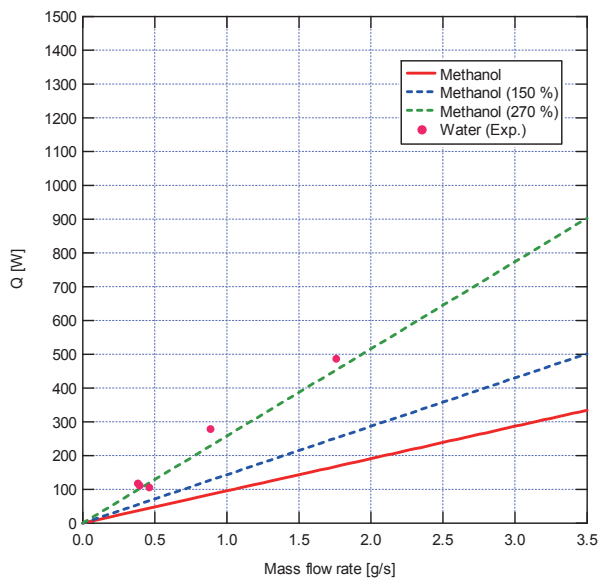


図 2-2 熱量と流量の関係.

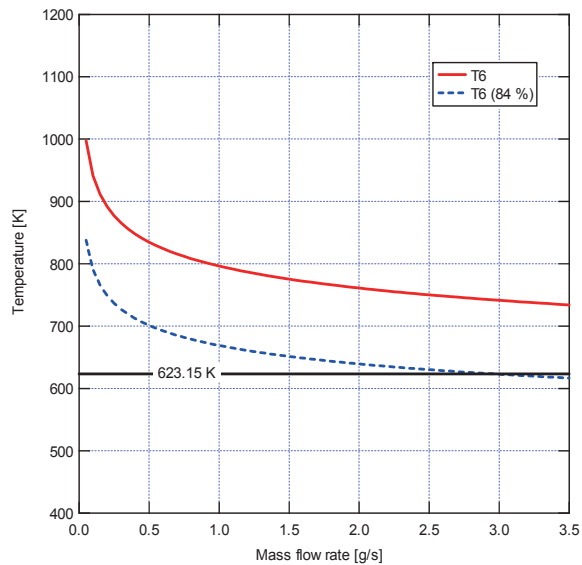


図 2-3 主加熱管出口温度と流量の関係

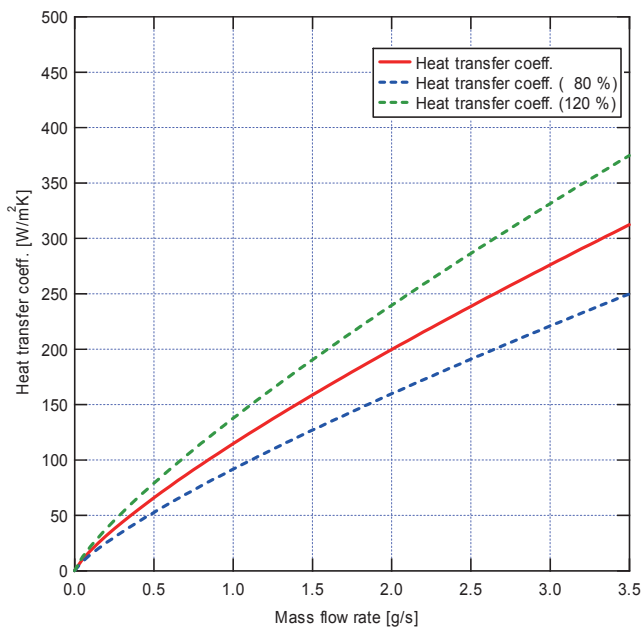


図 3-1 熱伝達率の推算結果

小型超音速飛行実験機の空力特性

溝端 一秀*¹, 羽田 尚太*², 工藤 摩耶*³, 笹山 容資*⁴, 桑田 耕明*⁵,
丸 祐介*⁶, 湊 亮二郎*¹, 棚次 亘弘*⁷, 新井 隆景*⁸, 坪井 伸幸*⁹

Aerodynamic Characteristics of a Small Scale Supersonic Flight Experiment Vehicle

Kazuhide MIZOBATA, Syota HADA, Maya KUDO, Yousuke SASAYAMA, Koumei KUWADA,
Yusuke MARU, Ryojiro MINATO, Nobuhiro TANATSUGU, Takakage ARAI

and

Nobuyuki TSUBOI

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

Extensive and intensive studies are being carried out for creation of innovative fundamental technologies for realization of hypersonic aircraft and reusable space transportation systems. In the course of the studies, a small scale flight experimental vehicle is under development for validation of the technologies in real high-speed flight environments. The aerodynamic characteristics of the overall configuration of the vehicle are measured by wind tunnel tests at Mach numbers ranging from 0.3 to 2.0. The lift, drag, and pitching trim characteristics are evaluated and assessed in detail.

Keywords: Supersonic, Aerodynamics, Lift, Drag, Pitching Moment, Trim

1 緒言

大陸間の高速航空輸送および地球軌道への再使用宇宙輸送を革新することを目指して、室蘭工業大学を中心として他機関の研究者の協力を得つつ、関連する基盤技術の研究を進めている⁽¹⁾。研究

された基盤技術を、小規模ながらも機体システムやエンジンシステムに搭載して、高速飛行環境においてその機能・性能を実証する計画である。このためのフライングテストベッドとして、全長 3m 程度の小型超音速飛行実験機（無人飛行機）の開発研究を進めている。

超音速航空機の開発のためには、亜音速から遷音速を経て超音速に至る広範な飛行速度について、総合的かつ詳細な空気力学的知見を必要とする。しかも、揚力、抗力だけでなく、ピッチング（縦揺れ）、ローリング（横揺れ）、およびヨーイング（偏揺れ）に関する各種の安定微係数を推定する必要がある。一般に、二次元翼、細長物体、等の単純形状物体に関する理論的な空力的知見は良く知られているが、空気力学の本質的非線形性ゆえに、実際の航空機の全機空気特性は、単純形

*1 機械システム工学科

*2 大学院博士前期課程機械システム工学専攻, 現 (株) IHI

*3 大学院博士前期課程機械システム工学専攻, 現札幌市

*4 大学院博士前期課程機械システム工学専攻

*5 大学院博士前期課程航空宇宙システム工学専攻

*6 航空宇宙機システム研究センター, 現 (独) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

*7 航空宇宙機システム研究センター

*8 大阪府立大学

*9 (独) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

状物体の空力特性を足し合わせるだけでは推定し難い。従って、理論に基づく演繹的研究だけでなく、実際の種々の全機形状について空力特性を詳細に調べることを積み重ねる帰納的な研究が必須である。

しかるに、これまで我が国では、飛行実験機ならびに実用機の両面において超音速航空機の開発機会がほとんど無かったため、航空機設計に必要な遷音速および超音速の全機空力の研究が極めて少ない。一方、米国および欧州では、第二次世界大戦の頃から研究が進められ膨大な知見が蓄積されている。その一部は DATCOM⁽²⁾ として公表されているが、空力特性の定性的傾向を見る程度の精度しか備えて居らず、実際の航空機設計に必要な水準の知見は国策上一貫して秘匿されている。我が国が将来大陸間的高速航空輸送および地球軌道への再使用宇宙輸送に関して技術的に重要な地位を得るためには、上述のような実際的な空力研究を早急に推進することが肝要である。

そこで、本研究は、上述の小型超音速飛行実験機をケーススタディとして、実際の超音速航空機の亜音速から超音速までの広範な速度領域における全機空力特性を明らかにする事を目的とする。超音速域までの加速性が期待できる双発・高翼の機体形状を選び、マッハ 0.3~2.0 の範囲の風洞試験（風試）によって全機空力特性を評価する。空力特性の項目としては、本稿では、最も重要な揚力、抗力、およびピッチングモーメントの3つを取り扱う。

以下、第2節では機体の空力形状の設計内容を概説する。第3節では風洞試験の概略を述べる。第4節では風洞試験の結果を詳述する。第5節は結論である。

2 機体の空力設計

2.1 全機空力形状の設計指針

小型超音速飛行実験機に搭載して実証される基盤技術は多岐に渡ることが予想されるため、飛行実験機は多様な飛行プロファイルに対応可能であることが望ましい。当面は Fig. 1 のような、滑走離陸、自力上昇・加速、超音速巡航、減速・降下、着陸アプローチ、および着陸滑走からなる飛行プロファイルを想定している。

この飛行プロファイルの実現を目指して種々の空力形状を考案し、風試によってその空力特性を

把握した。その結果、超音速域までの加速性が期待できる双発・高翼のM2006形状を当面のベースライン形状に選定した^(3, 4)。その特徴をTable 1に、概観をFig. 2に示す。また、実機と風試模型の寸法をTable 2に示す。

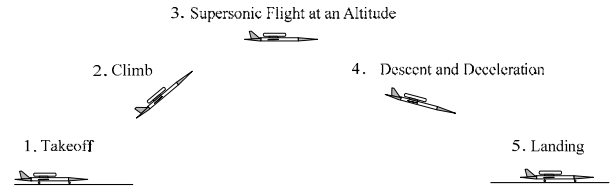


Fig. 1. The tentative plan of the flight profile of a small-scale supersonic experimental vehicle.

Table 1. The design concept of the M2006 configuration.

項目	設計内容	目的・効果
エンジン数	2基	推力の増強。
エンジンの搭載位置	胴体両脇	燃料搭載スペースの確保。 片肺時の偏揺れを低減。
翼平面形	クランクト・アロー	安定な縦渦による剥離特性の改善と揚力増強。 造波抗力の低減。
翼型	ダイヤモンド翼型	造波抗力の低減。
翼胴配置	高翼式	横揺れ安定性の確保。

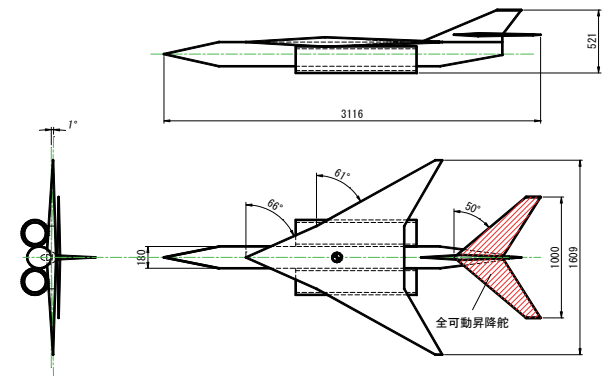


Fig. 2. The overview of the M2006 configuration.

Table 2. Dimensions of the M2006 configuration.

	Wind tunnel test model	Real configuration
Scale	1/5.7	1/1
Length [m]	0.55	3.12
Wing Span [m]	0.28	1.61
Wing Area [m ²]	0.03	0.96
MAC [m]	0.14	0.80
Sweep-back Angle [deg.]	66, 61	

2. 2 昇降舵

飛行プロファイルの全域において、ピッチングのトリムと静安定を確保することが必要である。そのため、小さな舵角で大きなピッチングモーメントを稼ぐことの可能な全可動式水平尾翼を採用する。この水平尾翼の諸元を Table 3 に示す。

Table 3. Dimensions of the all-moving horizontal tail.

Area [m ²]	0.26
Moment arm [m]	1.20
Volumetric coefficient	0.40
Sweep-back angle [deg.]	50

2. 3 昇降舵の役割

ある機体の重心まわりのピッチングモーメント曲線の一例を Fig. 3 に示す。図のように曲線の傾き $dC_M/d\alpha$ が負であればピッチングの静安定性は保たれている。さらに、機体を定常飛行させるためにはピッチングモーメント係数 C_M が 0 である必要がある。この例では、昇降舵の舵角 $\delta=0^\circ$ の場合は迎角 0° でのみ定常飛行が可能である。ここで舵角を変化させると水平尾翼の揚力が増減し、ピッチングモーメント曲線は上または下に平行移動する。これによって $C_M=0$ を満たす迎角が変わる。このようにして、昇降舵の操作によって、定常飛行できる迎角の範囲を広げることができる。迎角は、種々の飛行速度において定常飛行を実現するために設定されるものであるから、昇降舵の操作によって、定常飛行できる飛行速度の範囲を広げることができる。

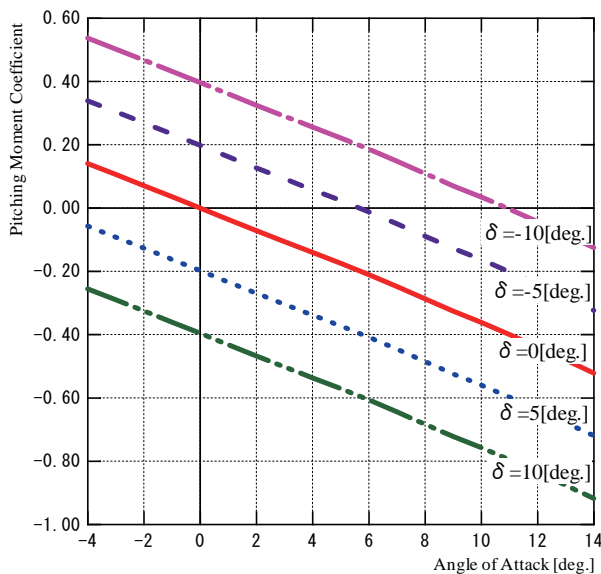


Fig. 3. A typical curve of pitching moment coefficient vs. angle of attack.

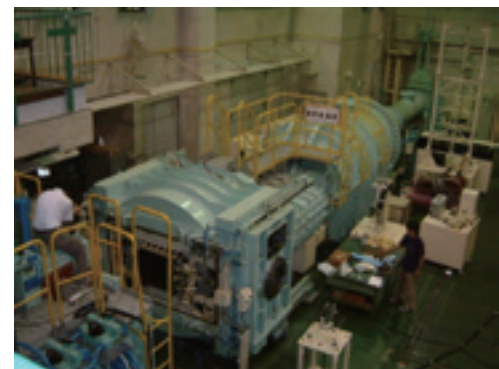
3 風洞試験

M2006 風試模型の水平尾翼の取付け角を変えつつ、風試によって迎角とピッチングモーメント係数の関係を計測する。試験設備としては、(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 (JAXA/ISAS) の遷音速風洞および超音速風洞を使用する。両風洞は吹出し式で、流路断面積は 600 mm × 600 mm、最大通風時間は約 30 秒、通風可能マッハ数はそれぞれ 0.3~1.3, 1.5~4.0 である。その概観を Fig. 4 に示す。

模型に作用する空気力の測定には、六分力内装天秤を用いるとともに、圧力変換器によって底面圧力を測定して底面抗力補正を施す。通風条件は、マッハ数は 0.3~2.0、迎角は亜音速域で $-10^\circ \sim 10^\circ$ 、超音速域で $-4^\circ \sim 4^\circ$ 、横滑り角は $-2^\circ \sim 2^\circ$ である。昇降舵の舵角は前縁上向きを正として 0° , $\pm 5^\circ$, および $\pm 10^\circ$ の 5 通りである。



(a) The transonic wind tunnel.



(b) The supersonic wind tunnel.

Fig. 4. Wind tunnels of JAXA/ISAS.

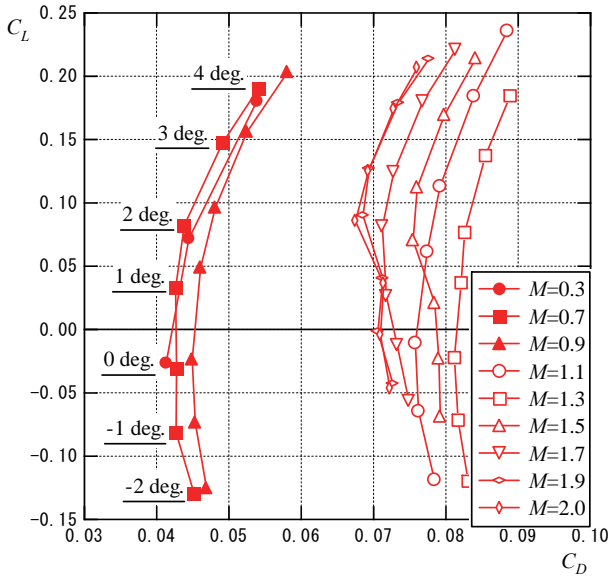
4. 試験結果と考察

4. 1 揚力および抗力

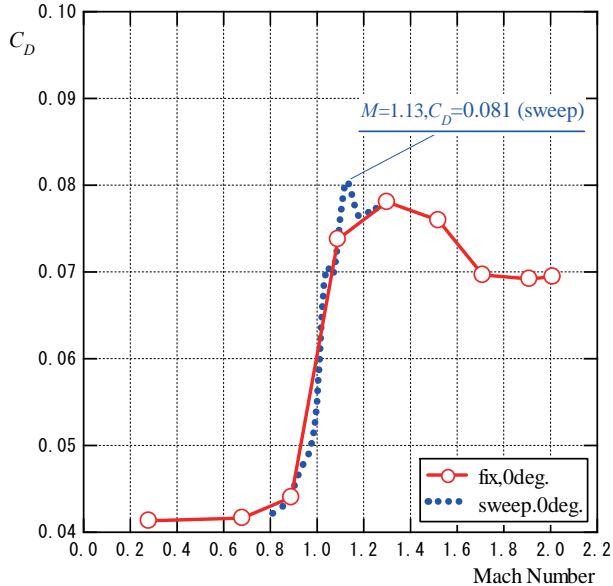
M2006 機体の極曲線を Fig. 5(a) に示す。また、抗力

係数のマッハ数依存性を、固定マッハ数の通風とマッハスイープ通風の結果について Fig. 5(b) に示す。抗力係数は、マッハ 1.13 で最大値 0.081 を示している。最大値をとった後は、マッハ数が増すに従って抗力係数は減り続け、マッハ 1.7 以上ではマッハ数が増加しても抗力係数はほとんど変化しなくなっている。

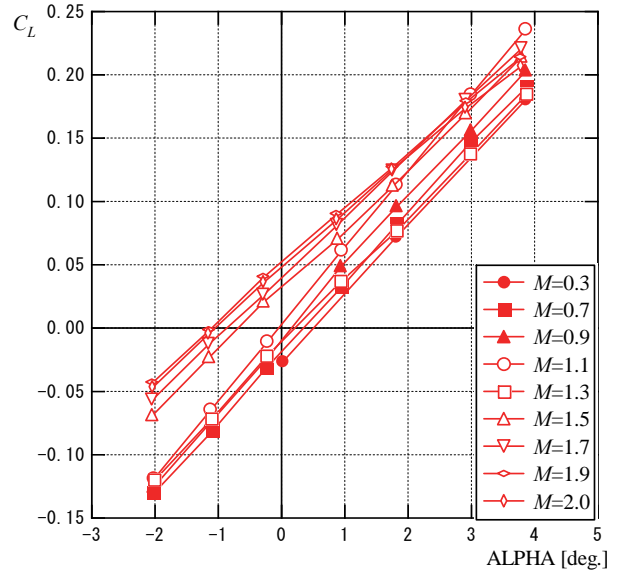
M2006 機体の揚力特性を Fig. 5(c) に、揚抗比を Fig. 5(d) に示す。亜音速域よりも超音速域のほうが揚力係数が大きいことが分かる。揚力傾斜 $dC_L/d\alpha$ は遷音速域において大きくなっており、マッハ 1.1 で最大値を取っている。超音速域で抗力が大きいため、揚抗比は亜音速域より超音速域の方が小さくなる。



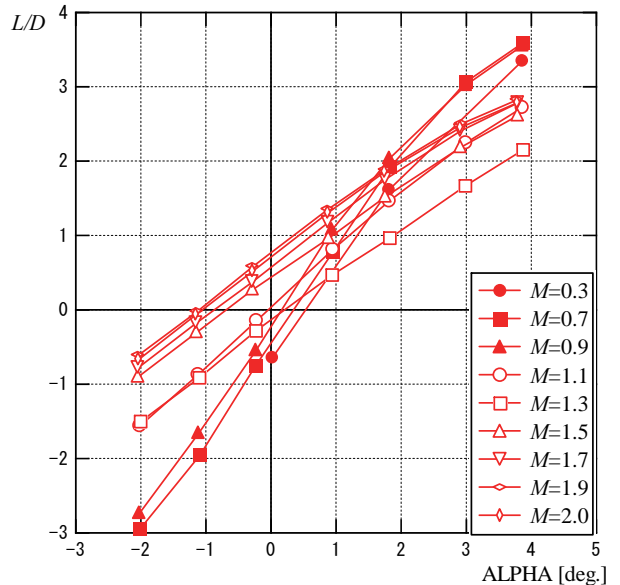
(a) The drag polar curves.



(b) Mach number dependence of the drag coefficient.



(c) The lift coefficient.



(d) The lift to drag ratio.

Fig. 5. Obtained aerodynamic data for the M2006 configuration.

4. 2 ピッチングのトリムと静安定性

Fig. 6 および Fig. 7 に、マッハ数 0.3 および 0.7 の場合の重心まわりのピッチングモーメント曲線を示す。重心は平均空力翼弦の 30% 位置に仮定している。舵角 $\delta=0^\circ$ の場合の曲線の傾きは負であり、ピッチングの静安定性は保たれていることがわかる。マッハ数 0.3 の場合、各舵角についての曲線は相互に平行である。舵角範囲を $\pm 5^\circ$ とすると定常飛行可能な迎角範囲は $-6^\circ \sim 8^\circ$ である。また舵角範囲を $\pm 10^\circ$ とすると、曲線を補外することにより定常飛行可能な迎角範囲は $-13^\circ \sim 15^\circ$ と予測される。マッハ数 0.7 の場合は、舵

角範囲を±5° とすると、曲線を補外することにより定常飛行可能な迎角範囲は-6° ~6° と予測される。しかし、舵角-10° および 10° では曲線の傾きが非常に小さく、安定中立に近い状態である。マッハ数 0.7 以上の遷音速域において同様の傾向が見られる。

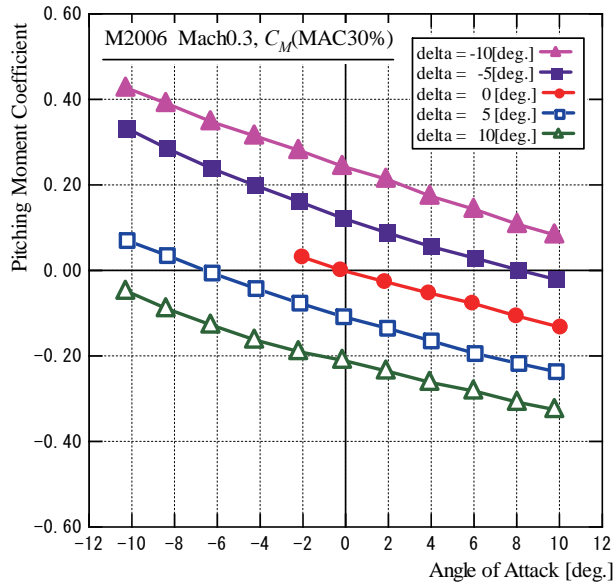


Fig. 6. The pitching moment coefficient vs. the angle of attack at Mach 0.3.

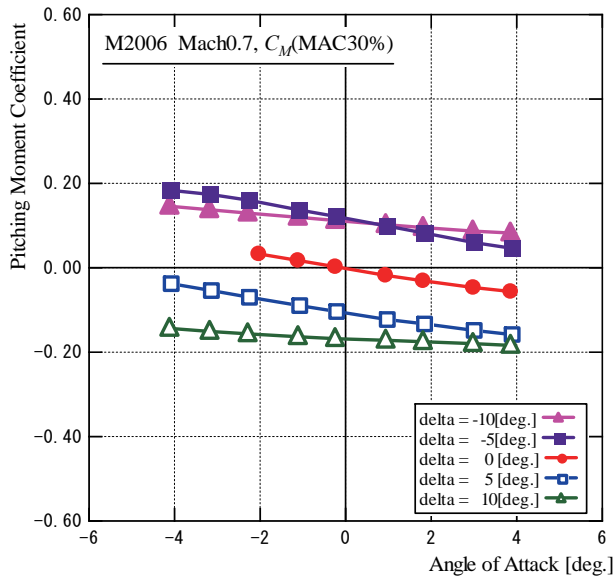


Fig. 7. The pitching moment coefficient vs. the angle of attack at Mach 0.7.

4. 3 昇降舵操舵による揚力係数の変化

Fig. 8 および Fig. 9 にマッハ数 0.3 および 0.7 の昇降舵操舵による揚力係数 C_L の変化の様子を示す。マッハ数 0.3 では、すべての迎角において、舵角に対して直線的に揚力係数が変化している。マッハ数 0.7 では舵

角に対する揚力係数の変化が直線的でなく、舵角範囲 -10° ~-5° および 5° ~10° で揚力係数の変化が鈍っている。これは、大きな舵角によって水平尾翼が失速しているためと考えられる。

4. 4 離着陸性能の予測

離陸速度をマッハ数 0.3 および 0.5 と仮定した場合の離陸時の揚力を Fig. 10 に示す。横軸は迎角[deg.]、縦軸は揚力[kgf]である。M2006 機体の全備重量は 155 kgf と推算されており、これを図中に赤線で示す。離着陸マッハ数を 0.3 (飛行速度 102 m/sec) とする場合は迎角 5° 程度 (水平尾翼舵角-3° 程度) で揚力が重量を上回って離着陸可能である。この値から換算すると、迎角を 8° (水平尾翼舵角-5°) とするならば、飛行マッハ数 0.24 (飛行速度 82 m/sec) 程度で離着陸可能である。なお、遷音速~超音速域については、2° 程度以下の小さな迎角で飛行するという事も相俟って、ピッチングトリム性能は十分であることが分かっている。

5. 結言

大陸間の高速航空輸送および地球軌道への再使用宇宙輸送を革新するための基盤技術を飛行実証することを目指して、フライングテストベッドとしての小型超音速飛行実験機の開発研究を進めている。超音速域までの加速性の期待できる双発・高翼形状を当面のベースライン形状として選定した。マッハ数 0.3~2.0 の範囲で風洞試験を実施し、揚力、抗力、およびピッチングモーメントを計測した。その結果、M2006 形状の飛行実験機は、離着陸から超音速巡航までの全速度領域におけるピッチングトリム性能および良好な離着陸性能を有することが予測された。

なお、亜音速域に比べて遷音速・超音速域では、ピッチング静安定性が若干低減することと、水平尾翼が失速する傾向が捉えられた。前者については重心位置をもっと前方に設定することが効果的であり、後者については水平尾翼の後退角を小さくしたり、ボルテックスジェネレータ、ドッグツース、等の失速抑制策を講じることが効果的と考えられる。

このような実際の航空機の全機空力特性に関する研究が累積され、超音速航空機の設計に資する知見が蓄積されることによって、大陸間の高速航空輸送および地球軌道への再使用宇宙輸送に関する我が国の技術的地位が確立することが期待される。

文献

- (1) 溝端 一秀, 棚次 亘弘, 東野 和幸, 湊 亮二郎, 丸 祐介, 新井 隆景, 「FTB としての小型超音速飛行実験機の構想と亜音速飛行実証」, 平成 19 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原 (2008 年 1 月 28-29 日).
- (2) USAF Stability and Control DATCOM, McDonnell Douglas Corporation and Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1978.
- (3) 羽田 尚太, 棚次 亘弘, 溝端 一秀, 湊 亮二郎, 木村 博幸, 工藤 摩耶, 麻生 茂, 谷 泰寛, 新井 隆景, 「小型超音速飛行実験のための有翼機体の空力設計と風試結果」, 平成 18 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原 (2007 年 1 月 18-19 日).
- (4) 工藤 摩耶, 棚次 亘弘, 溝端 一秀, 丸 祐介, 笹山 容資, 桑田 耕明, 新井 隆景, 楠亀 拓也, 久保 良介, 坪井 伸幸, 「小型超音速飛行実験機の空力設計と空力性能評価」, 平成 19 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原 (2008 年 1 月 28-29 日).

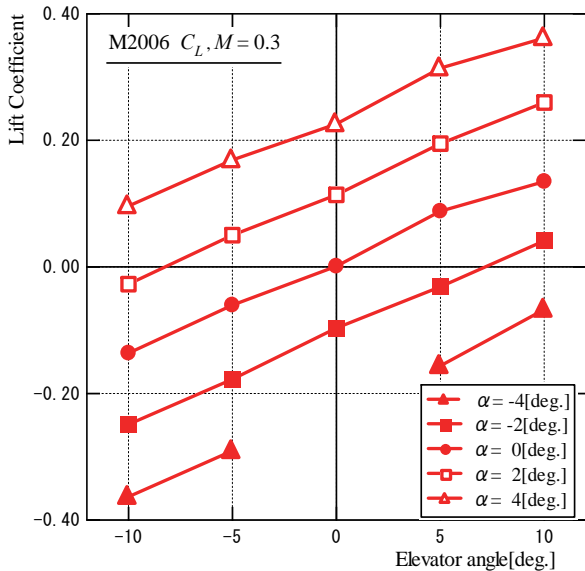


Fig. 8. The lift coefficient vs. the elevator angle at Mach 0.3.

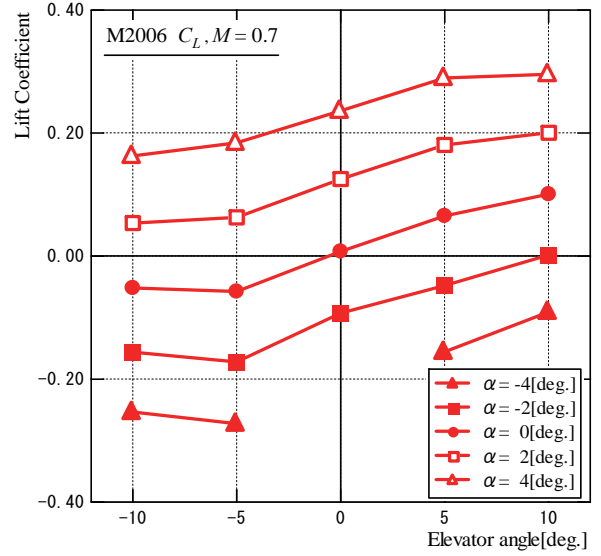


Fig. 9. The lift coefficient vs. the elevator angle at Mach 0.7.

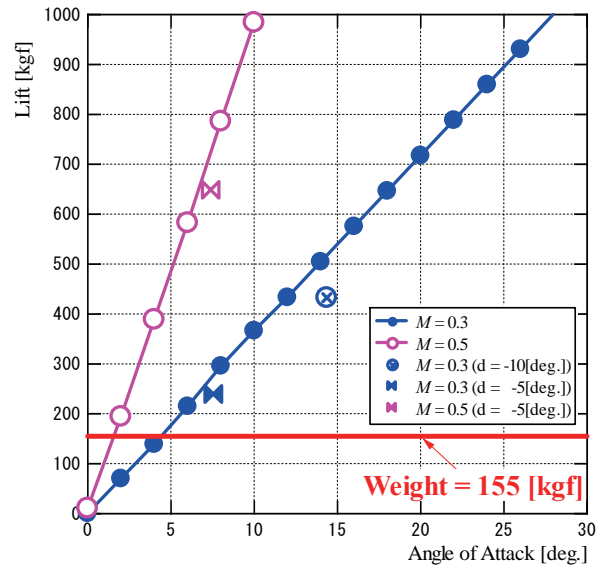


Fig. 10. The predicted lift of the experimental vehicle of the M2006 configuration.

サブスケール高速走行軌道装置の試作と走行実験

安田 有佑*¹, 宮瀬 宗彦*², 丸 祐介*³, 棚次 亘弘*³, 溝端 一秀*⁴

Experimental Construction and Operation Tests of a Subscale High-Speed Sled Track Facility

Yusuke YASUDA, Munehiko MIYASE, Yusuke MARU, Nobuhiro TANATSUGU,
and
Kazuhide MIZOBATA

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

Various studies are being carried out for innovation on the technology both for future super/hypersonic airplanes and for reusable space transportation systems. Functions and performances of the technologies proposed should be verified in high speed conditions safely and repeatedly on the ground before flight experiments. For this purpose, so-called high-speed sled track facility is planned to be constructed. Its subscale prototype is experimentally constructed and run tests are carried out. Useful know-how is obtained about designing, fabrication, and operation of the sled track.

Keywords: High-Speed Sled Track, Water Braking, Ground Verification

1 はじめに

航空輸送ならびに宇宙輸送を革新するための基盤技術の創出を目的に、室蘭工業大学が核となって、国内の大学や JAXA との連携の下、種々の研究が進められている。研究された基盤技術を小型超音速飛行実験機（無人飛行機）に搭載して、実際の飛行環境で実証する計画である。

飛行実証の前段階として、基盤技術の高速飛行環境下における機能・性能を、地上において繰り返し安全かつ確実に実証する必要がある。それに

は、地上に敷設した鉄道軌道と同様の直線軌道上を超音速で走行できる「高速走行軌道装置」の開発が極めて効果的である。この軌道装置の規模としては、軌道長は 3km 程度、軌道幅は新幹線用広軌に準拠した 1.4m 程度、走行台車（スレッド）の全備重量は 500kg 程度、加速度は 10G 程度と想定される。従って加速用推進器としては 5ton 程度の推力が必要である。このような「高速走行軌道装置」を利用することによって、航空宇宙機に関連した基盤技術の機能・性能を実際の飛行状態に近い条件で実証することができることに加えて、小型飛行実験機等の離陸補助装置として利用することも可能である。

本研究では、フルスケールの軌道装置の開発・設置に先行して、軌道やスレッドの設計指針や計測方法など各種のノウハウの取得を目的として、

*1 大学院博士前期課程航空宇宙システム工学専攻

*2 大学院博士前期課程機械システム工学専攻, 現三菱重工

*3 航空宇宙機システム研究センター

*4 機械システム工学科

1/10 の軌道幅のサブスケール軌道装置を試作し、無線操縦によってスレッドを走行させ、加減速特性を計測・評価する。スレッドの加速のためには、模型クラスのジェット推進器を搭載する。制動手法定としては、軌道の上に設けられた水路の水を掬う際の反力を利用する「水制動」を試みる。

2 実験装置

2.1 全体構成

実験装置の全体構成および概観を図1に示す。

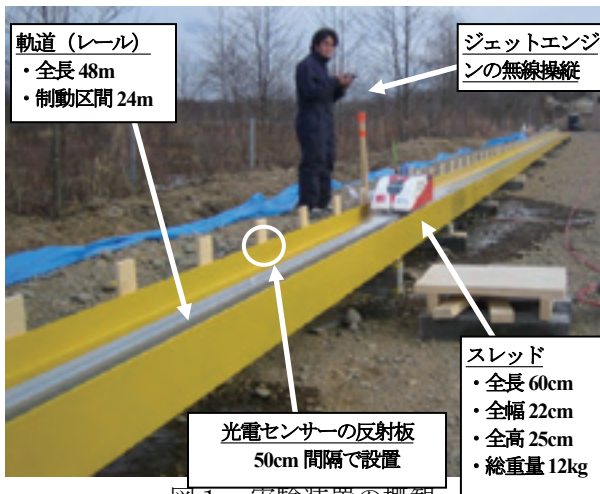


図1 実験装置の概観

2.2 軌道 (レール)

基礎としてH鋼を水平に設置し、そのウェブの上に鉄製の軌道を設置する。その様子を図2に示す。軌道幅は、フルスケール軌道の1/10の14cmである。軌道長は48mであり、うち半分の24mには水制動のための貯水槽となる幅72mmのアルミチャンネルを設置する。アルミチャンネルの端面はバルサで止水されており、走行してきたスレッドは、後述のバケットによってこのバルサを割って水制動区間に進入する。水制動によってスレッドを完全に停止できなかった場合に備えて、レールの終端にゴムロープを張り、その弾性力によってスレッドを緊急停止させることにする。

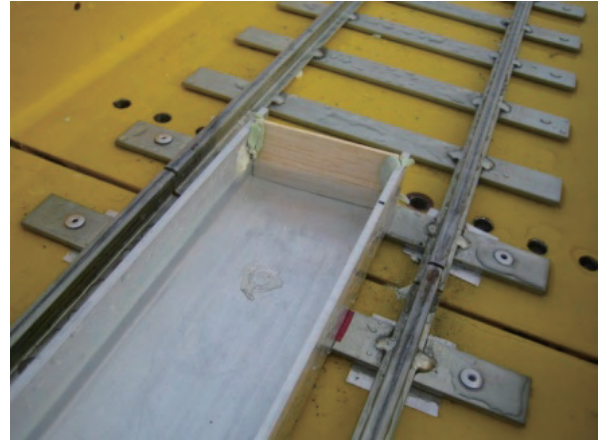


図2 レール、貯水槽、および止水バルサ

2.2 走行台車 (スレッド)

スレッドの骨組みは、厚さ2mmのアルミ板およびアルミアングル材を組み立てた構造である。図3のように、加速装置である模型飛行機用ジェットエンジン (公称推力160 N)、エンジン運転制御装置 (無線受信機・サーボ・燃料ポンプなど)、各種計測センサー、およびデータ集録装置が搭載される。図4のように、底部には、水制動用のバケット、およびレールと摺動するスリッパを備える。スリッパは超々ジュラルミンで作られている。

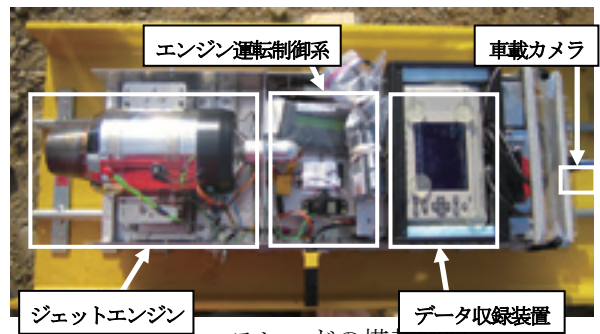


図3 スレッドの搭載機器

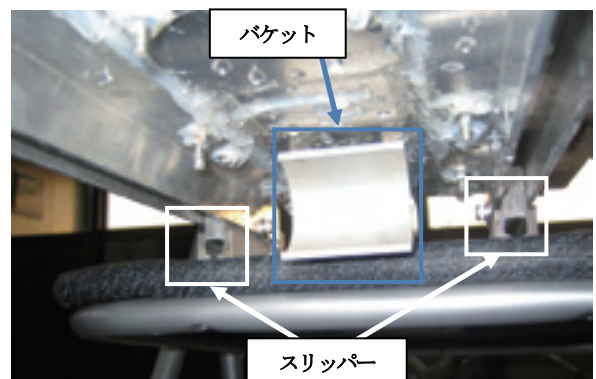


図4 スレッド底部

2.3 計測系

スレッドの位置と加速度、エンジン推力、およびバケット制動力を計測する。

スレッドの位置計測については、レール脇に反射板を 50cm 間隔で設置し、スレッドに搭載された光電スイッチ（キーエンス・PZ-101）によって反射板を検出することによって、スレッドが各反射板位置を通過する時刻を計測する。

スレッドの加速度は、スレッドの前部に取り付けられた三軸加速度センサー（Crossbow・CXL10GP3）で計測する。その計測レンジは±10G、応答性はDC～100Hz である。

エンジン推力とバケット制動力は相互に逆向きにはたらく。そこで、図5に示すような、一つのロードセルで両者を計測できる荷重計測架台を試作し搭載する。フレキシャ（板バネ）で吊り下げられた架台にジェットエンジンを搭載する。ピンでスレッド本体に留められたレバーの下端にバケットが取り付けられ、レバーの上端はエンジン架台に接する。

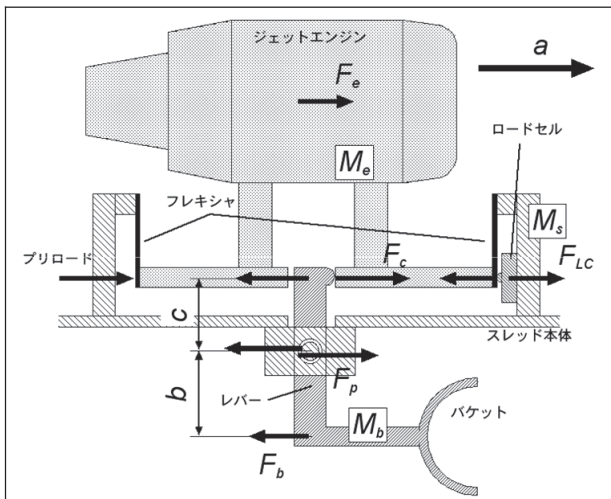


図5 荷重計測架台

スレッドが加速度 a で走行しているとき、荷重計測架台の各部には、同図に矢印で示された力はたらく。 F_e はエンジン推力、 F_{LC} はロードセルで計測される力、 F_c はレバーがエンジン架台を押す力、 F_p はレバーがピン部で受ける力、 F_b はバケットで発生する制動力である。ピンからバケットまでの距離を b 、ピンからエンジン架台までの距離を c とする。エンジンとその架台の質量を M_e 、バケットとレバーの質量を M_b 、これらを除いたスレッドの残りの部分の質量を M_s とすると、各部分の運動方程式は以下のようになる。

$$M_e a = F_e + F_c - F_{LC} \quad (1)$$

$$M_b a = F_p - F_b - F_c \quad (2)$$

$$M_s a = F_{LC} - F_p \quad (3)$$

また、レバーに関して、ピン周りのモーメントの釣り合いより、

$$F_b b = F_c c \quad (4)$$

ジェットエンジンによる加速の際には $F_b = 0$ であるから、式(1)(4)より、

$$F_e = F_{LC} + M_e a \quad (5)$$

となる。また、水制動の際にはエンジン推力は発生していないものとする $F_e = 0$ であるから同様に、

$$F_b = (c/b)(F_{LC} + M_e a) \quad (6)$$

となる。

本装置では、 $b=24\text{mm}$ 、 $c=17\text{mm}$ 、 $M_e=2.5\text{kg}$ 、 $M_b=0.2\text{kg}$ 、 $M_s=12-M_e-M_b=9.3\text{kg}$ である。また、加速度 a は、スレッドに搭載された加速度計で計測される値を用いる。

ロードセルとしては共和電業製LMA-A-1KNを用いる。データの集録は、スレッドに搭載したデータレコーダー（キーエンス・NR-2000）で行う。サンプリング周波数は、光電スイッチの検出速度を考慮して1kHzとする。

3 実験結果

3.1 計測結果の整合性

実験データの評価に先立ち、今回準備した3つの計測センサーの計測値が相互に整合している事を確認する。図6は、バケットの側壁を取り付けず、制動区間入口の貯水槽の水深を 20mm とし、スロットル最大で加速した場合の位置および速度の計測値である。光電スイッチで計測された位置とそれを時間微分して求められた速度を丸のシンボルで記しており、また、加速度計で計測された加速度から時間積分して求められた速度・位置を曲線で描いている。光電スイッチと加速度計による計測値は良く一致している。なお、時刻 7 秒以降の差違は、スレッドが緊急停止用ゴムロープによって最終停止しているためである。到達最高速度は 20.8m/s であり、今後軌道を延伸すれば最高速度の向上が見込める。

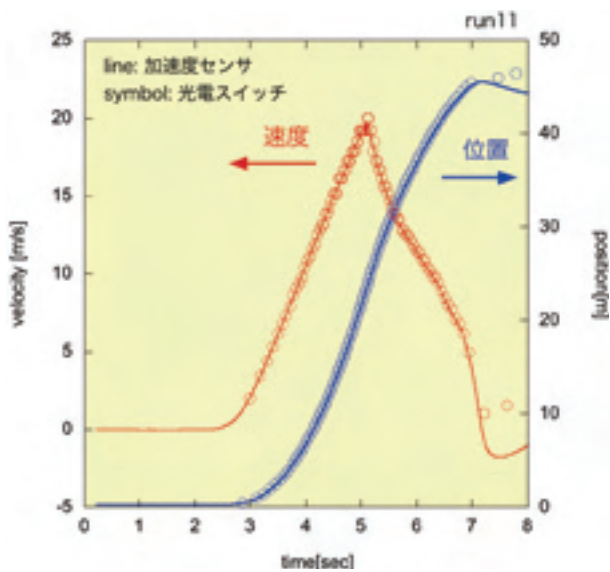


図6 位置・速度の計測結果の例

上述の式 (5) および式 (6) を用いてロードセル出力から求められるエンジン推力およびバケット制動力の値を図7に示す。理論制動力（速度の計測値と取水面積から推算される発生可能な最大の制動力）、および、計測された加速度にスレッド質量をかけた値も併記してある。

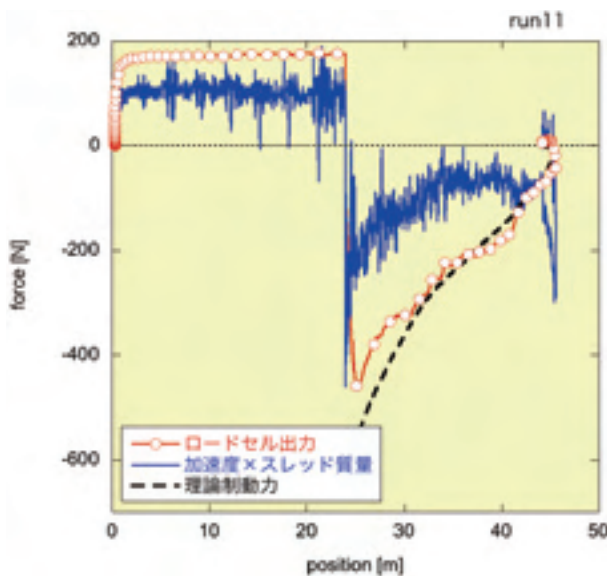


図7 荷重計測結果の例

ロードセル出力から推算されるエンジン推力は、加速時に最大で180N程度となっている。一方、スレッドにはたらく力の総和（合力の大きさ）は「加速度×スレッド質量」で評価され、110N程度であり、エンジン推力より約70Nだけ小さい。スレッドには、エンジン推力のほかに空気抵抗や摩擦抵抗が推力とは逆方向にはたらく。そこで、空気抵

抗係数として自動車の一般的な値である0.25を用いると、空気抵抗は最大速度においておよそ3N程度と見積もられる。また、レール（鉄）とスリッパ（超々ジュラルミン）の間は特に潤滑は施していないので、その動摩擦係数を0.5程度と仮定すると、摩擦抵抗は60N程度と見積もられる。従って、エンジン推力約180Nのうち、空気抵抗と摩擦抵抗によって約70Nが相殺されたものと推定される。

一方、制動時のロードセル出力からの荷重推算値と「加速度×スレッド質量」の値を比較すると、200N近い差がある。この要因としては、

(1) エンジン推力が制動区間でも惰性で発生している（推力の変化が無線操縦指令に対して遅れている）

(2) バケットで前方に噴射した水の一部がスレッドの下面に当たっている

等が考えられる。また、エンジン推力とバケット制動力を同一の圧縮型ロードセルで計測しようとしたために、荷重計測架台が複雑な構造となっており、工作精度等、製作上の不確定要素もある。これら荷重計測の詳細な評価のためには一層詳細な計測が必要であり、今後の課題である。本稿では、スレッドにはたらく力の総和である「加速度×スレッド質量」で制動力を定義することにする。

3.2 制動効率

スレッドが受けた制動力を、理論制動力（速度の計測値と取水面積から推算される発生可能な最大の制動力）で割ったものを制動効率と定義する。

計測の結果、スロットル50%で加速した場合は制動効率は40–60%の間で推移し、スロットル100%の場合には20–40%の間で推移したことが分かった。このメカニズムについても、今後詳細な解析を要する。

4 まとめ

航空輸送ならびに宇宙輸送を革新するための基盤技術の創出をねらって種々の研究を進めている。研究された基盤技術を地上実証ならびに飛行実証する計画である。小型超音速飛行実験機（無人飛行機）を用いた飛行実証に先立って、高速飛行環境を地上で模擬して繰り返し安全かつ確実に実証するための試験装置として、「高速走行軌道装置」を構想している。軌道および走行台車（スレッド）

の設計指針や計測手法など各種のノウハウの獲得のために、サブスケールの軌道装置を試作し、無線操縦によってスレッドを走行させ、加減速特性を計測・評価した。スレッドの位置および速度について二通りの計測手法を試みたところ、その計測値は良く整合した。エンジン推力とバケット制動力を単一のロードセルで計測する手法を試みたところ、その測定値は他の理論値等との整合性に課題が残った。複数の不確定要素の存在が推定され、これを排除するには一層詳細な測定および解析を追加実施する必要がある。

吸込み式超音速風洞におけるスターティングロードの計測と評価

湊 亮二郎^{*1} 溝端 一秀^{*1} 桑田耕明^{*2}

Experimental Measurements and Validations of Starting Loads in Indraft Supersonic Wind Tunnel

Ryojiro MINATO, Kazuhide MIZOBATA, Koumei KUWADA

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

Measurements of starting load in the indraft supersonic wind tunnel of Muroran Institute of Technology were conducted for Mach 2, 3 and 4 conditions with AGARD-B model. The high speed photographs were taken for the behaviors of the wind tunnel model. Those photographs make clear that the oscillations of the model coincide with the measured starting load oscillation and starting loads were caused by two shock waves. The first shock wave is the reflection shock, which is generated at the nozzle throat by expansion wave reflection. The second one is asymmetric oblique shock waves (AOS) coming from the upstream. AOS can generate the asymmetric conical shock (ACS) around the nose cone of the model, which would have directly caused the starting loads on the wind tunnel model. Based on those observations, the authors presented the conical shock theory, which is the alternative starting load prediction theory to the normal shock theory.

Keywords : Starting Loads, Supersonic Wind Tunnel, Aerodynamic Force Measurements

1 序論

室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センターでは、航空宇宙輸送に関する革新的な基盤技術を創出する研究を進めている。その一環として、旧東大宇宙航空研究所に設置されていた超音速風洞の主要部を移設して、新に吸込み式中型超音速風洞の整備を進めている

超音速風洞で飛行体模型の空力特性を計測するには、6 分力内挿天秤による計測が一般であり、その

天秤に作用する荷重は、始動荷重（スターティングロード）と定常荷重に大別される。そのうち、定常荷重は気流が静定した後の供試体に作用する空力荷重であり、スターティングロードは通風開始直後の過渡的な非定常流によって発生した、模型周囲の圧力差による衝撃荷重のことである。一般的に定常荷重に比べてスターティングロードの方が著しく大きくなることが経験的に知られているため、スターティングロードが天秤の許容荷重を超えないようにすることが必要である。そのためには、天秤の秤量に合わせて供試体のサイズを決めることが重要である。

*1 機械システム工学科

*2 大学院博士前期課程航空宇宙システム工学専攻

従来、スターティングロードは Normal Shock Theory に基づいて推算されてきたが、この理論は想定される最大荷重を算出するため、本来の計測対象である定常荷重に対して過大評価することになる。そのため大きな許容荷重の天秤を選択しなければならず、計測精度が低下する。そこで、天秤の安全性と計測精度をできるだけ確保するためには、スターティングロードの大きさを正確に評価することが求められる。

本研究では、室蘭工大に新設した超音速風洞において AGARD-B 模型によるスターティングロードを計測した。同時に風洞始動時における供試体の挙動と気流状態のシュリーレン画像を高速ビデオカメラで撮影し、スターティングロードの定量評価と発生メカニズムの解明を行い、その結果に基づいてスターティングロードの理論的な推算式を提案した。

2 従来のスターティングロードに関する研究

スターティングロードの一因として、風洞始動時の非定常な衝撃波の存在が挙げられる。それによって供試体の周囲に圧力差が発生し、過大な荷重が供試体に作用するものと考えられている。そこで仮に供試体片面にのみ垂直衝撃波が発生し、反対面には上流側静圧が一樣に作用している状態を想定してみる。まず垂直衝撃波の圧力比の式から、次の式(2.1)が得られる。

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1}(M^2 - 1) \quad (2.1)$$

供試体片面にのみ垂直衝撃波が存在し反対面は一樣流のままとすると、供試体の一面には衝撃波背後の静圧 p_2 が作用し、反対面には気流静圧 p_1 が作用する。これによって供試体の対面間には圧力差が発生するので、スターティングロードが発生する。これを Normal Shock Theory という¹⁾。供試体に圧力差

が生じる面の投影断面積を基準面積 S_a として、スターティングロード F_{SL} を与えると、その大きさは以下の式になる。

$$F_{SL} = (p_2 - p_1)S_a = \frac{2\gamma(M^2 - 1)}{(\gamma+1)\left(1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} P_T S_a \quad (2.2)$$

式(2.2)より、スターティングロードは基準面積 S_a と気流全圧 P_T に比例する。そこで、 F_{SL} を S_a と P_T で無次元化すると荷重係数 C_N が得られる。これにより Normal Shock Theory の荷重係数は次の式(2.3)で与えられる。

$$C_N = \frac{2\gamma(M^2 - 1)}{(\gamma+1)\left(1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad (2.3)$$

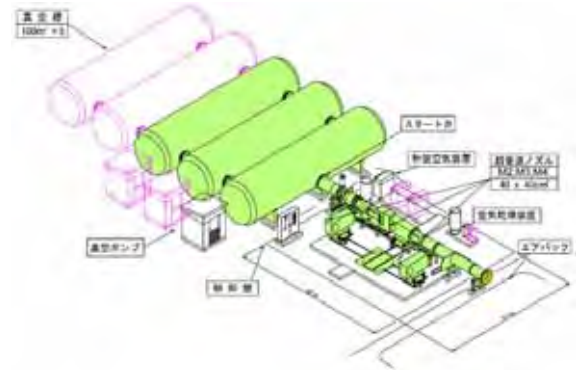


Fig.1 吸込み式超音速風洞の概要

Normal Shock Theory に基づくスターティングロードは、想定しうる最も大きな荷重を推算すると考えられる。一方、Maydew は、数々のスターティングロードの計測結果から、翼のみ形態と翼なし形態の供試体について、Normal Shock Theory の補正を提案した³⁾。Maydew の推算法は、風洞供試体の設計に広く用いられてきたが、実際のスターティングロードは、個々の風洞の固有の特性に大きく依存することや、必ずしも Maydew の推算式や Normal Shock Theory の推算式以下に収まるとは限らないことから^{2,5)}、より安全率の高い Normal Shock Theory に基

づいてスターティングロードを推算することが多かった。そのため風洞試験での計測精度を高めて、且つ天秤の保全を確保するには、より適切にスターティングロードを推算する方法が望まれている。

3 試験装置

3.1 吸込み式中型超音速風洞

本研究で使用した風洞は、室蘭工大航空宇宙機システム研究センターに設置された吸込み式中型超音速風洞である。その風洞の概観図を Fig. 1 に示す。

本風洞は旧東大宇宙航空研究所の噴出し式超音速風洞のノズルブロック等に移設し、平成 18 年に本学に新たに整備されたものである。本風洞はマッハ数 2, 3, 4 の 3 つのノズルブロックを備えており、試験マッハ数ごとに交換する。ノズルブロックは油圧昇降機付きの台車に積載されており、その交換は風洞側のターンテーブルを介して簡便に行うことが出来る。何れのノズルブロックもその全長は 2000mm で、ノズル測定部の通風断面寸法は 400mm×400mm である。詳細なノズル形状は文献 6 を参照されたい。測定部下流方向に真空タンクを設置しており、現在のところ容積 100m³ のタンクが 3 基設置しているが、平成 21 年度に 5 基に増設する予定である。スタートバルブは、風洞測定部と真空タンクの間設置してあり、0.3 秒程度で全閉から全開作動するが、気流は 0.1 秒程度で静定することが出来る。

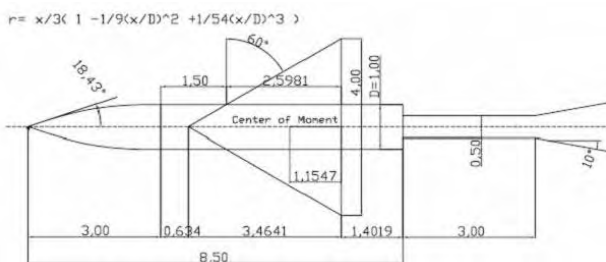


Fig.2 AGARD-B 模型の概要

3.2 風洞試験供試体 (AGARD-B 模型)

本研究では、スターティングロードの定量評価に、AGARD-B 標準模型⁷⁾を使用した。AGARD-B 標準模型は、超音速風洞の気流検定試験のための用いられる世界標準の風洞供試体であり、その形状は Fig. 2 に示してある。当然ながらその大きさは供試体に作用するスターティングロードが、使用する 6 分力内挿天秤の揚力制限秤量(245 N)以下になるように設定しなくてはならない。文献 5 には AGARD-B に作用するスターティングロードの荷重係数 C_N が、動圧で無次元化した値で報告されていたので、そのデータから胴体直径 D を 24 mm とするとスターティングロードは 200.3 N になり、制限秤量以下となると推算された。そのため実験に供する AGARD-B 模型の胴体直径もこの値に設定した。

4 試験方法

風洞試験では、スターティングロードの計測、風洞測定部における壁面静圧、及び高速度ビデオカメラによる供試体の挙動と気流のシュリーレン映像の撮影を行った。スターティングロードと壁面静圧データは、LabView を介して 50kHz のサンプリング周波数で 10kHz の Low Pass Filter を通してパソコンに取り込まれる。高速度ビデオカメラからは同期信号を LabView パソコンに出して、同期を取ることを試みた。風洞試験をサンプリング周波数と Low Pass Filter の設定の妥当性を検証するため、供試体と空力天秤をスターティングに装着した状態でハンマリング試験を行い、供試体-空力天秤-スターティング間の機械的な振動特性を計測したところ、その固有振動数は 50Hz であることが判明した。スターティングロードによる荷重や供試体振動現象は、この固有振動数と同等のオーダーの現象と考えられるため、サンプリング周波数と Low Pass Filter の設定は適切であると考えられる。

5 結果と考察

5.1 気流マッハ数との相関

本研究では、気流マッハ数条件が 2, 3, 4 の 3 条件について、スターティングロードを計測した。Fig.3 には、本試験でのスターティングロードと気流マッハ数の関係を図示してある。Normal Shock Theory に基づくスターティングロード¹⁾、Maydew による翼型模型による実験式²⁾、及び入門らによる、吹出し式風洞で計測されたスターティングロードの結果⁵⁾も示している。入門らの吹出し式超音速風洞による荷重係数は、本研究の吸込み式超音速風洞での荷重係数よりも大きく、特にマッハ 3 では Normal Shock Theory を越える荷重係数も計測されている。加えてスターティングロードの絶対値は気流全圧に比例するので、気流全圧が低い吸込み式超音速風洞では、実際に天秤に作用する荷重はより小さくなるので、供試体の選定自由度が高くなるという利点がある。

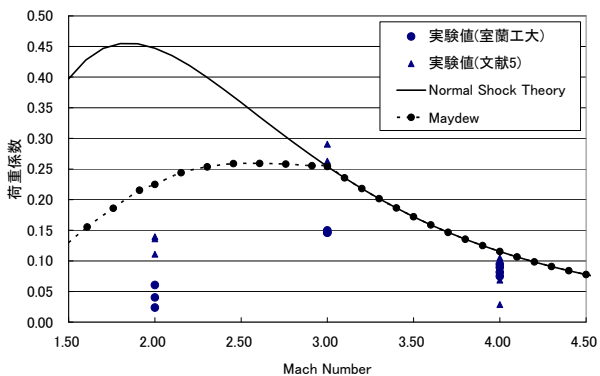


Fig.3 AGARD-B 模型によるスターティングロードの最大値とマッハ数との関係

吸込み式、吹出し式の両超音速風洞の荷重係数に共通して言えることは、マッハ 3 付近で大きな荷重係数を有し、マッハ 2 では、Normal Shock Theory よりはるかに小さい荷重係数になることである。マッハ 4 条件については、本試験でも入門らの試験でもマッハ 3 条件より小さくなっているが、入門らの吹出し式超音速風洞による試験では、エジェクターを使

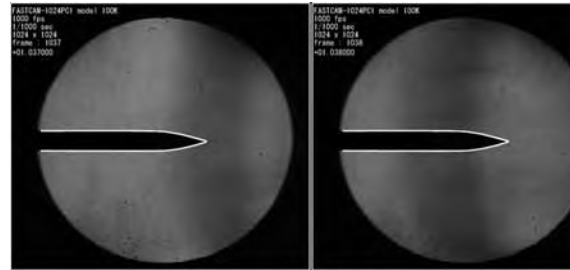


Fig.4 マッハ3における風洞始動時の反射衝撃波

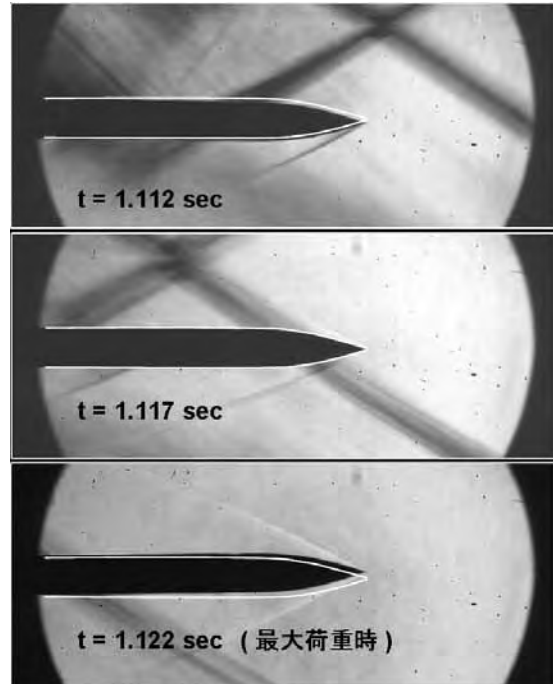


Fig.5 マッハ3における最大荷重時における供試体挙動

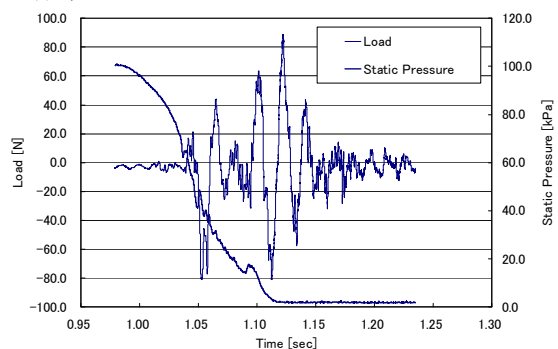


Fig.6 マッハ3における通風開始時のスターティングロードと壁面荷重の時間履歴

用して、全圧を抑えて試験していることに留意しなくてはならない。Normal Shock Theory の荷重係数は、式(2.3)で表されるようにマッハ 1.84 付近で最大値

を有するが、少なくともマッハ 2 以下では Normal Shock Theory の実験結果と定性的にも定量的にも一致していない。つまり Normal Shock Theory は定性的に現象と一致しておらず、新たなスターティングロードの評価式を提案する。

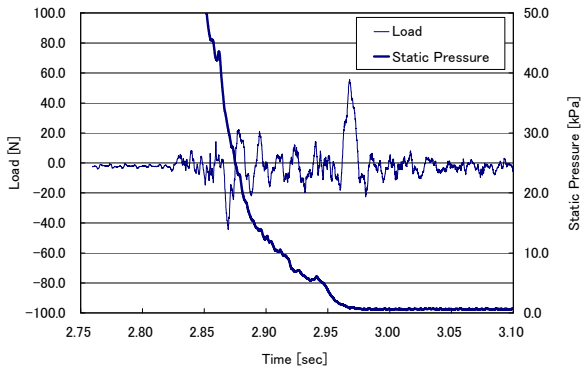


Fig.7 マッハ 4 における通風開始時のスターティングロードと壁面荷重の時間履歴

5. 2 高速度ビデオカメラによる供試体映像

Fig.4 と Fig.5 には、それぞれ反射衝撃波通過時とスターティングロードが最大になった時の高速度ビデオカメラの映像を示した。風洞始動時には真空タンクから膨張波が上流に伝播して、ノズルスロートで反射して衝撃波（圧縮波）となって下流側へ伝播していく。また Fig.6 と 7 にそれぞれマッハ 3 と 4 における、6 分力内挿天秤で計測したスターティングロードと測定部壁面静圧孔で計測した静圧の時間履歴を図示した。この 2 つの図より、気流が静定するまで 0.1 秒程度だが、文献 5 の吹出し式超音速風洞では 1 秒近い時間がかかっており、ここでも吸込み式超音速風洞は、6 分力内挿天秤の保全の面で有利である。これらの図より、スターティングロードは 2 つのインパルス荷重から成り立っていると考えられる。この振動過程を高速度ビデオカメラの映像と比較してみると、風洞作動開始時には Fig.4 で確認されるように、反射衝撃波が黒い影のような波となって通過していく様子が確認される。この反射衝撃波が供試体周りを通ると、供試体が振動し始めていた。これらの映像から、高速度ビデオカ

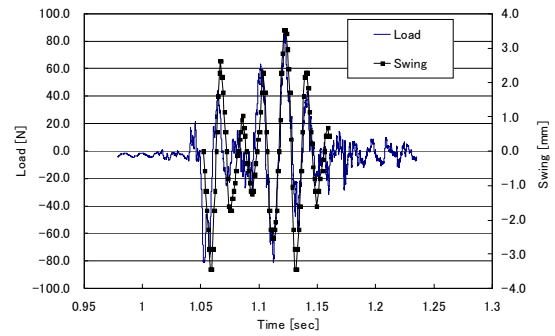


Fig.8 マッハ 3 の時のスターティングロードと供試体振幅の関係

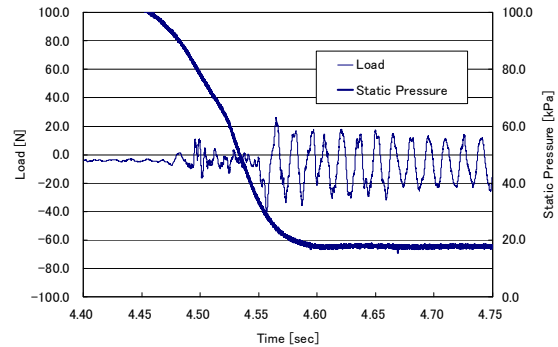


Fig.9 マッハ 2 における通風開始時のスターティングロードと壁面荷重の時間履歴

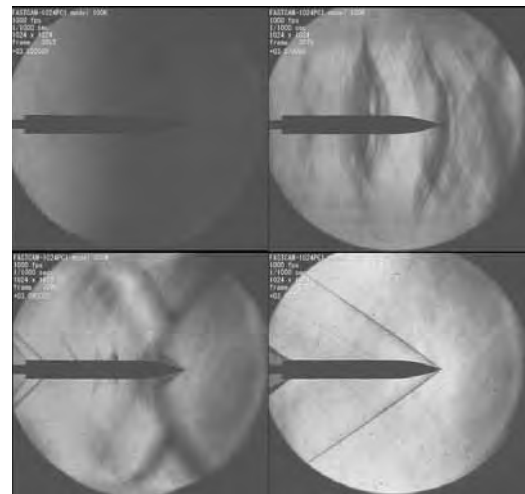


Fig.10 マッハ 2 における通風開始時の高速度ビデオカメラの映像

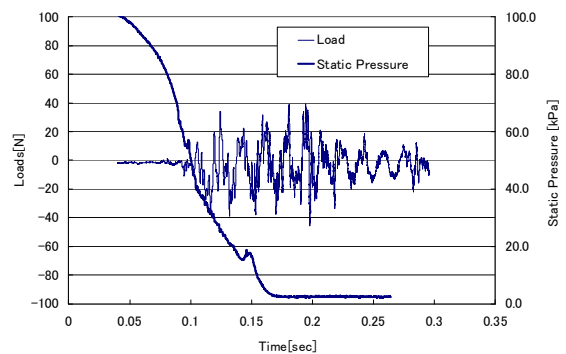


Fig.11 マッハ 3, 供試体を 90° 回転させた場合のスターティングロードと壁面静圧の時間履歴

メラから読み取った供試体の振幅波形と、スターティングロードの波形を、計測開始時刻を調整して重ねてみた図を Fig.8 に示した。この図から振動周期や振幅が互いに相似であることが確認できており、同様なことはマッハ 4 についても確認されている。このことより高速度ビデオカメラの映像による供試体振動と、6 分力内挿天秤によるスターティングロードの挙動は一致するものと考えられる。

Fig.7 より、スターティングロードが最大値を取る時は、ノズルから上下非対称な斜め衝撃波が通過して、それが供試体と干渉後、供試体先端から非対称な円錐衝撃波が発生した時であることが分かる。この事実はスターティングロードの予測に重要な意味を持つてくる。

一方、マッハ 2 条件でのスターティングロードの振動波形と、高速度ビデオカメラの映像については、それぞれ Fig.9 と 10 に示した。マッハ 2 では、全てのマッハ数条件でスターティングロードが最小であり、高速度ビデオカメラの映像からでは、通風開始から気流が静定するまで、流れの形態は上下対象であった。それが影響しているためか、供試体の振幅は映像からは殆ど確認されていない。これらから、流れの非対称性とスターティングロードが、密接に関連することを示唆している。この事実は、Fig.11 に示されているように、供試体翼面を風洞ノズルの対称面に対して 90° の角度で設置して通風試験を行った結果からも裏付けられている。つまり、そのようにすることで、供試体翼面がノズル対称面に垂直になり、ノズルからの非対称斜め衝撃波によって発生した圧力差が、供試体翼面に垂直に作用しなくなる。供試体翼面をノズル対称面に対して垂直に設置することで、スターティングロードを軽減できることは、従来から知られており、その裏付を確認したことになる^{1,2)}。以上の結果から、スターティングロードの主たる原因は風洞始動過渡期にノズルに発生する非対称斜め衝撃波であると結論付けられ

る。

気流マッハ数が低いと始動過渡期におけるノズル流れは対称性を維持し、気流マッハ数が上がると非対称流れに移行する明確な原因は不明であるが、ノズルスロート部での境界層などの乱れやノズル形状の誤差が、流れの非対称性を生じる原因になると考えられる。マッハ数が低いと、ノズルスロート部の流路は大きいので、それら乱れが生じても相対的にその影響は小さく、対称性を維持して測定部に流れるが、高マッハ数のノズルの場合、ノズルスロート部の流路は狭いので僅かな乱れでもノズルスロート部流路への影響は大きく、流れの非対称性を解消できないまま、測定部へ流れていくものと考えられる。またこのような現象は過去の実験結果からも報告されている^{2,5)}。

5. 3 Conical Shock Theory の適用

前節では、スターティングロードの発生要因として、非対称円錐衝撃波であることを示した。このことは従来の Normal Shock Theory では、考慮されていなかった知見である。また Fig.4 及び 5 から分かるように非対称斜め衝撃波が供試体と干渉する時の気流静圧は、マッハ 3 で約 18 kPa、マッハ 4 で約 7.0kPa であり、気流静定時の静圧（マッハ 3 で 2.75kPa、マッハ 4 で 0.667kPa）よりも一桁大きい値である。このことはスターティングロードを逆に過小評価することにもなりかねない。

以上より、従来の Normal Shock Theory では、スターティングロードを定性的、定量的に予測することが困難であるため、本研究では、Conical Shock Theory を提唱する。Normal Shock Theory では、風洞始動過渡期に供試体の片面のみに垂直衝撃波が発生し、それによって供試体の対向面に圧力差が生じると考えられてきたが、Conical Shock Theory ではそれを円錐衝撃波に置き換える。

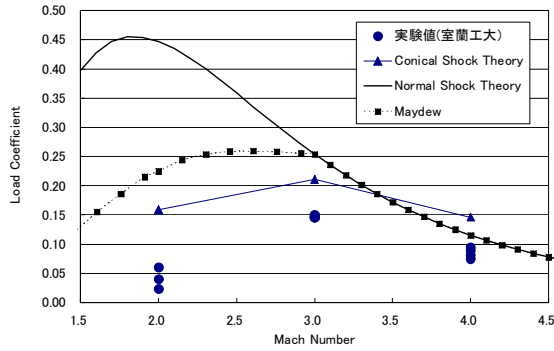


Fig.12 Conical Shock Theory と実験値の比較

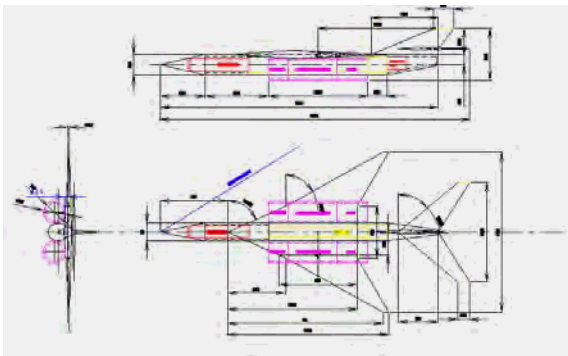


Fig.13 風洞試験用 M2006 型小型超音速機模型

$$F_{SL} = p_1 S_a \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M^2 \sin^2 \beta - 1) \quad (5.1)$$

ただし β は供試体先端から発生する斜め衝撃波で、 p_1 は非対称衝撃波を引き起こす圧力波の静圧である。 p_1 は実験的に求める。式(5.1)より Conical Shock Theory による荷重係数は次の式で表される。

$$C_N = \frac{F_{SL}}{P_T S_a} = \frac{p_1}{P_T} \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M^2 \sin^2 \beta - 1) \quad (5.2)$$

Normal Shock Theory と異なり、 p_1 については個々の風洞について固有の値であり、供試体に依存しないと考えられる。次に β であるが、これは供試体先端から発生する斜め衝撃波の角度である。楔型形状であれば斜め衝撃波の関係式から求めることが可能で、AGARD-B 模型 (半頂角 18.43 度) のように先端が円錐物体であれば、Taylor-Maccoll 方程式⁸⁾を解くことにより、 β を予測することが出来る。供試体の形状がそれ以外の場合、理論的に衝撃波角 β を計算することは困難だが、一つの方法として

CFD で定常状態の流れを解析し、その解から求めた衝撃波角で与えるということが考えられる。今回の風洞試験で得られたスターティングロードを Conical Shock Theory での理論値と比較し、その結果を Fig.12 に示した。式(5.1)に必要な定数を実験結果等から以下のように与えた。

マッハ数	衝撃波角 β	静圧 p_1 [kPa] (実験結果よ り)
2	36.470°	33.6 kPa
3	28.179°	18.2 kPa
4	24.960°	6.87 kPa

ただし、マッハ 2 条件では、マッハ 3 やマッハ 4 のように非対称斜め衝撃波は観測されず、Fig.9 の静圧履歴からも、圧力波の痕跡は確認されていない。そのため Fig.9 の荷重波形が観測される直前における静圧値を用いて、式(5.1)と(5.2)を評価した。

Conical Shock Theory と実験値との間には、依然として定量的な差が存在するが、マッハ数に対するスターティングロードの変化については、定性的に表しており、本研究でのマッハ 3 における実験値は、Conical Shock Theory による理論値の 7 割程でマッハ 4 だと 6 割程度であった。この結果から、実際に定量的な評価式としてはまだ不十分であるものの、風洞試験の供試体を設計する場面では有効な理論になりうる。

5. 4 M2006 モデルの試験実行の可否

現在、航空宇宙機システム研究センターでは小型無人超音速機の機体設計とその空力特性の把握を試みている。これまで JAXA 宇宙科学研究本部の高速気流試験設備で空力試験を行ってきたが、今後この機体形状で本学の吸込み式超音速風洞での試験を行うことが予想されるので、その試験が実行可能か検証してみることにする。まず、従来 JAXA で行っていた風洞試験に用いた供試体に作用する、スターティングロードを予測してみる。Fig.13 にこれまで

試験を行ってきた風洞試験供試体模型の図面を図示する。この供試体の先端の円錐部の半頂角は 12.4° であるので、Taylor-Maccoll 方程式から機体先端から発生する衝撃波角を推算してみると、マッハ 2, 3, 4 でそれぞれ、 32.32° 、 23.28° 及び 19.56° となる。また上面からの投影断面積は 463.01cm^2 であることから、この風洞試験用供試体を本学吸込み式超音速風洞で試験した場合、スターティングロードはマッハ 3 の時が最大で、 398.56N になると推算される。これは、本学が所有する空力天秤の許容容量(245N)を大きく上回るので、より容量の大きい天秤が必要と考えられる。一方、機体の前方投影断面積は 55.72cm^2 であった。本学の風洞試験部の測定部断面積は 1600cm^2 であることから、ブロックージ比は 3.48% となる。ブロックージ比の制限については、本風洞では検証していないが、他の風洞でのブロックージ制限比に比べても少ないので問題はないと思われる。

6 結論

吸込み式超音速風洞を用いて、AGARD-B 模型によるスターティングロードの計測と供試体挙動の高速度ビデオカメラの撮影を行い、その結果から Normal Shock Theory に代わる Conical Shock Theory を提案した。以上の結果をまとめると以下のように要約される。

1. 吸込み式超音速風洞におけるスターティングロードは、2つのインパルス荷重から成立つ。1つ目は膨張波がノズルで反射することによって発生した反射衝撃波によるもので、2つ目はノズルから発生する非対称斜め衝撃波によるものである。後者によるスターティングロードの方がより大きい荷重を引き起こすことが分かった。
2. スターティングロードの時間履歴の波形と、シュリーレン映像による、供試体の振動の振幅波形を比較すると、ほぼ相似であり両者は互いに対応していると考えられる。
3. 非対称斜め衝撃波はマッハ数の高い時で発生し、マッハ 2 では殆ど流れは上下対称であった。この非対称斜め衝撃波はノズルが拡大する上下方向に非対称であり、そのため供試体の上下方向に圧力差を発生させるものと考えられる。供試体翼面をノズル対称面と垂直に設置すると、マッハ 3 条件でスターティングロードが 40% 近くまで抑制されたことや、マッハ 2 条件では、スターティングロードの絶対値や供試体の振幅が小さかったことから、非対称斜め衝撃波の発生が、大きなスターティングロードを引き起こすものと考えられる。
4. 高速度ビデオカメラによるシュリーレン映像から、ノズルからの非対称斜め衝撃波が供試体と干渉すると供試体先端から非対称な円錐衝撃波が発生し、その非対称円錐衝撃波が発生してから供試体が振動し始めていた。このことから、ノズルからの非対称斜め衝撃波が、直接供試体に力を及ぼしているのではなく、供試体に非対称円錐衝撃波を発生させ、その非対称円錐衝撃波がスターティングロードを発生させていることが分かった。
5. 従来の Normal Shock Theory に代わって、円錐衝撃波に基づくスターティングロードの予測式を提案したところ、スターティングロードの予測値に対して、実験値はマッハ 3 で 70%、マッハ 4 で 60% の値になっていた。このことから、Conical Shock Theory は風洞試験の供試体を設計する上で、有効な設計式になり得ると考えられる。
6. 従来 JAXA 宇宙科学研究本部で行った M2006 型機体模型による風洞試験を本学で行った場合スターティングロードは最大で 398.56N に達することが判明し新たな空力天秤を用意する必要があることが分かった。

参考文献

1. Pope, A. and Goin, K. L., “High Speed Wind Tunnel Testing”, John Wiley and Sons Inc, (1965).
2. 飯島秀俊, 渡辺光則, 神田宏, 佐藤衛, 永井伸治, 鈴木教雄 “超音速風洞における起動/停止荷重に及ぼす影響パラメータの検討” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-05-048, 2006年.
3. Maydew, R.C., “Compilation and Correlation of Model Starting Loads from Several Supersonic Tunnels”, Sandia Corporation-4691(RR), (1962)
4. Crane, J. F. W. and Woodley, J. G. “The 7 in. X 7 in. Hypersonic Wind Tunnel at R.A.E Farnborough, Part IV – Measurements of Diffuser Performance, Blockage, Starting Loads and Humidity”, Aeronautical Research Council Current Papers No.663. (1963).
5. 入門朋子, 佐藤清, 藤井孝藏 “ISAS 風洞における風洞始動時の衝撃荷重と流れ場” 第38回流体力学講演会論文集, 2006年
6. 超音速気流総合実験室建設委員会 “超音速気流総合実験室建設報告” 東京大学航空研究所集報 第3巻, 1962-1963年
7. Bromm, A. F. Jr., “Investigation of Lift, Drag and Pitching Moment of A 60deg Delta-Wing-Body Combination (AGARD Calibration Model B) in the Langley 9-inch Supersonic Tunnel”, NACA TN-3300. (1965).
8. Shapiro, A.H. “The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow”, John Wiley and Sons Inc., (1953).

学 術 論 文

Study on Electric Properties of Gadolinium Nitrate Crystals

Hiroshi ISODA* and Riki KAWASHIMA*

(Received 20 June 2008, Accepted 7 November 2008)

Abstract

Frequency dependence of ac conductivity from 20Hz to 10MHz and time series of the conductivity at 2kHz along *c*-axis of gadolinium nitrate crystal $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ were measured in the temperature range from 210K to 290K. Meta-stable phenomena were observed. Dynamical property given by the frequency dependence of the conductivity is compared to those in disorder system. Non-periodic instability (burst) was found in the time series data of the conductivity. The frequency dependence of the power spectrum densities is well represented by the power law $1/f^\alpha$. The exponent α is discussed with the nonlinear dynamical property.

Keywords : Gadolinium nitrate, Ac conductivity, Meta-stable phenomena, Nonlinear property

1. INTRODUCTION

Nonlinear and non-equilibrium phenomena were observed in many systems such as disordered ferromagnets⁽¹⁾, superconducting vortices⁽²⁾, martensitic shape memory alloys⁽³⁾, glass⁽⁴⁾ and earthquakes⁽⁵⁾. The physical quantities in equilibrium state always show time variation in the vicinity of the average values, and the physical properties are characterized by the fluctuation⁽⁶⁾. The fluctuation could be closely related to inevitable thermodynamic instability⁽⁷⁾. Therefore the investigation of the thermodynamical instability could give a new information for unknown properties of the material. The behavior of the fluctuation was given by measuring the time variation of the physical quantities.

The rare earth nitrate crystals $\text{R}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ where R is rare earth element, form the triclinic symmetry with the space group $\text{P}\bar{1}$ above 193K⁽⁸⁾. Authors have studied the characteristic property of the rare earth nitrate crystals by electric measurement in the time successive procedures and the time series data between 210K and room temperature. In the successive measurements for the time variation of the electric properties in rare earth nitrate crystals,

meta-stable and non-ergodic nonlinear properties were found⁽⁹⁾. By the measurements of time series for the ac conductivity at 2kHz, nonlinear dynamical property having deterministic chaotic one were also found in the rare earth nitrate⁽¹⁰⁾. In addition, the crystals show the distinct intermittent non-periodic oscillations (bursts) and the dependence of the rare earth element on the time series of the ac conductivity⁽¹¹⁾⁽¹²⁾. However the instability in the rare earth nitrate crystal was not known sufficiently. In order to clarify the characteristic phenomena, we have measured frequency spectra of the ac conductivity in the frequency region from 20Hz to 1MHz and the time series of the conductivity at 2kHz at temperatures $210\text{K} \leq T \leq 290\text{K}$ along *c*-axis of $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ crystal.

2. EXPERIMENTAL

The crystal used for the present measurements was grown in a gadolinium nitrate aqueous solution by decreasing temperature. The size of sample A used for the measurements of the frequency spectra for the ac conductivity was $0.061 \pm 0.005\text{cm}$ in thickness and $0.591 \pm 0.005\text{cm}^2$ in area, and that of the sample B used for measuring the time series of the conductivity, $0.228 \pm 0.005\text{cm}$ in thickness and $0.228 \pm 0.005\text{cm}^2$ in

*Department of Materials Science and Engineering, Muroran Institute of Technology

area. The silver paste (Tokuriki Chem.Inst.P255) was used as a contact electrode. The good qualities of the electrodes and the specimens have been kept at the final stage of the experiment.

The ac conductivity in the frequency region from 20Hz to 1MHz was measured by using a computer controlled LCR meter (HP4284A) with a general purpose interface bus (GPIB). Time series data on the ac conductivity at 2 kHz were measured by using the digital lock-in amplifier (EG&G Princeton Applied Research, Model 5210) and an analog memory recorder (YOKOGAWA, AR1100).

The conductivity was measured at the sensitivity within $\pm 10^{-11} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$. All the measurements were carried out under the isothermal condition and controlled by the computer within $\pm 0.1\text{K}$. For the time series data, 5000 data points were collected with a sampling time of 50 ms.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Frequency dependence of ac conductivity

The Frequency dependence of ac conductivity along *c*-axis was measured from 20 Hz to 1MHz at temperatures between 290K and 210K in both cooling and heating cycles of four measuring runs (1)~(4) using the sample A. Figure 1 shows the real component $\sigma'(T)$ of the complex conductivity σ^* ($\sigma^* = \sigma' + i\sigma''$) derived from the experimental data at 1 kHz.

As seen from Fig.1, $\sigma'(T)$ in cooling and heating cycles of run (1) shows appreciable temperature variation with thermal hysteresis in the region between 280K and 230K. The temperature variation of $\sigma'(T)$ as observed in the following runs (2) and (3) suggests an existence of meta-stable phase in the crystal. The phase seems to disappear asymptotically. At the run (4), the meta-stability behavior appeared in the first time. The temperature dependence of $\sigma'(T)$ shows the same behavior observed in the first runs.

The behavior of meta-stable phase in other rare earth nitrate crystals was dependent on the rare earth ion R^{3+} in $R(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$; non-periodic oscillation of appearance for meta-stable phase in $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽⁹⁾; rapid disappearance of the phase in $\text{La}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽¹³⁾, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽¹⁴⁾, $\text{Tb}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽¹⁵⁾ and $\text{Er}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽¹⁶⁾; complex behavior appearance of the phase in $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽¹⁷⁾ and $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽¹⁸⁾.

Figure 2 shows the frequency dependence of $\sigma'(v)$ in the logarithmic scale within the range $20\text{Hz} \leq v \leq 1\text{MHz}$ at several temperatures 288K, 273K, 253K, 233K and 214K in cooling(1) of the first measuring run. The $\sigma'(v)$ increases with increasing frequency v at 253K and 233K in cooling(1). The frequency dependence of $\sigma'(v)$ was analyzed by power law, $\sigma' \propto v^s$, where s is frequency exponent. The value of the exponent s was estimated from the local slope $-\partial \ln \sigma'(v) / \partial \ln v$ in Fig.2.

The temperature variation of the frequency exponent $s(T)$ was given in Fig. 3 in the frequency region $10\text{kHz} \leq v \leq 100\text{kHz}$. As the temperature increases, the value of s decreases and is nearly equal

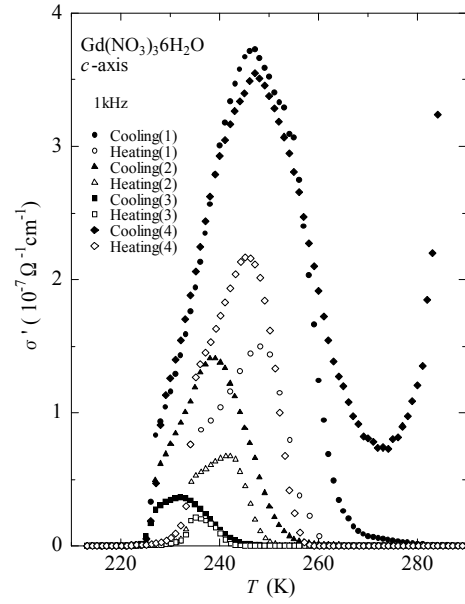


Figure 1 The real part σ' of the complex conductivity σ^* at 1 kHz along *c*-axis of $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ crystal at temperatures between 290K and 210K in both cooling and heating cycles of four measuring runs.

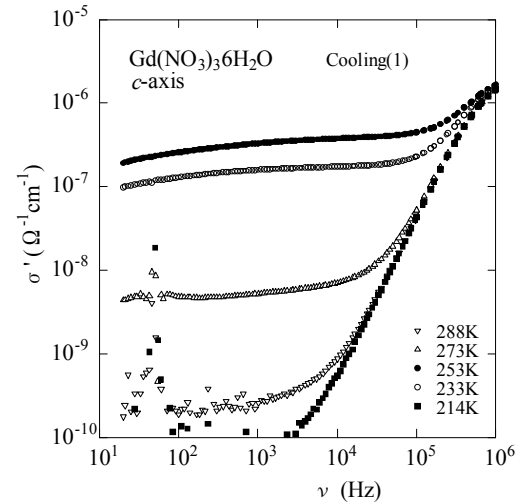


Figure 2 Frequency dependence of the conductivity σ' along *c*-axis of $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ crystal at several temperatures in the cooling(1) of the measuring runs.

to 0 for meta-stable phase. The value $s \leq 1$ has been obtained in a frequency dependent conductivity in disordered materials, such as an amorphous semiconductor and glass material⁽¹⁹⁾. The $\sigma'(v)$ in the meta-stable phase shows similar behavior as that of the nearly constant loss in ionic conducting glass⁽²⁰⁾. The value $s \approx 2$ of the frequency exponent s corresponds to the frequency response of Debye relaxation process⁽²¹⁾.

3.2. Time series of ac conductivity

Figure 4 shows the time dependence of the fluctuation $\Delta\sigma'$ of the real part σ' of the complex conductivity σ^* at 2kHz along *c*-axis of the $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ crystal at several temperatures in the

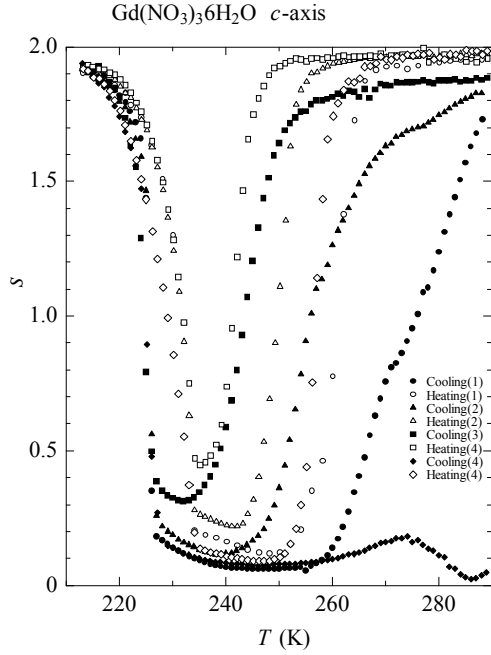


Figure 3 Frequency exponent $s(T)$ of the power law in the frequency spectra of the ac conductivity in the frequency region 10kHz~100kHz in both cooling and heating cycles of four measuring runs.

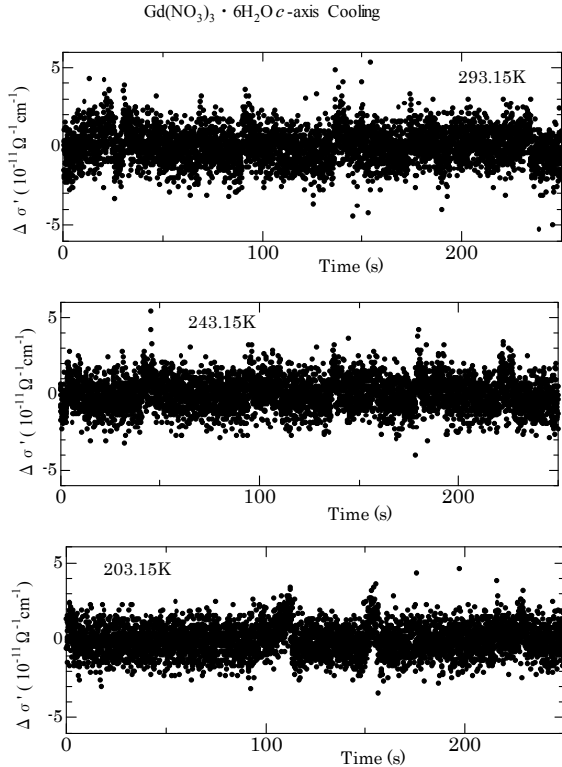


Figure 4 Time series of the fluctuation $\Delta\sigma'$ for the real part σ' of the complex conductivity σ^* at several temperatures in cooling cycle measured at 2 kHz with a sampling time 50 ms along c -axis of $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ crystal.

cooling cycles, where $\Delta\sigma'$ is given as $\Delta\sigma' = \sigma' - \langle\sigma'\rangle$. The average value $\langle\sigma'\rangle$ was obtained from 5000 data points of σ' at the temperature. The set of the data $\Delta\sigma'$ is represented by $\{\Delta\sigma'\}$. As shown in Fig.4, the non-periodic unstable oscillations (bursts) appear in the time series data $\{\Delta\sigma'\}$ at several temperatures, 293.15K, 243.15K and 203.15K in cooling, respectively.

The probability distributions of the fluctuation $\{\Delta\sigma'\}$ show continuous line shapes. The power spectrum densities were calculated from the time series data $\{\Delta\sigma'\}$ ⁽¹⁰⁾. The power spectral densities of the fluctuation $\{\Delta\sigma'\}$ at temperatures show the random broad peaks in the statistical frequency region from 1Hz to 10Hz and the continuous line shape below 1Hz. In the statistical frequency region 0.1~1Hz, the continuous part of the power spectra is proportional to $1/f^\alpha$, where f is the statistical frequency in the power spectra and α is the exponent of the power law. The values of α were estimated by calculating the local slopes of the power spectra in the temperature region $210\text{K} \leq T \leq 290\text{K}$. The temperature dependence of the exponent α is given in Figure5 for cooling and heating cycles. In Fig.5, the value of α is nearly equal to 2 and the power spectra are assigned to the thermal noise⁽²²⁾. The values of α in the light rare earth nitrates $^{57}\text{La} \sim ^{64}\text{Gd}$ are approximately equal to 2 with exception of ^{59}Pr ⁽¹²⁾. In the case of the heavy rare earth nitrates, the values of α were nearly equal to 1, so that this is assigned to the f^{-1} noise⁽¹²⁾⁽²³⁾.

To study the non-periodic unstable oscillation (the burst), the data $\{\Delta\sigma'\}$ were analyzed in detail by using the nonlinear dynamical method. The nonlinear dynamical property of the system was specified by a fractal dimension derived from N data point of the time series according to the simple procedure of Grassberger and Procaccia⁽²⁴⁾. For an arbitrary embedding dimension n , the σ'_i and σ'_j are pseudo-vectors defined by

$$\sigma'_i = \{\sigma'(t+i\tau_N), \sigma'(t+(i+1)\tau_N), \dots, \sigma'(t+(i+n-1)\tau_N)\}, \quad (1)$$

where the value of τ_N is a fixed time increment between successive measurements. In the present measurement, τ_N corresponds to the sampling time 50 ms. Spatial correlation of the attractor embedded in a phase space of n -dimensions is defined by

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - |\sigma'_i - \sigma'_j|), \quad (2)$$

where $\theta(x)=0$ if $x<0$ and $\theta(x)=1$ if $x>0$. Thus the correlation integral $C(r)$ counts the number of pairs whose distance $|\sigma'_i - \sigma'_j|$ is smaller than a given r .

The correlation integral $C(r)$ were calculated for the time series data $\{\Delta\sigma'\}$ at temperatures for the embedding dimension $n = 1 \dots 20$ by using the supercomputer (Hitachi SR8000) of Hokkaido University. The correlation integral $C(r)$ behaves as power of r for small r : $C(r) \propto r^d$, where d is a correlation exponent. The values of d at each embedding dimension n were obtained from the slope

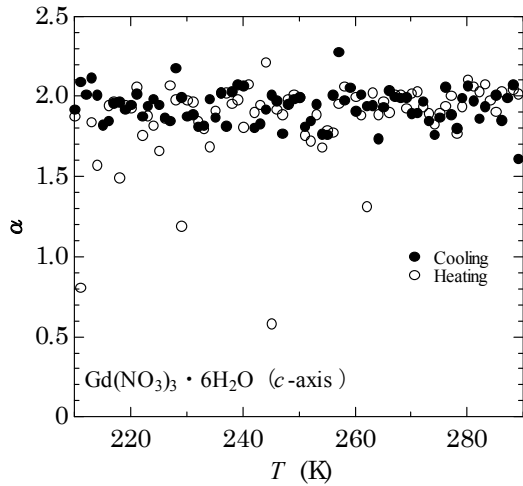


Figure 5 Temperature dependence of the exponent α in the power law $1/f^\alpha$ for the power spectral densities of the fluctuation $\{\Delta\sigma'\}$ in the statistical frequency region $0.1\text{Hz} \leq f \leq 0.5\text{Hz}$ for both cooling and heating cycles of four measuring runs, where f is the statistical frequency.

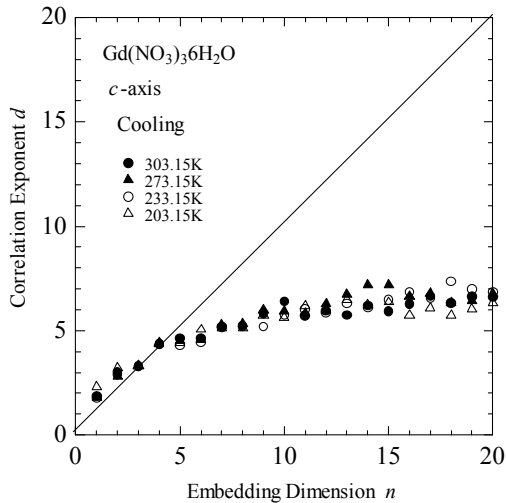


Figure 6 Correlation exponent d versus dimension n of the embedding space.

of $\ln C(r)$ versus $\ln r$. Figure 6 shows the dependence of the correlation exponent d on the embedding dimension n at the several temperatures in cooling cycle. In the case of the random noise, d is equal to n ($d = n$) so that the relation is shown as the straight line in Fig.6. As seen from Fig.6, d shifts to the asymptotic value as n increases.

4. SUMMARY

The time successive processes of the electric properties of the $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ crystal were studied by two different experimental methods. The frequency dependence of the ac conductivity was analyzed by the power law v^s . The value of the exponent s depends on the temperature and the measurement cycles. The meta-stable structure was discussed in terms of the exponent s .

The power spectrum densities were calculated from the time series of the ac conductivity. The frequency dependence of the power spectrum densities is well represented by the power law $1/f^\alpha$. The obtained value $\alpha \approx 2$ corresponds to the thermal noise. The nonlinear dynamical analyses were carried out. The analyses indicate that the correlation exponent deviated from the value of the random noise as the embedding dimension n increases.

In the present study, it confirms that the electric property measured for $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ shows the nonlinear non-equilibrium phenomena, and that the fluctuation, generated in the rare earth nitrate crystal, has both the chaotic feature and the effect of rare earth element.

REFERENCES

- (1) D. Lorenzo, D. Gianfranco, M. Alessandro and Z. Stefano, Phys. Rev. B 65 (2002),144441.
- (2) S. Field, J. Witt, F. Nori and X. Ling, Phys. Rev. Lett. 74(1995), p.1206-1209.
- (3) E. Vives, J. Ortín, L. Mañosa, I. Ràfols, R. Pérez-Magrané, and A. Planes, Phys. Rev. Lett. 72(1994), p. 1694-1697.
- (4) T. Komori, H. Yoshino and H. Takayama, J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999), p. 3387-3393.
- (5) J. P. Sethna, K. A. Dahmen and C. R. Myers, Nature 410(2001), p. 242-250.
- (6) L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Statistical Physics (New York: Wesley, 1958).
- (7) P. Glansdorff and I. Prigogine, Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations (New York:Wiley, 1971).
- (8) R. Kawashima, M.Sasaki, S.Satoh, H.Isoda, Y.Kino and Y.Shiozaki, J.Phys.Soc.Jpn. 69(2000), p. 3297-3303.
- (9) R. Kawashima and Y. Matsuda, J.Phys.Soc.Jpn.59 (1990), p.3727-3731.
- (10) R. Kawashima, S. Nishimura and H. Isoda, Physica B183(1993), p.135-144.
- (11) R. Kawashima, R. Hattada and H. Isoda, J.Phys.Soc.Jpn.68(1999), p. 1143-1147.
- (12) R. Kawashima, J. Fukui, K. Haruki and H. Isoda, J.Phys.Soc.Jpn.72(2003), p.2477-2480.
- (13) R. Kawashima, T. Saitoh and H. Isoda, J.Phys.Soc.Jpn.62(1993), p.4529-4530.
- (14) R. Kawashima, M. Hattori and H. Isoda, J.Phys.Chem.Solids 55 (1994), p.1331-1335.
- (15) R. Kawashima, S. Nasukawa and H. Isoda, J.Phys.Soc.Jpn.64(1995), p.1439-1440.
- (16) R. Kawashima, J.Phys.Soc.Jpn.60(1991),p. 342-343.
- (17) R. Kawashima, T. Sasaki and H. Isoda, J.Phys.Soc.Jpn. 63(1994), p. 2008-2009.
- (18) R. Kawashima, R. Takahashi and H. Isoda, J.Solid State Chem.121(1996), p.74-78.
- (19) A. K. Jonscher, Dielectric Relaxation in Solids (Chelsea Dielectric Press:London, 1983).
- (20) K. L. Ngai and C. León, Phys. Rev. B 66(2002), 064308.
- (21) V. V. Daniel, Dielectric Relaxation (Academic Press,London, 1967).
- (22) P. Dutta and P. M. Horn, Rev.Mord.Phys. 53(1981),p. 497-516.
- (23) R. Kawashima, T. Okubo and H. Isoda, J.Solid State Chem. 177(2004), p. 2223-2230.
- (24) P. Grassberger and I. Procaccia, Physica 9D(1983),p. 189-208.

ローカル・マニフェストのリアリティ

— 地方政治変革の潮流 —

永松俊雄^{*1}

The Reality of What “Local Manifesto” Means in Japan

— Current Movements in Local Politics —

Toshio NAGAMATSU

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

The term "manifesto" was recently introduced to the political world of Japan from Britain and began to function as a new communication tool between politicians and citizens. This paper verifies the features of what manifesto means in Japan, and studies what kind of impact the term has on voters, politicians, the assembly and the government, in particular at the local level.

Keywords : Manifesto, Policy, Numerical target, Election, Voter, Government, Assembly

1 はじめに

2003 年に流行語大賞を受賞した「マニフェスト」は、従来の選挙公約に代わる有権者との「政策契約」として我が国に紹介、導入されている。地方選挙においても、「ローカル・マニフェスト」という名称で定着しつつあり、国政のみならず地方政治にも変革をもたらす新たなツールとして期待されている。

しかし、マニフェストという言葉が一般化する中で、その特性や社会的影響についての理解は必ずしも深まっているとは言えない。マニフェストは、我が国の政治風土から生まれた従来の選挙公約とは何が異なり、何が共通しているのだろうか。また、4 年間という限られた期間で具体的成果を求められることが、地方公共団体（以下「自治体」

と言う。) にどのような影響を与えるのだろうか。さらに、地方議会（以下「議会」と言う。）を経由しない有権者との直接契約の性格を持つローカル・マニフェストは、首長と議会の関係をどう変えていくのであろうか。政策に直接関与することになる有権者は、どのような対応が求められるのだろうか。本稿は、このような問題を視野に入れながら、地方におけるローカル・マニフェストの現状と課題について検討を行うものである。

2 マニフェストの社会的文脈

2. 1 イギリスにおけるマニフェスト

マニフェストは「明確に示す」というイタリア語が語源である。イギリスでのマニフェストの起源は、1884 年にピール (Peel, R.) 首相が自らの選挙区タムワース (Tamworth) に送った書簡を、保守党

^{*1} 共通講座

が翌年の総選挙で党の方針として採用したことが始まりとされる。その後、1906年の総選挙において、初めて労働党が政党の公約としてマニフェストを出している⁽¹⁾。当初は数ページに過ぎなかったマニフェストも、現在では40～60ページ程度の冊子になっている。マニフェストは書店でも購入できるし、各党のホームページからもダウンロードできる⁽²⁾。

マニフェストは、選挙において政党と有権者との「コミュニケーションを充実させるための1つの工夫」であり「仕掛け」として考案されたものである³。有権者(principal)にとってのマニフェストは、どの政党を自らの代理人(agent)として選ぶかを判断するための情報パッケージとして、政党から見れば、有権者の政治的信頼を勝ち得るためのツールとして機能している。

日本に紹介され定着しつつあるマニフェストは、1997年に誕生したイギリスのブレア(Blair, T.)政権時代の労働党のマニフェストがモデルとされる。1979年のサッチャー(Thatcher, M.)政権発足以来18年間続いた保守党政権は、新自由主義に基づく公営企業の民営化や規制緩和に取り組み、イギリス経済の構造改革・改善を進めた。一方の労働党は、従来の福祉国家路線や労働組合依存体質から抜け出すことができず、長らく低迷を続けていた。1994年に労働党の党首となったブレアは、有権者からの支持を取り戻すべく、市場の効率性を重視しつつも国家による公正の確保を指向するという、これまでの労働党の福祉路線でも保守党の新自由主義でもない「第3の道」路線を提唱した。ブレア労働党のマニフェストの狙いは、現実的な政権運営を行う能力と政策責任を持つ決意をアピールし、有権者の信頼を取り戻すことにあった。

マニフェストには、政権政党に求められる現実的な社会認識と将来ビジョン、そのビジョンを実現するための政策理念、そして理念を具現化した主な政策群が含まれる。数値目標は有権者の信頼を得るための一手法として、効果的かつ注意深く用いられている。数値目標は、有権者にとっても政策の方向性や到達地点を理解するための、印象的かつ簡便な手がかりとなっている。

一方、イギリスの地方選挙においてもマニフェストは作成されているが、国政選挙と同様、候補者ではなく政党が作成するのが一般的である。国政レベルのように詳細なものではなく、発行部数も限られている。また国政選挙のマニフェストは

ど注目されることはない。なおローカル・マニフェストにおいて、目標を達成するための具体的手段と財源が明示されているものは少ない。これは、自治体の権限が制限されていること、財源の8割弱を国の補助金等に依存しており、自主性を発揮した政策が打ち出しにくいためである⁽⁴⁾。

国政レベルのマニフェストと比べるとかなり控え目で内容も乏しく映るが、一面ではイギリスにおけるマニフェストの性格が表われているとも言える。つまり、マニフェストには「口約束でない実現可能な政策」が求められるという認識であり、自分達のできる範囲のことを、完全とは言えないまでも約束しようとする政治姿勢である⁽⁵⁾。

2. 2 日本におけるマニフェスト

日本におけるマニフェスト(以下「日本型マニフェスト」と言う。)は、「どのような政策を実行する予定なのかを検証可能な形で有権者の前に示すこと」とされ、そこで示す政策は「どのくらいの予算を使ってどれほどのことをいつまでにやるのか、またある政策を行うとどれだけの効果があるのか、その根拠が示され、検証を事前にも事後にも出来るように作られている」ことが重要な条件とされる⁽⁶⁾。目標、達成手段、投入資源を具体的に示した政策パッケージであり、選挙を通して政党(候補者)と有権者の間で交わされる「政策契約」であることが強調されている。

例えば、2003年の統一地方選で、西川一誠知事(福井県)は100項目を4年間で実行するローカル・マニフェストを掲げた。2007年の統一地方選挙でも、高橋はるみ知事(北海道)は59項目の数値目標を掲げ、松沢成文知事(神奈川県)は11の新条例の制定をマニフェストに掲げた。これは、イギリスにおけるマニフェストの特徴的要素が抽出され、それが言わばマニフェストに不可欠な要素として日本に紹介・導入されたためである。

マニフェスト選挙では、まず政党(候補者)が政策パッケージであるマニフェストを「政策契約書(案)」として有権者に示す。有権者は各政党(候補者)のマニフェストを比較し選択を行う。選挙に勝利した政党＝政権政党(候補者＝首長)は、マニフェストを実行に移す。政権政党(首長)は次の選挙で、マニフェストの成果に関して審判を受けるというものである。

マニフェストを一種の社会契約と見なす場合、2つの拘束力を持つことになる。1つは、有権者の政

権政党(首長)に対する「命令書」としての拘束力である。政権政党(首長)にとっては、有権者に対してマニフェストを実行する「義務」を負う意味合いを持つ。もう1つは、マニフェストを示し選挙に勝利することによって、有権者からマニフェストを実行する権限を付与された「授権書」としての拘束力である。これは、政権政党(首長)が、有権者に代わってマニフェストを実行する「権限」を有するという意味合いを持っている。日本型マニフェストでは、義務・権限いずれも強い拘束力を持つものとして理解されている。

マニフェストに対して、「有権者の政権選択の実質化、政治主導の確立」という90年代初頭以来の政治改革の中心目標は、ようやく実現への分水嶺を超えつつある。「空回り気味であった日本の行政評価、行政経営が首長の政治的指導力のもとで蘇生する可能性が出てきた⁽⁷⁾」といった特効薬的な効果を期待する研究者は少なくない。その理由は、第1に浮遊する民主主義の定着と政治に対する関心の喚起、第2に官僚優位から政治優位への転換、第3に行政経営的手法(NPM)の推進、を同時に成し遂げる可能性をマニフェストに見出しているからに他ならない。

2. 3 マニフェストと代理人

日本の選挙公約の特徴は、抽象的かつ総花的なウィッシュ・リストの性格が強いことであった。有権者が代理人を選ぶ際に生じる不確実性には特に関心が払われず、そのために政党(候補者)は2つの政治的自由を享受していた。1つは、財政状況を始めとする様々な現実的制約にとらわれずに、夢や願望を語る自由である。もう1つは、表現が抽象的であるため、公約の達成が問われにくいという自由である。従って「なるべく公約はあいまいにしておいて、有権者に言質をとられないまま当選するのが賢い政治家だと考えられてきた⁽⁸⁾。」

日本型マニフェストで政策の具体性や有権者との政策契約が強調されるのは、あいまいな選挙公約が政治家のモラル・ハザードを助長し、有権者の政治不信や政治への無関心を招く一因になっていたという反省からである。

しかし、選挙がマニフェストという政策パッケージを選択する行為を意味するのであれば、当選したマニフェストの実行を行政府が引き受ければ事は足りることになる。決定された政策を着実に実行するのが行政府の本来的責務だからである。

有権者が選挙で選ぶのはマニフェストではなく自らの代理人であり、その代理人に期待することは有権者の信頼に応える行政運営にある。マニフェストは有権者に判断の材料を提供するために考案された1つの手段である。

そこには当然2つの「不確実性」が存在する。1つは、代理人が公約をどの程度守るのか実際にはわからないという不確実性と、将来起こる出来事に代理人がどう対処するのかわからないという不確実性である。有権者の信頼を得ようとするならば、代理人はこれらの不確実性を低減させる情報を提供しなければならない。

前者の不確実性を低減させるためには、政策の内容を具体的に示し、その実現を誓約する必要がある。「乳児に対して配慮する」ではなく「乳児医療費を無料にする」と宣言する方が、選挙後の言動に制約を受ける代わりに、より厚い信頼を得ることができる。数値目標は、確かに有権者の不安を低減させる有効な手段である。

将来の不確実性に対する有権者の信頼を得るためには、社会情勢の変化に対応した迅速な政策対応、すなわち状況対応型の柔軟な行政運営能力があることを示す必要がある。社会では日々様々な出来事が起こっている。数年後ではなく数か月後に社会がどのようになっているかさえ、誰も確実には予測できない。そのような中で、行政は日々起こる様々な問題や事件に対処していかなければならない。その判断を任せられる代理人であることを有権者に示さなければならない。そのためには、現状認識だけでなく、将来の出来事にどのような政策対応を取るのかという基本的考え方(政策理念)に関する情報が重要になるのである。

実は、この2つの不確実性への対処法は相反する要素を含んでいる。前者の不確実性を減少させるためには政策の具体性・明確性ととともに、約束の履行を有権者に宣誓する必要があるが、これらは代理人の自由を奪い、判断や行動に「硬直性」をもたらす側面を持っている。

一方、後者の不確実性に応えるためには、代理人には裁量の自由、すなわち「柔軟性」が求められることになる。日本では、マニフェスト導入当初から数値目標の設定とその達成度が注目されてきた。有権者も十分な情報を持っていないために、しばしば数値目標やその達成度に目を奪われやすい。しかし、社会状況や行政活動を示す一部の指標を取り上げるだけでは、全体像を把握すること

は実際には難しい。また、社会は常に変化を続け、行政を取り巻く環境も日々変わっている。その変化に対応するためには絶えざる政策見直しや取捨選択、あるいは新たな政策を実行する必要が不可避免的に生じる。仮にマニフェストに掲げた政策であっても、状況に応じてより望ましい政策に乗り換える柔軟性が求められる。選挙時に考えられた数値目標の達成より、むしろ日々の状況変化に対して柔軟な政策対応を行うことにより、4年間を通して利益の最大化が図られる方が、有権者にとっては望ましいからである。

いずれにしろ、数値目標とその忠実な履行を強調するだけでは、有権者の持つ2つの不確実性を同時に軽減させることは困難である。

2. 4 マニフェストと政策理念

マニフェストは、有権者と代理人を結ぶコミュニケーション・ツールとして機能しているが、この情報ツールには次のような留意事項が付されている。

第1に、マニフェストは実施する全ての政策を網羅することはできず、ある意図のもとで選択的に抽出された政策しか記載することができない。実務に求められる程度の詳細な内容をマニフェストに記載することは、もとより困難である。

第2に、前述のように将来起こる全てのことを予測することは不可能であり、選挙時点で想定し得る範囲の政策しか記載できない。有権者は、未知の問題や事件に対して代理人がどのような具体的対応を取るのかを、事前に知ることはできない。

第3に、有権者はマニフェストという政策パッケージを一括して承認するかどうかの選択をしなければならず、政策ごとの取捨選択はできない。当選した代理人のマニフェストに全ての有権者が反対している政策が入ることもあり得る。従って、有権者が代理人を選挙で支持することは、有権者がマニフェストの内容全てを支持していることを必ずしも意味しない。

第4に、有権者は政策の専門家ではない。マニフェストを評価するには、各分野に関する一定以上の知識が前提となる。また、要約的に記述されているため、政策の中身が見えないものも少なくない。有権者が全ての具体的目標の意味や政策の実効力を正確に評価することは難しく、多くを自らの想像に頼らざるを得ない。

マニフェストには、このような制約条件を踏ま

えたうえで、有権者の信頼を得るために必要な情報が盛り込まれる必要がある。

有権者の持つ不確実性の解消という観点から言えば、まず現状認識、すなわち理想社会と現実社会の間には、どのようなギャップが存在しているかという問題認識が書き込まれなければならない。何故なら、このまま放置しては解消されないギャップを解消するための手段が政策なのであり、まさに政治の存在理由もそこにあるからである。

次に、望ましい(と代理人が考える)社会を実現するための政策理念を有権者に問う必要がある。2007年のフランス大統領選挙において、福祉社会型の政策か自由競争社会型の政策いずれを選択するかが争点となったが、どのような政策理念のもとで理想とする社会の実現を目指すのかを明らかにする必要がある。この理念に基づいて各政策の取捨選択や優先順位づけがなされるからである。これは、日々の行政運営の基本的な行動指針ともなるものである。有権者との関係においては、政策理念が堅持されることが重視されるべきことになる。

次に、政策理念に基づく主要政策と具体的な達成レベル、そして各政策に必要な財源とその捻出方法、必要であれば工程表が続くことになるが、これはあくまで選挙時点の社会状況に基づくものであり、加えて政策の一部を例示的に取り上げるにとどまるものである。

なお、日本の従来選挙公約にも、自分が当選した場合に実現したい社会像や政策理念は書かれていた。しかし、その社会像とは「市民が豊かで幸せに暮らせる社会」といった、誰も異論を唱えないような理想的な社会の有り様を描写したものであった。また、どのような政策展開をするかという政策理念も、一言で言えば全ての分野の政策を充実するという総花的なものであった。そのため、各政党(候補者)の選挙公約は、言葉の使い方や政策の括り方が違う程度の似通ったものになっていたのである。

有権者がある特定の政党(候補者)を支持する場合、実際にはマニフェストに掲げられている政策の中で象徴的な、あるいは自分の関心のある政策を支持しているに過ぎないことも少なくない。しかし、政策パッケージを一括して承認するというマニフェストの性格上、各分野の具体的指標や政策を半ば想像的理解によって判断する前に、理想社会を実現するためにどのような仕組みを社会に

用意し、それに基づいてどのような分野の行政サービスを優先するかという政策理念を、まず判断・選択することが重要となるのである。

3 ローカル・マニフェストの現在

マニフェストは、地方選挙においても「ローカル・マニフェスト」という名称で市民権を得つつあるが課題も少なくない。

2007年に行われた統一地方選挙におけるローカル・マニフェストを見ると、従来の選挙公約の土壌に、日本型マニフェストの必須要素とされる数値目標、達成期限・工程表、財源の明示が、部分的に持ち込まれていることがわかる。候補者達は、掲げる数値目標の数や種類、数値の高さで個性を競う一方で、あらゆる分野の振興を図るという総花的、拡大志向的な姿勢は、従来の選挙公約と特に変わるところはない。また、どのような政策を展開するかという歳出面に関心が寄せられ、財源の手当については具体的に触れていないマニフェストが大半である。

3.1 ローカル・マニフェストの守備範囲

従来の選挙公約に見られた現実的制約についての無関心は、ローカル・マニフェストにも色濃く引き継がれている。

第1に指摘すべきことは、財政的制約についての無関心である。マニフェストは、実際には必ずしも全ての行政活動を対象としているわけではない。扶助費などの制度的に義務付けられている経費（義務的経費）は、首長の政策判断で見直しが柔軟にできる性格のものではない。自由裁量的な行政活動が候補者の個性を競うマニフェストの主な対象となるが⁽⁹⁾、周知のように自治体は国から強い行財政統制を受けている。

中央地方関係を財政面から見れば、総税収の約6割を国が徴収し、地方交付税・地方譲与税・国庫支出金等の財政調整制度を通じて、総歳出の約3分の2を自治体が支出する構造であり、結果として自治体の財政調整に、総税収の約3分の1が振り向けられてきた。自治体は3割自治と言われて久しいが、恒常的な自主財源不足は制度的に構造化されたものである。

特に、1990年代初頭のバブル崩壊に伴う経済不況からの脱却を目指し、数次にわたる国の経済対策に自治体も呼応した結果、財政状況は一気に悪

化した。地方財政の借入金残高は、1990年度の67兆円から2000年度には184兆円に膨れ上がった。その結果、経常収支比率⁽¹⁰⁾も1989年度の70.0%から1998年度には89.4%に上昇している。

自治体財政をさらに窮迫させることになった原因は、地方分権改革の名目で行われた三位一体の改革(2003～2006年度)である。国庫補助負担金改革で3.1兆円⁽¹¹⁾減額する見返りとして地方へ3.0兆円の税源移譲がなされたが、同時に地方交付税が5.1兆円減額されたためである。

総務省の2008年版『地方財政の状況』は、全自治体の2006年度決算を集計したもののだが、概要版の見出しは「厳しい財政状況の中、大幅な歳出削減(7年連続の減少)」であった。社会保障関係の歳出が増加する一方、職員給1.9%減、投資的経費6.5%減などの削減努力により、普通会計の歳出総額は約89兆2千億円と前年度を1.6%下回った。歳出総額は年々減っているが、最も減少したのは普通建設事業費である。1996年度には歳出の30.2%を占めていたが、2002年度には22.0%、2006年度は16.0%にまで減少している。

例えば熊本県の場合、1988年には4,000億円に満たなかった県債の残高は、10年後の1998年には1兆円を超える一方、一時期1,300億円あった財政調整基金はほぼ底をつく状況にまで落ち込んだ。また、熊本県では三位一体の改革によって裁量的に使える財源が約436億円減少した結果、2007年度予算(約7,319億円)のうち、義務的経費、準義務的経費を除く一般財源(裁量的に使える財源)は、約670億円にまで減少した。これは予算総額の約9%に過ぎない額である。前回統一地方選挙が行われた2003年以降、裁量的財源は4年間で約40%減っている。それでも、同年度の熊本県の自主財源額及び比率はいずれも九州で2番目に高いのである。ちなみに、熊本県の予算規模は、地方分権一括法が施行された2000年度以降8年間で15%縮小している。

また、熊本県の裁量的経費の中には、私学助成、商工会議所・商工会人件費等補助、乳幼児や重度心身障害者への医療費補助等、削減が容易ではない経費が多く含まれている。多くの自治体の状況も同様であり、文字通り自由に使える財源は見かけ上の裁量的財源の額よりかなり少ない。これは、人件費補助など聖域とされていた事業の削減をしない限り、新規事業の財源ねん出が難しいという極めて厳しい事態を意味している。

2003年の統一地方選時に比べ2007年の選挙時には、地方財政は一段と厳しさを増していた。このような財政事情の中で「口約束でない実行可能な政策」を掲げようとするれば、イギリスのローカル・マニフェストのように、かなり控え目なものとならざるを得ない。しかし、2007年の統一地方選時においても、裁量的財源の現実を視野に入れた上で、その限られた財源を各政策分野にどう分配するかを示したローカル・マニフェストは、ほとんど見受けられない。多くの数値目標が華々しく掲げられる一方で、必要財源の捻出が容易に想像し得ない数値目標も少なくない。また、どの分野の行政サービスを削減するかを明示したマニフェストも見出し難い。数値目標の華やかさが、予算を組むこと自体が難しくなっている自治体の現実を覆い隠す結果をもたらしたのである。

3. 2 所管領域の曖昧さ

第2に指摘すべきことは、首長の所管領域についての無関心である。国と地方の役割分担と責任の明確化は、戦後一貫して指摘されてきた問題である。シャープ勧告(1949年)以来、中央地方関係に関する数多くの勧告は、国、都道府県、市町村の事務を可能な限り明確に区別することを提言してきた⁽¹²⁾。しかし、集権的分散システム⁽¹³⁾と呼ばれる我が国の中央集権的な制度構造のもと、国と自治体の守備範囲や役割は明別し難く重なり合っている。2000年に地方分権一括法が施行されたが、大規模な法令の改正とは対照的に、現在でも「ほとんどの自治体現場では『分権元年』以前と同様の意識と実務が支配⁽¹⁴⁾」している。

各候補者は等しく地方分権の推進を訴えるが、国と地方の本来の役割に言及したローカル・マニフェストは見出し難い。知事、市町村長選挙を問わず、候補者はあらゆる地域課題を視野に入れたローカル・マニフェストを作成している。

また、このような所管領域に関する一種の麻痺感覚は、制度的には首長の権限外とされている領域にまで及んでいる。例えば2007年の都道府県知事選挙においても、「義務教育において、全科目で全国の平均を上回ることを目指す」「県立高校の部活動加入率運動部50%、文化部25%以上」、あるいは「刑法犯検挙率、窃盗犯検挙率で全国トップレベルを目指す」「飲酒運転死亡者数ゼロ」など、多くの候補者が教育委員会や公安委員会の所管事項に関する目標を掲げた。

都道府県や市町村の教育委員会は、戦後、民主化の重要な柱の1つとして1948年に制度化され、以後、教育行政は一般地方行政から独立している。首長の権限は議会の同意を得て教育委員を任命する権限と、議会への予算や条例議案の提出権等に限定されている⁽¹⁵⁾。これは、首長の政治的影響力を排除し、教育の中立性を確保するためである。

都道府県公安委員会は知事の所轄とされているが、警察に対する直接的な指揮命令権は含まれない。ここで言う所轄とは公安委員の任免や警察に関する予算・条例議案の議会提出であり、知事の所轄以外の事項については、公安委員会が警察を管理する権限と責任を負うものとされる⁽¹⁶⁾。

これまでの選挙公約にも、教育や治安については盛り込まれるのが通例であった。確かに、広報・啓発、地域住民の取り組み支援といった事業の企画・実施は可能である。また、すでに教育委員会や公安委員会で政策方針が決定している事項を、条例上程や予算調製権を持つ首長として尊重するという趣旨での言及は可能である。しかし、数値目標の中には教育委員会や公安委員会の同意を要する事項や、指揮・命令権がなければ実現困難な項目も少なからず見受けられる。

これに対しては次のような反論がなされる。第1に、民主主義の原点は言論の自由にあり、首長の権限外の事柄について議論をし、あるいは提言、意見することまで排除されるものではない。もし、権限外のことについて発言できないのであれば、国の制度や事業に対する要望、陳情もできないことになる。第2に、首長は教育委員会等に対する指揮、命令権はないが、予算や条例の議会上程権を持っていることから、一定の影響力を行使することは認められている。

しかし、国等への要望、陳情は、まさに首長の政治的影響力を前提にしたものであり、公共事業を巡って繰り返される汚職事件も、首長の個人的意見や独り言が事の起こりである。「天の声」と言われるように、首長の発言は権限の有無に関わりなく十分な政治的影響力を持っている。制度的議論はあるにしても、行政の長として、率先して法令の尊重、遵守すべき立場にあることに鑑みれば、やはり厳しい自制が求められよう。

3. 3 政策の目的と手段

日本型マニフェストでは、検証可能な具体的政策をパッケージすることが強調されるが、政策に

は3つの要素が含まれる⁽¹⁷⁾。政策の構成要素は、第1に、社会課題に対応するための特定の目的や目標を有していること⁽¹⁸⁾。第2は、目的を実現するための手段として、予算、人員等の行政資源が組み合わされた行政活動が目的に照らしてある程度のもたまりになっていること。第3は、行政活動の実施を通じて、一定の効果を国民生活や社会経済に及ぼすものであること、である⁽¹⁹⁾。

政策は、望ましいと考えられる社会と現実社会との間に、放置しては適切に解消されない何らかのギャップがあることを前提としている。行政による財貨・サービスの提供活動は、そのギャップを解消するための手段である。何故、政策の目的と手段を識別する必要があるかと言えば、マニフェストで言う「数値目標」とは何を指すのか、換言すれば、政策のどの構成要素を指標として選択することが適当か、という問題があるためである。しかし、政策の目的(実現すべき社会状況)と手段(行政活動の内容)の違いは、意外なほど意識されていない。

2007年の統一地方選挙で出されたローカル・マニフェストの数値目標を大別すれば、実現したい社会を明示するタイプ(理想社会明示型)と行政の活動内容を明示するタイプ(活動明示型)に分けられる。

理想社会明示型とは、例えば県民所得40万円増(麻生渡知事:福岡県)、有効求人倍率維持(飯泉嘉門知事:徳島県)、食料自給率220%以上(高橋知事)という具合に、自らが実現したい地域社会の状況を具体的に明らかにしたものである。

一方、行政活動明示型は、例えば「地域産業活性化基金の創設(野呂昭彦知事:三重県)、経済・雇用振興キャビネットの創設(平井伸治知事:鳥取県)、各拠点への立地企業相談員の配置(荒井正吾知事:奈良県)」という具合に、政策目的を達成するための具体的な行政活動を記したものである。実際のローカル・マニフェストでは、この2つのタイプの数値目標が混在している。

ある社会状況を実現するための手段としての行政活動が目的を達成するまでの過程は、「投入(Inputs)→活動(Activities)→結果(Outputs)→成果(Outcomes)」というロジック・モデルで表わされる⁽²⁰⁾。

例えば、「人権啓発教育講座」の実施は、差別のない地域社会の実現という政策目的を達成するための1つの手段として位置づけられる。この場合、

講座開設のために必要な教職員や教材、教室などが「投入」される資源であり、その資源を活用して講座を年間30回開催するというのが「活動」である。そして年間3千人が受講するというのが「結果」であり、それによって受講生の80%が人権について正しい知識を修得するというのが「成果」である。この例に基づけば、飯泉知事が掲げた「人権教育啓発推進センターを核とした教育啓発の実施。講座への参加者数:平成22(2010)年までに1万2千人」という数値目標は「結果」指標となる。

これに対し、例えば「県民所得を40万円引き上げる」という指標は、行政活動との距離が遠く、その影響力が判然としない「成果」指標である。戒能一成は、県民所得の水準が、製造業の生産額や労働生産性と強い正の相関関係にあることを指摘しているが⁽²¹⁾、地域経済が持続的発展を遂げるためには地域産業の労働生産性の向上が不可欠である⁽²²⁾。各自治体においても、企業誘致を始めとして中小企業向け低利融資や各種相談・指導、商工団体への補助など様々な商工業振興策を展開している。しかし、各振興策への投入資源は産業活動の規模から見れば小さく、各産業の労働生産性向上への寄与も間接的で限定的なものである。また各振興策がどの程度労働生産性の向上に寄与したかの判別もほぼ不可能である。

この他にも、例えば「男性の家事時間を20分伸ばす」といった、実現するための政策立案自体が容易でない数値目標も見られる。これらは、まさに候補者個人の夢や願望を数字で表した理想社会明示型と言えよう。目的地を示すのが政治家の役目であり、その実現化は政策のプロたる職員の役目とする見方もあるが⁽²³⁾、実現するための政策手段を用意することなく成果指標だけを数値目標として掲げることは、結果として首長自身や職員の行動を制約し、他の行政サービスも人員や予算の削減という形でしわ寄せを受けることになる。

実現可能性を重視した政策公約をマニフェストと呼ぶとすれば、その範疇からは外れていると言えよう。

4 変革を迫られる地方行政

4.1 ローカル・マニフェストと行政計画

ローカル・マニフェストの登場は、ボトムアップからトップダウン型行政への移行を促進する。自治体において、総合計画が最上位の計画だと考

える職員は少なくない。「多くの行政職員が 10 年間の総合計画を 4 年毎に行われる首長選挙の結果とは関係なく、粛々と実施されるべきものとして理解している⁽²⁴⁾。」これは、行政の継続性はその時々で替わる首長ではなく、職員によって維持されているという認識からくるものである。

また、これまでの総合計画は、「ボトムアップで、既存の事務事業を束ねて施策が設定され、そうした施策を束ねて政策が設定されている⁽²⁵⁾。」各部局はそれぞれ複数の計画を持っており、それに基づいた事務事業を継続的に展開している。総合計画を策定する場合、企画部局は事務事業をどのような箱に区分けして入れるか、つまり政策理念や政策・施策レベルの箱の名称を工夫することにより、その時々々の首長の特徴を演出する手法を取ってきた。「上位の政策や基本目標、理念がきわめて抽象的だったり、政策分野を提示するだけのような表現だったりする⁽²⁶⁾」のは、このような事情による。

例えば、熊本県では 2004 年春に潮谷義子知事が 2 期目の当選を果たしたが、これを機に、それまで総合計画に基づく柱立てがなされていた「重点施策」を、潮谷知事選挙公約「くまもと元気づくり宣言」の柱立てに変更した。これは、潮谷知事の公約を実現するための施策が重点施策との考えからであった。しかし、同県のホームページでは、重点施策は「県総合計画を着実に推進するため」のものと説明されていた。総合計画が最上位計画であり、重点施策(知事の公約)は総合計画を推進するための下位計画という位置づけである。これも、広く県民や学識者の意見を聞き、所定の手続きを経て策定された行政計画と、知事が選挙に勝利するために掲げた公約とは性格が異なるとみならず組織文化からきている。

今後 4 年間の行政活動を具体的に示して有権者に問うローカル・マニフェストの一般化は、計画行政のパラダイム転換をもたらすことになる。これまで曖昧な関係にあった行政計画と首長の公約が、明確に結びつくことになった。当然ながら、職員の行動はローカル・マニフェストを頂点とする政策体系に拘束されることになる。

問題となるのが、過去に策定された計画との整合性である。過去に決定された政策は、行政の継続性の観点から当然尊重されなければならない。しかし、選挙で首長が有権者に約束したローカル・マニフェストより上位に位置することはない(政策転換を有権者が選択した場合には、行政はそ

れに服する)というのが、日本型マニフェストの考え方である。職員が判断する政策の継続性・安定性よりも、有権者が選挙で支持した政策選択が重視される時代への移行である。

なお、総合計画とローカル・マニフェストをどう整合させるかについての首長の対応は分かれている。1 つは、松沢知事のようにローカル・マニフェストを総合計画に入れ込むというやり方である。神奈川県では概ね 20 年後の 2025 年を展望し、望ましい将来像や政策の基本方向などをまとめた「神奈川県力構想・基本構想」と、任期中の 2007～2010 年度に行う県の取組みを明らかにした「神奈川県力構想・実施計画」を策定している⁽²⁷⁾。東国原英夫知事(宮崎県)は、総合計画の期間を知事の任期に合わせて 2007～2010 年度の 4 年間とする「新みやざき総合計画」を策定した⁽²⁸⁾。

一方、総合計画の守備範囲にローカル・マニフェストも含まれるとして処理するやり方もある。古川知事は、2003 年就任時に、実際には相当総花的に書き込みがなされていて、書き換えをしないと整合性が取れないとまでは言えないとして、総合計画の見直しを行わなかった⁽²⁹⁾。これまでの総合計画は、1 年間(もしくはそれ以上)かけて策定する相当の手間のかかるものであり、同じ作業を 4 年ごとに繰り返すことは効率的ではないという経済合理主義的な考え方もある。しかし、どのようなローカル・マニフェストを持ってきても整合性が取れるという総合計画は、「あまりにも意味のない総花的なものにとどまっているという根本的な問題⁽³⁰⁾」を抱えていることも確かである。

いずれにしろ、マニフェストの登場により公約と行政計画とが連結し、ローカル・マニフェストを実現するために毎年度ローリング(見直し)を行う中期計画の重要性がクローズアップされることになった。

4. 2 自治体組織へのインパクト

ローカル・マニフェストは、制度疲労が目立つ自治体の財政・人事システムの変革を求めるものでもある。これまでの選挙公約は抽象的であったこともあり、新首長の初予算の実態は、公約の区分にあわせて作られた箱に、既存の事務事業を整理し直すという意味合いが強かった。熊本県の場合も、2000 年に潮谷知事が初当選した際に、公約実現のために用意されていた財源は 2 千万円余に過ぎなかった。ほとんどの予算の使い道は、選挙

前に財政課と各部局の間で決着がついていた。職員人事も同様であった。

しかし、ローカル・マニフェストの登場は、各部局が事前に用意していた予算の大幅な組み替え、場合によっては組織改編や人員配置の変更を要求することになる。具体的目標の実現をまず優先する予算編成、組織体制が求められ、選挙後短期間での大幅な組み替えにも対応できる機動性ある財政・人事システムが必要とされるのである。特に「現職の政策を批判し 180 度の方向転換を盛り込んだローカル・マニフェストで当選してきた新首長の場合、それを迎える自治体組織に大きな混乱が予想される⁽³¹⁾。」

また、行財政改革が大きな課題とされていることから、どの候補者もかなり大胆な改革案を提示している。佐賀県では、古川知事のローカル・マニフェスト(2003年)に基づき部局制から本部制に再編・集約され、同時に財政・人事権が各本部に大幅に移譲された。また、2007年の知事選において、古川知事は公共投資が予め定めた一定総額を超えないようにする「総額調整ルール」の導入をローカル・マニフェストに掲げた。

ローカル・マニフェストは、職員に対しても担当業務において掲げられた具体的目標を4年以内に達成することを要求する。西尾勝は、「首長が住民を代表している自分たちの使用者、指揮監督者であり、職員はその補助機構でしかない⁽³²⁾」ことを強調しているが、職員はトップの指示に従うという、当たり前のことを改めて認識しなければならなくなったのである。ただ、現在のように1人で行政のトップとして乗り込んだとしても、数千人、数万人規模の職員を抱える自治体組織は簡単には動かないのが現実である。

トップダウンによる組織運営の強化を図る1つの手法が、「インナー・マニフェスト」と呼ばれるものである。これは、首長が公約したローカル・マニフェストをどうやって実現していくかを具体的に記したものであり、首長と幹部職員との間で交される政策契約とされる。福井県の「政策合意」、長崎県の「職務目標」等は、いずれも首長と取り交わす約束として、毎年度各部局長に対して目標設定を求めるインナー・マニフェストである⁽³³⁾。各部局の取組みについては毎年実施状況が公表される。

「県部長目標達成率 59%」—これは、西日本新聞(2007.5.7付)が長崎県の各部長のインナー・マニ

フェストの事後評価を報じた記事の見出しである。防災危機管理監がインナー・マニフェストで約束した目標を1つも達成できなかったことが報じられている。では、長崎県の行政サービスは、達成すべき水準の6割に満たず、防災危機管理に至ってはまさに危機的状況にあるかと言えば、そうではない。

インナー・マニフェストは、マニフェストの不完全さを同様に引き継ぐことになる。前述のとおり、マニフェストに掲げられた具体的目標は、行政活動の全容を表すものとはなっていないことから、インナー・マニフェストも自治体活動の一部を抽出したものになっている。先の記事は、インナー・マニフェストの達成度を、自治体全体の活動水準を表す象徴的指標として扱った例である。

確かに、上司たる知事が部局長にインナー・マニフェストの作成を命じ、経過や結果の報告を受けることは、ローカル・マニフェストの進捗管理のための一手法である。しかし、インナー・マニフェストは、もともと首長査定を経て議会で議決された予算の中で、ローカル・マニフェストに明記された事項を中心に部局別の取り組み概要をまとめたものである。従って、インナー・マニフェストを詳細・緻密化すればするほど、重点施策を中心とする部局別事業計画書に近くなり、事後評価も部局別の政策評価に近似する。

ローカル・マニフェストが有権者と首長との直接契約であるとすれば、その達成度は、首長が自らの責任において有権者に対して直接公表すべき性格を有している。首長が持つべき責任を、結果として部下に分散・転嫁した形で外部に公表する手法は、首長と職員の信頼関係や士気に少なからぬ影響を与えるものであり、人事管理・組織運営上から見ても検討すべき余地がある。

具体的指標によって到達地点を示すローカル・マニフェストは、自治体活動を達成度で評価する成果主義への転換を促すが、これは首長、幹部職員にとどまらず一般職員にも波及する。特に、ローカル・マニフェストに明記された数値目標を担当する課長、班(係)長、担当職員は、その数値達成を強く求められることになる。

この評価方法の導入には幾つかの問題点が指摘される。この手法は各職員の権限・責任が明確な組織を前提とした手法だが、第1の問題は、曖昧な各職員の責任範囲である。確かに制度上は各決裁権者(首長、部長、課長)が執行責任を持つが、

各人がどの程度の責任を持つか判然としない。決裁書に押印する担当、係長、補佐、次長、あるいは合議先の職員の職務上の責任割合は、さらに識別し難い。成果主義に基づく評価の徹底は、責任範囲が明確となる雇用形態や決裁制度を採用しない限り、現在の稟議制のもとでは難しいのが現実である。

第2の問題は、数字による定量評価を原則とする成果主義は、定性評価が適当とされる行政サービスや、プロセスに関する諸活動をうまく評価できない。行政サービスの徹底した数値化を試みた米国政府のPPBS(Planning Programming Budgeting System)が結局失敗に終わったように、行政活動の性質上、数値評価が困難なものも少なくない。

第3に、具体的目標が不適切あるいは実現が困難な場合、職員がいかに努力を積み重ねたとしても、結果を伴わない活動は評価の対象とはなり難い。有権者との契約として具体目標が明示されている以上、「契約を履行したか否か」「目標の何%を達成したか」が評価基準となるからである。

第4に、先に述べたように、義務的活動はその性格上マニフェストの対象とはなりにくい。欠くべからざる義務的行政サービスをいかに迅速・的確に提供したとしても、マニフェストに明記されていない限り、優先的な評価対象にはならない。しかし、自治体の行政サービスにおいて、世間の注目を集めるような政策はごく一部に過ぎない。住民の日常生活を支える自治体活動の大半は、地味で黙々とした努力を要する事務事業なのである。

4. 3 ローカル・マニフェストと地方議会

ローカル・マニフェストは、議会と首長の間新たな軋轢を生む火種ともなる。有権者との政策契約とされるローカル・マニフェストは、議会での議論や承認手続きを経ることなく、事実上政策を決定する側面を持つからである。これが、ローカル・マニフェストは議会軽視につながるの批判を生む理由である。

日本の地方自治は、首長も議員も直接選挙で選ぶ二元代表制を採用しているが、この制度の趣旨の1つは、これによって権力の濫用を防ぐことにある。例えば、議会は首長に対する不信任の決議権を持つ一方で、首長は不信任決議後10日以内に議会を解散することができる。首長は予算等の議案提出権を持つが議会の承認を必要とするという具合に、相互牽制的な仕組みが採用されている。

首長と議会は「車の両輪」であり、互いに緊張感をもってそれぞれの役割を果たすことが理想とされるのも、このような制度構造に由来する。

しかし、首長は自治体を「統括し、これを代表する⁽³⁴⁾」という言葉に象徴されるように、現実には首長が優位にある。議会も、議決権を首長と連帯して責任を負うという意味ではなく、首長の責任で行うことを認める権利として理解しており、結果として地方行政に関する実質的な責任は首長が担っている。このような首長と議会の関係について、「理想と現実の乖離は、努力を積み重ねて解消できるとはとても思えないほど深刻になっている⁽³⁵⁾」との指摘があることも確かである。「二元代表制全体について言えば、よく機能させる可能性よりも、その問題点を深刻化する可能性の方が高いかもしれない⁽³⁶⁾」という指摘は、ローカル・マニフェストは首長と有権者の絆を強める一方で、議会の形骸化に拍車をかける効果を併せ持つためである。

また、首長はローカル・マニフェストを実現するための諸議案を議会に上程することになるが、日本型マニフェストは首長自身の言動を強く拘束することから、仮に議会多数派の意向と異なる政策であっても、その変更は容易にはできない。このため、議会は首長に対して是々非々で望むという大義のもと、政策というより「勝つか負けるか」という対立関係の深刻化を助長しやすい。

2006年に初当選した嘉田由紀子知事(滋賀県)は、ローカル・マニフェストでダム建設の「凍結・見直し」を掲げていた。しかし、知事就任後、現状を精査した結果として、同年末、6つのダムのうち県営1つを除き、「有効性を認める」旨の発言を行い、2007年度当初予算では3つのダム計画の関連経費を計上した。「ダムだけに頼らない治水対策の観点からダム計画を検討する」との発言が、支持者やマスコミから「ダム容認への路線転換」、議会多数派からは「二枚舌」との非難を浴びた。ローカル・マニフェストに「ダム以外の方法」と記載していたためである⁽³⁷⁾。

研究者の一般的論調は、「首長は貫徹するために努力すべきだ。議会ですら議案を否決されても、少なくとも1期目は頑張り通さなければならない。そうでなければ選挙の意味を問われる⁽³⁸⁾」というものである。首長は安易に妥協すべきではないという、有権者との誓約書としてのローカル・マニフェストの重さが強調されている。

しかし、首長と議会との厳しい対立は、総じて行政の混乱・停滞を招きやすい。また、現職でなければ複雑化した行政活動の実態を正確に把握することは難しいし、社会状況の変化に合わせて政策変更が求められる場合もある。例えば、嘉田知事は「県職員の人件費の2割、人員の1割の削減」をローカル・マニフェストで掲げたが、教職員や警察職員は法令で定数が決まっており、知事部局などの職員から削減しようとする、ほぼ半減させる必要があることが分かったとして断念した⁽³⁹⁾。これは、適切な対応と言えよう。しかし、一方で有権者との政策契約とは異なる対応をしたことも確かである。

このように、日本に導入されたマニフェストでは数値目標の履行義務が強調されるため、硬直的な政策運営を強いる側面を持っている。ローカル・マニフェストは、首長が自らの志を貫徹する強力な武器となる一方で、首長自身を同様の強さで束縛する、両刃の剣ともなるのである。自治体の懸案事項には様々な対立が内在していることから、特に議会多数派と対立する政策をローカル・マニフェストに明記する場合には、十分な政策的根拠が求められる。議会との政策論争の活発化を期待する論調もあるが、日本型マニフェストの持つ硬直性は、首長か議会かという二者択一的対立を助長する可能性を明らかに持っている。マニフェストの持つ機能的な限界を考慮すれば、マニフェストを硬直的な政策契約とみなすことは、危険を伴う行為なのである。

一方、マニフェストを状況対応型の柔軟性を持つ政策パッケージとしてとらえたとすれば、議会はこのようなマニフェストの持つ不完全性を補完する機関となる可能性を持つことになる。首長が掲げたローカル・マニフェストを、同じ有権者の代理人として協力して改善していくという行動選択である。この文脈から言えば、ローカル・マニフェストは首長と議会の新たな政策協力関係構築の機会を提供するツールにもなり得る。

しかし、この機能が発現するためには、ローカル・マニフェストに掲げた数値目標や政策手段に必要以上に固執しないという首長の政治的器量と、意見の相違はあったとしても、同じ有権者の代理人として地域社会に尽くすという議会側の協働意識、そして代理人の行動に対する有権者の賢明な監視がその前提として求められることになる。

5 ローカル・マニフェストと公共性

ローカル・マニフェストは、地域の主要課題や争点化している問題に対し、どのような政策対応を行うかについての決定を自治体外部で行う機能を持つが、同時に社会に新たな責任をもたらすものでもある。

第1に、ローカル・マニフェストは、地域社会の全ての関係者に対して政策に関する「責任の共有」を要求する。行政任せの風潮や政治的無関心もあり、これまで実質的な政策責任は全て行政が担っていた。しかし、有権者の立場も、政策の受益者・要望者からマニフェストに関する責任を首長と共有する当事者になる。投票行為に対する社会的責任が問われるのである。

第2に、ローカル・マニフェストは候補者、有権者双方に、社会性、公共性を前提とした思慮分別を要求する。これまで候補者は有権者に夢や願望を訴えていけばよかった。有権者も個人的利害や関心事項を政治家や行政に要求していればよかった。しかし、政策は、個人の利害得失に基づく行動に任せては解決されない社会課題を解決するために存在している。有権者には、マニフェストを個人の利害を超える公共的利益の観点から検討・選択することが求められるのである。

第3に、マニフェストは、限られた財源をいかに配分するかという問題を社会に提示する。欧米においては、政策論議の際には財源問題も併せて議論されるのが普通だが、我が国では政策と言えどもつばら歳出に関するものであり、歳入とは切り離して議論されるのが通例である。しかし、限られた自治体の財源を視野に入れるならば、どの分野を優先するか、しないかという、厳しい現実的な議論を避けることはできない。この視点が欠落しては、あらゆる分野に関する数値目標をセットとして提示する日本型マニフェストの実現可能性や社会的妥当性を評価することはできない。

第4に、マニフェストは自治体に徹底した情報公開を要求する。候補者が正しく地域課題を認識し、有権者がマニフェストを適切に評価するためには、地域社会の現状や自治体活動の全体像を、ある程度は把握していることが前提となる。

なお、自治体がこの種の情報を外部に公表しているというだけでは不十分である。例えば、多くの自治体は毎年政策評価を公表している。確かに詳細ではあるが、それをもって各政策の実態を理

解することは不可能に近い。住民に理解できる、わかりやすい形にして情報を流す必要がある。特に、自治体の厳しい財政事情や裁量的財源がどの分野にどのような形で使われているのかといった情報が行き届かない限り、候補者が非現実的なマニフェストを掲げ、あるいは有権者が現実を無視した選択を行う可能性の方がむしろ高いであろう。そうなれば、自治体内部に大きな混乱が生じるだけでなく、行政サービスにも様々な影響が生じる。選挙を控える自治体においては、候補者や有権者が必要とする地域社会や行財政に関する情報をわかりやすく整理し、提供しておくことが不可欠である。

おわりに

ローカル・マニフェストは、立候補者と有権者をつなぐ有効なコミュニケーション・ツールとして一定の役割を担いつつある。また、政策に有権者の意見を直接反映させるだけでなく、安定性・継続性を重視する自治体職員にはなし得ない大胆な政策や改革を一気に実現化させるツールとなり得るものである。

一方、ローカル・マニフェストは全ての政策を網羅することはできず、有権者も政策パッケージを一括して承認するか否かの選択しかできない。また、立候補者の自制心の欠如や有権者の政治的無関心は、非現実的なローカル・マニフェストを生み出しかねず、それは自治体活動に歪みや混乱をもたらす可能性をはらんでいる。さらに、日本型マニフェストの持つ硬直性は首長自身を拘束するとともに、結果として議会の存在意義を希薄化させる側面を併せ持つものでもある。

このような諸相を持つローカル・マニフェストの今後の課題は、大別して2つに分けられよう。第1の課題は、ローカル・マニフェストをどのような社会的機能、特性を持つツールとして理解し、わが国の政治風土に定着させていくかという問題である。現時点での日本型マニフェストは、イギリスにおけるマニフェストの特徴的要素が強調され、それが言わば理念型として紹介・導入された経緯から、明確性とともな強い硬直性を持つものとして理解されている。

しかし、小松浩が指摘したように、日本型マニフェストの手本となったイギリスにおいても、マニフェストは「融通の利く」原理として理解され

べきとの見解が有力であり、「完全に実行されるべき政策」というよりは、選挙民が選択を行う際のシンボル(目安)として受け止められている⁽⁴⁰⁾。

自治体は翌年度の歳入予測も容易ではない状況にある。地方税収もさることながら、地方交付税についてはさらに不透明な状況にある。また自治体を取り巻く社会経済環境も日々刻々と変わっている。2008年秋の金融危機に端を発した景気後退は地域経済にも大きな影を落としているが、当然ながら2007年の統一地方選挙時のローカル・マニフェストは、このような事態を想定したものではない。

社会経済情勢への的確な対応という観点からみても、ローカル・マニフェストを金科玉条としてとらえ過ぎることはリスクを伴う行為である。情勢の変化に応じて一部の政策を変更または転換する柔軟性が、日本型マニフェストにも組み込まれる必要がある。換言すれば、導入段階における理念型マニフェストから定着段階における現実型マニフェストへの移行の問題である。

第2の課題は、ローカル・マニフェストの使い手の問題である。ローカル・マニフェストをどう使いこなすかによって社会に対する影響は大きく異なるものとなる。ローカル・マニフェストが期待される社会的効果を発揮するためには、有権者、政治家、自治体職員全ての関係者がその機能、特性、限界を理解するとともに、政策責任を共有する意思と自制心、そしてより望ましい社会を実現するための情熱を持つことが求められる。新たなツールを使いこなすためには使い手にも相応の心構えと修練が求められるのである。

ローカル・マニフェストは地域社会への適応途上の段階にあるが、本稿で概観したように様々な変化や葛藤を生み出している。その定着過程において、有権者、政治家、自治体職員の意識や行動、そして自治体の活動自体に様々な体質的变化が生じ、それらが日本におけるマニフェスト運動の成果として社会に刻まれていくことになる。

注

- (1) Ramsden (2002) p420.
- (2) 小松 (2004) p131.
- (3) 豊永 (2005.10.3)
- (4) (財)自治体国際化協会ロンドン事務所(2005) p35-36.
- (5) (財)自治体国際化協会ロンドン事務所(2005) p38,40.
- (6) (社)日本経済調査協議会(2006) p1.

- (7) 後(2007)p232.
 (8) 後(2007)p236.
 (9) 「主な対象」の含意は、義務的・準義務的経費が全くマニフェストの対象とならないわけではなく、例えば人件費の削減や事務事業の見直し等、行財政改革にかかる取り組み等については対象となるためである。
 (10) 経常収支比率(%) = 人件費、扶助費、公債費等に充当した一般財源 / 経常一般財源 (地方税 + 普通交付税等) × 100
 (11) この額は、国庫補助負担金削減額 4.7 兆円から、事業廃止等によるスリム化(自然減)及び国庫補助負担金から交付金化された額を除く実質ベースの減少額である。
 (12) 地方分権改革推進会議(2001.9.14)p8-11.
 (13) 神野(1993)
 (14) 松下、西尾、新藤編(2002)p85-86.
 (15) 地方教育行政の組織及び運営に関する法律 23 条、24 条
 (16) 警察法 38 条
 (17) 政策の構成要素についても当然ながら多様なアプローチが可能である。松下圭一『政策型思考と政治』東京大学出版会(1991)p10.などを参照されたい。
 (18) 目的と目標は厳密に区別されて使用されているわけではないが、目的は抽象度が高く、目標は特定の具体的対象を指す用語として使用されるのが通例である。
 (19) 宇賀(2002)p18.
 (20) 龍・佐々木(2000)p26-27.
 (21) 戒能(2005)
 (22) 内閣府(2007)
 (23) 佐々木(2007)p26.
 (24) 後(2007)p230.
 (25) 後(2007)p229.
 (26) 後(2007)p230.
 (27) 神奈川県(2007)
 (28) 宮崎県(2007)
 (29) 古川(2005)
 (30) 後(2007)P235.
 (31) 佐々木(2007)p24.
 (32) 西尾(2007)p23.
 (33) 小池(2007)p27-29.
 (34) 地方自治法 147 条
 (35) 後(2007)P246-247.
 (36) 後(2007)P248.
 (37) 大峯(2007)p34.
 (38) 西尾(2007)p22.
 (39) 大峯(2007)p33.
 (40) 小松(2004)p139.

参考文献

- ・ 豊永郁子「マニフェスト政治にもの申すー日本化されたマニフェスター」(2005.10.3)
<http://www.asahi.com/ad/clients/waseda/opinion/opinion158.html> (2008.2.20)
- ・ (社)日本経済調査協議会「マニフェストによる政治ガバナンスの確立ー大文字のマニフェストを書けー」(社)日本経済調査協議会(2006)
- ・ 総務省自治行政局「地方分権改革推進会議(2001.9.14)ヒアリング資料 1-2『国と地方の役割分担等について』」総務省(2001)
<http://www8.cao.go.jp/bunken/h13/004/1-2.pdf> (2004.8.15)
- ・ 後房雄「ローカル・マニフェストと二元代表制ー自治体再生の胎動と制度の矛盾ー」法政論集 217 号(2007)p223-259.
- ・ 神野直彦『『日本型』税・財政システム』岡崎哲二、奥野正寛編『シリーズ現代経済研究 6 現代日本経済システムの源流』日本経済新聞社(1993)
- ・ 松下圭一、西尾勝、新藤宗幸編『岩波講座自治体の構想 1 課題』岩波書店(2002)
- ・ 宇賀克也『政策評価の法制度ー政策評価法・条例の解説』有斐閣(2002)
- ・ 龍慶昭、佐々木亮『「政策評価」の理論と技法』多賀出版(2000)
- ・ 戒能一成「地域経済の動向変化の要因分析-何が各都道府県の県民所得を決定していたのか?-」経済産業省地域経済研究会(2005)
<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/> (2008.3.10)
- ・ 内閣府「平成 19 年度年次経済報告(経済財政政策担当大臣報告ー生産性上昇に向けた挑戦ー)」(2007)
<http://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je07/07b02010.html> (2008.3.10)
- ・ 佐々木信夫「問われる『行政の継続性』とマニフェスト」『ガバナンス』No.73、ぎょうせい(2007)p24-26.
- ・ 神奈川県「神奈川県力構想」神奈川県(2007)
<http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/01/0102/sougou/sougou/kanagawaryoku/index.html> (2008.5.20)
- ・ 宮崎県「新みやざき総合計画」宮崎県(2007)
<http://www.pref.miyazaki.lg.jp/parts/000085539.pdf> (2008.5.20)
- ・ 古川康「ローカル・マニフェストの実際と今後の課題」『地方自治』2005 年 8 月号、地方自治制度研究会(2005)
<http://www.power-full.com/gra/tihouziti2005-8.htm> (2008.5.20)
- ・ 西尾勝「候補者レベルのマニフェストを首長・行政の『約束』とすべきー地方の政治改革と『政権交代』」『ガバナンス』No.73、ぎょうせい(2007)p20-23.
- ・ 小池治「首長の交代と自治体職員ーマニフェストとどう向き合うかー」『ガバナンス』No.73、ぎょうせい(2007)p27-29.
- ・ 大峯伸之「Case Study 1 『政権交代』で何が変わったのか滋賀県「推進」から『凍結』へー嘉田・滋賀県政はどこまで対話路線を貫けるかー」『ガバナンス』No.73、ぎょうせい(2007)p32-34.
- ・ 揚田徹「特集 3 イギリスの地方版マニフェスト」『自治体国際化フォーラム』No.178、(財)自治体国際化協会(2004)
- ・ 金井辰樹『マニフェスター新しい時代の潮流ー』光文

-
- 社(2003)
- ・鎌田徳幸「ローカルマニフェストが地方自治体及び評価制度に与える影響」『日本評価研究』Vol.4,No.1 (2004)p112-120.
 - ・北川正恭『マニフェスト革命—自立した地方政府をつくるために』ぎょうせい(2006)
 - ・(財)自治体国際化協会ロンドン事務所「英国の地方選挙風景(地方版マニフェストの実情)」『CLAIR REPORT』No272、(財)自治体国際化協会(2005)
 - ・田中弥生「ローカル・マニフェスト評価の設計と課題」言論NPO
http://www.genron-npo.net/library_region/000009.html
(2008.5.20)
 - ・松下圭一、西尾勝、新藤宗幸編『岩波講座自治体の構想1 課題』岩波書店(2002)
 - ・UFJ 総合研究所国土地域政策部『ローカル・マニフェストによる地方のガバナンス改革—自治体が変わる、地域も変わる』ぎょうせい(2004)

Blake の *A Vision of the Last Judgment* について

安藤 栄子*

On Blake's *A Vision of the Last Judgment*

Eiko ANDO

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

We can see Jesus' mercifulness and Forgiveness of Sin in "The Woman Caught in Adultery" in the Gospel according to John. In the Revelation, however, we cannot but feel the strictness of Jesus as a Judge. There is no Forgiveness of Sin here. Blake seemed to feel something confusing in Jesus' contradictory facets in the Bible and moreover, to understand it was wrong. Therefore, he decided to correct the Bible by writing *A Vision of the Last Judgment*. Blake boldly regarded Jesus in the Revelation as Satan. Blake's Jesus seemed to demand the Bible's Jesus to commit self-denial. The Bible's Jesus shows Forgiveness of Sin, but it appears not to be perfect to Blake. Blake's Jesus shows Continual Forgiveness of Sin which means to forgive others, continually, and through doing this, to realize a world of absolute love and harmony.

Key words : the Last Judgment, Jesus, Satan, Forgiveness of Sin, Continual Forgiveness of Sin

序

The Gospel according to John の "The Woman Caught in Adultery" (8:1-11) では、姦通の現場で捕らえられた女を Jesus の所に連行した律法学者やファリサイ派の人々が、モーゼの掟に従い、石打ちの刑に処すよう促すが、Jesus は彼らの非情な手から女を救い、その罪を赦す場面が描かれている。多くの読者はこの話に感動するのであり、Jesus が示した「罪の赦し」という教えに深い感銘を覚えるのであろう。西欧基督教文化の中で育まれた W. Blake も同様であり、この福音書に基づいて

"The woman taken in Adultery" (1800-1805) という見事な絵を残した¹⁾。

ところで新約聖書の終わりに置かれる The Revelation to John には、先にあげた温かで穏やかな Jesus は消え、代わりに此の世の悪は一切許さず、罪人は地獄の責め苦にあわすことも辞さない厳格な審判者 Jesus が登場する。短絡的な言い方をすれば、聖書では罪を赦す Jesus と罪を罰する Jesus が描き分けられており、それが教義として当然とされてきたように思われる。

しかしながらこの「描き分け」について Blake は違う考えを示したようなのである。大預言書の代表作 *Jerusalem* (1804 - 1820) には "The long sufferings of God are not for

* 共通講座

ever: there is a Judgment.”(K620)という一行がある。その前の数行から推測すると神は人間の墮落に苦悩するが、すぐに「最後の審判」が起こり問題は解決するというのである²⁾。そのすぐ後に置かれる第3プレートでは“The Spirit of Jesus is continual forgiveness of Sin”と「罪の継続的な絶えず繰り返される赦し」こそはイエスの精神であることが述べられている(K621)。基督教では「罪の赦し」と「最後の審判」とが Jesus の矛盾する二面性を表すように感じられるのに対して、Blake の場合は「最後の審判」と「罪の赦し」とは矛盾せずに関連しているように感じられるのである。これはどのようなことであろうか。このことを解決する糸口は *Jerusalem* を書き進めていく最中に書かれた *A Vision of the Last Judgment* (1810)の中にあるように思われる。この小論ではこの点を追求したい。

1. Revelation における最後の審判

The Revelation to John (以下 Revelation と略す)はローマ帝国の基督教会への弾圧が最大であった1世紀頃、流刑地パトモス島にいた John は、恐るべき強さを誇る Jesus を幻視する。そして Jesus の命令でアジア州にある7つの教会に宛てた手紙を書いたのである。ローマ帝国による耐え難い弾圧に耐え、教会内に忍び寄るグノーシス派という異端信仰を排除するよことの諫めの手紙であった。そして天まで引き上げられた John は神の玉座とその周囲を囲む奇怪な4つの生き物達(獅子のようなもの、若い雄牛のようなもの、人間のような顔をもつもの、鷲のようなもの)そして24人の長老達が神を賛美し、礼拝するのを目撃する。John は7つの封印のある巻物を子羊が神から受け取り一つずつ封印を解く度に地上に様々な災難が降りかかるのを間近で目撃する。そして Jesus が天使達による地上の破壊戦略を目論んでいることを知る。此の世の悪は必ず全滅し、Jesus は再臨すると全人類を善人と悪人とに二分し、それぞれを天国と地獄に送るといのである。それゆえに Jesus は John を通して各教会がすぐに悔い改めるよこと促すのである。

ところで Jesus による最後の審判と人類の二分化は The Gospel according to Matthew (25:31-32)においても言及される。

When the Son of Man comes as King and all the angels with him, he will sit on his royal throne, and the people of all the nations will be gathered before him. Then he will divide them into two groups, just as a shepherd separate the sheep from the goats. He will put the righteous people at the right and the others at his left.

ここでは王のように威厳のある Jesus が天使を連れて再臨し、羊飼いが羊と山羊とを分けるように善人と悪人とを

左右に振り分けると言われる。同じ内容が Revelation ではよりドラマチックな手法で描かれている。(20:11-15)

Then I saw a great white throne and the one who sits on it. Earth and heaven fled from his presence and were seen no more. And I saw the dead, great and small alike, standing before the throne. Books were opened, and then another book was opened, the book of living. The dead were judged according to what they had done, as recorded in the books. Then the sea gave up its dead. Death and the world of the dead also gave up the dead they held. And all were judged according to what they had done. Then death and the world of the dead were thrown into the lake of fire. (This lake of fire is the second death.) Those who did not have their name written in the book of living were thrown into the lake of fire. すなわち我々人類は、神の支配する新たなエルサレムに入るために、生きているものも死者もこれまでの行いにより判定されるのである。これが Jesus による最後の審判である。「命の書」に名前が記載されていない人は罪を犯した人、つまり悪人ということで裁かれ、火と硫黄の地獄に投げ込まれる運命にある。Jesus の掟に従い善行を積んだ善人のみが「命の書」に名前があり、天国へと入ることが可能なのである。

2. Blake の最後の審判

それでは Blake は最後の審判をどのように考えていたのだろうか。彼は *A Vision of the Last Judgment* (以下 *A Vision* と略す)の中で次のように述べる。

The Last Judgment (will be) when all those are Cast away who trouble Religion with Questions concerning Good & Evil or Eating of the Tree of those Knowledges or Reasonings which hinder the Vision of God, turning all into a Consuming Fire. When Imagination, Art & Science & all Intellectual Gifts, all Gifts of the Holy Ghost, are (despis'd del.) look'd upon as of no use & only Contention remains to Man, then the Last Judgment begins, & its Vision is seen by the (Imaginative Eye del.) of Every one according to the situation he holds (K604).

Blake によると「宗教」が善悪の二元論を基本とする道徳等に変質する時、そして理論が優位にたち、善悪では判断できない「想像力」、「芸術」、「聖霊に基づく様々な才能」が理論的ではないという理由から「無用なもの」の刻印を押され無視される時に、最後の審判は起こるとされる。Blake はまた“A Last Judgment is Necessary because Fools flourish.”(K612)「愚か者が繁栄する時に審判は起こる」とも言う。Blake はまた以下のようにも述べる。

This world of Imagination is the world of Eternity; it is the divine bosom into which we shall all go after the death of the Vegetated body. This World of Imagination is Infinite & Eternal, whereas the World of Generation, or Vegetation, is Finite & (for a small moment *del.*) Temporal (K605).

上の引用文には Imagination と Generation (Vegetation) と呼ばれる対立する二つの世界が描かれる。善悪、真偽の二元論中心の世界が Generation であるが、これは時空に拘束された、常に私利私欲のための争いが起こる偏狭な世界と言えよう。道徳や掟等はこの世界から生まれるのである。これに対して先の引用文の「宗教」は二元論を突破した時空を超えた所にある Imagination に属するのである。それこそは真実の世界、永遠の世界である。Imagination に覚醒するには「To Tirzah」に歌われるように「The Death of Jesus」による他はない。それは絶対的な自我の死、完全な自己否定の境地なのである。Blake の最後の審判が Imagination に属するとすれば、Revelation の最後の審判は Generation に属するのであり、両者は同じテーマを扱いながら異質の内容を提示するようだ。Blake は *The Marriage of Heaven and Hell* (1790-1793) を書き、地獄の回復、肉体の開放、情念と精力の賛美を歌い上げた。つまり Revelation が天国中心の伝統的な基督教に止まるのに対し、Blake は地獄も天国も共に救われなければならないという極めて斬新な宗教を我々に示そうとしているのではないかと。

3. Blake の絵画(1)

それでは Blake が実際に *A Vision* の中で彼の最後の審判をどのように展開したのかをテキストと絵とを参考に述べていこうと思う³⁾。審判の中心人物 Jesus は次のように描かれる。

Jesus seated between the Two Pillars, Jachin & Boaz, with the Word of divine Revelation on his knees, & on each side the four & twenty Elders sitting in judgment (K606);

Solomon の神殿前の 2 本の柱 Jachin と Boaz の間に Jesus は座すとされる⁴⁾。膝の上には「the Word of divine Revelation」「聖なる啓示の言葉」と言われる本が開かれている。これには何が書かれているのか。おそらく伝統的な基督教徒が驚愕する内容であろうと考えられる。Blake の最後の審判が Revelation のそれとは異質であることは既に述べた。Blake の Jesus の再臨は以下のような意味を持つ。

Christ comes, as he came at first, to deliver those who were bound under Knave, not to deliver the Knave. He comes to deliver Man, the Accused, & not Satan, the Accuser. We do not find any where that Satan is accused of Sin; he is only

accused of Unbelief & thereby drawing Man into Sin that he may accuse him. Such is the Last Judgment a deliverance from Satan's Accusation. Satan thinks that Sin is displeasing to God; he ought to know that Nothing is displeasing to God but unbelief & Eating of the Tree of Knowledge of Good & Evil (K615).

Revelation の Jesus は罪を裁く目的で再臨する。これに対して Blake の Jesus は裁かれた罪人を救うために再臨するというのである。つまり Revelation と *A Vision* とが描く Jesus の性質は完全に正反対なのだ。Blake は Revelation の Jesus を Satan と呼び罪の告発者だと述べる。なぜなら告発すること、裁くことは善悪の二元論を基本とする Generation (Vegetation) の世界から生み出される偏狭な思考であり、Blake からみると Revelation の Jesus は救世主ではなく悪魔そのものであると思えたのであろう。

Blake の Jesus の座す玉座の周囲には眩い光が溢れており、その光の中で無邪気な幼児達が乱舞するのが見られる。彼らは Jesus の無心さの象徴のようだ。Jesus の頭上には太陽のような聖霊が置かれ⁵⁾、両側には 2 人の天使が見られる⁶⁾。絵の右手には地獄に落ちるものが描かれ、左手には玉座に向かい上昇するものが描かれる。

玉座のすぐ下には審判を待つ一組の男女がいる。彼らは我々の祖先である Adam と Eve である。彼女の足下から Abel を殺害した Cain が火打ち石を手にしたまま逆さまに落ちていくのが見える⁷⁾。蛇の尾に巻き付かれた Satan が逆さまに落下する。蛇の長大な体はそれに絡みつく十字架に釘付けされて十字架と共に落ちていくのだ⁸⁾。Satan の化身と思われる蛇は Adam と Eve とを誘惑し、原罪を犯させた張本人である。その蛇が落ちてゆくということは、Adam と Eve とが置かれた絵の高さから判断すると二人は原罪を免れたことを表したのではないかと想像できる。

それでは蛇と共に落下する十字架について考えてみたい。言うまでもないことだが、十字架は基督教会にとって恥辱と栄光のシンボルである。神の一人子 Jesus は十字架上で辱めと苦しみを受けて死んだが、3 日目に甦ることで死と罪とに打ち勝ち、原罪により断たれていた神と人間とを和解させることに成功したからである。基督教では Jesus の死は贖罪死である。すなわち神が全人類の罪を背負い、十字架上に死ぬことで罪を贖ったのである。このように十字架は厳粛な意味合いを帯びているのである。Blake も当然のことながらこのことは熟知していたはずだ。Blake は実は *A Vision of the Last Judgment* という同じタイトルの絵を二枚描いている。最初のは 1808 年の作品であるが、それには十字架が玉座の上に描かれてあった⁹⁾。しかしながら 1810 年に描いた時には十字架は不

要の物のように落下させられたのであり、その空白を埋めるために聖霊が置かれたのである。Blake は Jesus の死を無比なる自己否定と考えており、贖罪死とは考えない¹⁰⁾。自己否定を表すためには十字架を描くことは不要であると画家 Blake は考えたようだ。基督教教会の中心に掲げられる十字架は、見る者の心に神は自分を含む人類のために犠牲となったことを永遠に記憶に留める効果があると思われる。そのことは人間に神への絶対的な服従を当然のこととし、神の定めた掟を遵守できぬ場合は処罰されることが正当だと思わせることになると言えよう。つまり Revelation のあの威圧的な Jesus の下す審判も正当と受け入れられることになるのだ。さらにはこのことは基督教における神と人間との関係が関わるようだ。神は創造者であり、人間は被造物にすぎない。両者は支配者と被支配者の関係にあり、謙虚に服従する以外ないと思われる。これに対し、Blake の場合は異なる。神は常に人間と共にいて “‘I am in you and you in me, mutual in love divine’”と語りかけ、“‘I am not a God afar off, I am a brother and friend; / Within your bosoms I reside, and you reside in me.’”(K622)と親しく語りかけるのである。神と人間との関係は親子、兄弟、姉妹、友人のような絶ちがたい温かな交わりの中にあるのだ。それは罪から開放された喜びに満ちた「十字架のない基督教」とも言うべき革新的な Blake の宗教なのである。

さて「罪」が、「死」が、そして「時間」が落下してゆく。「残酷な掟」も落ちて行く。“beneath the falling figure of Cain, is Moses casting his tablets of stone into the deeps.”(K607)と言われるように Moses が血迷ったかのように十戒のきざまれてある石板を地獄めがけて落とす¹¹⁾。これは一大事である。なぜなら十戒と Moses とは密接不可分な関係にあるからだ。にもかかわらず石板を放棄するとは Moses が掟から開放されて自由となったことを意味すると思われる。これは聖書にはない Blake 独自の解釈である。Blake は上の引用に続けて“it ought to be understood that the Persons, Moses & Abraham, are not here meant, but the States Signified by those Names”(K607)と述べる。つまり Moses は、聖書で言及される十戒に拘束された偏狭な人間を指すのではなく、そのような人間でも真理に目覚めることで柔軟な心を取り戻すことが可能であることを示す「状態」を意味すると考えられるのではない。これとは対照的に絵の右端には“the Pharisees are pleading their own Righteousness”(K612)と言われるように十戒を重視するファリサイ派の人々が、自らの正しさを玉座に向かい一心に主張する様子が見られる。しかしながら皮肉なことに、天使が「怒りの鉢」からまき散らす「3つの災難」に遮られてその主張は Jesus の耳には届かないのである。罪人を見下し、自分だけの正しさを主張す

る偽善者の愚かさ、空虚さが浮かびあがるようだ。

ところで玉座の真下には洞窟がある。その中には「7つの頭と10本の角を持つ竜」がいるが、その両足は鎖に繋がれている¹²⁾。竜は Revelation では Satan の化身であり、陣痛に苦しむ女の前に立ちほだかり、生まれ出ようとする赤子を食べようとする。一方 *A Vision* においても竜は Satan の化身と言えよう。しかしその意味は正反対なのである。*A Vision* の竜の前方に“Satan’s book of Accusation”と呼ばれる「告発の本」が無造作に投げ出されている。つまり *A Vision* の竜は罪の告発者であり、審判者である。すなわち Revelation の Jesus その人を指すのである。Revelation においては竜は Jesus に倒される悪の象徴である。竜の洞窟の上に一人の裸体の女が座る。Revelation では「バビロンの大妖婦」と呼ばれ王や商人にもてはやされたが、最後には裏切られて殺される運命の女である。Blake はこの女を“Mystery”「神秘」と呼ぶが、それは Satan を神として崇拝する「偽りの宗教」を意味するのである¹³⁾。すなわち罪を罰するが、罪を赦すことのできないきわめて未熟で偏狭な宗教であり、それは道徳とでも呼べるものである。

4. Blake の絵画(2)

次に地獄の底辺近くを観察しよう。Jesus を処刑した大祭司 Caiaphas とローマ総督 Pilate とが描かれる¹⁴⁾。しかしながら彼らは歴史上の人物を表すのではないのである。これはこの作品に登場する旧約の族長の名前がその人物を意味するのではないのと同じことである。Blake は“these are Caiaphas & Pilate --Two States where all those reside who Calumniate & Murder under Pretence of Holiness & Justice”(K608)と述べる。すなわち彼らは「神聖さ」と「正義」という美しい仮面をつけ平然と殺人をやっている人間の心の「残忍さ」という「状態」をあらわすのである。Blake が考えた「状態」は、彼らのような残虐非道を行う人間でも覚醒することが可能であることを予期させる最良の方便であるようだ。Blake は異端審問の残酷さと残忍な教会について“The Figure dragging up a Woman by her hair represents the Inquisition, as do those contending on the sides of the Pit, & in Particular the Man strangling two women represents a Cruel Church.”(K608)と述べている¹⁵⁾。ローマ・カトリック教会を始めとする多くの基督教諸派は正統の教義から逸脱するものを異端として告発し、拷問責めにしたのであった。Blake は正統派が見せる異端への不寛容さに我慢できなかったのであり、これをあえて黙認する教皇へも大いなる不満を募らせたことは想像に難くない。Revelation で示される異端者、離反者への容赦ない処罰行為は、異端審問や掟中心の冷酷な教

会を生み出した母胎のようにも思える。

地獄の底辺には死体や墓があると想像できる。*Revelation* では地獄に落ちた者は二度と生き返ることはできないのである。しかしながら *A Vision* では“beneath the Dragon’s Cavern a Skelton begins to Animate starting into life at the Trumpet’s sound”(K609)と言われるように骸骨が甦るのである¹⁶⁾。骸骨に生命を吹き込んだのは天使のラッパの響きである。玉座から流れ落ちる火の川を4人の天使がラッパを吹きながら勢いよく下降するのである(K609)¹⁷⁾。*Revelation* ではラッパの音がするたびに地上を大地震、飢饉などが襲い、動揺と破壊とがもたらされたのであり、それはいわば不吉の兆しであった。しかしながら *A Vision* ではそれは反対に幸せの兆しと言えよう。なぜならそれは理性の地獄で禁欲生活の結果、精力、情熱すべてを否定し、骸骨と化した人間に再度精力を与え肉体を回復させるからである。地獄での再生が開始されるのに対応するかのように玉座の近くにいる天使が、“The Aged Figure with Wings, having a writing tablet & taking account of the numbers who arise, is The Angel of the Divine Presence mention’d in Exodus”(K610)と述べられるように、覚醒する者の数を数えるのである¹⁸⁾。天と地との共同作業の幕開けである。

神の選民であるイスラエル民族を蹂躪したためにヤハヴェの怒りの一撃を受けて倒れたバビロンを始めとする多くの異民族、異教徒も覚醒し活動を始めようとする(K608)¹⁹⁾。その側に“a Youthful couple are awaked by their Children”(K609)と表現される一組の夫婦が描かれる²⁰⁾。おそらくは戒律に拘束され、十分に肉体を解放せぬまま死の眠りについたが、今子供達の声に励まされて覚醒したのである。子供達は玉座の乱舞する幼児達と呼応し、Blake の Jesus の伝言である肉体の開放と情熱の復活を伝えたのであろう。Blake の預言書の主人公の Albion も禁欲生活で情熱を喪失し老人になったが、Britannia の温かな励ましに答えようと覚醒した(K609)²¹⁾。

5. Blake の絵画(3)

さて左側に目を向けると男女と思われる人物達の抱擁シーンが多くなる。エロスの力が増大したようだ。これらの多くは教会のある状態を示している。あの洞窟の側の抱擁する二人は“The Two Figures in purifying flames by the side of the dragon’s cavern represents the Latter state of the Church when on the verge of Perdition, yet protected by a Flaming Sword.”(K610)と言われる²²⁾。すなわち破壊寸前の教会がどうか愛を取り戻し、掟よりも罪の赦しを主体とする教会へと覚醒するようだ。次にはその近くに“Just above the graves & above the spot where the Infants

creep out of the Ground stand two, a Man & Woman; these are the Primitive Christians.”(K610)と言われるように二人の人物が両手を上げて何か喜びを表しているようだ²³⁾。これは「原始基督教徒」と言われる。当初から迫害にもめげず初心を貫いたことは見事であるが、Imagination に生きる Blake には律法中心の窮屈な教会のようであり、それゆえ墓場近くに置かれたが、未熟さを悟り、罪の赦しの真の教会へと目覚めるようだ。

ところで玉座に向かう上昇の流れには旧約聖書からの人物名が多く見られる。たとえば Abraham, Noah, Shem, Japhet, Seth 等である。彼らは新約聖書等からの人物達と共に Blake の「27の独善的基督教会」を象徴するのである²⁴⁾。つまり Blake から見ると彼らは未だ不完全な教会を表すのであろう。ではなぜ基督教会がユダヤ教と深い関わりを持つ旧約聖書の人物と関連づけられるのか。Abraham, Noah はヤハヴェへの篤い信仰に生きた純粋な人々であった。Abraham は信仰の深さゆえに神の命令ならば、大切な一人息子を犠牲に捧げようとしたのである。Noah も信仰の深さゆえ洪水の被害を一族と共に免れることができた。しかしその後息子 Shem の子が犯した過ちを頑なに許そうとはせず、呪いをかけることで一族分裂の乱れをもたらしたのである。Blake は彼ら的人身供犠を行ったと恐れられる Druids と同一視する。Blake は、たとえ自分の息子であれ、人間を犠牲にしたり、呪いをかける行為は真実の信仰とはほど遠いと考えたのであろう。そこから Abraham, Noah の名前は頑迷固陋な基督教会を表すと考えられるのである。それではこのような不完全な教会がなぜ玉座に向かうのか。既述したように、Moses, Abraham は旧約時代に生きた人物を表すというよりは、その名前により示される“Ststes”「状態」を表すのである。

Blake は Beulah の娘達の嘆きを通し、「状態」の創造と罪からの開放とを“Descend, O Lamb of God, & take away the imputation of Sin by the creation of States & the deliverance of Individuals Evermore.”(K648)と述べる。Moses, Abraham, Noah 等は頑迷固陋な基督教会を表した。しかしながら彼らはその状態に止まるだけではない。彼らは最高の世界に飛翔し覚醒しうるのである。つまり「状態」は「罪の赦し」という我々の最終目的が実現される「回心の場」と言えるのではないか。Noah は二人の息子の間に置かれる。そして“these three Persons represent Poetry, Painting & Music, these Powers in Man of conversing with Paradise, which the flood did not Sweep away”(K609)と言われる²⁵⁾。Noah の回心の結果、頑迷だった教会は永遠界と交信できる芸術を理解できる柔軟性に富む豊かな精神の教会へと変貌したのだ。かつては Noah のように「独善的教会」に数えられた Seth

(Agamの第3子)は、ここでは“*This State call'd Seth is Male & Female in a higher state of Happiness & wisdom than Noah, being nearer the State of Innocence.*” (K611)と言われる²⁶⁾。すなわちSethはNoah以上に平安と知恵の高い状態にあり、それは無心の境地に達した教会を表すと思われる。

玉座近くに興味深い教会が置かれてある。それは子供に囲まれた一人の女性で表される。

Above Noah is the Church Universal, represented by a Woman Surrounded by Infants. There is such a State in Eternity; it is composed of the Innocent civilized Heathen & the uncivilized Savage, who having not the Law, do by Nature the things contain'd in the Law. This State appears like a Female crown'd with stars, driven into Wilderness; she has the moon under her feet (K609-610).

この女性は「普遍的教会」と呼ばれる²⁷⁾。この教会員はおそらく最もユニークだと思う。彼らは謙虚な基督教徒ではない。殺戮を繰返し、調和とはまるで無関係に見える「蛮族」と「異教徒」である。それではこの自由奔放な彼らはどのように融合されるのか。彼らは「掟」に支配されず、自然体で行動するが、彼らの精神の無意識な奔放の中にBlakeはImaginationへの覚醒を主張したのである。彼はそれを「同愛」と呼ぶが、この愛こそはすべての人に開かれる教会の本来の愛の姿のようだ。

さて新約聖書からは「受胎告知」で有名なVirgin Maryへの言及がある。

Around Noah & beneath him are various figures Risen into the Air; among these are Three females, representing those who are not of the dead but of those found alive at the Last Judgment; they appear to be innocently gay & thoughtless, not being among the condemn'd because ignorant of crime in the midst of a corrupted Age; the Virgin Mary was of this Class (K610).

「腐敗した時代にありながら罪を犯さず、したがって咎められることもなく無思慮で陽気に見える人々」の中にVirgin Maryはいるのである²⁸⁾。Michelangeloの最後の審判の絵には手と足に釘あとの生々しいが若々しい審判者Jesusが中央に描かれ、Maryはそのすぐ側に寄り添うように描かれる。多くの芸術家がMaryに並々ならぬ思いを抱くのは昔も現代も変わらない気持ちであろう。Virgin Maryに関しては「無原罪 懐胎説」「聖母被昇天」等の教義がある。しかしBlake自身はそのような教義にはほとんど関心をもたなかったようだ。彼はVirgin MaryがMary Magdaleneのような女性であったとしてもJesusの母として受け入れることができたようである²⁹⁾。この「陽気で無思慮」な女性達は絵では比較的不鮮明に描かれる。このことがかえって彼女らの前方を男性に抱

かれようと勢いよく下降してくる一人の女性の躍動感を際立たせるようだ³⁰⁾。

A Mother Meets her numerous Family in the Arms of their Father; these are representations of the Greek Learned & Wise, as also of those of other Nations, such as Egypt & Babylon in which were multitudes who shall meet the Lord coming in the Clouds (K610).

一人の母親が父親の腕に抱かれる無数の家族に会うと言う。その無数の家族とは学識があり賢いギリシャ人、エジプト人、そしてバビロンの人々だと言われる。言い換えると、異教徒達である。彼らはBlakeが理想とする既述した「普遍的教会」の構成員の蛮族と異教徒達でもある。Blakeは、「罪の赦し」は教義を優位におく信者よりも掟も教義も知らない異教徒の奔放な情熱と自由な生活のうちによりよく実現されていると確信しているようである。

Revelationでは教義を無視し、自由奔放に行動する異教徒は天国には入ることは出来ないのである。

Revelationでは

One of the elders asked me, “Who are these people dressed in white robes, and where do they come from?”

“I don't know, sir. You do.” I answered.

He said to me, “These are the people who have come safely through the terrible persecution. They have washed their robes and made them white with the blood of the Lamb.” (7:13-14)

と言われるように天国に入ることの出来る人々は上の“the terrible persecution”が示唆するように数々の迫害に耐え幾多の苦難を乗り越えた殉教者のような人々であろう。彼らは自らの情念や欲望を抑圧することができる強靱な精神の持ち主である。これに対しBlakeは以下のように述べる。

Men are admitted into Heaven not because they have curbed & govern'd their Passions or have no Passions, but because they have Cultivated their Understandings. The Treasures of Heaven are not Negations of Passions, but Realities of Intellect, from which all the Passions Emanate Uncurbed in their Eternal Glory. The Fool shall not enter into Heaven let him be ever so Holy. Holiness is not The Price of Entrance into Heaven (K615).

すなわちBlakeは情念を抑圧し、「神聖な」顔つきをしてみせても心が冷酷ならば天国に入ることは不可能であること、そして情念も肉体も十分に開放することが重要であると主張するのである。

結び

序文で一方では姦通罪の女の罪を赦しながら、他方

では罪人を裁く聖書の Jesus の矛盾する二面性に Blake は違和感を覚え、聖書の Jesus に疑惑を持ったのではないかという仮説を立てた。Blake は「裁く」という厳しい態度を善悪の二元論を超克できない未熟な精神界の特質と考えた。聖書では最後の審判は裁く Jesus を強調する。これに対し Blake の最後の審判は「罪の継続的な絶えず繰り返される赦し」を意味するのである。*A Vision* 中では此の真実の赦しを目指す教会の革新が叫ばれ、その変貌する姿が力強く描かれたと思われる。極論を許していただければ、*A Vision* の Jesus は Revelation の Jesus に「自己否定」を要求したのである。Jesus が偏狭な心を捨て、すべての人間を無条件で受け入れるようにとせまったのである。西洋の批評家のほとんどは Blake の最後の審判のこの独自性を見落としているようだ。神は愛である。しかし同時に神の義が全うされなければならない。教義としてこの二つが別々に立てられるのはやむを得ない。しかしその義が愛とはなれて掟として示される時、それは冷たい道徳律となる。なぜなら神の愛と義とは全く同じもの、一つのものであり、人間が無限の赦しを実践しようとするところに神の義も又あらわれるからである。すなわち Blake は彼の「罪の赦し」が憎悪、復讐などという相対的なものに対する二元的な愛ではなく絶対的な愛であると言いたいのである。

親鸞は「善人なをもて往生をとぐ、ましていはんや悪人をや」と述べ、悪人の救いを強調した。Imagination に目覚めた Blake にとって善人悪人の区分はないのであり、また基督教徒、異教徒、仏教徒の区別もないのである。あくまですべての人間が「罪の赦し」を実践しようとするところに自ずから現れる調和の世界の実現を *A Vision* の中で Blake は主張したと言えると思う。

註

聖書は旧約聖書続編つき新共同訳(日本聖書協会 1997)及び聖書 和英対照(日本聖書協会 1998)を使用した。

Blake の作品からの引用は全て Geoffrey Keynes ed., *Blake: Complete Writings with Variant Readings* (London: Oxford Press, 1969) による。たとえば文中で (K22) とあるのは引用された Blake の作品がこの版の 22 ページにあることを示す。

- 1) Milton Klonsky, *William Blake: The Seer and His Visions* (New York: Harmony Books, 1977), p.72.
- 2) His Sublime & Pathos become Two Rocks fix'd in the Earth; / His reason, , his Spectrous Power, covers them above.

/ Jerusalem his Emanation is a Stone laying beneath, (K620, 4-6) これらの数行は理性の横暴が人間の情念と知性、及び生命を枯渇させ、墮落させたことを暗示すると言えよう。

3) *A Vision* の絵は S. F. Damon の *A Blake Dictionary: The Ideas and Symbols of William Blake* (Providence, Rhode Island: Brown University Press, 1965) の巻末に収められているものを参考にした。Damon 氏はこの絵に描かれた人物、事柄等に1から81までの番号を付け、*A Vision* の本文に従い各項目を解説している (Key To “A Vision of The Last Judgment”).この小論の中で絵に言及する時は Damon 氏が付けた番号をたとえば Key No.21 のように記す。*A Vision* の絵を参考までに最後に載せる。

4) Key No.22.

5) Key No. 1.

6) Key No. 6 .

7) Key No. 24, 25.

8) Key No. 29, 30.

9) Morton D. Paley, *William Blake* (Phaidon Press Limited, Littlegate House, St Ebbe's Street, Oxford, 1978), plate no. 50. なお 2 枚の絵について Damon 氏は次のように述べている。“In the same year Blake painted for the Countess of Egremont a Last Judgment, which still hangs in Petworth Hall. Blake thanked the countess for the commission in a poem, “The Cavern of the Grave I’ve seen” (K558). Though it is only 19 7/8 by 15 3/4 inches, it contains hundreds of symbolic figures. Blake explained the chief of these figures in a letter to Ozias Humphry (K442). Above the figure of Christ the Veil of the Temple is opened, revealing the Cross in place of the Ark.

In 1810 he made the ink drawing of the Last Judgment now in the Rosenwald Collection (see Illustrations). A preliminary pencil sketch was reproduced by Keynes in the first Nonesuch edition of Blake’s works (1925, III, 148). *A Blake Dictionary*, p.235.

10) Jesus の死については拙著「To Tirzah」の意義(「北海道言語文化研究」第6号 2008年、pp.95-103)を参照のこと。

11) Key No.37.

12) Key No.51.

13) S. F. Damon, *A Blake Dictionary*, p.291.

14) Key No.41, 42.

15) Key No.44, 46.

16) Key No.55.

17) Key. No.47.

18) Key No.12.

19) Key No.43.

- 20) Key No.56.
- 21) Key No.58.
- 22) Key No.57.
- 23) Key No. 59.
- 24) S. F. Damon, *A Blake Dictionary*, pp. 85-86.
- 25) Key No.68.
- 26) Key No.62.
- 27) Key No.64.
- 28) Key No.79.
- 29) Cf. *The Everlasting Gospel* の断片 i には Jesus の母は娼婦でもかまわないことが示唆される。
- 30) Key No.76.

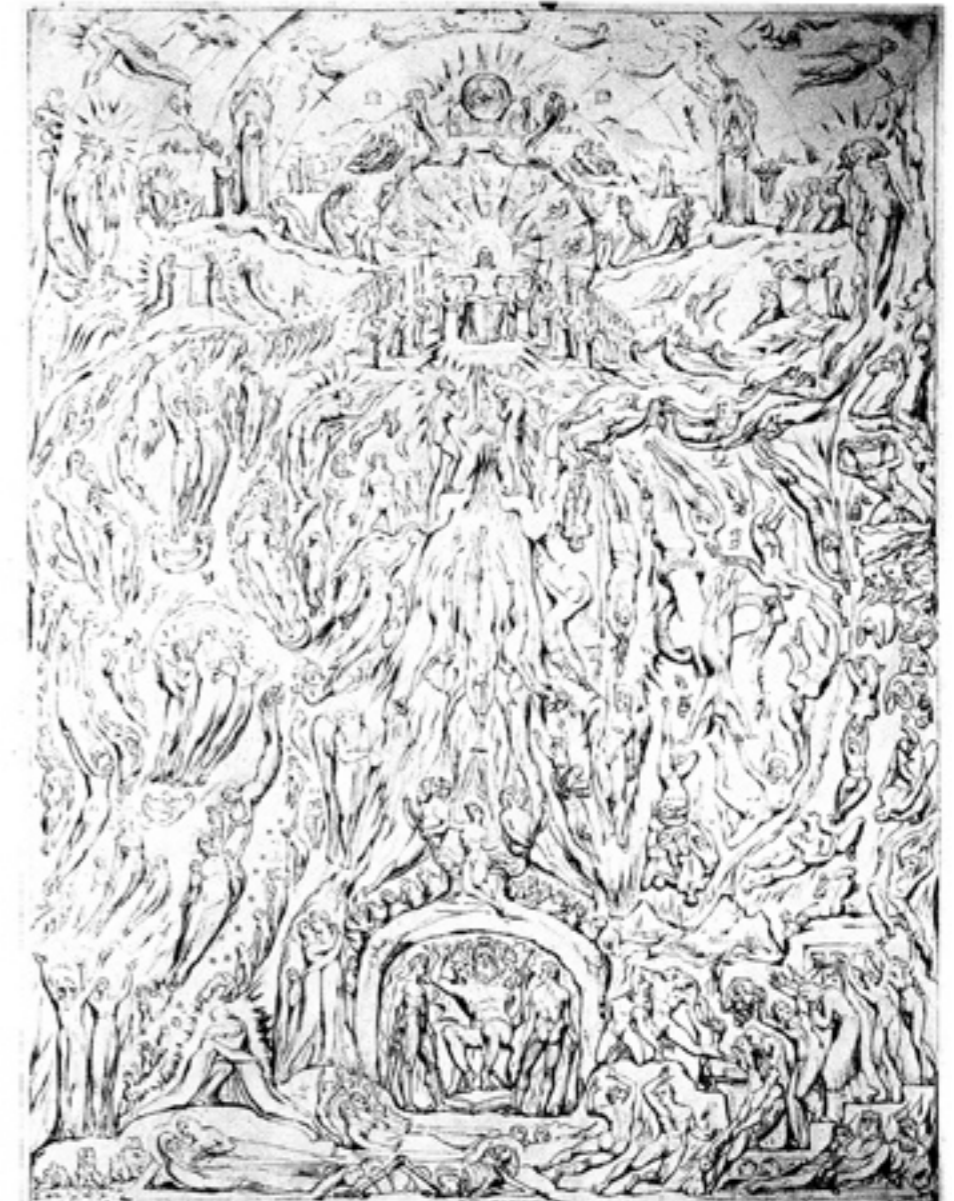
KEY TO 'A VISION OF THE LAST JUDGMENT'

1. The Holy Ghost
2. Glorification of angels with harps
3. The Candlestick
4. The Table of Shew-bread
5. The cherubim of the Ark
6. Infants; "these represent the Eternal Births of Intellect from the divine Humanity"
7. Baptism
8. Education ("Nursing Fathers & Nursing Mothers")
9. A Living Creature (a four-headed Zoa)
10. The Two Witnesses subduing their enemies
11. The Lord's Supper
12. The Angel of the Divine Presence, "having a writing tablet & taking account of the numbers who arise . . . is frequently call'd by the Name of Jehovah Elohim"
13. The Holy Family ("Mary, Joseph, John the Baptist, Zacharias & Elizabeth")
14. A Living Creature "on the Left of the Throne Gives to the Seven Angels the Seven Vials of the wrath of God"
15. A woman with children fleeing from the Wrath; "these represent those who, tho' willing, were too weak to Reject Error without the Assistance & Countenance of those Already in the Truth"
16. Michael
17. Apollyon, "foiled before the Sword of Michael"
18. The Book of Life
19. Three figures bowing in humiliation before the record of their good deeds
20. The Book of Death, uttering "Lightnings & tempests"
21. Two Pharisees "who plead their own Righteousness before the throne"
22. Jachin and Boaz
23. The Four and Twenty Elders "sitting in judgment"
24. Adam
25. Eve
26. Three plagues poured from the Vials of Wrath: Labor, Materialism, and Hate
27. Cain, "falling with the head downward"
28. Araunah casting out the chaff, "the vanities of Riches & Worldly Honours"
29. The Cross, on which the Serpent is nailed
30. Satan, wound round by the Serpent
31. Eliakim, the Son of Hilkiah, who "drags Satan down headlong"
32. Sin, dragged down by the hair by a demon with a key
33. Death, dragged down by a demon
34. Time, dragged down by the same demon
35. Og, king of Bashan, with the sword of Justice
36. Cruel laws, as "three fiery fiends with grey beards & scourges of fire"
37. Moses, "casting his tables of stone into the deeps"
38. A male and female, "chain'd together by the feet; they represent those who perish'd by the flood"
39. Hazeal the Syrian, "a fiend with wings," who "urges the wicked onwards with fiery darts"; he "drives abroad all those who rebell against their Saviour"
40. Achitophel, with the cord in his hand
41. Caiaphas "has a Blue Flame like a Miter"
42. Pilate "has bloody hands that never can be cleansed"
43. Babylon and other kingdoms
44. The Inquisition, "dragging up a Woman by her hair"
45. The Inquisition; two men contending even on the brink of the Pit
46. A Cruel Church; a man strangling two women
47. Four Angels "descend headlong, with four trumpets to awake the dead"
48. "The Harlot nam'd Mystery in the Revelations"
49. Vegetative Existence ("Two Beings each with three heads")
50. Mystery's kings and counsellors
51. The Dragon with seven heads and ten horns
52. Satan's book of Accusations
53. Gog
54. Magog
55. The skeleton animating
56. "A Youthful couple . . . awak'd by their Children"
57. "The two Figures in purifying flames by the side of the dragon's cavern represents the Latter state of the Church when on the verge of Perdition, yet protected by a Flaming Sword"
58. Albion awak'd by Britannia
59. "A Man & Woman; these are the Primitive Christians"
60. Elijah; "he comprehends all the Prophetic Characters"
61. Abel, "surrounded by Innocents"
62. Seth. "This State call'd Seth is Male & Female in a higher state of Happiness & wisdom than Noah, being nearer the State of Innocence . . . The figures of Seth & his wife comprehends the Fathers before the flood & their Generations"
63. "The two Seasons of Spring & Autumn"
64. The Church Universal as the Woman in the Wilderness. "There is such a State in Eternity: it is composed of the Innocent civilized Heathen & the Uncivilized Savage, who, having not the Law, do by Nature the things contain'd in the Law"
65. "Between Seth & Elijah three Female Figures crown'd with Garlands Represent Learning & Science, which accompanied Adam out of Eden"
66. "Two figures, a Male & Female, with numerous Children; these represent those who were not in the Line of the Church, & yet were Saved from among the Antediluvians who Perished"
67. "A female figure represents the Solitary State of those who, previous to the Flood, walk'd with God"
68. Noah, with Shem and Japhet; "these three Persons represent Poetry, Painting & Music, the three Powers in Man of conversing with Paradise, which the flood did not Sweep away"
69. The Four Seasons, "the Changed State made by the flood"
70. Abraham
71. Hagar and Ishmael
72. "Jacob & his Twelve Sons hover beneath the feet of Abraham"
73. Abraham's Posterity. "The Children of Abraham, or Hebrew Church, are represented as a Stream of Figures, on which are seen Stars somewhat like the Milky way; they . . . Represent Religion, or Civilized Life such as it is in the Christian Church, who are the Offspring of the Hebrew"
74. "On the right hand of Noah, a Woman with Children Represents the State Call'd Laban the Syrian; it is the Remains of Civilization in the State from whence Abraham was taken"
75. "Three aged Men who appear as suddenly emerging from the blue sky for their help. These three Aged Men represent divine Providence as oppos'd to, & distinct from, divine vengeance, represented by three Aged men on the side of the Picture among the Wicked, with scourges of fire"
76. "A Mother Meets her numerous Family in the Arms of their Father; these are representations of the Greek Learned & Wise, as also of those of other Nations, such as Egypt & Babylon in which were multitudes who shall meet the Lord coming in the Clouds"
77. "On the right hand of Noah A Female descends to meet her Lover or Husband, representative of that Love call'd Friendship, which Looks for no other heaven than their Beloved & in him sees all reflected as in a Glass of Eternal Diamond"
78. Lovers reunited, or the Soul reunited with the Body
79. "Three Females, representing those who are not of the dead but of those found alive at the Last Judgment; they appear to be innocently gay & thoughtless, not being condemn'd because ignorant of crime in the midst of a corrupted Age; the Virgin Mary was of this class"
80. Mahomed, beneath Ishmael
81. The Seven Eyes of God



These identifications are made from *A Vision of the Last Judgment* (K 904-17). There are some discrepancies between the text and this picture. Only two of the Living Creatures are shown, and only three of the seven Vials of Wrath. Satan, though he has

coils about his waist, is not involved with the crucified Serpent; neither is Sin bound in the Serpent's folds. Death is not chained to the Cross. Some attributes are also omitted; for example, Og has his sword but not his balances.



National Gallery of Art, Washington, D. C., Rosenwald Collection

A Vision of the Last Judgment

研 究 報 告

Catalytic properties of metallosilicates

Yasuharu KANDA*¹, Ewa JANISZEWSKA*², Justyna PAWLESA*²,
Stanisław KOWALAK*² and Masatoshi SUGIOKA*¹

(Received 20 June 2008, Accepted 7 November 2008)

Abstract

Metallosilicates with MFI structure containing metal atoms such as Ni, Co, Cu, Zn-Cu and Zn in framework have been synthesized with various metal/silicone (Me/Si) ratios (up to 0.1). The acidities of H-form metallosilicates were evaluated by some acid-catalyzed reactions (decomposition of 2-propanol, cracking of cumene and isomerization of 1-butene). The Zn-Si catalyst showed the highest acidities among various metallosilicates. In the metallosilicates-supported noble metal catalysts, 5%Pt/Zn-Si and 0.1%Pd/Cu-Si catalysts showed the highest activities for hydrodesulfurization of thiophene and hydrodechlorination of chlorobenzene, respectively.

Keywords: Metallosilicates, MFI structure, Catalytic properties,

1 INTRODUCTION

The isomorphous substitution of the framework atoms has become very efficient method of modification of molecular sieves and manufacturing of novel materials. The valence, electronegativity, size, nature of the introduced metal atom significantly affects properties and stability of resulting materials. Although the aluminosilicate zeolites remain still the most important group of the molecular sieves, according to the classification they are only one family of metallosilicate. The MFI structure is susceptible for isomorphous substitution and quite a number of metallosilicates (e.g. Ti-Si, Fe-Si, B-Si, Ge-Si, Ga-Si) have been obtained⁽¹⁾⁽²⁾. Some of the metallosilicates show the remarkable catalytic activities and high selectivities for the mild oxidation (Ti-Si)⁽³⁾ and

aromatization of hydrocarbons (Ga-Si)⁽⁴⁾. We have reported that catalytic activities of Zn-Si modified with cations for various reactions and the effect of cations on the activity of supported platinum catalyst for hydrodesulfurization (HDS) of thiophene⁽⁵⁾. The samples that showed the most pronounced acidity appeared high activity for the HDS reaction. Furthermore, synthesis of metallosilicates (Cu-Si, Zn-Si and Zn-Cu-Si) and its catalytic activities for NO reduction were studied⁽⁶⁾. However, catalytic examinations of metallosilicates for various reactions are not sufficient to understand catalytic properties of metallosilicates.

In the present paper, we studied the synthesis and characterization of metallosilicates such as Ni-Si, Co-Si, Cu-Si, Zn-Cu-Si and Zn-Si. The samples were examined as catalysts for decomposition of 2-propanol (2-PA), cracking of cumene and isomerization of 1-butene to evaluate the acidity of metallosilicates. Furthermore, hydrodesulfurization (HDS) of thiophene and hydrodechlorination (HDC) of chlorobenzene over noble metal supported on metallosilicates were examined to obtain information of effect of support on the catalytic activities of noble metal catalysts. In the case of the HDS and HDC reactions, the

*¹Department of Applied Chemistry, Muroran Institute of Technology, Muroran, JAPAN.

E-mail address: msugioka@mmm.muroran-it.ac.jp
kanda@mmm.muroran-it.ac.jp

*²Faculty of Chemistry, Adam Mickiewicz University, Poznań, POLAND.

E-mail address: skowalak@amu.edu.pl

metallo-silicates were used as a support for Pt and Pd catalysts.

2 EXPERIMENTAL

2.1 Preparation of metallosilicates

The conventional hydrothermal preparation procedure was applied for syntheses, described earlier⁽⁵⁾⁽⁶⁾. The initial gels were formed from solutions of silica source (water glass, fumed silica, Ludox, H_2SiF_6), source of metal (Zn(II), Cu(II), Co(II), Ni(II)) and tetra-*n*-propylammonium bromide (TPABr) as a structure directing agent (template). The inorganic acids (H_3PO_4 or H_2SO_4) were always admitted into the initial mixture in order to adjust the pH of the gel to the value of 11. The metal(Me)/Si ratio of the initial mixture varied in the range of 0.0-0.1. The resulted materials were washed with distilled water till pH=7-8, then dried overnight at 75 °C and finally calcined at 450 °C to remove the template. The H^+ form samples were prepared by ion-exchange with 0.1 mol/l NH_4Cl solution. The products were characterized by means of standard methods such as XRD (Tur M-62 with $CuK\alpha$), SEM (Philips SEM-515), FT-IR (Bruker, Vector 22, KBr), UV-vis (Varian, Carry 100, diffuse reflectance), DTA, TG (Setsys 12, Setaram, air atmosphere).

2.2 Preparation of supported noble metal catalysts

Supported noble metal catalysts were prepared by an impregnation method using $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ and $PdCl_2$ aqueous solution. However, $PdCl_2$ was dissolved in 1.0 mol/l HCl aqueous solution because $PdCl_2$ dose not dissolve completely in water. The amount of metal loading was as follows; Pt: 5 wt%, Pd: 0.1 wt%. After impregnation, the samples were dried at 120 °C followed by calcination at 450 °C for 4 h. Supported noble metal catalysts were reduced by hydrogen at 400 °C for 1 h before the reaction.

2.3 Catalytic activities of metallosilicates

The catalytic activities of metallosilicates were evaluated by 2-PA decomposition, cumene cracking, 1-butene isomerization, thiophene HDS and chlorobenzene HDC. 2-PA decomposition (250 °C) and cumene cracking (400 °C) were carried out using a pulse reactor. In both reactions, the catalysts (0.03 g) were pretreated at 400 °C for 1 h in helium stream before the reaction. We used $SiO_2 \cdot Al_2O_3$ (JRC-SAL-2, 13% Al_2O_3) as a reference acidic catalyst. 1-butene isomerization was carried out using a Pyrex glass closed circulation system. 0.05 g of catalyst was evacuated at 400 °C for 2 h. After evacuation, 1-butene isomerization was carried out at 100°C and the initial pressure of 5.3 kPa. Thiophene HDS was carried out at 350 °C using a conventional fixed bed flow reactor under 0.1 MPa. Reaction conditions were as follows: catalyst weight = 0.1 g, H_2 /thiophene = 30, W/F = 37.9

g•h/mol. Chlorobenzene HDC was carried out using a pulse reactor at 250 °C. In all reactions, reactants and products were analyzed by gas chromatograph.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 XRD patterns of metallosilicates

Fig. 1 shows the XRD patterns of metallosilicates. The XRD patterns indicate that synthesized products show the MFI structure with good crystallinity of samples at low metal loading ((a), Me/Si = 0.01). The formation of metallosilicate with MFI structure is difficult at higher Me/Si ratio (Me/Si = 0.05, Zn/Si = 0.03) as shown in Fig. 1 (b). The samples with higher metal content required longer crystallization time and always contained some admixture of amorphous material. The crystallinity of the samples depends on the kind of metal. XRD data indicate lower crystallinity of the samples containing Zn and Co as substituted heteroatoms.

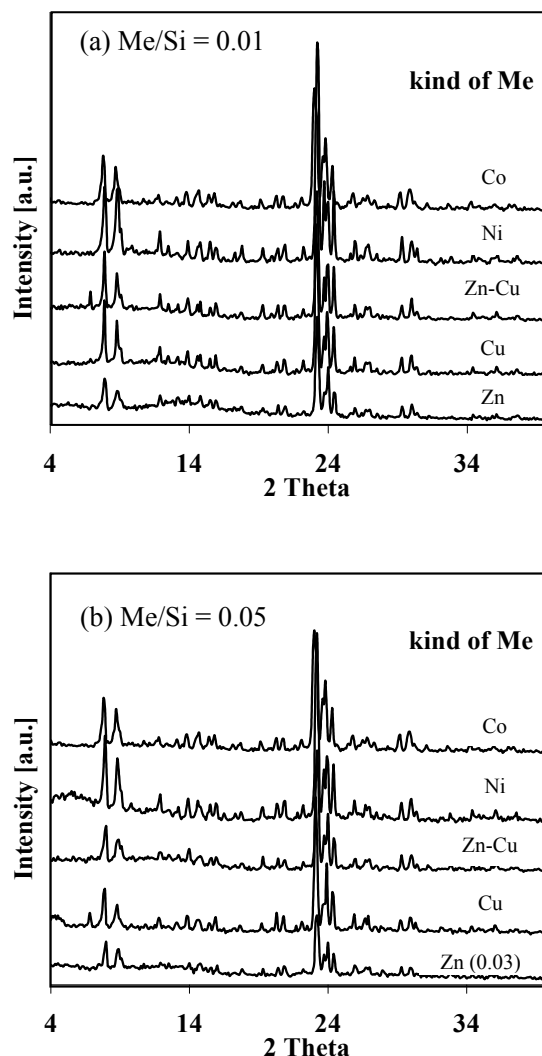


Fig. 1 XRD patterns of metallosilicates.

3.2 FT-IR spectra of metallosilicates

Fig. 2 shows the FT-IR spectra of metallosilicates. The IR spectra of the products do not provide any clear evidence on the presence of heteroatoms in the framework positions. The bands at $\sim 960\text{ cm}^{-1}$ hardly noticeable in spectra can reflect the Me-O bond vibrations⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾. The shoulder peaks at 960 cm^{-1} were observed in the FT-IR spectra of synthesized metallosilicates. Instead, we have noticed an interesting behavior of the asymmetric stretching bands at $\sim 1100\text{ cm}^{-1}$. This band is attributed to the framework tetrahedral TO_4 . In the case of zeolites, silicate, AlPO_4 and many other zeotypes, the band is sharp and single without any shoulders. Such shape is also seen in spectra of zincosilicate. However, in the spectra of the other series of metallosilicates under study we can notice a splitting of this band. Perhaps, it reflects the lower homogeneity of the framework O–Me–O–Si–O bonds than the analogous bonds (–Al–O–Si–) in zeolites. The split in main stretching bands can be considered as an argument supporting the framework position of the heteroatoms. If the metal atoms were sitting in extra-framework positions, the bands should be similar as that in silicate, i.e. the single ones. These results indicate that heteroatoms incorporated into framework of MFI zeolite.

3.3 SEM images of metallosilicates

Fig. 3 shows the SEM images of metallosilicates. The morphology and crystallite size of the products depended on nature of the introduced metal. Usually the samples of the metal rich products formed large

aggregates. The Co-Si catalyst showed very large crystallites which could affect their catalytic efficiency. Furthermore, the Zn-Si showed the larger crystallites than Cu-Si⁽⁶⁾. Thus, low crystallinity of Co-Si and Zn-Si (Fig. 1) were explained by high metal content in the SiO_2 framework.

3.4 Thermal analysis of metallosilicates

The thermal analysis in air indicate that the decomposition of organic template takes place in the range of $350 - 500\text{ }^\circ\text{C}$ as shown in Fig 4. In all samples, it is reflected in very distinctive exothermic effect (DTA, $\sim 390\text{ }^\circ\text{C}$) and significant weight loss (TG). However, weight loss was hardly changed with increasing temperature ($\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$). This indicates that metallosilicates show a good thermal stability. The exothermic effect is proceeded with an endothermic effect at $\sim 420\text{ }^\circ\text{C}$, which can be attributed to desorption of template oxidation products. The differences in temperatures of these effects are significant for the samples with the same metal loading.

3.5 Catalytic properties of metallosilicates

3.5.1 Acidic properties of metallosilicates

The acidic properties of catalysts can be evaluated by dehydration of 2-PA, which proceeds on both Lewis and Brønsted acid sites, and cumene cracking, which proceeds only on Brønsted acid sites. Fig. 5 shows the catalytic activities of metallosilicates for 2-PA decomposition at $250\text{ }^\circ\text{C}$. Zn-Si catalyst showed remarkably high dehydration activity. This indicates that Zn-Si have higher acidity than other metallosilicates.

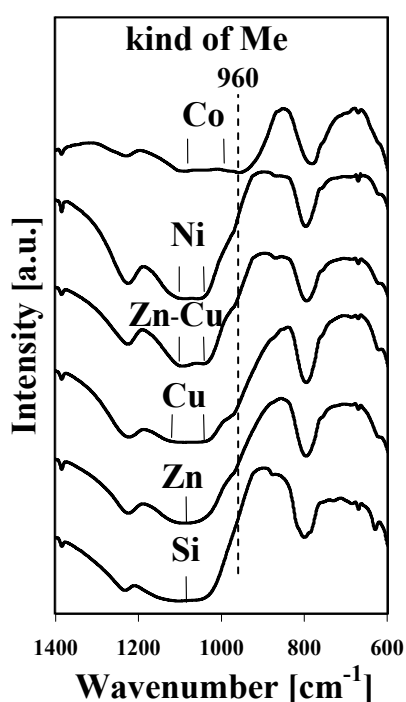


Fig. 2 FT-IR spectra of metallosilicates (Me/Si = 0.01).

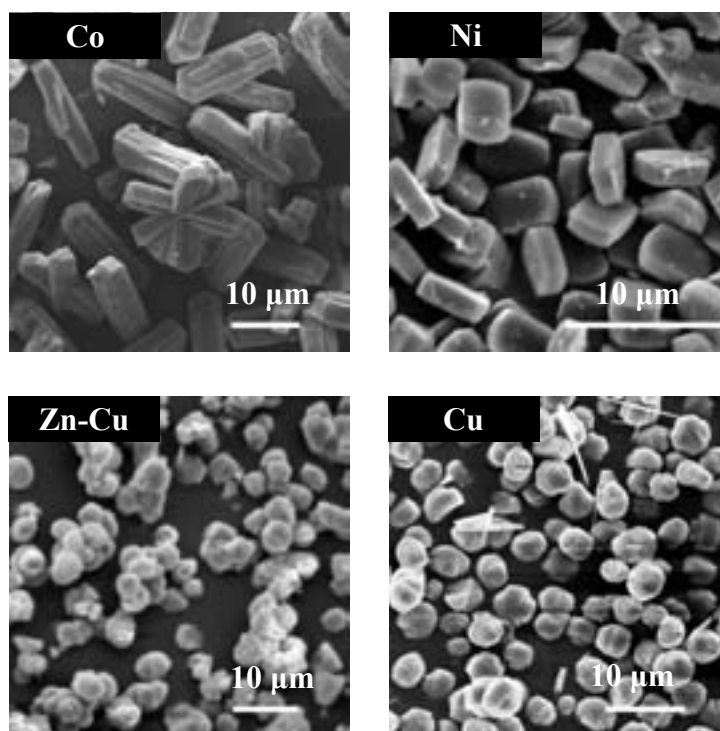


Fig. 3 SEM images of metallosilicates (Me/Si = 0.01).

However, the activities of other catalysts, except Zn-Cu-Si, were very low. Furthermore, the products of 2-PA decomposition over Cu-Si catalyst were propylene and acetone. It is known that 2-PA molecule is dehydrogenated to acetone on metal particle and/or basic site. It was reported that, in the 2-PA dehydrogenation over Cu catalyst, CuO and Cu₂O act as active sites⁽⁷⁾.

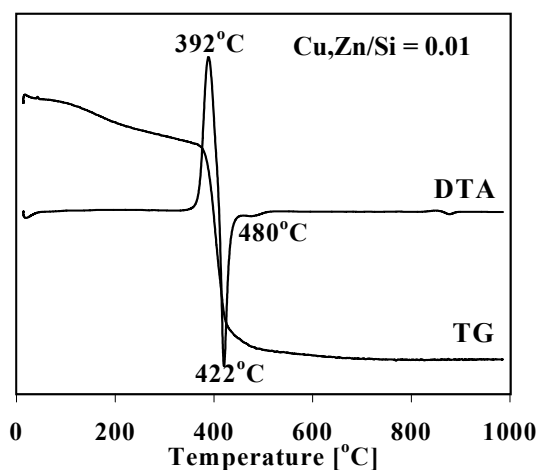
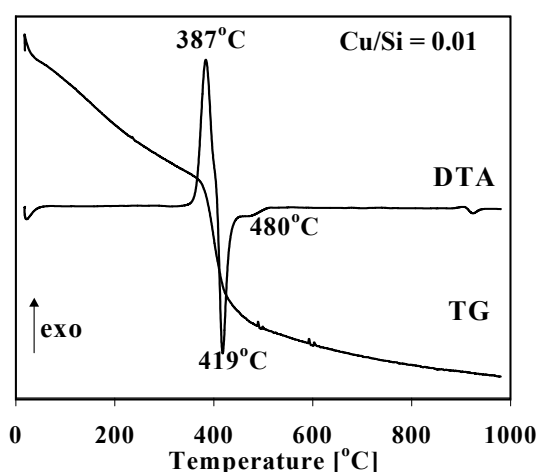
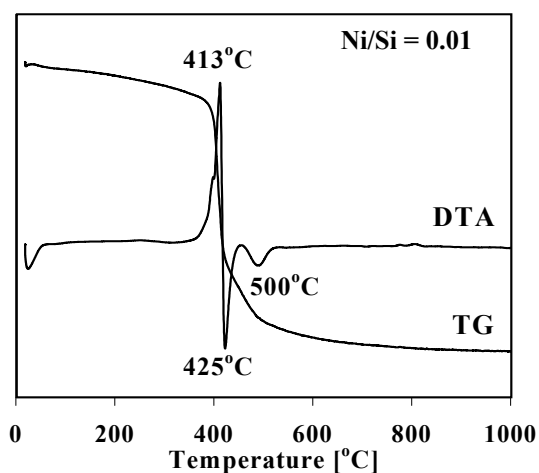


Fig. 4 Thermal analysis of metallosilicates.

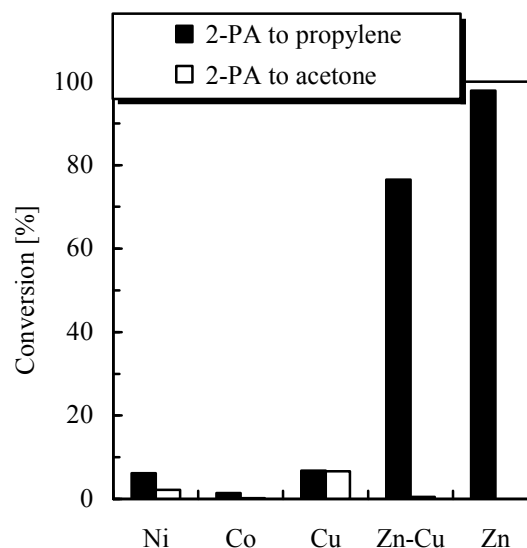


Fig. 5 Catalytic activities of metallosilicates (Me/Si = 0.01) for 2-propanol decomposition at 250 °C.

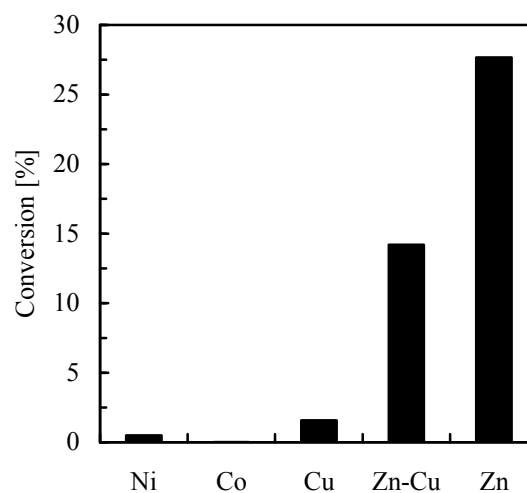


Fig. 6 Catalytic activities of metallosilicates (Me/Si = 0.01) for cumene cracking at 400 °C.

Thus, small amount of extra framework CuO and Cu₂O species probably exist in Cu-Si catalyst, or Cu atom in framework act as active site as well as Cu oxides. The Co-Si catalyst showed the very low activity for 2-PA decomposition. The order of dehydration activities of metallosilicates was as follows; Zn-Si > Zn-Cu-Si > Cu-Si ≈ Ni-Si >> Co-Si.

Fig. 6 shows the catalytic activities of metallosilicates for cumene cracking. The cracking activity of Zn-Si catalyst was remarkably higher than that of other metallosilicates. The order of catalytic activities of metallosilicates for cumene cracking was almost the same as that for 2-PA dehydration. Thus, Zn-Si catalyst has higher Brønsted acidity than other metallosilicates.

It was reported that the Brønsted acidities of isomorphous substituted ZSM-5 zeolites were theoretically explained by polarization of incorporated metal ion and this result was agreed with experimental data⁽¹⁵⁾. Thus, acidity of metallosilicate would be explained by polarizability of incorporated metal ion. However, since we did not evaluate the metal content in samples, there is a possibility that the metal content in metallosilicates differ from Me/Si ratio. Therefore, the polarization and metal content are necessary to explain the order of acidities of metallosilicates evaluated by model reactions.

We used $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ as reference acidic catalyst to compare with metallosilicates. The catalytic activities of $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ for 2-PA decomposition and cumene cracking were remarkable high as shown in Fig. 7. These activities were higher than those of metallosilicates. These results indicate that the acidities of metallosilicates were weaker than that of $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Furthermore, it is well known that 1-butene isomerization proceeds over both acidic and basic sites. The order of catalytic activities of 1-butene isomerization at 100 °C was $\text{Zn-Si} > \text{Zn-Cu-Si} \gg \text{Cu-Si} > \text{Ni-Si} > \text{Co-Si}$ as shown in Fig. 8. This result also agreed with the results of former reactions.

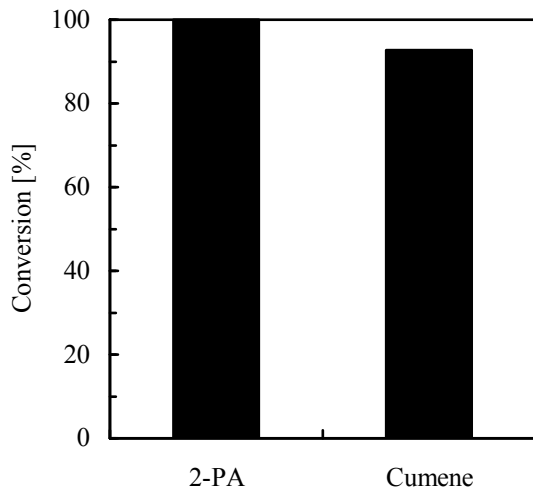


Fig. 7 Catalytic activities of $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ for 2-propanol decomposition at 250 °C and cumene cracking at 400 °C.

3.5.2 Catalytic properties of noble metals supported on metallosilicates

Thiophene HDS⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ and chlorobenzene HDC⁽¹⁸⁾ are proceeded over noble metal catalysts supported on acidic carrier. Thus, we evaluated the catalytic activities of noble metal supported metallosilicates with different acidities.

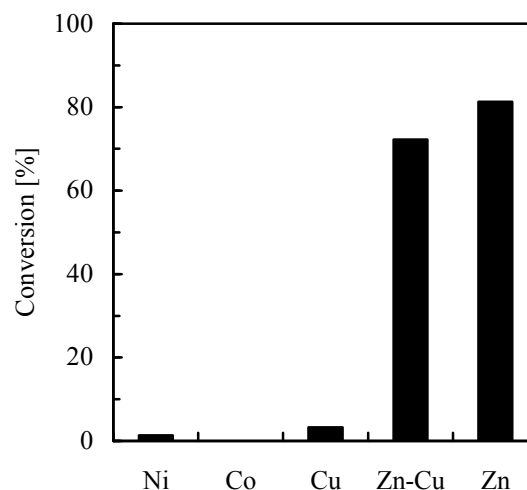


Fig. 8 Catalytic activities of metallosilicates (Me/Si = 0.01) for 1-butene isomerization at 100 °C.

Fig. 9 shows the catalytic activities of platinum supported on metallosilicates for thiophene HDS at 350 °C. The HDS activity of Ni-Si catalyst was remarkably higher than those of other metallosilicates. In the petroleum industry, sulfided $\text{Co(Ni)Mo/Al}_2\text{O}_3$ catalyst has been widely used in the HDS process⁽⁸⁾. In these catalysts, Co and Ni act as promoter to create highly active “Co(Ni)-Mo-S” phase. Thus, high HDS activity of Ni-Si catalyst can be explained by sulfidation of Ni species. However, Co-Si catalyst showed the very low activity for thiophene HDS. The crystallite size of Co-Si was larger than those of other metallosilicates. Thus, since diffusion of reactant into Co-Si catalyst is difficult, Co-Si catalyst showed low activities for some acid-catalyzed reactions (2-PA dehydration, cumene cracking and 1-butene isomerization) and HDS reaction. In the supported Pt catalysts, the order of HDS activities was as follows; $\text{Zn-Si} > \text{Ni-Si} > \text{Cu-Si} \approx \text{Zn-Cu-Si} > \text{Co-Si}$. We have reported that Brønsted acid site plays an important role in the highly active supported Pt HDS catalyst⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾. However, Pt/Zn-Cu-Si catalyst, which has higher Brønsted acidity than other catalysts, showed lower HDS activity than Pt/Ni-Si catalyst. Some methods of dealumination of zeolites, such as thermal treatment, steaming, acid treatment and SiCl_4 treatment, were reported⁽¹²⁾⁽¹³⁾. We used $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ solution (pH = 1) as a Pt precursor to prepare supported Pt catalyst. Thus, in the impregnation of Pt, demetalation from metallosilicates would be caused in the catalyst preparation with $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ solution. Thus, since acidity of metallosilicates would be changed by demetalation, the order of HDS activities of Pt/metallosilicate catalysts was not explained simply by the order of acidity of metallosilicates.

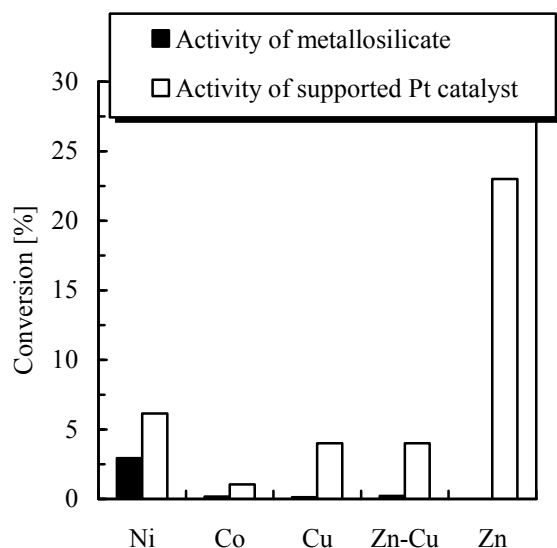


Fig. 9 Catalytic activities of Pt/metallosilicates and metallosilicates (Me/Si = 0.01) for thiophene HDS at 350 °C.

We also examined the catalytic activities of Pd/metallosilicates for chlorobenzene HDC at 250 °C as show in Fig. 10. The HDC activity of Ni-Si catalyst was the highest among those of metallosilicates. However, in the supported Pd catalyst, Pd/Cu-Si catalyst showed the highest HDC activity among supported Pd catalysts. It was reported that Cl atom on Cu surface in Pd-Cu/SiO₂ catalyst was removed by hydrogen which is activated on Pd surface⁽¹⁴⁾. Thus, since Pd and Cu atoms in Pd/Cu-Si catalyst act as active sites for the HDC of chlorobenzene, the HDC activity of Pd/Cu-Si catalyst was the highest among those of Pd/metallosilicate catalysts. However, the Pd/Zn-Si and Pd/Zn-Cu-Si catalysts showed lower HDC activities than other Pd/metallosilicates. This result may be explained by decrease of acidity which was caused by poisoning with Cl atom.

4. CONCLUSIONS

The metallosilicates with transition metals (Co, Ni, Cu, Zn-Cu, Zn) in the framework can be obtained by hydrothermal crystallization and the MFI structure can be attained at as high Me/Si ratio as 0.05. The products show a good thermal stability. They can be modified by cation-exchange which confirms the framework localization of the metal atoms. The order of acidity of metallosilicates was as follows; Zn-Si > Zn-Cu-Si > Cu-Si > Ni-Si > Co-Si. On the other hand, in the metallosilicates-supported noble metal catalysts, 5%Pt/Zn-Si and 0.1%Pd/Cu-Si catalysts showed the highest activities for the HDS of thiophene and HDC of chlorobenzene, respectively.

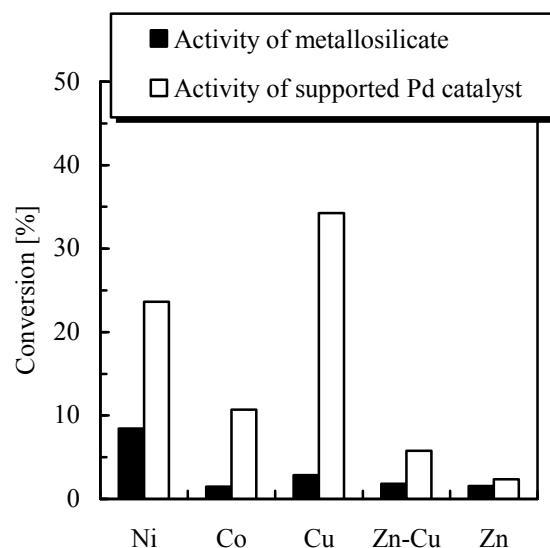


Fig. 10 Catalytic activities of Pd/metallosilicates and metallosilicates (Me/Si = 0.01) for chlorobenzene HDC at 250 °C.

REFERENCES

- (1) Yashima, T., *Catal. Surv. Jpn.*, **2**, (1998), p121-132.
- (2) Gabelica, Z., Valange, S., *Microporous Mesoporous Mater.*, **30**, (1999), p57-66.
- (3) Tatsumi, T., Koyano, K.A., Shimizu, Y., *Appl. Catal. A*, **200** (2000), p125-134.
- (4) Takuma, K., Uemichi, Y., Ayame, A., *Appl. Catal. A*, **192**, (2000), p273-280.
- (5) Sugioka, M., Janiszewska, E., Kowalak, S., *Stud. Surf. Sci. Catal.*, **158**, (2005), p207-214.
- (6) Janiszewska, E., Kowalak, S., Gierczyńska, M., Dolata, V., Zieliński, M., Wojciechowska, M., *Catal. Letters*, **112**, (2006), p97-103.
- (7) Chen, X., Shen, Y.-F., Suib, S.L., O'Young, C.L., *J. Catal.*, **197**, (2001) p292-302.
- (8) Topsøe, H., Clausen, B.S., Massoth, F.E., *Catal.-Sci. Tech.*, **11**, (1996) p1-310.
- (9) Kanda, Y., Kobayashi, T., Uemichi, Y., Sugioka, M., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **49**, (2006), p49-56.
- (10) Kanda, Y., Kobayashi, T., Uemichi, Y., Namba, S., Sugioka, M., *Appl. Catal. A*, **308**, (2006), p111-118.
- (11) Kanda, Y., Aizawa, T., Kobayashi, T., Uemichi, Y., Namba, S., Sugioka, M., *Applied Catalysis B*, **77**, (2007), p117-124.
- (12) Triantafyllidis, C.S., Vlessidis, A.G., Nalbandian, L., Evmiridis, N.P., *Microporous Mesoporous Mater.*, **47**, (2001), p369-388.
- (13) Müller, M., Harvey, G., Prins, R., *Microporous Mesoporous Mater.*, **34**, (2000), p135-147.
- (14) Lambert, S., Heinrichs, B., Basseur, A., Rulmont, A., Pirard, J.-P., *Appl. Catal. A*, **270**, (2004), p201-208.
- (15) Chatterjee, A., Iwasaki, T., Ebina, T., Miyamoto, A., *Microporous Mesoporous Mater.*, **21**, (1998), p421-428.

- (16) R. Szostak, *Molecular Sieves, Principles of Synthesis and Identification* (Van Nostrand Reinhold, New York, 1989). Confer. (Kodansha/Elsevier, Tokyo/Amsterdam, 1986) p129.
- (17) G. Perego, G. Bellussi, C. Corno, M. Taramasso, F. Buonomo and A. Esposito, in: *Proc. 7th Intern. Zeolite* (18) Hashimoto, Y., Uemichi, Y., Ayame, A., *Appl. Catal. A*, **287**, (2005), p89-97.

メタロシリケートの触媒特性

神田 康晴^{*1}, Ewa JANISZEWSKA^{*2}, Justyna PAWLESA^{*2},
Stanisław KOWALAK^{*2}, 杉岡 正敏^{*1}

種々の金属/ケイ素(Me/Si)比(0.01-0.1)におけるNi、Co、Cu、Zn-CuおよびZnを骨格内に含むMFI型メタロシリケートを合成した。H型のメタロシリケートの酸性質はいくつかの酸触媒反応(2-プロパノール分解反応、1-ブテン異性化およびクメン分解反応)により評価した。その結果、Zn-Si触媒は種々のメタロシリケートにおいて最高の酸性質を示した。また、種々のメタロシリケート担持貴金属(Pt, Pd)触媒において、5%Pt/Zn-Siおよび0.1%Pd/Cu-Si触媒はそれぞれ、チオフェンの水素化脱硫反応およびクロロベンゼンの水素化脱塩素反応に対して最高の活性を示した。

キーワード：メタロシリケート， MFI 構造， 触媒特性

*¹ 室蘭工業大学応用化学科， *²Faculty of Chemistry, Adam Mickiewicz University

グリーン水素製造 (第2報) 金属酸化物担持ニッケル触媒によるメタン分解反応

アスマリザ アブドル ビンティ ガニ*², 齋藤真由*¹, 神田康晴*¹,
小林隆夫*¹, 上道芳夫*¹, 杉岡正敏*¹

Production of Green Hydrogen (Part 2) Methane Decomposition over Metal Oxides-supported Nickel Catalysts

Asmaliza binti Abd Ghani, Mayu SAITO, Yasuharu KANDA,
Takao KOBAYASHI, Yoshio UEMICHI and Masatoshi SUGIOKA

(原稿受付日 平成20年6月20日 論文受理日 平成20年11月7日)

Abstract

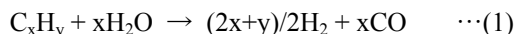
Methane decomposition over metal oxides-supported nickel (Ni/MO_x) catalyst was studied to produce green hydrogen without emission of carbon oxides. The Ni/TiO₂ catalyst showed the highest activity for methane decomposition among Ni/MO_x catalysts and this activity was higher than that of Ni/HZSM-5 catalyst. The catalyst life of Ni/TiO₂ was longer than that of Ni/HZSM-5. Furthermore, catalytic life of Ni/TiO₂ for methane decomposition were improved by Pd addition. Improved catalytic life of Ni/TiO₂ by Pd addition were caused by formation of Ni-Pd alloy particle.

Keywords: Methane decomposition, Supported nickel catalyst, Metal oxide, Green hydrogen

1 緒言

化石燃料の燃焼時に生じる二酸化炭素(CO₂)をはじめとした温室効果ガスにより、地球温暖化が引き起こされている。京都議定書には温室効果ガス排出量を2008年から2012年までの平均値で1990年レベルの6%削減することが日本の目標として掲げられている⁽¹⁾⁽²⁾。そのため、化石燃料に替わるクリーンな次世代エネルギー

ーとして水素(H₂)が注目されている。現在、水素は石油系化石燃料の水蒸気改質反応(式(1))および一酸化炭素(CO)の水蒸気シフト反応(式(2))により大量に製造されている。



しかしながら、上記の方法ではCO₂を放出するため、真のクリーンエネルギーは得られない。そのため、CO₂を排出しないグリーン水素の製造法の開発が望まれている。式(3)に示すように、メタンを触媒存在下で反応させると水素と炭

*¹ 室蘭工業大学応用化学科

E-mail: msugioka@mmm.muroran-it.ac.jp
kanda@mmm.muroran-it.ac.jp

*² 現在: Faculty of Agricultural and Biotechnology,
University Darul Iman Malaysia, MALAYSIA.

素に分解されるため、グリーン水素を得ることができる。さらに、この反応で得られた水素にはCOが含まれないため、燃料電池に使用の際に有利である。



先に我々はゼオライトにニッケル(Ni)を担持した触媒のメタン分解活性について検討し、HZSM-5を担体に用いると高い活性が得られることを明らかにした⁽³⁾。そこで、本研究ではさらに高活性な触媒を開発するため、種々の金属酸化物(MO_x)担持Ni触媒のメタン分解特性について検討し、Ni/HZSM-5触媒の活性と比較した。

2 実験

担持Ni触媒は硝酸ニッケル(Ni(NO₃)₂・6H₂O)を用いた含浸法によって調製した。また担持パラジウム(Pd)触媒は塩化パラジウム(PdCl₂)を用いた含浸法で調製し、担持Ni-Pd触媒は硝酸ニッケルおよび塩化パラジウムの混合溶液を用いて調製した。含浸後の担持Ni触媒、担持Pd触媒および担持Ni-Pd触媒は120℃で乾燥し、500℃で4時間焼成した。なお、Niの担持量は1wt%~40wt%とした。メタンの接触分解反応は、前報と同様に反応器を横置きにした常圧固定床流通式反応装置を用いて行った⁽³⁾。担持Ni触媒および担持Ni-Pd触媒は500℃で1時間水素還元し、反応に用いた。反応温度は500℃~550℃、触媒量は0.01g~0.3g、メタン流速は20ml/minの

条件で反応を行った。未反応のメタンおよび生成した水素の分析は活性炭カラム(1m, 100℃)を装着したガスクロマトグラフ(TCD)により行い、キャリアーガスには窒素を用いた。

3 結果と考察

3.1 金属酸化物担持ニッケル触媒のメタン分解活性

Ni/MO_x触媒のメタン分解活性の経時変化をFig. 1に示す。Ni/TiO₂触媒は高い活性を示すと報告されているNi/SiO₂触媒⁽⁴⁾よりも高い活性を示すことが明らかとなった。

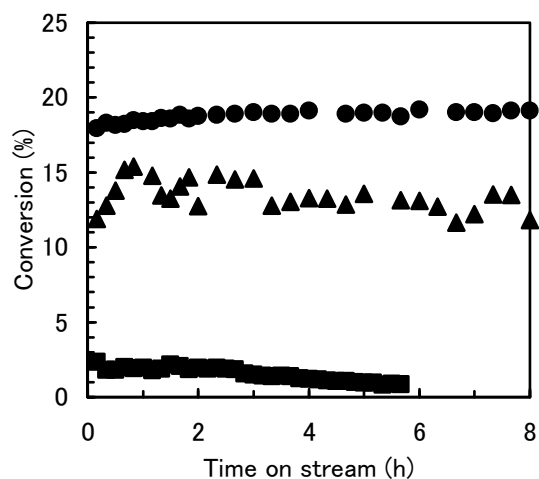


Fig. 1 Decomposition of methane over MO_x-supported Ni catalysts at 500℃ (catalyst weight = 0.3 g). (●) 10%Ni/TiO₂, (▲) 10%Ni/SiO₂, (■) 10%Ni/Al₂O₃.

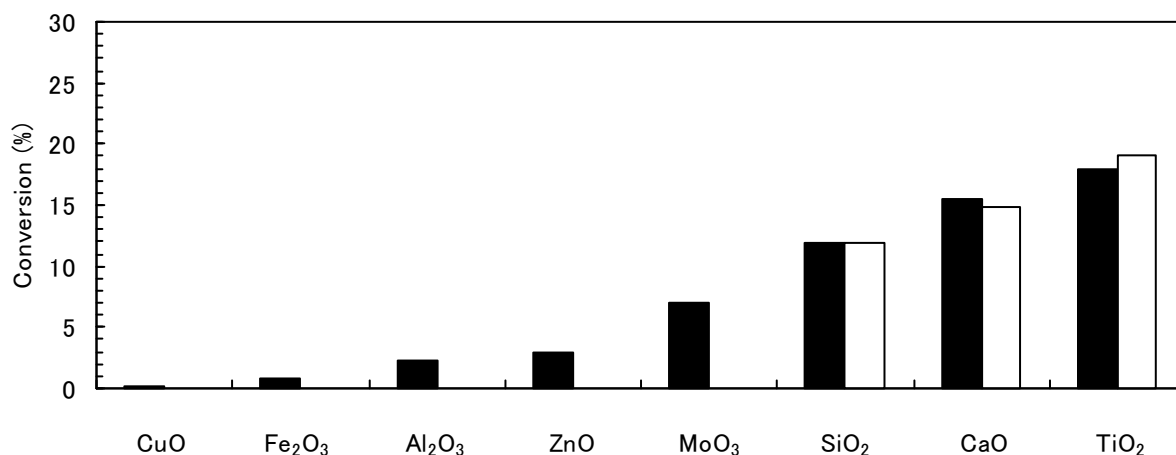


Fig. 2 Catalytic activities of 10%Ni/MO_x for methane decomposition at 500℃ (catalyst weight = 0.3 g). (■) After reaction for 10 min, (□) After reaction for 8 h.

また、Ni/TiO₂触媒の活性は非常に安定であることがわかった。一方、Ni/Al₂O₃触媒の活性はこれらの触媒よりも著しく低かった。これは、NiがAl₂O₃とニッケルアルミネート(NiAl₂O₄)を形成するためであると考えられる。

Fig. 2に種々の金属酸化物(MO_x)を担体に用いた担持Ni触媒のメタン分解活性を示す。担持Ni触媒のメタン分解活性は担体に用いるMO_xの種類により大きく異なり、活性の序列はTiO₂ > CaO > SiO₂ > MoO₃ > ZnO > Al₂O₃ > Fe₂O₃ > CuOとなった。また高い活性を示したTiO₂、CaOおよびSiO₂担体を用いた触媒は、反応8時間後においても高い活性を維持していることが明らかとなった。NiおよびCaを炭素に担持した触媒は高いメタン分解活性を示し、この触媒ではCaが助触媒として働いていることが報告されている⁽⁵⁾。そのため、Ni/CaOが高い活性を示したのは、NiとCaOの間に相互作用があったためであると考えられる。次に、Ni/MO_xにおいて最も高い活性を示したNi/TiO₂と先に高い活性を示すと報告したNi/HZSM-5⁽³⁾との触媒特性の比較を行った。

3.2 メタン分解反応に対するNi/TiO₂およびNi/HZSM-5触媒の寿命

反応温度500℃における10%Ni/TiO₂および10%Ni/HZSM-5触媒のメタン分解活性をFig. 3に示す。なお、触媒量はいずれも0.3gである。

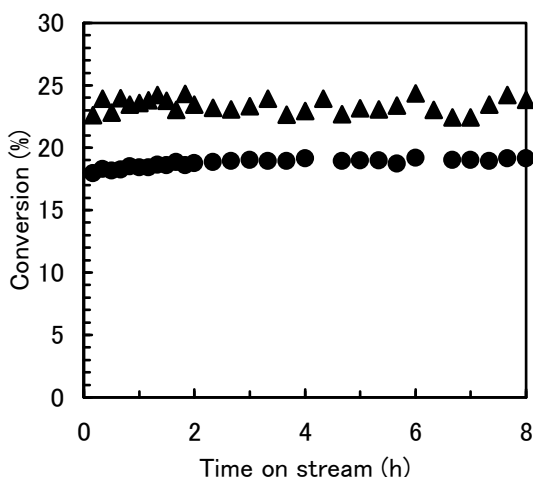


Fig. 3 Effect of support on catalytic life of 10%Ni/TiO₂ and 10%Ni/HZSM-5 for methane decomposition at 500°C (catalyst weight = 0.3 g). (●) TiO₂, (▲) HZSM-5.

この反応条件下ではNi/HZSM-5触媒はNi/TiO₂触媒よりも高い活性を示すことがわかった。しかしながら、Fig. 3では反応時間の経過にともなう触媒活性の低下がみられないため、この反応条件は触媒寿命についての知見を得るために適しているとはいえない。そこで、触媒量を0.01gに減少させ、触媒寿命の評価を行った。Fig. 4にこの結果を示す。

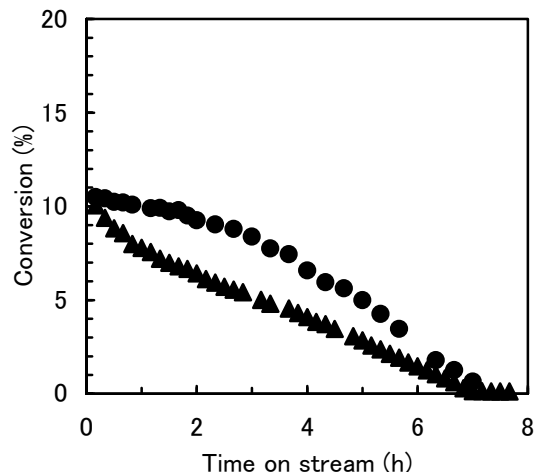


Fig. 4 Effect of support on catalytic life of 10%Ni/TiO₂ and 10%Ni/HZSM-5 for methane decomposition at 500°C (catalyst weight = 0.01 g). (●) TiO₂, (▲) HZSM-5.

10%Ni/HZSM-5触媒および10%Ni/TiO₂触媒ともに反応時間の経過とともに失活するのが確認され、いずれの触媒も反応開始約7時間後にはメタン分解活性を示さなくなることが明らかとなった。したがって、これ以降は触媒量0.01gで反応を行い、触媒活性および寿命の評価を行った。一方、反応開始直後における10%Ni/TiO₂触媒の活性低下は10%Ni/HZSM-5触媒の場合よりも緩やかであることがわかった。さらに、反応温度550℃でメタン分解反応を行い、これらの触媒特性の比較を行った。その結果、10%Ni/TiO₂は10%Ni/HZSM-5よりも高い活性と長い寿命を有することから、優れた触媒特性を示すことが明らかとなった(Fig. 5)。

この触媒特性の違いは担体の細孔構造によるものであると考えられる。HZSM-5ゼオライトは結晶性アルミノシリケートであり、直線状の2つの細孔(細孔径0.56×0.53nmおよび0.55×0.51nm)がジグザグに配列した細孔構造を有し

ている。また、メタン分解反応後のNi/HZSM-5触媒の表面には大量の炭素が析出することを明らかにしている⁽³⁾。そのため、メタン分解反応により生成した炭素がHZSM-5の細孔を塞ぐため、Ni/HZSM-5触媒では著しい活性低下が確認されたと考えられる。一方、TiO₂はHZSM-5よりも細孔径は非常に大きく、炭素析出による細孔の閉塞が起こりにくいため、Ni/TiO₂触媒の失活はNi/HZSM-5触媒よりも緩やかに起こると考えられる。

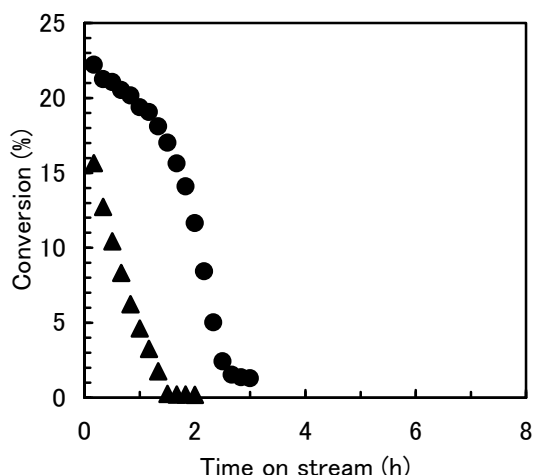


Fig. 5 Effect of support on catalytic life of 10%Ni/TiO₂ and 10%Ni/HZSM-5 for methane decomposition at 550°C (catalyst weight = 0.01 g). (●) TiO₂, (▲) HZSM-5.

これらの結果から、担持Ni触媒のメタン分解特性に対する担体の細孔径の影響は大きいことが明らかとなった。次に、Ni担持量がNi/TiO₂触媒のメタン分解活性に与える影響について検討した。

3.3 Ni/TiO₂触媒のメタン分解活性に与えるNi担持量の影響

Ni/TiO₂触媒のメタン分解活性に対するNi担持量の影響について検討した結果をFig. 6に示す。Ni担持量が10wt%以下では反応時間の経過とともに著しい活性低下がみられた。これに対してNiの担持量を増加させることでメタン分解活性は向上し、さらに活性低下も抑制されることがわかった。多田はメタン分解反応の進行によりNi粒子が微粒子化し、生成した炭素の凝集体に埋め込まれるため、担持Ni触媒の失活が

起こるとしている⁽⁶⁾。したがって、Ni担持量が多いNi/TiO₂触媒にはNi粒子が多く存在するため、活性低下は起こりにくいと推測される。

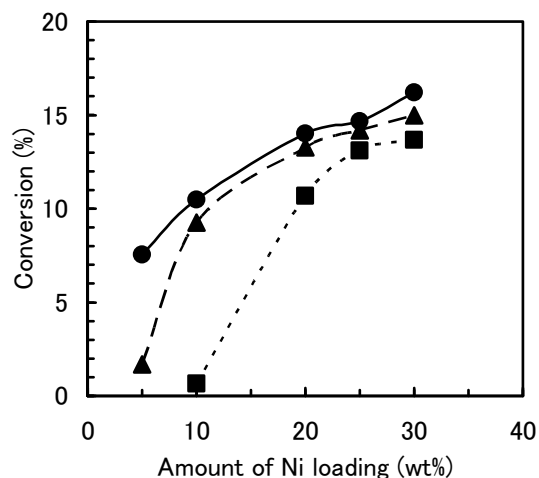


Fig. 6 Effect of Ni loading amount on catalytic activity of 10%Ni/TiO₂ for methane decomposition (catalyst weight = 0.01 g). After reaction for (●) 10 min, (▲) 2 h and (■) 7 h.

3.4 メタン分解反応に対するNi/TiO₂触媒の特性に与えるPdの添加効果

OtsukaらはNi/SiO₂触媒にパラジウム(Pd)を添加することでメタン分解反応に対する触媒寿命および水素収率が向上すると報告している⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。そこでNi/TiO₂触媒のメタン分解活性および寿命へのPdの添加効果について検討した。Fig. 7に5%Ni-5%Pd/TiO₂触媒のメタン分解活性を示す。PdのみをTiO₂に担持した触媒のメタン分解活性はNi/TiO₂触媒の活性よりも非常に低いことがわかった。しかし、PdをNi/TiO₂触媒に添加することでメタン分解活性および触媒寿命が著しく向上することが明らかとなった。

メタン分解反応によりNi粒子中の炭素濃度が増加し、炭化ニッケルが生成するため、担持Ni触媒のメタン分解活性は低下することが報告されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これに対して、Ni-Pd合金粒子では炭素濃度の上昇が抑制され、担持Ni-Pd触媒は高い活性と長寿命を示すことが明らかにされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。したがって、本研究で調製したNi-Pd/TiO₂触媒においてもNi-Pd合金を形成している可能性がある。そこで担持Ni-Pd触媒における金属の状態について検討するためにXRDの測定を行った。Fig. 8に還元後

のNi/TiO₂、Ni-Pd/TiO₂およびPd/TiO₂触媒のXRDパターンを示す。担持Ni触媒の回折パターン(a)にはNiによる回折ピークがみられた。また、担持Ni触媒の回折パターン(c)には強度の弱いPdのピークを確認することができた。一方、担持Ni-Pd触媒ではNiによるピーク以外にも、2θ=41.4°にピークがみられた。これはNi-Pd合金に帰属することができるピーク⁽⁷⁾⁽⁹⁾であるため、Ni-Pd/TiO₂触媒にはNi-Pd合金が存在しているといえる。

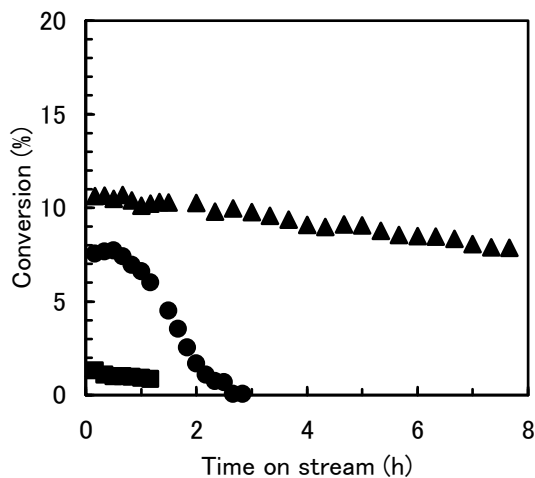


Fig. 7 Effect of Pd addition on catalytic activity of 5%Ni/TiO₂ for methane decomposition (catalyst weight = 0.01 g). (●) 5%Ni, (▲) 5%Ni-5%Pd, (■) 5%Pd.

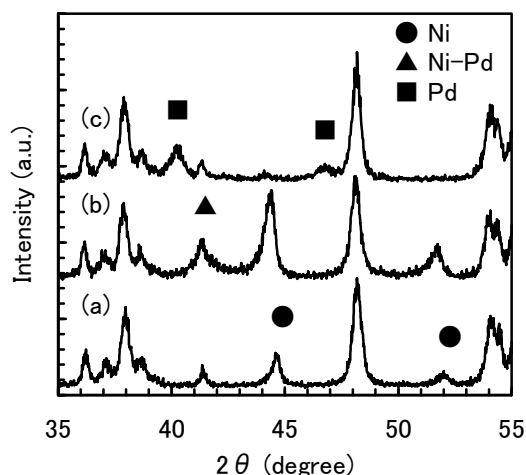


Fig. 8 XRD patterns of reduced Ni-Pd/HZSM-5 catalysts. (a) 5%Ni, (b) 5%Ni-5%Pd, (c) 5%Pd.

したがって、Ni/TiO₂にPdを添加することでメタ

ン分解活性および触媒寿命が向上したのは、Ni-Pd合金がTiO₂上に形成されるためであると考えられる。

4 結言

種々のNi/MO_x触媒のメタン分解特性について検討した結果、Ni/TiO₂触媒が最高の活性を示すことがわかった。さらに、Ni/TiO₂触媒は前報⁽³⁾で報告したNi/HZSM-5触媒よりもメタンの分解反応に対して高い活性を示し、寿命も長いことが明らかとなった。これはNi/HZSM-5触媒ではメタン分解反応により生成する炭素でHZSM-5の細孔が閉塞するが、Ni/TiO₂触媒の細孔はHZSM-5よりも大きいいため細孔の閉塞が起こらず、長寿命を示したと考えられる。また、Ni担持量がNi/TiO₂触媒の寿命に大きな効果を与えることも明らかにした。さらにNi/TiO₂触媒にPdを添加することによって活性低下は抑制され、触媒の寿命が長くなることがわかった。この原因はTiO₂上にNi-Pd合金粒子が形成するためであると考えられる。

これらのことから、担持Ni触媒の担体およびNi担持量をより最適化し、Pdなどの貴金属を添加することでさらに高活性かつ長寿命なグリーン水素製造用のメタン分解触媒を調製することが可能である。

文献

- (1) 資源エネルギー年鑑編集委員会編, 2003/2004 資源エネルギー年鑑, 通産資料出版会, p24.
- (2) United Nations Framework Convention on Climate Change/UNFCCC ホームページ, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- (3) アスマリザ, 齋藤真由, 神田康晴, 小林隆夫, 上道芳夫, 杉岡正敏, 室工大紀要, **57** (2007), p37-42.
- (4) Ermakova, M.A., Ermakov, D.Yu., Kuvshinov, G.G., Plyasova, L.M., J. Catal., **187** (1999), p77-84.
- (5) Murata, K., Fujita, K., Uchida, K., Sekiyu gakkaisi, **40** (1997), p129-133.
- (6) 多田旭男, 天然ガスの高度利用技術, エヌ・ティー・エス (2001), p592-598.
- (7) Takenaka, S., Shigeta, Y., Tanabe, E., Otsuka, K., J. Catal., **220** (2003), p468-477.
- (8) 竹中壮, 重田幸生, 山中一郎, 大塚潔, 触媒, **45** (2003), p154-156.
- (9) Ogihara, H., Takenaka, S., Yamanaka, I., Tanabe, E., Genseki, A., Otsuka, K., J. Catal., **238** (2006), p353-360.

北海道内市町村の鳥獣被害への取り組み

亀田 正人*

Municipalities Tackling Conflicts with Wildlife in Hokkaido

Masato KAMEDA

(原稿受付日 平成20年6月20日 論文受理日 平成20年11月7日)

Abstract

In February 2008, a law was implemented to encourage municipalities to prevent agricultural damage caused by wild animals. It was accompanied by a subsidy program to help municipalities undertake measures of their own choice. We conducted a survey with all the municipalities in Hokkaido on their responses to the law and the program. The result shows: (1) the number of applicant municipalities for the subsidies were small, compared with those that had been tackling conflicts with various wild animals. (2) A few municipalities are planning to take some newer kinds of measures. It may indicate the beginning of a change in the context of wildlife management. (3) The municipalities have a lot of requests concerning the program to the central and the Hokkaido governments. There is a need for them to comply with the requests, as long as they are consistent with wildlife conservation.

Keywords: Conflict, Wildlife conservation, Municipality, Hokkaido

1 はじめに

2008年2月21日、鳥獣による農林水産業等に係る被害の防止のための特別措置に関する法律（以下、特措法）が施行された。翌3月13日から4月18日には農林水産省が、この法律に基づいて市町村の施策を支援するため、鳥獣害防止総合支援事業（以下、総合支援事業）の公募を行った⁽¹⁾。

特措法は、深刻化する鳥獣による農林水産業被害の防止のための施策を総合的・効率的に推進することを目的としている。農林水産大臣の定める基本指針⁽²⁾に沿って市町村が被害防止計画を作成

し、それに基づいて各種施策を実施する場合には、国と都道府県がそれを支援するという内容である。

被害防止計画に盛り込むべき事項として掲げられているのは、対象鳥獣の捕獲（上記の基本指針は捕獲機材の導入、担い手の確保、狩猟免許の取得促進などを例示している）、捕獲以外の被害防止施策（同じく侵入防止柵の設置、緩衝帯の設置、生息地の整備、犬などを活用した追い上げ・追い払い、放任果樹の除去、被害防止知識の普及など）、実施体制（同じく被害防止対策協議会、鳥獣被害対策実施隊の設置など）、捕獲鳥獣の処理（同じく適切な処理方法の普及、肉の利活用など）、その他である。

なお特措法は、被害防止計画が都道府県の鳥獣保護事業計画および特定鳥獣保護管理計画と整合性のとれたものでなければならないことを定める

*共通講座

一方、都道府県の同意を得ればその許可権限の一部（対象鳥獣の捕獲の許可権限など）の委譲を受けることができることとしている。

農林水産省の総合支援事業は、被害防止計画が作成されていること、または作成されることが確実に見込まれることを要件として、各市町村の事業を財政的に、また専門家の派遣などの形で支援するものである。

従来の鳥獣被害対策は捕獲に大きく依存してきたが、二つの点で行き詰まりに直面している。一つは捕獲に直接携わる狩猟者が高齢化し減少して、このままでは必要な捕獲ができなくなるということ、もう一つは捕獲だけでは被害が減らないということである。特措法と総合支援事業はこのような現状に対応すべく登場した。すなわち一方では被害対策要員の育成を支援することで捕獲の継続と増強を促進し、他方では各市町村が必要に迫られて試験的に始めている、捕獲以外の各種対策（非致命的であるため鳥獣保護の観点から望ましい）を支援し拡充する。つまり、捕獲と捕獲以外という、二つの異なる、往々にして対立する対策を、各市町村の判断に応じて促進することになる。

このように特措法と総合支援事業は、各市町村および都道府県の対応次第では鳥獣被害防止と鳥獣保護の双方が大きく変わっていく転換点となる可能性を孕んでいる。野生鳥獣の保護管理の観点からも今後の推移が注目される場所である。

このような関心から、筆者は北海道内の市町村の動向を把握することを目的に、緊急のアンケート調査を実施した。本稿はその結果を報告するものである。

なお、このアンケート調査の実施後、農林水産省は上記総合支援事業の公募を「第1次公募」と位置付け直し、5月26日から7月11日まで第2次公募を行った³⁾。アンケート調査を実施した時点では、事態がそのように推移することは想定さ

れていなかった。

アンケート調査実施時点で「第1次公募」に未応募であった市町村の中から、第2次公募に応募する市町村が現れた可能性はあるが、本稿執筆時点でその結果は判明していない。今後第2次公募終了後の時点で追加のアンケート調査を実施し、今回のアンケートに未回答の市町村を含めて、より確度の高い調査結果を得たい。

このような事情から、本稿はあくまでも中間報告という性質のものとならざるをえない。したがって分析は最小限にとどめ、現在までに収集しえたデータを提示するにとどめることとする。

2 方法

2008年4月11日、北海道内の全180市町村に調査票を郵送し、回答の上郵送にて返信してもらった（付録参照）。回答は、総合支援事業の（第1次）応募締切日にあたる4月18日現在で記入するよう依頼した。全180市町村のうち、60%にあたる108市町村から回答を得た。

調査票は次の7つの質問で構成した。

- 1 被害防止計画の作成状況
- 2 被害防止計画に盛り込む施策
- 3 鳥獣害防止総合支援事業への応募状況
- 4 鳥獣害防止総合支援事業に盛り込む施策
- 5 従来実施してきた鳥獣被害対策
- 6 鳥獣被害対策上の困難・問題点
- 7 国と北海道への要望

3 結果

3.1 従来実施してきた鳥獣被害対策

調査票の質問順序とは異なるが、まず、これまで鳥獣被害対策としてどのような施策をとってきたかを聞いた結果を表1に示す。

表1 従来実施してきた鳥獣被害対策

対象鳥獣	シカ	ヒグマ	カラス	キツネ	アライグマ	ハト	トド	ノイヌ
対策をとってきた市町村	75	61	56	51	24	14	3	3
捕獲	70	56	53	47	20	14	1	3
防護柵・電気柵等の設置	34	20	1	3	3	0	0	0
刈り払いによる緩衝帯の設置	1	9	0	0	0	0	0	0
生ごみ・農作物残渣の管理指導	7	23	15	15	6	3	0	0
犬などを活用した追い払い	3	3	2	4	2	0	0	1
住民への普及・啓発	21	45	17	18	8	6	6	1
生息地の整備	0	0	0	0	0	0	0	0
その他の被害防止施策（具体的に）	4 ^a	1 ^d	7 ^e	2 ^f	2 ^g	0	2 ^h	0
捕獲鳥獣の加工施設設置	4 ^b	1	0	0	0	0	0	0
現場技術者の育成	1	1	0	0	0	0	0	0
国や道に専門家の派遣を要請	0	2	0	0	0	0	0	0
専門的知識を有する者に事業の一部委託	8 ^c	5	4	4	7	1	1	1

表 1 従来実施してきた鳥獣被害対策（つづき）

対象鳥獣	スズメ	「鳥類」	ヒヨドリ	ムクドリ	タンチョウ	カモメ	アシカ	アザラシ
対策をとってきた市町村	2	2	1	1	1	1	1	1
捕獲	2	2	1	1	0	1	1	1
防護柵・電気柵等の設置	0	0	0	0	1	0	0	0
刈り払いによる緩衝帯の設置	0	0	0	0	0	0	0	0
生ごみ・農作物残渣の管理指導	0	0	0	0	0	0	0	0
犬などを活用した追い払い	0	0	0	0	0	0	0	0
住民への普及・啓発	0	0	0	0	0	0	0	0
生息地の整備	0	0	0	0	1 ^k	0	0	0
その他の被害防止施策（具体的に）	0	0	1 ⁱ	1 ^j	1 ^l	0	0	0
捕獲鳥獣の加工施設設置	0	0	0	0	0	0	0	0
現場技術者の育成	0	0	0	0	0	0	0	0
国や道に専門家の派遣を要請	0	0	0	0	0	0	0	0
専門的知識を有する者に事業の一部委託	0	0	0	0	1	0	0	0

（注1）数字は当該項目に「○」または語句を記入した市町村数を表す。

（注2）質問対象はこのアンケートに回答を寄せた全108市町村であり、そのうち100市町村がこの質問に回答を寄せた。

（注3）複数の鳥獣について回答した市町村は89あった。それらの場合、各鳥獣についての回答を1とカウントした。

（注4）対象鳥獣の不明な回答が2町あった。それらの回答は表に含まれない。

（注5）アルファベットの添え字はそれぞれ次の回答があったことを表す。

- a:「爆音器設置」1、「忌避装置」1、「威嚇」1、「囲いわなによる捕獲」1 b:「残滓ボックス設置及び処理」1、「民間」1を含む
 c:「ハイタワーの研究・発信機による移動調査」1を含む d:「電気柵購入補助」1 e:「巢の撤去」1、「捕獲小屋設置」1、
 「爆音器設置」1、「駆除の許可」1、「威嚇」1、「網による侵入防止」1、「はこわな」1 f:「網による侵入防止」1、「はこわな」1
 g:「檻・電気柵購入補助」1、「はこわなの貸し出し」1 h:「銃で威嚇」1、「猟友会による威嚇」1 i:「爆音器設置」1
 j:「爆音器設置」1 k:「ねぐらの整備」1 l:「追い払い」1

5割から7割にのぼる市町村がシカ、ヒグマ、カラス、キツネを対象として対策をとっている。全般に捕獲が最も多くとられる対策であるが、住民への普及・啓発もそれに次いで行われている。また少数ではあるが、シカ、ヒグマ、カラス、キツネ、アライグマには犬などを活用した追い払いを行う市町村もみられる。

シカについては防護柵の設置が多いのが特徴的であるが、ヒグマでは電気柵の設置以上に住民向けの普及・啓発や生ごみ・農作物残渣の管理指導が行われ、刈り払いによる緩衝帯の設置も行われるようになってきている。またアライグマに関しては専門家に委託するケースが比較的多く見られる。

3. 2 鳥獣被害対策上の困難・問題点

日頃から鳥獣被害対策を行ううえでの困難や、今後予想される問題を自由に述べてもらったところ、75市町村から回答があった。内容別に分類すると、比較的多かったものは表2のとおりである。

各分類の典型的な回答の例を挙げると、以下のとおりである（以下、引用に当たっては回答の文意を損なわない範囲で必要最小限の省略・修正を加えている）。

（1）ハンターの高齢化・後継者不足

・猟友会等のメンバーが高齢化等により減少しており、地域で十分な駆除体制を組むことが困難に

表 2 鳥獣被害対策上の困難・問題

内 容	市町村数
ハンターの高齢化・後継者不足	37
防除方法の手詰まり	18
財政難	13
被害増加・個体数増加	12
残滓処理の困難	11
近隣との協力の必要	4
住民の理解の必要	4
生息状況調査の必要	3

（注）1市町村が複数の内容を述べている場合、それぞれの内容を1とカウントした。

なっている上に有資格者の育成が前進しない。

- ・農家はもちろん、住民全体が高齢化しているため、ハンターも後継者不足、経験不足のため、ことが起きてからの確な対応がとれるか不安。
- ・ハンターの高齢化が問題で、お金を出しても有害鳥獣の捕獲が追いつかないことも予想される。

（2）防除方法の手詰まり

- ・キツネやカラスによる被害は年々増加傾向にあるなか、住宅地に出没する個体は警戒心が強く箱わなやくくりわなでの捕獲は難しい。今後どのような捕獲方法が効率的かを検討する必要がある。
- ・当町において、現在カラスの農業被害が問題と

なっている。被害を受けている農業者からは「檻を設置して駆除してほしい」という要望がある中で、設置場所の選定、エサの確保、捕獲されたカラスの殺し方、死骸の処分方法、そして誰が管理及び処理を行うのか？という問題がある。

- ・ヒグマ出没箇所への即応力（通報から猟友会が現地に到着するまでの所要時間）。猟友会が赴いての銃での捕獲は時間的に相当困難。猟友会の身分・休業補償など。実績ある箱わなは、申請・許可（支庁長権限）が困難。

- ・銃器やわなによる捕獲、巡回等を行っているが、当地域の総土地面積約52,000ha（耕地面積13,300ha）と広く、被害報告から現場到着まで時間的なロスがあり、即時対応が行えていない状況である。

- ・①ヒグマ：電気柵内に侵入した場合は圃場の外に出られず捕獲が困難で危険を伴う。②エゾシカ：当町は有数の軽種馬産地であるため、牧場の近くでは発砲できない。

- ・シカの農作物の被害の場所が住宅街に近いケースにおいて銃を使用しての捕獲が困難な場合等の対応に苦慮している。

- ・住宅街において鳥獣被害が発生した場合の対応。
- ・侵入防止柵設置を予定しているが、希望していない農家の農地に被害が集中することが予想される。

- ・防護柵の設置について、一部市町村でも効果が上がらない。また防護柵を囲うことにより農作業の被害は減るもののシカによる角こすりや唐松などがダメになり、山が荒れてしまう。

- ・白鳥飛来地周辺をついばみ等の被害が近年増加しているが、追い払いするぐらいしか対策がとれない。

- ・トドは国際的に保護が必要な動物とされ、北海道連合海区漁業調整委員会指示により採捕が規制されており、採捕に制限があること。

（3）財政難

- ・町財政が厳しい中、鳥獣害専門の職員の配置がこれからの課題。ニホンジカが増加傾向にあり被害が拡大すれば他業務との兼務では対応できない。

- ・エゾシカ侵入防止柵（金網フェンス）の資材（鋼材）の高騰に伴う事業費の増大。

- ・アライグマの殺処分費用等に多額の費用が必要となっている。

- ・少額な有害鳥獣捕獲手当であるが故に積極的な捕獲が出来ない。

- ・財政再建団体の当市において新たな事業の取り組みに市負担分の予算計上が難しいため、地域協議会の立ち上げも他の協議会構成機関に負担割合について予め協議しておく必要がある。

（4）被害増加・個体数増加

- ・現在、道南地域においてエゾシカの個体数が増加しており、今金町においても目撃されている。

- ・シカによる農作物被害、海獣による漁業被害が増加傾向。

- ・駆除数を上回る勢いで増え続ける生息数（エゾシカ・アライグマ）。

- ・エゾシカの急激な増加によってヒグマの生息数が増加し、一定の所に長期間とどまるケースが増えており、人間社会エリアまでテリトリーを広げてきている。

（5）残滓処理の困難

- ・シカ等の捕獲後の処理、処理場搬入の負担。

- ・有害鳥獣捕獲適正時期における食用困難（廃棄処分にも高額な処理料）。

- ・地元で残滓処理ができないことから費用が増大してくる。

- ・エゾシカについて、有害捕獲だけで年間2,000頭以上駆除していることから残滓の処理が問題である。地理的にエゾシカの越冬地となっており、一自治体だけで駆除と残滓処理をするのは限界である。

（6）近隣との協力の必要

- ・各市町単位の被害防止事業では限界があるため、広域で対策する必要がある。

- ・周辺自治体と協調して対策を講ずることが重要。単独では単なるやっかい払いにしかならない。

- ・トドの被害について、隣接市町村との連携を取りながら防止対策を検討する必要がある。

（7）住民の理解の必要

- ・有害鳥獣捕獲は被害防除対策を行っても被害が改善されない（捕獲以外に防除対策がない）場合に行われるが、住民（被害者）に対し、駆除実施前に自らが行わなければならない被害防除対策の必要性を十分理解してもらうのが難しい。

- ・防護柵・電気牧柵等の設置に向け、住民負担も含めて地域住民への理解を求める必要がある。

- ・被害者は被害を起している鳥獣の駆除を望み、鳥獣の保護を訴える人々は一切の駆除の排除を望む。この正反対の要望があるということが、被害対策をいっそう難しくしていると思う。

- ・鳥獣保護に関する法律は「全ての生物種の保護」を基本としていることは理解出来るが、保護のあり方が単なる「かわいそうだ！」という発想で、「えさ」を与える行為が横行し、外来種まで蔓延している。保護活動に携わる関係者が保護の本質を認識して、保護計画（増えた分をどうするかも含め）を樹立し、実行してほしい。保護計画はその鳥獣の負の部分、野性性に対しても責任を持った上で実践してもらいたいものである。

（8）生息状況調査の必要

- ・「被害防止計画」を作成するために必要な対象鳥獣の生息状況等の把握。

- ・当地域は道東地域と比較すると鳥獣等の生息調査等に関する情報が少ないため、長期的に調査を行わなければならないと考えているが、被害対策

の中心となっている豊富町鳥獣害防止対策協議会では自己資金を保有していないので、その活動費用をどのように拠出するか検討しなければならない。

(9) その他

- ・アライグマ対策はH19年度から捕獲に努めている(27頭)。行政(市)主導で捕獲業務を実施しているが、限界に来ている。農協(農業者を含め)主導への転換を検討中であるが、捕獲体制の構築が難しい。
- ・近年エゾシカの急増により果樹・野菜等の被害が増加しており、現行の狩猟期間での対応では被害を減少させることは難しいことから、狩猟期間の延長を検討してほしい。また、ヒグマについても同様、農業被害が拡大しており、狩猟期間以外、特に春の駆除を検討願いたい。
- ・大規模なシカ柵を整備し、農作物被害防止に大きな効果が得られているが、すでに設置から10年程度経過しており、今後は大幅な補修・更新が必要となってくる。
- ・農業被害のほとんどがエゾシカ食害であり、その対策に絞って各種事業に取り組んできた。(有害鳥獣の捕獲・シカ侵入防止柵・電気牧柵・北海道犬の導入など。)費用負担が大きく、労力もかかっているのが課題である。

3.3 被害防止計画の作成状況

次に、特措法で作成が求められている被害防止計画の作成状況を聞いた結果を表3に示す。

表3 被害防止計画の作成状況

回 答	市町村数
作成した	1
今年度中に作成する予定	22
来年度以降に作成する予定	4
作成する予定はない	22
検討しているが未定	48
検討していない	11

回答市町村のうち被害防止計画を作成したのは小平町1町のみ(対象鳥獣はシカ)であった。作成の予定を持つ市町村を合わせても27と、少数にとどまっている。これには法律の施行からあまり時間が経過していないという事情も働いているものと思われる。検討中の市町村が48にのぼっていることから、今後作成する市町村が増える可能性もある。

一方、計画を作成する予定のない市町村が22、検討していない市町村が11あるが、このことは必ずしもこれらの市町村で鳥獣被害が問題になっていないということを意味しない。これらの市町村のうち従来まったく鳥獣害対策をしていないのは4町のみであり、それ以外は多かれ少なかれ鳥

獣害対策を行っており、後述の「鳥獣被害対策上の困難・問題点」に他市町村と同様深刻な回答を寄せている。このことから推して、計画を作成しないのは必ずしも鳥獣害が深刻でないからではなく、他の何らかの理由で作成しないことを選択しているものと考えられる。ただし、今回の調査からはその理由までは明らかにしえなかった。

3.4 被害防止計画に盛り込む施策

前問で被害防止計画を「作成した」、「今年度中に作成する予定」または「来年度以降に作成する予定」と答えた27市町村に、対象とする鳥獣を挙げてもらい、その鳥獣ごとに計画に盛り込んだ、あるいは盛り込むことを検討中の項目を選んでもらった。これらの項目はいずれも特措法に挙げられているものである。結果を表4に示す。

対象とされる鳥獣は、従来から多くの市町村で対策対象となっているシカ、ヒグマ、カラス、キツネ、アライグマ、ハトが多いが、なかでもシカ、ヒグマ、アライグマが盛り込まれる比率が高い。これらの対策に困難を感じている市町村が多いことがうかがわれる。海岸部ではトド、アシカ、アザラシもみられる。

対策の内容は対象鳥獣によって当然異なるが、多くの鳥獣に共通しているのは、実際に対策に当たる鳥獣被害対策実施隊の設置と隊員の育成、捕獲の継続、残滓の処理体制の整備、住民への普及・啓発である。シカの場合にはそれ以外に肉の利活用が、またシカとヒグマでは防護柵・電気牧柵の設置と捕獲許可権限の委譲が検討されている。

3.5 鳥獣害防止総合支援事業への応募状況

次に総合支援事業への応募状況を聞いた。結果は表5のとおりである。

表5 総合支援事業への応募状況

回 答	市町村数
応募した	3
来年度以降、公募があれば応募する予定	5
応募する予定はない	32
検討しているが未定	46
検討していない	22

応募したのは小平町、豊富町、芦別市の3市町であった。対象鳥獣は、小平町がシカ、豊富町がシカ、キツネ、アライグマなど、芦別市がシカ、ヒグマ、アライグマとなっている。総合支援事業は採択要件として、被害防止計画が作成されていること、または作成されることが確実に見込まれることを求めているが、応募時点ですでに計画が作成されていたのは、前述のとおり小平町のみであり、豊富町と芦別市はともに作成予定であった。

これら3市町に、「来年度以降、公募があれば応

表4 被害防止計画に盛り込む施策

対象鳥獣	シカ	ヒグマ	カラス	キツネ	アライグマ	ハト	トド	ノイヌ	カモメ	アシカ	アザラシ
「被害防止計画」を作成済みまたは作成予定の市町村	21	15	7	5	5	4	2	1	1	1	1
捕獲											
捕獲許可権限の移譲を受ける	8	3	0	0	0	0	0	0	1	1	1
捕獲予定頭数の設定	13	6	1	2	3	0	1	0	0	0	0
(科学的知見の入手先を具体的に)	1 ^a	0	0	0	0	0	1 ^j	0	0	0	0
捕獲機材の整備	5	5	4	3	5	2	0	0	0	0	0
捕獲以外の被害防止施策											
防護柵・電気柵の設置	13	7	0	0	1	0	1	0	0	0	0
刈り払いによる緩衝帯の設置	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
生ごみ・農作物残渣の管理指導	5	6	3	4	3	2	0	0	0	0	0
犬などを活用した追い払い	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
住民への普及・啓発	12	9	3	4	4	2	0	0	0	0	0
生息地の整備	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
その他の被害防止施策(具体的に)	2 ^b	0	1 ^d	1	1	1 ^g	1 ^k	0	0	0	0
実施体制											
対策協議会の設置	14	6	4	4	3	3	1	0	0	0	0
鳥獣被害対策実施隊の設置	13	9	4	3	2	2	2	0	1	1	1
同実施隊員の育成	7	6	2	2	1	0	0	0	0	0	0
その他の実施体制整備(具体的に)	1 ^o	0	1 ^e	0	0	1 ^h	0	1 ^l	0	0	0
捕獲鳥獣の処理											
処理体制整備	6	3	2	2	1	2	1	0	0	0	0
肉の利活用	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
その他の処理体制整備(具体的に)	2	1	1 ^f	0	0	1 ⁱ	0	1 ^m	0	0	0
計画作成や人材育成のため国や道に専門家の派遣・助言を要請	2	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0

- (注1) 数字は当該項目に「○」または語句を記入した市町村数を表す。
 (注2) 質問対象は27市町村であり、そのうち無回答の2町と「内容未定」の2市町村を除く23市町村が具体的な回答を寄せた。無回答の2町と「内容未定」の2市町村は表に含まれない。
 (注3) 複数の鳥獣について回答した市町村が19あった。それらの場合、各鳥獣についての回答を1とカウントした。
 (注4) アルファベットの添え字はそれぞれ次の回答があったことを表す。
 a:「従来の捕獲頭数(年100頭)」1 b:「生息状況調査」1、未記入1 c:「猟友会に委託」1 d:「牛舎等侵入防止」1
 e:「猟友会に委託」1 f:「最終処分場」1 g:「牛舎等侵入防止」1 h:「猟友会に委託」1 i:「最終処分場」1
 j:「北海道連合海区漁業調整委員会」1 k:「銃による威嚇」1 l:「猟友会に委託」1 m:「最終処分場」1

募する予定」と答えた5市町を加えても、応募の意向をもっているのは8市町にとどまり、被害防止計画の作成に比べても少ない。

なお、公募終了後の農林水産省の資料によれば、北海道から応募して採択されたのはここに挙げた3市町と、アンケートに回答を寄せていない6市町、合わせて9市町であった⁽⁴⁾。これは北海道内全180市町村の5%にあたる。

農林水産省からの情報によれば、北海道を含め全国から応募した市町村160のすべてが採用された。それらへの交付金を合計しても総合支援事業の2008年度予算約28億円に達しなかったため、追加的な公募を実施したわけである。

3.6 鳥獣害防止総合支援事業に盛り込む施策

前問で総合支援事業に「応募した」または「来年度以降、公募があれば応募する予定」と答えた8市町に、対象鳥獣ごとに事業に盛り込んだ、あるいは盛り込むことを検討中の項目を選んでもらった。これらの項目はいずれも総合支援事業の公募要領⁽¹⁾に挙げられているものである。結果を表6に示す。前述の被害防止計画に盛り込む施策に見られた傾向がここでもうかがわれる。

3.7 国への要望

被害防止計画の作成と支援について国への要望

表6 鳥獣害防止総合支援事業に盛り込む施策

対象鳥獣	シカ	ヒグマ	カラス	キツネ	アライグマ	ハト
「鳥獣害防止総合支援事業」に応募済み または応募予定の市町村	7	2	1	2	3	1
推進事業						
捕獲						
狩猟免許の取得	2	1	1	1	2	1
捕獲実施	5	1	1	2	3	1
捕獲以外の被害防止施策						
現場技術指導者の育成	0	0	0	0	0	0
防護柵・電気柵等の設置	3 ^a	0	0	0	0	0
刈り払いによる緩衝帯の設置	0	0	0	0	0	0
生ごみ・農作物残渣の管理指導	1	1	1	1	0	1
犬などを活用した追い払い	0	0	0	0	0	0
住民への普及・啓発	4	1	1	2	2	1
生息地の整備	0	0	0	0	0	0
その他の被害防止施策（具体的に）	3 ^b	0	0	1 ^c	2 ^d	0
整備事業						
被害防止施設（防護柵・電気柵等）	4	0	0	0	0	0
捕獲鳥獣の処理・加工施設	3	0	0	0	0	0
国や道に専門家の派遣を要請	1	0	0	0	1	0
専門的知識を有する者に事業の一部委託	1	0	0	0	0	0

（注1）数字は当該項目に「○」または語句を記入した市町村数を表す。

（注2）質問対象は8市町村であり、その全部が回答を寄せた。

（注3）複数の鳥獣について回答した市町村が5あった。それらの場合、各鳥獣についての回答を1とカウントした。

（注4）「未定」が1町あった。その回答は表に含まれない。

（注5）アルファベットの添え字はそれぞれ次の回答があったことを表す。

a:「調査する」を含む b:「被害状況調査」2、「生息調査」1 c:「生息調査」1 d:「被害状況調査」1、「生息調査」1

を自由に述べてもらったところ、31市町村から回答があった（一部、国と北海道双方への要望を含む）。最も多かったのは、支援事業の内容拡大の要望であった（19市町村）。

特徴的なものを以下に示す。

（1）支援事業の内容拡大の要望

・特措法や総合支援事業の交付金の補助率を上げてほしい。

・H20～22年度の3ヵ年事業であるが、事業採択については単年度毎とのことである。当町では事業内容として侵入防止柵を3ヵ年で対象全地区に設置することから、事業採択についても3ヵ年確約されたものとしてほしい。

・単年度ごとの補助事業ではなく、長期間地域全体の生息調査が実施できる補助事業の確立をお願いしたい。

・今回の計画はどちらかといえば本州寄りの計画で、北海道の実態では支援事業も使いづらいと思う。もう少しそれぞれの地域で使いやすい事業内容にしてほしい。

・事業実施体や補助メニューの拡大。現在示されている補助対象事業内容においては、苫小牧市の

場合対象とならない。

・エゾシカやアライグマの処分経費は、今回のソフト事業では補助対象外。補助対象経費の拡充を希望。

・今回の総合対策事業ではハンターに対する日当や駆除奨励金については補助対象外となっていることから、事業内容に関しての検討を要望する。

・猟友会に対する狩猟税の軽減措置の活用を検討していくが、より簡易な方法での財政支援が望まれる。

・①被害の状況は深刻と思えるが、捕獲隊員への補償は不十分ではないか。狩猟税1/2、非常勤職員への報酬（低額）：仕事を休んでまで積極的に取り組むことは見込まれないのではないかと。②市町村長による市町村職員等の捕獲隊員への指名：仕事の一環では捕獲意欲の継続はなく、短期の一過性に終わると思われる。（専門職ではないため、職場の異動もあり。）③ライフル所持要件の緩和・拡大。（ベテランハンターの減少の中、若手ハンターの散弾銃では捕獲に限度あり。道内の広い牧草地等では近づくのも困難。）

・補助制度の拡充は大変ありがたいが、地域が補

助を希望しているものが対象外であったり事務が煩雑になったりしては、せっかくの制度が生かし切れない。喫緊の施策であるので、柔軟な対応や都道府県に裁量権を渡すなど希望する。弟子屈町では、有害鳥獣の捕獲に対する補助を新たに事業の対象としてほしい。鹿柵の費用負担軽減（交付税）は大変ありがたいが、事業採択基準が厳しくなったり事務が過大にならないよう希望する。

- ・エゾシカ駆除経費及び処理経費についても補助対象としてほしい。ヒグマについては被害が人命と直結してしまう。ツキノワグマと大きさが違うため、当町でも毎年のように人身事故があり、平成13年と17年には町民が尊い命を失っている。学校周辺に出没した場合は父兄に送迎の負担が増える。何らかの財政的な支援策はないか。

- ・国と北海道に。特に被害を受ける作物（にんじん）は、4年輪作体系の中に組み込まれ、被害を受ける畑は町内転々と変わるが、被害を受ける畑も当然予想される。そこで補助対象で電気柵を購入した場合、予想される毎年変わる出没箇所に移動して使用できるようにしてほしい。作物面積当たりの面積が大きいいため、連続した「受益者3戸以上」の要件を緩和してほしい。

- ・ハード事業については、受益農家が3戸以上であること、1件あたりの事業費が50万円以上であることが条件とされているが、事業費の下限額の見直しを検討してほしい。事業費が50万円以上の場合、実施が難しい状況である。

- ・当市では簡易な電気柵の設置を考えているが、毎年の設置と撤去及び放電対策が一番手間がかかることから、維持管理の負担が少ない個人の圃場を囲う場合にも補助の対象になるように措置していただきたい。

- ・防止柵については農地の周囲に設置することにより効果はあがるが、農業者の高齢化等により意見がまとまらないこともあり、農業者負担がなく事業が行えるよう検討願いたい。

- ・国と北海道に。アライグマの専門家を派遣していただき、生息場所、習性、効率的な捕獲方法を指南していただきたい。③駆除専門部隊を新設し、被害市町村と連携し、駆除の実施支援。

(2) その他

- ・国と道に。トドによる刺し網や水産物への被害の補填。

- ・国有林野へのスノーモービル乗り入れ許可発行、残滓処理の適正化対策→ヒグマ対策にもなる。

- ・ハンターの高齢化や銃に関する規制強化のため、年々銃の所持者が激減している。銃の所持について検討されるよう要望したい。

- ・対象鳥獣の生息数の把握は、市町村レベルで行うのは、生息域の問題があり非常に難しいため、国や道レベルでの調査を行ってほしい。

- ・国と道に。対象となる鳥獣の生息が広範囲に及

ぶため、一市町村での対応策では効果が期待できない。国（道）の施策として、根本的な対応策を望みたい。

- ・特措法は市町村を実施主体としているが、財政支援の面からどの程度市町村に対して有効性があるかはっきりしていない。現状から国も道も財政支援はほとんどしていないため、各市町村の取り組みに依存しており財政事情により被害防止の取り組みにもバラつきが見られる。

- ・国と道に。鳥獣の保護計画または管理計画があるが、保護の本質を履き違えるとき、自然環境が保護鳥獣によって破壊され、人間界の生産物に寄せてくる被害を他人事のように、研究と称して手立て、警鐘もせず手遅れ状態を生み出している実態を認識してほしい。「人間が獣の被害にあった場合」捕獲許可が出る状態は、殺人を認めていると等しく、許可を出す人間に何も咎めがないのは、保護計画の責任はどこにあるか疑問である。自治体が鳥獣被害対策を取り組むのは、一方で「保護計画」の負の部分の押し付けているように思える。憲法で保障されている安全安心な暮らしを確保するため、国の全機関が包括的に検証実践する必要があると思う。

3.8 北海道への要望

被害防止計画の作成と支援について北海道への要望を自由に述べてもらったところ、27市町村から回答があった（一部、国と北海道双方への要望を含む）。内容別に分類すると、比較的多かったものは表7のとおりである。

表7 北海道への要望

内 容	市町村数
独自の支援策の要望	13
広域的な対策の要望	5
規制緩和の要望	5
専門的見地からの指導の要望	4

(注) 1市町村が複数の内容を述べている場合、それぞれの内容を1とカウントした。

各分類の典型的な回答の例を挙げると、以下のとおりである（国と北海道双方への要望の例は前項に掲げたので、ここでは省略する）。

(1) 独自の支援策の要望

- ・特措法において道は第三者的位置付けにあり、道からの現実的な支援もあまり実施されていない。特措法のような条件付きの支援ではない財政支援を要望したい。

- ・国の事業の対象とならない支援制度に対して、道独自に制度化して市町村を支援しては？（以前のエゾシカ捕獲の補助など。）

- ・国とは違った支援制度があるとよい。気候・風土が違えば、害を及ぼす鳥獣の種類や被害の程度

も異なってくるので、国と連携した、より手厚い支援制度を構築することを求める。

- ・狩猟者登録料の減額措置。
- ・電気柵設置等に対する補助金。
- ・長期間地域全体の生息調査が実施できる補助事業の確立をお願いしたい。
- ・道農政部で通知している「防鹿柵計画・設計指針（案）」は国費補助事業の基準となっているが、この基準に基づく設置では事業費が高くなりすぎる。（国は今回のハード事業はこの基準に基づかなくてもいいと言っているが、会計検査等で説明必要。）市町村が国費補助事業を活用してエゾシカ侵入防止柵を設置するためには、この道の基準を使用するか、あるいは市町村独自の根拠ある指針が必要となり、独自の根拠づくりは技術的に困難。道に低コスト鹿柵の設計指針を作成していただきたい。

- ・養鹿に関しては、捕獲から養鹿・食肉加工・流通といった一貫した体制が整備されなければ取り組むことは困難。早急な体制整備を望む。

（2）広域的な対策の要望

- ・残滓処理施設の整備と広域化、連携。
- ・農林水産業等に係る被害防止は、市町村単独による取り組みでは限界があり、道が主導のもと、広域的な連携を図りながら防止について積極的に推進していただけるよう要望する。
- ・エゾシカ被害は農林業だけでなく、自動車や列車事故も増加している。生態系の破壊にもつながっている。広範囲を移動する動物であり、一自治体の負担で解決することは困難である。広域な駆除を望む。

（3）規制緩和の要望

- ・エゾシカの狩猟期間の延長と、春のヒグマ駆除区域の拡大をお願いしたい。
- ・わなの設置に特定箇所が必要となったが、ことが起きて許可を得る形式では対応が後手になる。わなは被害予防、早期対応にも、年間、町内一円での設置許可を願いたい。

（4）専門的見地からの指導の要望

- ・被害防止計画の作成に必要なヒグマ、エゾシカの生息数等の調査を行って欲しい。
- ・当市におけるシカの生息状況の把握が難しく、今後把握していく上で、協力・指導願いたい。
- ・地域毎に駆除計画を定める必要があり、そのためのデータの提供と専門的な見地からの指導をお願いしたい。

（5）その他

捕獲時の資料提供が非常に事務的、捕獲現場への配慮に欠けている。

4 考察

以上の結果から、調査時点での各市町村の動向について、暫定的に次の3点を指摘することがで

きよう。

第1に、従来から鳥獣被害対策をとっている市町村は多いが、特措法の求める被害防止計画を作成または作成予定の市町村は現在までのところ比較的少なく、総合支援事業に応募または応募予定の市町村はさらに少ない。ただし、特措法施行と総合支援事業開始からまだ間がないことから、今後各市町村での準備期間を経て徐々に増えていく可能性がある。

第2に、一方では従来実施してきた対策の特徴が被害防止計画に引き継がれ、さらに総合支援事業にも盛り込まれていく傾向がみられるが、他方では捕獲許可権限の委譲、鳥獣被害対策実施隊、残滓処理、肉の利活用など、一部の市町村にとってこれまで果たせなかった課題を実現する可能性が生まれてきたケースも見られる。鳥獣被害対策と野生生物保護に変化が生まれる兆しかもしれない。

第3に、市町村からの要望を踏まえて、特措法と総合支援事業の内容、国と北海道に求められる役割などについて、野生生物保護との整合性を保ちながら再検討する余地が多分にある。

以上の点について、更なる調査を通じた分析が必要である。今後の課題としたい。

謝辞

調査に協力下さった各自治体関係者に感謝の意を表す。また、本調査の設計にあたって助言を下さったのぼりべつクマ牧場・ヒグマ博物館の前田菜穂子氏と室蘭工業大学の丸山博氏に感謝する。この研究は平成18年度～20年度科学研究費補助金基盤研究（C）（一般）「人間的側面研究に基づくヒグマ保護管理の社会実験—北海道渡島半島地域住民との協働—」（課題番号18510030）による研究成果の一部である。

文献

- （1）農林水産省，平成20年度鳥獣害防止総合支援事業公募要領，(2008)。
- （2）農林水産省，鳥獣による農林水産業等に係る被害の防止のための施策を実施するための基本的な指針，平成20年2月21日農林水産省告示第254号，(2008)。
- （3）農林水産省，鳥獣害防止総合支援事業公募要領，(2008)。
- （4）農林水産省，平成20年度鳥獣害防止総合支援事業採択（交付金交付候補者）一覧，(2008)。

対象 調査票

鳥獣被害防止特措法に係る市町村の施策に関する緊急調査にご協力下さい

日頃より鳥獣被害対策でのお骨折り、ご苦労様です。私共は室蘭工業大学で鳥獣被害・対策と住民の意識・行動について研究している者です。

さて、ご承知のとおり今年2月、鳥獣による農林水産業等に係る被害の防止のための特別措置に関する法律（鳥獣被害防止特措法）が施行されました。また現在、この法律に基づいて市町村の施策を支援するため、農林水産省が鳥獣被害防止総合支援事業を公募しています。

この法律では、特に市町村による自主的な施策が重視されています。地域に即した市町村の工夫によって、鳥獣被害をより効果的に防止することにつながる可能性ががあります。同時に他方では都道府県の鳥獣保護事業との整合性を担保することが求められ、捕獲以外の様々な防止策の実施が求められています。このようにこの法律は、各市町村の対応次第で鳥獣被害防止と鳥獣保護の双方が大きく変わっていく転換点となる可能性を孕んでいます。

そこで私共の研究室では、最も重要な役割を担う各市町村がこの法律の施行を受けてどのような施策をとろうとされているのか、直接お聞きする必要があると考えました。そのため、不躰ではありますが、なにとぞご協力のほどお願いいたします。

この調査の結果は私共の研究の中で一つの資料として使わせていただくほか、論文や新聞、ウェブサイトで、各種審議会などで公表させていただくことがあります。回答資料の中に個人情報が入り込んでいない場合、その情報は公表いたしません。

調査票はこのページを含めて4ページあります。すべてお答えいただきましたら、同封の返信用封筒にて、4月25日（金）までに返送下さい。

なお、私共の手違いでこの調査票が鳥獣被害対策を担当していない部署宛てに届いてしまいました場合は、お手数をおかけして申し訳ありませんが、本来の担当部署に回送下さいますようお願いいたします。

ご不明な点がありましたら、下記までお問い合わせ下さい。

2008年（平成20年）4月11日

室蘭工業大学 共通講座
亀田 研究室
(代表 亀田正人)

〒050-8585 室蘭市水元町 27-1
TEL/FAX 0143-46-5819

Email kameda@mmm.muroran-it.ac.jp

以下の問いに、農水省が現在公募中の「鳥獣被害防止総合支援事業」の応募締め切り日に当たる4月18日現在でお答え下さい。

1 鳥獣による農林水産業等に係る被害の防止のための特別措置に関する法律（鳥獣被害防止特措法）に基づく「被害防止計画」を作成しましたか。

- A 作成した
- B 今年度中に作成する予定
- C 来年度以降に作成する予定
- D 作成する予定はない
- E 検討しているが未定
- F 検討していない

2 「1」で「A」と答えられた場合は、たいへん恐れ入りますが、計画の写しを一部ご提供下さい。また、「B」または「C」と答えられた場合は、下の表に、対象とする鳥獣の種類ごとに、計画に盛り込むことを検討中の項目に○を記入して下さい。

対象鳥獣（種類をお書き下さい）	
捕獲	
捕獲許可権限の移譲を受ける	
捕獲予定頭数の設定	
(科学的知見の入手先を具体的に)	
捕獲機材の整備	
捕獲以外の被害防止施策	
防護柵・電気柵の設置	
刈り払いによる雑草等の設置	
生ごみ・農作物残渣の管理指導	
木などを活用した追い払い	
住民への普及・啓発	
生息地の整備	
その他の被害防止施策（具体的に）	
実施体制	
対策協議会の設置	
鳥獣被害対策実施隊の設置	
同実施隊員の育成	
その他の実施体制整備（具体的に）	
捕獲鳥獣の処理	
処理体制整備	
肉の利活用	
その他の処理体制整備（具体的に）	
計画作成や人材育成のため国や道に	
専門家の派遣・助言を要請	

3 農水省が現在公募中の「鳥獣被害防止総合支援事業」について伺います。この事業に応募しましたか。

- A 応募した
- B 来年度以降、公募があれば応募する予定
- C 応募する予定はない
- D 検討しているが未定
- E 検討していない

4 「3」で「A」と答えられた場合は、たいへん恐れ入りますが、応募書類のうち「様式2 事業実施計画」と「応募者概要」の写し各1部をご提供下さい。個人情報保護に差し支えない範囲で結構です。また、「B」と答えられた場合は、下の表に、対象とする鳥獣の種類ごとに、事業に盛り込むことを検討中の項目に○を記入して下さい。

対象鳥獣（種類をお書き下さい）			
推進事業			
捕獲			
狩猟免許の取得			
捕獲実施			
捕獲以外の被害防止施策			
現場技術指導者の育成			
防護柵・電気牧柵等の設置			
刈り払いによる緩衝帯の設置			
生ごみ・農作物残渣の管理指導			
犬などを活用した追い払い			
住民への普及・啓発			
生息地の整備			
その他の被害防止施策（具体的に）			
整備事業			
被害防止施設（防護柵・電気牧柵等）			
捕獲鳥獣の処理・加工施設			
国や道に専門家の派遣を要請			
専門的知識を有する者に事業の一部委託			

5 貴自治体ではこれまで鳥獣被害対策としてどのような施策をとってこられましたか。主な対象鳥獣ごとに、これまで実施してこられた項目に○を記入して下さい。「被害防止計画」を作成済みの鳥獣については、それ以前についてお答え下さい。また欄が足りない場合は、欄を分割してお書き下さい。

対象鳥獣（種類をお書き下さい）			
捕獲			
防護柵・電気牧柵等の設置			
刈り払いによる緩衝帯の設置			
生ごみ・農作物残渣の管理指導			
犬などを活用した追い払い			
住民への普及・啓発			
生息地の整備			
その他の被害防止施策（具体的に）			
捕獲鳥獣の加工施設設置			
現場技術指導者の育成			
国や道に専門家の派遣を要請			
専門的知識を有する者に事業の一部委託			

6 貴自治体で日頃から鳥獣被害対策を行ううえでの困難や、今後予想される問題にはどのようなものがありますか。主な事柄をお書き下さい。

7 被害防止計画の作成と実施への支援について、国や道に要望することがあればお書き下さい。

国に：_____

道に：_____

最後に、この調査票にご記入下さった部署名をお書き下さい。

_____ 市 町 村

ご協力ありがとうございます。ご回答内容について後日ご連絡申し上げます。ご回答内容について後日ご連絡申し上げます。その際はよろしくお願いたします。

北海道稚内市の洪水ハザードマップ作成 および避難に関する考察

太田典幸^{*1}

Proposal of Flood Hazard Map and Investigation of Evacuation Countermeasures in Wakkanai , Hokkaido

Noriyuki OHTA

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

Abnormal weather might be generated by the influence of global warming in various places. The flood damage by the heavy rain happened frequently in the local city. This paper presents the method of making the flood hazard map of Wakkanai, Hokkaido, based on the rainfall which has a statistical probability of being equaled 1 time in 30 years on average. Evacuation countermeasures of Wakkanai City were also examined by the flood analysis result. The examination is not only water depth on the hazard map but also flow velocity for safe walking resident's evacuation, and considers about the evacuation possibility.

Keywords: flood hazard map, depth, flow velocity, Wakkanai

1 はじめに

地球温暖化の影響によって台風の襲来数や集中豪雨の発生が近年増加傾向にあり、洪水被害の多発が懸念されている。特に北海道は、本州に比較し平坦な地域が多く、かつ広大な面積を有するため、洪水が発生した場合には、被害を広域に受けやすい¹⁾。

平成 15 年には台風 10 号による記録的な集中豪雨が発生し、日高・十勝地方に甚大な被害をもたらした。今後も北海道内各地で洪水被害が多発する恐れがある。しかし、道内の地方都市を貫流する中小河川は、河道計画規模が小さく、河川整備も充分ではないため、ハード対策だけでは洪水被

害を抑制することが難しくなっている。そのため、洪水ハザードマップによる住民の安全な避難行動の指針等のソフト的な減災対策の重要性が高まっている。また、洪水時の住民の避難行動には、浸水が浅くとも氾濫水の流速が速い場合には転倒等の危険性があり、避難行動を左右する要因であることも知られている。

本報告は、事例研究として北海道稚内市の市街地を貫流する二級河川クサンル川を対象とし、洪水に伴う外水氾濫を想定した洪水想定浸水区域図の作成を行うことを目的とする。また、作成した洪水想定浸水区域図に基づき、稚内市街地における浸水深のみならず、氾濫水の流速についても検討し、両者を照らし合わせた結果から、洪水発生後の避難の可能性について検討を行い、住民の安全な避難行動に供するものである。

*1 建設システム工学科

2 稚内市及び解析対象河川

図 1 に洪水氾濫解析対象であるクサンル川の位置を示す。同川が貫流する稚内市は北海道最北に位置し、面積約 760km²、年平均気温 7 度、年平均降水量 1200mm、人口約 4.1 万人の都市である。稚内市の南方には、宗谷丘陵が広がっており、緩起伏の地形を有する。地質は硬質泥岩及び砂質頁岩等から構成され²⁾、脆弱な地層であり、同丘陵は笹や低木のみ植生のため保水能力が低く、ひとたび豪雨に見舞われると、丘陵からの大規模な流出が懸念される。

対象とするクサンル川は平成 19 年度に二級河川に指定された河川で、流路延長 4.0km、流域面積は 4.9km² である。流域の土地利用は、山林が 57%、市街地が 43% であり、上流域は山林が繁茂し、中流域から下流域にかけての右岸沿いに住宅が密集しており、下流域は水産加工場、公共・商業施設などが立地している。同川は現況河道幅員が小さく、同時に湾曲部も存在するため、洪水疎通能力は 10m³/s 程度であり、表 1 に示すように洪水注意報発令の大雨時には洪水被害が頻発しており³⁾、市民の生活や都市機能へ影響を及ぼしている。

現在、クサンル川の河川整備計画⁴⁾が策定され、河口から JR 宗谷本線直上流の緑 2 号橋（次頁図 4 中の No.1 地点）までの 1.05km 区間は、50 年確率雨量に対応する洪水流量を疎通する断面に改修される。これにより狭窄部が解消され、洪水安全度は著しく改善されることになる。

稚内市民の生活・社会活動を一層安全にするこのクサンル川整備事業は、完成まで少なくとも 10 年の歳月を要する。従って、この期間に豪雨による外水氾濫が生じた場合、浸水域、浸水深の想定、それに基づく有効な避難対策を備えておくことが必要不可欠と思われる。

3 洪水流出予測

3.1 再現期間 30 年確率降雨量の設定

洪水氾濫解析を行うには、対象降雨の設定を行う必要がある。二級河川の場合、通常、基本方針の上限値である 50 年確率降雨(24 時間雨量)を採用するが、同川は現況の洪水疎通能力が小さいため、本報告では 30 年確率降雨を採用する。同降雨は、統計年 1977 年～2006 年⁵⁾の稚内市の年最大 24 時間雨量を図 2 に示す対数正規確率紙上にプロットし、観測値のトレンドを最も良く再現する Gumbel 法により $r_{30}=116\text{mm}/24\text{h}$ と決定した。

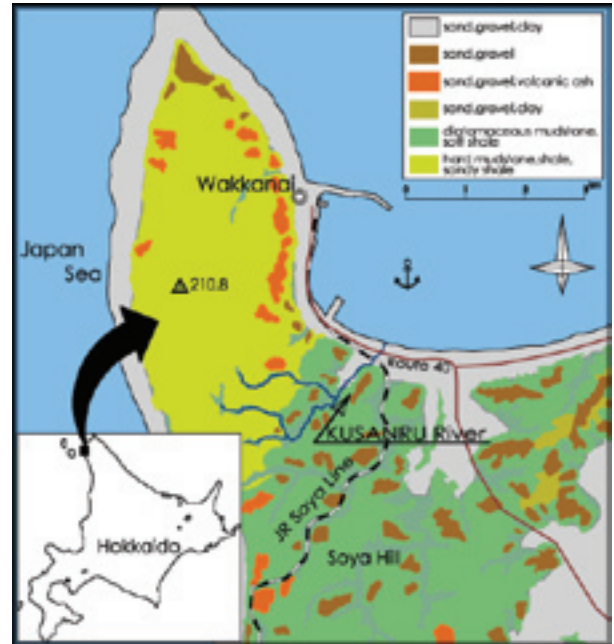


図 1 クサンル川位置

表 1 クサンル川流域の浸水被害状況³⁾

生起年月日	24時間 降水量 (mm)	浸水家屋 (戸)
1985.8.17	87	171
1994.8.12	84	23
1995.8.31	42	2
1996.8.18	97	25
2000.10.1	86	23

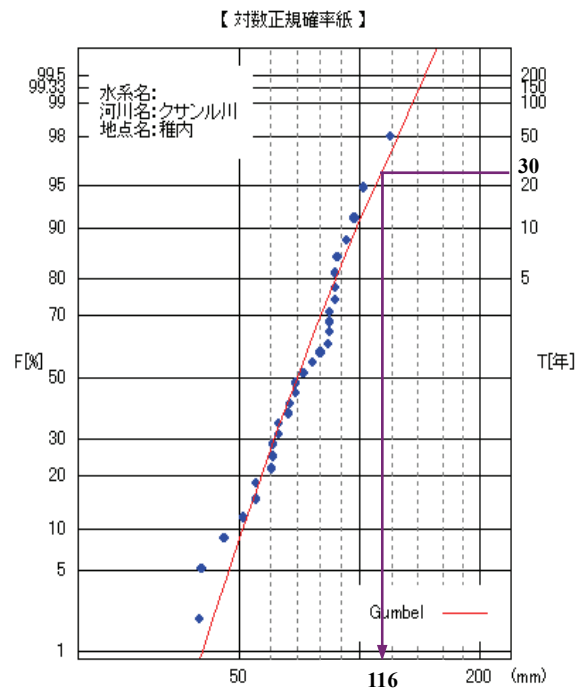


図 2 稚内市における 30 年確率降雨

3.2 洪水ハイドログラフの算定

同川流域内には水文観測所が存在しないため、近接する声間川のパラメータ⁶⁾を準用し、次式の式(1)と式(2)に示す貯留関数法から、クサンル川のハイドログラフを推定する。なお、式(1)中の降雨量 $r(t)$ には、表1に示した5事例の雨量を使用し、各々の24時間降雨量を30年確率降雨量116mmに引き伸ばして洪水流量を算出した。この結果に基づき、5事例の中で最大洪水流量 $49\text{m}^3/\text{s}$ を示す2000年10月1日の降雨パターンを採用し、推定したハイドログラフを図3に示す。

$$\frac{dS(t+T_L)}{dt} = r(t) - q(t+T_L) \dots\dots\dots (1)$$

$$S = k \cdot q^p \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S は貯留高(mm)、 q は流出高(mm/h)、 r は有効雨量(mm/h)、 t は時間(h)、 T_L は遅滞時間(h)をそれぞれ示す。

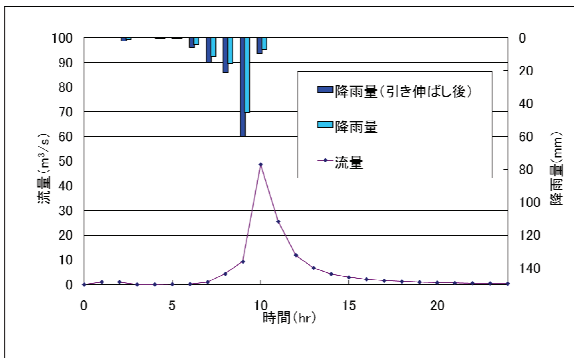


図3 2000年10月クサンル川洪水ハイドログラフ

3.3 洪水時水位の算定

図4は洪水時水位の算定地点を示す。これら地点では河道断面の諸元が既知である。図中の四角形はボックスカルバート設置位置を表示し、丸印で示す記号SPについては右の数字が河口基準点からの距離(m)を示す地点である。ボックスカルバートはJR宗谷本線より下流側に5箇所設置されており、これらが同川の狭窄部を形成している。

ボックスカルバート地点における洪水時水位は、前述した貯留関数法で算出した流量を各地点に与えた後、エスコフィエ法に基づく不等流計算により求めた。なお、ボックスカルバート部について管路路として取扱い、あらかじめ最大流下能力を算出し、流下できない流量は直上流の兩岸から越流するものとした。

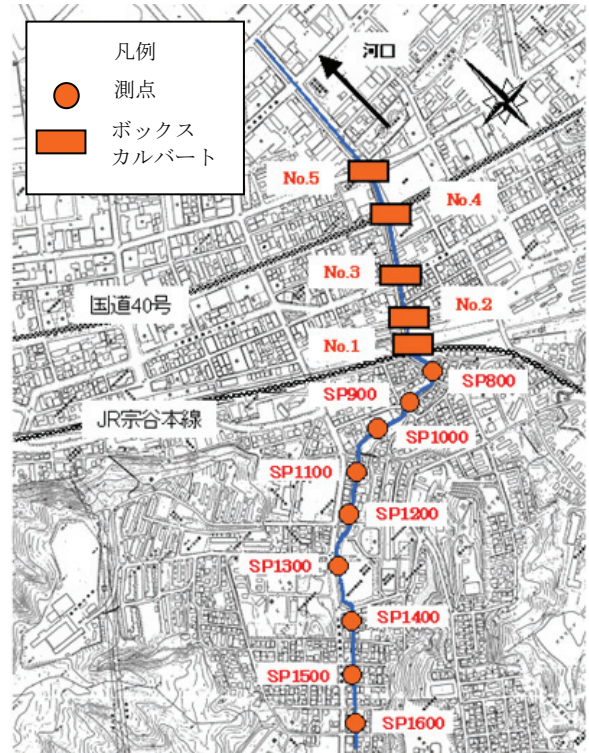


図4 洪水時水位算定地点⁷⁾

表2 最大流下能力と直上流流量

No.	最大流下能力 (m^3/s)	直上流流量 (m^3/s)
1	30	45
2	19	30
3	3	19
4	44	3
5	48	3

(1) JR宗谷本線より下流域の洪水時水位の算定

この区間にはボックスカルバートが5箇所設置されており、ボックスカルバートを通過する流れは管路路として取扱い、式(3)よりそれぞれの最大流下能力を求めた。

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} A \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Q は最大流下能力(m^3/s)、 n はManningの粗度係数、 R は径深(m)、 I は勾配、 A は流水面積(m^2)である。

表2に、計算により求めた各地点のボックスカルバートの最大流下能力と各直上流の流量を示す。No.1~3のボックスカルバートでは流量が全量流下できないことが認められる。この場合の越流水深を求める計算法をNo.1ボックスカルバートについて概説する。

直上流流量が 45m³/s、最大流下能力が 30m³/s であることから、それらの差分である 15m³/s を Q とし、No.1 ボックスカルバート部から SP800 までの距離である 50m を L と与えて、式(4)より左右岸の単位幅当たりの越流流量を求め、式(5)より越流水深 h を算出する。

$$q = Q/2L \dots\dots\dots(4)$$

$$h = (q/K)^{2/3} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 q は左右岸の単位幅当たりの越流流量 (m³/s/m)、 Q は直上流流量と最大流下能力との差 (m³/s)、 L は越流幅(m)、 K は越流係数、 h は越流水深(m)である。

本報告では他のボックスカルバートについても同様の計算を行う。上記計算による結果、No.1～3 ボックスカルバートの越流水深と氾濫時間を表 3 に示す。

表 3 越流水深と氾濫時間

No.	越流水深 (m)	両岸	氾濫時間 (min)
1	0.2		70
2	0.2		130
3	0.2		430

(2) JR 宗谷本線より上流域の洪水時水位の算定

この区間ではボックスカルバートが設置されていないため、下記に示した式(6)～式(8)に示すエスコフィエ法に基づいた開水路として取扱い不等流計算を行う。ただし、限界勾配より大きな河床勾配を有する SP800～SP900、SP1000～SP1100 は射流区間となり、他の区間は常流区間と判定された。

$$\frac{(h_2 + z_2) - (h_1 + z_1)}{F_1 - G_2} = Q^2 \dots\dots\dots(6)$$

$$F = \frac{\alpha}{2gA^2} + \frac{n^2 l}{R^{4/3} A^2} \dots\dots\dots(7)$$

$$G = \frac{\alpha}{2gA^2} - \frac{n^2 l}{R^{4/3} A^2} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 h は水深(m)、 z は河床高(m)、 Q は河川流量(m³/s)、 α はエネルギー補正係数、 n は Manning の粗度係数、 l は 2 断面間の距離(m)、 g は重力加速度(m/s²)、 A は流水断面積(m²)、 R は径深(m)である。

不等流計算の結果、越流地点は表 4 に示す SP900～SP1600 までの 8 地点から越流することが認められる。また、越流水深、氾濫時間の算出方法として、図 5 に一例として SP1600 右岸側の水位時間曲線を示す。

表 4 越流水深と氾濫時間

SP	越流水深 (m)		氾濫時間 (min)	
	右岸	左岸	右岸	左岸
900	—	0.5	—	40
1000	—	2	—	110
1100	—	0.5	—	40
1200	1.3	1.6	60	80
1300	1.6	1.6	60	60
1400	1.3	2	60	90
1500	0.5	0.5	30	30
1600	0.5	0.6	30	30

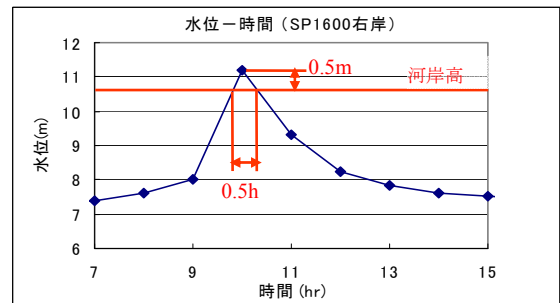


図 5 SP1600 右岸の水位－時間曲線

同図より SP1600 地点においては洪水時水面が河岸高を越えた水深、時間のそれぞれを越流水深、氾濫時間とし、他の測点についても同様に算出する。各測点の越流水深、氾濫時間を表 4 に示す。ただし、同表の記号－は越流しないことを示す。

4 洪水氾濫流数値解析

4.1 洪水氾濫流解析の基本方程式

氾濫流の数値解析⁸⁾は平面二次元流れとし、計算法には差分法を用いる。基本方程式は次頁に示す連続式(9)と運動量方程式(10)及び式(11)を用いる。

4.2 標高及び土地利用データの作成

氾濫流の数値解析を行うには、式(10)及び式(11)の右辺第 1 項及び第 2 項に含まれる標高 H 及び粗度係数 n については計算格子毎に与える必要がある。計算格子は間隔 10m の直行正方格子とし、対象領域は、過去に浸水被害のあった下流域を網羅する x 方向に 1.4km、 y 方向に 1.5km とする。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h} \right) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2}{h^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{h} \right) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2}{h^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 M 、 N は x 、 y 軸方向の流量フラックス(m^2/s)である。 $M=uh$ 、 $N=vh$ と与えられ u 、 v は x 、 y 軸方向流速成分、 g は重力加速度(m/s^2)、 $H(=h+Z)$ は水位(m)、 h は水深(m)、 Z は地盤高(m)、 n はManningの粗度係数である。

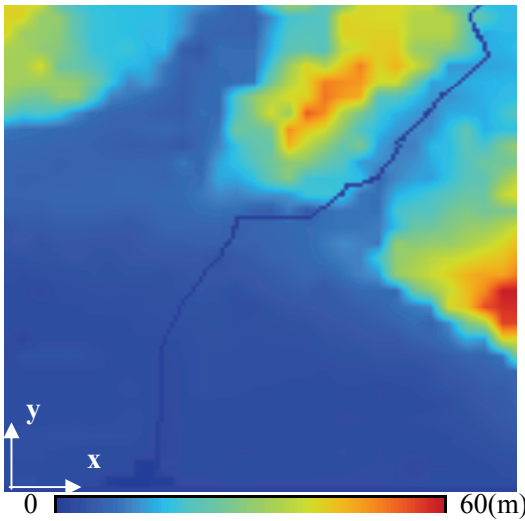


図6 解析対象領域標高図

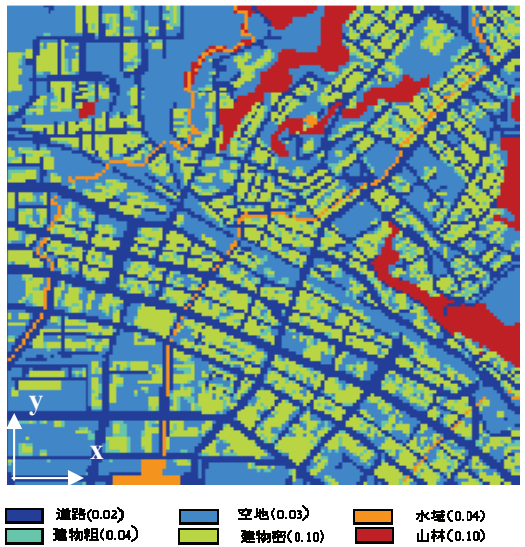


図7 解析対象領域土地利用図

氾濫流の方向を規定する標高データは、縮尺1/2500地形図上に設定した50m格子点の標高を読み取り、10m間隔格子に線形補間し作成する。氾濫流の流速を規定する土地利用状況については、一格子内で建物や道路等の占有率の高いものを代

表値として読み取り、土地利用状況に対応したManningの粗度係数を与える。図6並びに図7に稚内市現況図に基づき作成したクサンル川の標高図と土地利用図を示し凡例括弧内は与えた粗度係数である。

4.3 氾濫条件

氾濫流数値解析は、前出の図5のように、越流水深を頂点とし、河岸高によって切り取られる底辺を氾濫時間とした三角形分布に従い氾濫するものとして設定する。実現象を考慮し、氾濫はボックスカルバート断面3地点、河道断面8地点の合計11地点のそれぞれが単独に発生するものとした数値解析を行い、11地点の解析結果について検討を行い、合計面積を浸水域とした。

計算時間中の各格子点における計算浸水深のうち、最大のものをその計算格子点における浸水深 h_{max} として決定する。計算時間ステップ Δt は0.5秒とし、最大計算時間は、各越流断面において設定した越流時間の約3倍とする。

5 解析結果

5.1 洪水想定浸水区域図の作成

基礎式(9)~(11)に基づき作成した稚内市クサンル川の洪水想定浸水区域図を次頁の図8に示す。

同図より、河口付近の大黒・末広地区においては0.5~1.0mの浸水深で広域にわたり浸水すると想定され、稚内港と道央方面及び道北のオホーツク海沿岸地域とを結ぶ国道や鉄道等の主要交通網に支障が出る恐れがある。

市街地の同川上流部では、緑1丁目~3丁目にかけて最大2.0mの浸水深となることが予測される。これは、緑地区の地形特性が峡谷状であり、氾濫水が滞留する傾向にあるためと考えられる。特に、浸水深が成人男性の避難限界1.0mを超えると予測されるため、住民の避難経路、避難時期は十分に検討しなければならない。

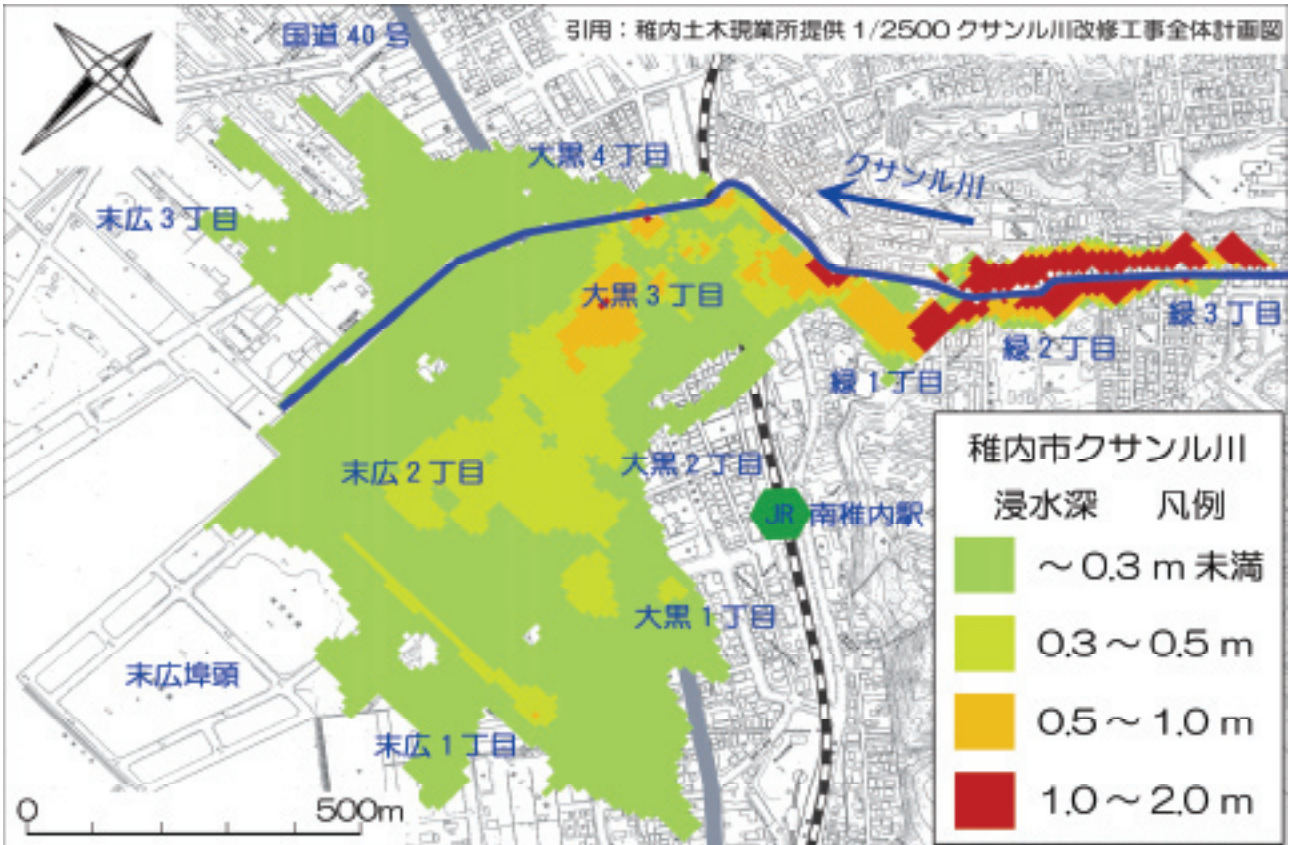


図8 稚内市クサナル川想定浸水区域図

5.2 氾濫流速の導出

本報告では、避難対策を検討するために、浸水深だけではなく、地表を流下する氾濫水の流速についても導出を行う。

氾濫水の流速は、式(12)に示す、任意の計算格子点における氾濫解析から計算時刻毎に変化するx方向、y方向の流量フラックスM、Nおよび浸水深hから、流速V(m/s)として計算する。

$$V = \sqrt{M^2 + N^2} / h \dots \dots \dots (12)$$

氾濫水の流速計算は氾濫解析と同様に、計算中に各格子点に出現した最大流速をピーク流速とする。解析対象領域における氾濫水の流速分布を図9に示す。

図9から、市街地上流部の緑地区では、図8の浸水深が2.0mの地区において溪谷状の急峻な地形効果のため、氾濫水の流速が速くなることが予測される。

大黒・末広地区では、避難に使用される道路上において流速が速くなる傾向が見られ、2.0m/sの最大流速が発生する。

浸水深が0.5m以下と予測され、危険性が少ないと思われる地区であっても、流速を考慮した場合、

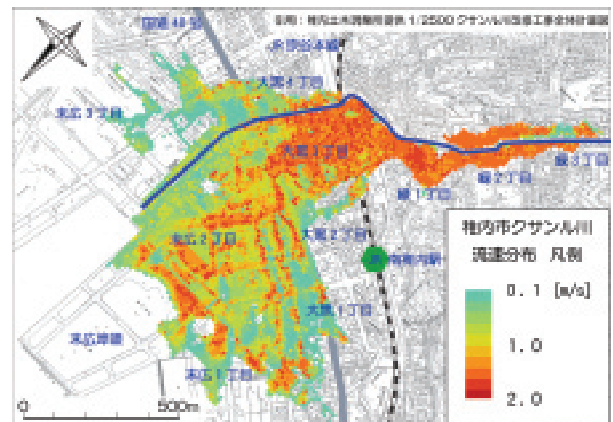


図9 稚内市クサナル川氾濫流速分布

漂流物による人的被害の発生⁹⁾、木造住宅では流体力による家屋の損傷、倒壊や流失の可能性があることから¹⁰⁾、危険と判断される場合が多くなる。このため、洪水発生前の避難が重要である。

5.3 歩行による避難行動の可能性の検討

住民の避難行動が遅れた場合には、避難行動自体が危険となる可能性が予測される。そのため、本報告では、洪水発生後における歩行避難についての検討を行う。

5.3.1 避難可能条件

河川氾濫時において、成人男性が歩行による避難を行う場合、次頁の表5に示すように、浸水深

が 0.5m 以下の時に流速が 1.5m/s 以下、浸水深が 1.0m 以下では流速 0.5m/s 以下の条件であれば歩行による避難が可能であるとされる¹¹⁾。

本報告で作成した稚内市クサンル川洪水想定浸水区域図ならびに流速分布図にこれらの条件を適用し、歩行による避難行動が可能な地点の判定を行う。

表 5 流速と水深による避難可能性の表現例¹¹⁾

浸水深 h (m)	$h \geq 1.0$	$0.5 \leq h < 1.0$	$h < 0.5$
流速 V (m/s)			
$V \geq 1.5$	不可能	不可能	困難
$0.5 \leq V < 1.5$	不可能	困難	可能
$V < 0.5$	困難	可能	可能

5.3.2 歩行避難の危険度

本報告では表 5 中の、困難及び不可能の条件を危険、他を可能であるとして前出の図 8 と図 9 の危険判定を行い、作成した歩行避難の危険箇所の分布を図 10 に示す。

同図において、赤色で示す歩行での避難に適さない危険と判断される地点が、市街地上流部から下流部にかけて広く分布している。図 8 で浸水深

が 0.5m 以下である JR 宗谷本線より下流の右岸側の大黒 4 丁目と左岸側の末広 1~2 丁目、大黒 1~3 丁目において、歩行が危険と判定される地点が多く、越流地点が多い左岸側においてはその傾向が顕著である。

本報告で行った洪水時歩行可能性判定は、成人男性を対象としており、女性や高齢者、児童が避難する場合には、避難に適さない赤色で示した地点はさらに広がることが推測できる。そのため、事前の迅速な避難行動が不可欠である。

6 洪水避難対策

これまで得られたことから、河川が氾濫してからの避難行動には数多くの危険が伴うため、氾濫が始まる前に避難を完了していることが望ましい。

本報告では、洪水が到達する前に安全で円滑な避難を行うための避難所の選定や洪水警報を発令すべき累計雨量についての考察を行う。

6.1 避難所の選定

解析対象地域に設置された避難所を図 10 に示す。同図ならびに前出の図 8 から、浸水深が 1.0~2.0m

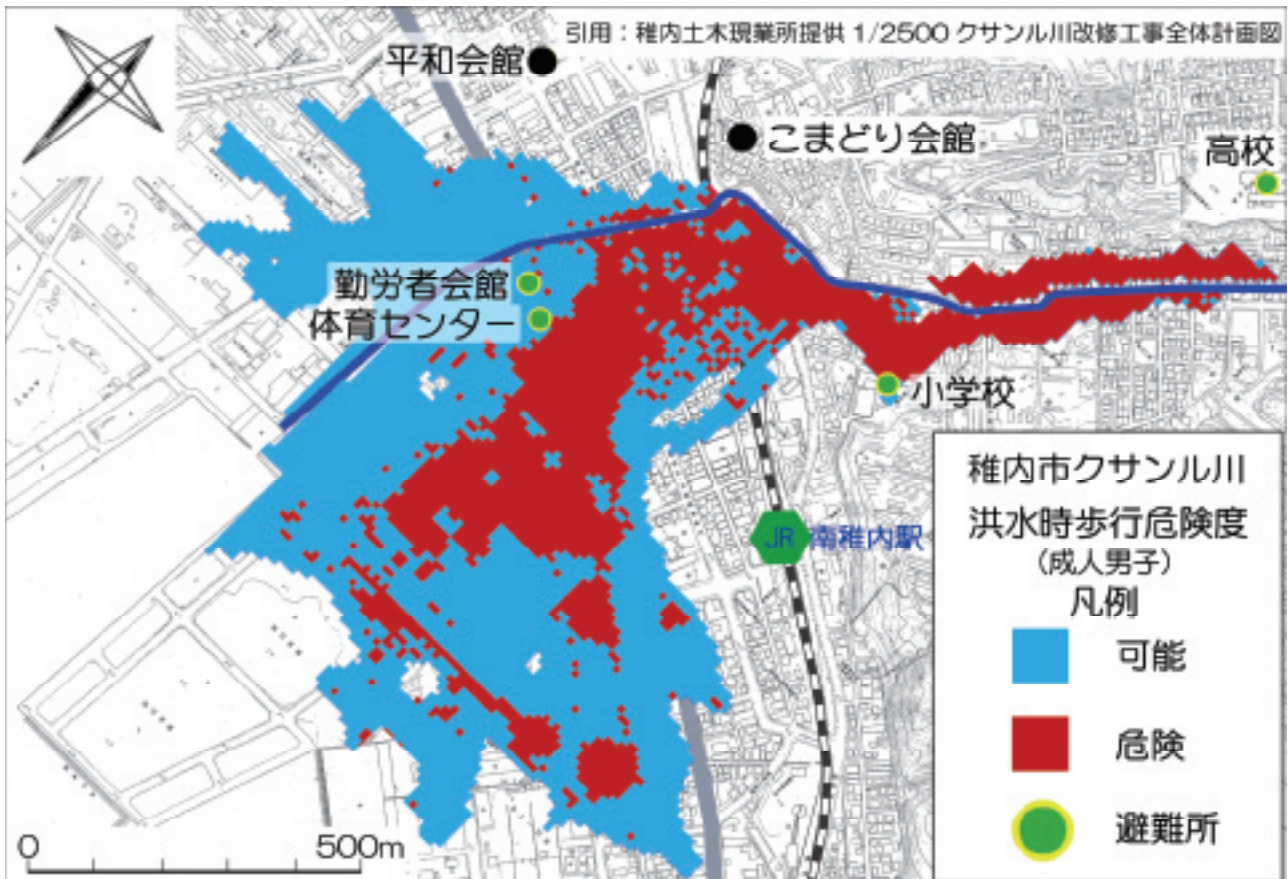


図 10 クサンル川洪水時歩行危険度

に達している緑2、3丁目の右岸側については、高等学校、緑1～3丁目の左岸側では、小学校に避難することが適切と思われる。これらの施設はいずれも浸水域に隣接する高台に位置し、コンクリート構造物で安全性の高い避難所と考えられる。

避難所の一つとなる勤労者会館は2階建以上の堅牢な建物であることから、浸水前に避難する場所として極めて有効と思われる。

下流域の右岸側では、高台に位置する平和会館、こまどり会館が避難所として適切だと思われる。ただし、平和会館、こまどり会館は稚内市の避難所として指定されていないため、予め事前に所有者との協議が必要と考えられる。

6.2 避難開始の指針となる累加雨量

6.2.1 避難対策検討地区

避難すべき雨量について検討を行う際の対象地区を下記の基準を用いて選定する。

2004年に発生した全国の水害・土砂災害の死者の約60%が65歳以上であるため¹²⁾、稚内市においても高齢者の避難対策が最重要となる。

図8に示す洪水ハザードマップにおける浸水域の住民の約26%が65歳以上であり、緑2丁目は高齢者比率が他の区域に比較して高い地区である¹³⁾。従って、緑2丁目の有効な避難対策を検討することとする。

6.2.2 避難開始の累加雨量の推定

図11に示すハイエト・ハイドログラフからクサンル川の洪水水位が河岸高に達するまでの累加雨量を算定する。同図より、水位が河岸高に達した際の流量に相当する累加雨量は112mmであり、この雨量に達する時刻に緑2丁目地点で越流が発生する。

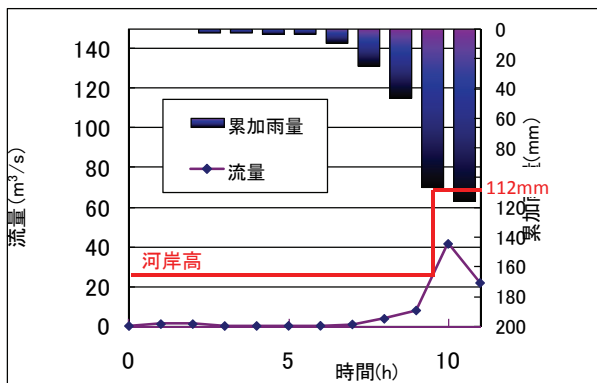


図11 緑2丁目のハイエト・ハイドログラフ

クサンル川最上流部に降ったこの雨量が緑2丁目まで流下する時間42分と、住民が避難行動を起

こすのに要する時間20分¹⁴⁾を加えると、避難警報の発令時刻は越流発生時の60分前と推定される。この時刻に相当する累加雨量は2000年10月降雨パターンから80mmを得る。なお、この累加雨量80mmは、宗谷地方の洪水注意報発令基準値70mmにほぼ一致する。

累加雨量80mmの出現頻度を求めるため、稚内地方気象台の統計資料に基づいた豪雨の出現頻度を表6に示す¹⁵⁾。累加雨量80mm以上の豪雨は、1.5年に1回の頻度で発生することが認められる。このことは、表1に示すクサンル川流域での実績洪水が1～4年間隔で起きていることとほぼ合致する。

豪雨発生時の稚内市における災害発生率¹⁶⁾を図12に示す。避難開始の指針として提案する累加雨量80mmが生じた場合、同市における災害発生率は約5%であり、この値を超過すると災害発生率が急激に増加することが認められる。

クサンル川流域では、累加雨量が80mmを超えると氾濫被害が発生すること、現行河道では洪水が1～4年間隔で起きていることから、稚内市が発令する避難指示の指針として累加雨量80mmを採択することが望ましい。このことにより、河川氾濫が発生する前に円滑な避難が行えるものと考えられる。

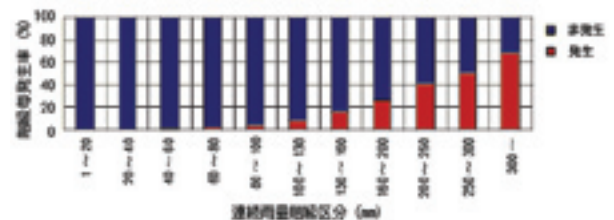


図12 雨量階級毎の災害発生率¹⁶⁾

表6 稚内市における降雨出現頻度¹⁵⁾

累加雨量階級区分	40mm以上	80mm以上	100mm以上
出現頻度	1年に3.5回	1.5年に1回	4.3年に1回

6.2.3 避難指示について

避難指示の情報広域伝達法としてサイレン、広報車がある。しかし、本報告が解析した対象地域には、サイレンを有する消防署等の施設が存在せず、避難情報を伝達する手段は広報車に頼らなければならない。

広報車の情報伝達は一般に半径80m内の地域で有効とされているが、豪雨災害時ではその情報が

聞こえない場合が多いことが指摘されている。従って、確実に情報伝達を行うには各町内会館に防災行政無線を設置し、災害時の手段として使用することが望ましい。

防災行政無線は、人命に関わる通信を確保するために整備された専用の無線通信システムであり、公衆通信網の途絶・商用電源の停電の場合にも使用可能となっている。現在、総務省がその設置と推進を地方公共団体へ働きかけている¹⁷⁾。

防災行政無線の機能を発揮させるには、避難準備及び避難のために気象庁が発表する流域雨量警報¹⁸⁾を、稚内市→各町内会→住民の順に伝える災害情報伝達ネットワークを確立する施策が必要である。

稚内市にはローカル FM ラジオ局が設置されており、警報が発令された際に稚内市からの洪水情報をこのラジオ局から放送することで、住民へ情報を伝達するネットワークの一翼として補完が可能となる。

住民が避難情報を取得した場合には、避難体制の立ち上げが円滑に運ぶよう、事前の避難訓練を通し、市防災担当者と各町内会の責任者との役割分担を明確にしておかなければならない。

6.3 避難訓練について

洪水未経験の住民は、一般に防災意識が低く、災害時に孤立する恐れがある。また、避難行動が遅れた場合、冠水で状況が一変した避難路を避難することは上述のとおり危険性が非常に高い。これを防ぐには全住民が参加する避難訓練を行うことで、自助・共助による防災意識を向上する等の取り組みが重要である。

避難訓練の実践例として、自宅から避難所までの模擬避難は勿論、小学校等の児童用プールにおいて浸水を想定した体験をし、水中での歩行の困難さを体験すること、日中だけでなく夜間の避難訓練を実施することなどが挙げられる。

このような体験に基づき住民自身ができることとできないことを明確に認識し、市と住民の協働による防災対策の策定が不可欠となる。

7 おわりに

本報告は、氾濫流解析結果については、稚内市を貫流するクサンル川流域において、30年確率降雨が発生した場合、0.3~2.0mの浸水深が生じる可能性を予測し、避難対策の基礎資料策定に不可欠な情報を得ることができた。また、同川右岸側下

流部においては避難所が無いため、新たに避難所の選定を行い、これを提案した。また、同川下流部に設置されたNo.1~No.3断面のボックスカルバートについては、流下能力が低いことが認められたため、早急な河川整備を行い、治水効果を上げる必要性が考えられた。

氾濫水の流速に関しては、クサンル川市街地上流部から河口部にかけての流速分布を予測し、最大で2.0m/sの流速が発生することを明らかにした。

浸水深予測と流速分布の両者の結果から、洪水ハザードマップで浸水深が浅く危険性が低いと住民に認識されるような地点においても、歩行ができない危険地点が多くなる結果となった。洪水発生後における歩行避難の危険分布を提案した。

避難対策としては、下流域の右岸側については避難所が存在しないため、関係協議の上、こまどり町会館や平和会館を避難所に指定するといった必要性が考えられた。

避難すべき雨量としては、累加雨量80mmに達した時、避難指示を発令し避難することを提案した。また、避難訓練の実践例として、プールに水をためるなどといった模擬体験をする必要性や、市と町内会との連携を密接にし、前述した避難訓練の実践を通し住民の防災意識を高め、より安全な避難対策につなげることが重要となってくる。

これまでのことから、本報告では、北海道稚内市における洪水ハザードマップに基づいた危険地点箇所予測、情報伝達システムならびに避難対策まで、総合的に考慮した新たな提案をすることができた。

最後に、過去幾度の洪水に見舞われた稚内市はその貴重な経験を風化させず、将来起こり得るであろう洪水に、地域全体が丸となって常日頃から備えることが必要不可欠である。

謝辞

本報告を作成するにあたり、貴重なデータを提供していただいた北海道開発局、北海道稚内土木現業所、稚内市の関係各位へ、ここに記して深謝を表します。

文献等

- 1) 北海道稚内土木現業所編、公共事業事前評価書クサンル川、(2007)
- 2) 北海道地下資源調査所、(稚内(旭川 - 第3号)、5万分の1地質図、(1954)

- 3) 北海道稚内土木現業所編、クサンル川水系河川整備計画概要版、(2007)
- 4) 稚内市編、第1回クサンル川水系河川整備計画検討委員会資料、(2007)
- 5) 気象庁ホームページ、気象統計情報.
- 6) 稚内開発建設部河川計画課編、声問川の工事実施基本計画.
- 7) 稚内市編、稚内市現況図.
- 8) 太田典幸、藤間聡、北海道室蘭市における洪水浸水域解析および避難対策、室蘭工業大学紀要、第57号(2007)、p53-54
- 9) 内閣府、大規模水害時の被害事象と活動支障の時間推移、第3回大規模水害対策に関する専門調査会、資料4、(2007)、p3.
- 10) 国土交通省北陸地方整備局、急流河川における浸水想定区域検討の手引き、(2003)、p31.
- 11) 国土交通省北陸地方整備局、急流河川における浸水想定区域図作成の手引き、(2003)、p68.
- 12) 田中淳、豪雨災害と高齢者—平成16年新潟・福島豪雨と福井豪雨を事例として—、消防防災博物館、(2006)
- 13) 総務省統計局編、平成12年度国勢調査.
- 14) 末次忠司、現場で役立つ実践的減災読本—河川の減災マニュアル—、山海堂、(2004)
- 15) 稚内土木現業所ホームページ、土砂災害を防ぐために.
- 16) 前出15).
- 17) 総務省電波利用ホームページ、防災行政無線.
- 18) 気象庁編、平成20年報道発表資料.

屋内バイクトレーニング時のトライアスロン熟練者の発汗量と体表面温度の測定

森谷 直樹^{*1}, 大平 勇一^{*2}

Measurements of Sweat Loss and Body Temperature of an Expert Triathlete at Indoor Bike Training

Naoki MORIYA and Yuichi OHIRA

(原稿受付日 平成 20 年 6 月 20 日 論文受理日 平成 20 年 11 月 7 日)

Abstract

The purpose of this study was to measure the perspiration loss and body surface temperature of an expert triathlete during indoor bike training. Exercise by the expert triathlete was carried out in a room with a room temperature of 22.2 – 22.5 °C, a relative humidity of 64–69% and WBGT of 18.5–19.5 °C. Heart rate and body surface temperature were measured intermittently throughout the experiment. Perspiration loss was calculated from the body weight measured before and after exercise. The findings in this study can be summarized as follows: 1) Perspiration loss during indoor bike training was about 0.70 kg/h. 2) Body surface temperature decreased with heart rate and exercise time. 3) The performance of the expert triathlete was high even though the AT level was exceeded.

Keywords : Expert Triathlete, Indoor training, Bike training, Perspiration loss, Body surface temperature

1. はじめに

トライアスロンはスイム, バイク, ランから構成される複合スポーツである。その様式は様々であるが, 最も普及しているトライアスロンディスタンス(スイム 1.5 km, バイク 40 km, ラン 10 km ; 通称: オリンピックディスタンス)の場合でも 2 時間以上の競技時間を要するため, 持久力を高めるためのトレーニングは 3 種目とも必須である。

*1 文化女子大学室蘭短期大学保育科

*2 応用化学科

3 種目のうち, バイクパートとランパートでは主として脚部を駆使するため, 3 種目の中で最も所要時間が長いバイクパートで体力を消耗するとランパートの成績に大きく影響する。前報⁽¹⁾で, バイクパートの所要時間とランパートの所要時間の間に正の強い相関関係が認められること, バイクパートの所要時間は総合成績と強い相関関係があることを報告した。和多野・調枝⁽²⁾はトライアスロン選手をレースタイプ別に分類し, スイム型とラン型の 2 つに分けられるもののバイク型に分類される選手はいないと報告している。和多野・調枝はさらにこれらの結果について考察し, バイクパートが

得意なトライアスリートは絶対人数の占める割合が極めて少ないためであると考察するとともに、スイム型、ラン型選手がトレーニングを積むにしたがってバイクパートを第2の得意種目としていき、発展最終型としてスイム・バイク・ランの全てを得意とするオールラウンド型になると推察している。これらのことから、バイクパートは上級者にとって総合成績に大きく影響を及ぼす種目であり、初級者にとっても第2の得意科目になる可能性が高い種目である。よって、バイクパートはトライアスロン競技の中でも特に重要なパートと言える。

オフシーズンとなる冬期は次期に向けての重要なトレーニング期間である。スイム、ラントレーニングは一年を通じて屋内運動施設で可能であるが、バイクトレーニングは一般道路等を走行するため、積雪地域の北海道においては冬期間の屋外トレーニングは事実上不可能であり、屋内でトレーニングを行わざるを得ない。しかし、バイクトレーニングの場合は屋内に十分なスペースを確保することができないため、一般的には専用ローラー台にバイクを固定してペダリングを行なう。トライアスロンのバイクパートでは、前走者のスリップストリームを利用するドラフティングは一般に禁止されており、競技者は常に正面から風を受けている。梅林ら⁽³⁾はトレッドミルを用いた運動で風速が小さくなると発汗量が増大することを報告している。屋内は無風もしくはそれに近い状況であり、固定バイクによるトレーニングでは空冷効果が見込めないため発汗量が増すと考えられる。発汗によって失われた水分を給水等で適切に補給しないとパフォーマンスが低下するため、効果的な屋内バイクトレーニングおよび回復を行うには、余剰熱を効率よく除去する必要がある。菅原ら⁽⁴⁾は自転車エルゴメーターによる運動中に前腕を冷却すると呼吸循環系の負担軽減、体温上昇と発汗量増加の抑制に効果があると報告している。また、藤島・大垣⁽⁵⁾は自転車エルゴメーターでの運動中および運動後にコールドパックによって前額部、腰背部を冷却する実験を行い、身体冷却は体温上昇、体熱量、心拍数増加を抑制することを明らかにしているが、冷却部位の選定理由が明確ではない。寄本⁽⁶⁾は自転車エルゴメーターによる運動中の非活動部位である手部・前腕部皮膚温をサーモグラフィで測定した。運動負荷強度の増加に伴い皮膚温は低下し、体内温は上昇することを報告しているが、主要部位以外の温度変化については不明である。各パートについては、発汗量や体表面

温度などの基本的データや報告が見受けられるが、それらの実験に参加した被験者の多くは学生である。また、前報⁽¹⁾を含め、トライアスロンレースで解析対象となるのは多くが市民であり、トライアスリートによる実験データ・報告はほとんど見受けられない。そのため、現状ではトライアスリートとして目指すべき目標の設定が難しい。また、トライアスロンのトレーニング方法およびケア方法を体系的に確立するためには、トライアスリートのパフォーマンスに関する基本的データ蓄積が必須である。

本報では、トライアスロンで重要なパートであるバイクパートのトレーニング方法を確立するために必要な基本データの取得を目的として、無風状態の屋内に設置した固定バイクをトライアスロン熟練者がペダリングを行った際の発汗量測定とサーモグラフィによる全身の体表面温度の測定を行った。さらに得られた結果について考察を加えた。トライアスロン熟練者によるバイクトレーニング例を示すことで、目指すべき目標設定用の資料を提示することが可能となる。

2. 実験方法

実験に用いた室は気積 150 m³ 以上で、空調機器を使わず全ての窓を閉じ、日没後に実施した。この室内には被験者と測定者の2名以外はいない。実験に用いた固定バイクとしてロードレーサー型の自転車(TCR-COMPOSITE, GIANT 製)とローラー台(HYPERMAG ALU, MINOURA 製)を Fig. 1 に示す。補給水は常温の水道水を用い、1000 ml ボトルに入れた。心拍数および消費エネルギーを測定



Fig.1 実験に用いた自転車とローラー

するため心拍計(S725, POLAR 製)を用いた。気温および湿度は温湿度データロガー(RS-12, エスピーックミック製), 黒球温度は黒球温度計(吉野計測製), 風速および照度は多機能環境測定器(AHLT-100, CUSTOM 製)を用いて測定した。体重および補給用水道水の質量は電子天秤(HW-100KGL, 最小目盛 0.01 kg, エー・アンド・ディ製)を用いて測定した。体表面温度測定にはサーモビジョン(CPA-2200, 温度分解能 0.1 °C, チノー製)を用いた。

被験者 N.M.(29 歳(実験当時), 男性, 180.0cm, 70.2kg, 体脂肪率 8.2%)は, 日本選手権に出場した経験(3 回出場し, うち 2 回完走)を持つトライアスロン熟練者である。被験者の予測最大心拍数は次式^{*)}から計算した。

$$(\text{予測最大心拍数}) = 220 - (\text{年齢})$$

心肺機能の向上を目的とした心拍数は上記の 70~85%とされている⁽⁷⁾。このことから, AT レベルを次式で計算すると, 被験者の AT レベルは 162 となる。

$$(\text{AT レベル}) = (0.75)(\text{予測最大心拍数})$$

実験では発汗量および体表面温度の測定をより正確に行うため, 短パン, シューズ, 心拍計用ベルトのみの着用とした。体重および補給水質量を測定した後, 直ちに乗車し, ここを時刻 0 とした。自転車で 20 分間安静にした後, 心拍数 120 程度を目標にして毎分約 100 回転でのペダリング 1 を 30 分間行った。ペダリング 1 の後, 20 分間バイク上で安静にし, 下車した後に体重と補給水質量を測定した。再びバイクに乗車し, 5 分間安静にした後, ペダリング 2 を開始した。前半 5 分間をペダリングにより心拍数を AT レベルまで到達させること, 後半 5 分間はさらに心拍数を上げることを目標とした。実験中は汗のふき取りを行わなかった。また, 被験者に対して水分摂取に注意するよう伝えるにとどめ, 補給水量, 補給タイミングは任意とした。定期的に被験者の右前方(Right), 後方(Back), 左前方(Left)からサーモビジョンによる撮影を行うとともに, 気温等の測定を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 実験環境と心拍数

Table 1 に実験開始前および実験終了後の屋内環境を示す。室内は蛍光灯により照らされているため, 実験前後で大きく変化しなかった。室を閉めるとともに意図的な送風を行っていないため,

Table 1 屋内実験環境

測定項目	実験開始前	実験終了後
照度 ^{*1}	500-1000 lx	500-1000 lx
風速 ^{*1}	0.0 m/s	0.0 m/s
黒球温度 ^{*2}	22.2 °C	22.5 °C
乾球温度 ^{*2}	22.0 °C	22.4 °C
湿度 ^{*2}	64%	69%
湿球温度 ^{*3}	17.5 °C	18.5 °C
WBGT ^{*3}	18.9 °C	19.5 °C
不快指数 ^{*3}	68.9	69.9

*1 バイク周辺で測定

*2 バイク側方 1.5 m, 高さ 1.2 m の位置で測定

*3 計算値

Table 2 屋内実験(ペダリング 1)での測定データ

ペダリング時間	30 分	(時刻 20-50 分)
消費エネルギー	245 kcal	(時刻 20-50 分)
実験前体重	70.46 kg	(時刻 0 分)
実験後体重	70.24 kg	(時刻 70 分)
実験前補給水質量	0.77 kg	(時刻 0 分)
実験後補給水質量	0.64 kg	(時刻 70 分)

風速は 0.0m/s のままであった。黒球温度, 乾球温度, 湿度については若干変化したが, ほぼ一定とみなした。乾球温度と湿度から計算した湿球温度および不快指数についてもほぼ一定とみなすことができる。乾球温度, 湿球温度, 黒球温度から計算した WBGT は運動を行う際の温度の指標である。本実験における WBGT は 19 °C 程度であり, 熱中症予防のための指針⁽⁸⁾によれば, ほぼ安全な条件である。

Fig. 2 に心拍数の変化を示す。図中一点鎖線は AT レベルである。安静時の心拍数は 70 前後であるが, ペダリング 1 を開始すると心拍数は上昇し, 約 2 分で 130 程度となった。その後, 徐々に心拍数は低下し, ペダリング 1 終了直前では 120 程度となった。ペダリング 1 の後の安静状態では, 約 5 分で心拍数が 70 程度まで低下した。目視確認ではあるが, この間に発汗はほぼ停止した。ペダリング 2 を開始すると 1 分後に心拍数が 120 を超えた。その後徐々に心拍数は上昇し, 5 分後には被験者の AT レベル(HR=162)に達した。10 分後には被験者の最大心拍数に近い心拍数 180 となった。

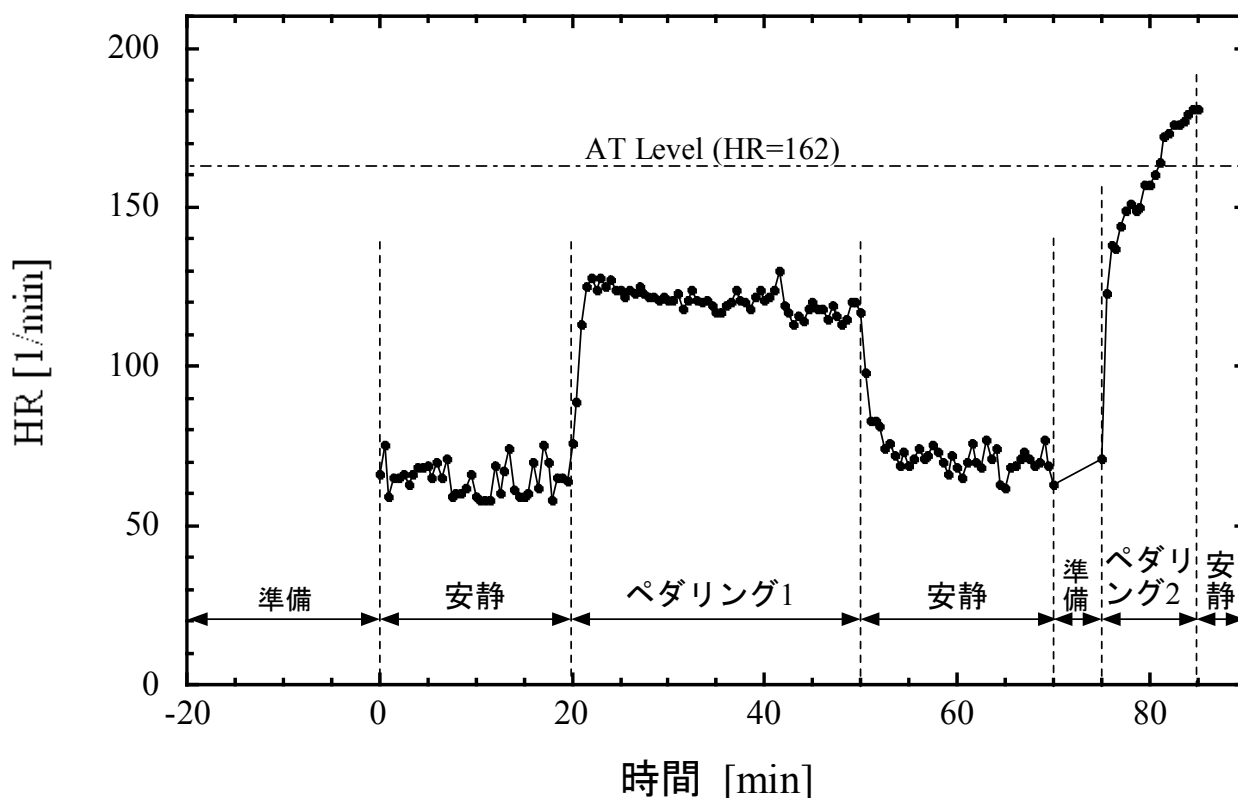


Fig.2 実験中の心拍数変化

3.2 発汗量測定

Table 2 にペダリング 1 中の消費エネルギー, 体重, 補給容器内水質量の変化を示す。ペダリング中の消費エネルギーは 245 kcal/30 分(1025 kJ/30 分=570 W) であった。実験前後で体重は 70.46 kg から 70.24 kg となり, 0.22 kg 減少した。さらに, 補給容器内水質量が 0.77 kg から 0.64 kg となり, 0.13 kg 減少していた。ペダリング運動による体重減少には発汗による減少と, 体内の糖類代謝等による減少があるが, 糖類等の代謝は極微量であり, 実質発汗による体重減少とみなすことができる。ペダリング 1 の実験前後の体重差(0.22 kg)と補給水の質量差(0.13 kg)の合計を求めると, 発汗量が 0.35 kg であることがわかった。

22 °Cでの水の蒸発エンタルピーは 2448 kJ/kg である。ペダリングによって生じたエネルギーを水の蒸発のみで全て除去する場合, 必要な水の量は約 0.42 kg と計算され, 発汗量とほぼ一致する。本実験において, 発汗で失われた水分量を 1 時間あたりに換算すると 0.70 kg となる。藤島・大垣⁽⁵⁾ は自転車エルゴメーターによる運動を 24±0.5 °Cの屋内で 60 分間行い, 心拍数 150 前後での体表面積あたりの発汗量を報告している。この報告による発汗量の測定

結果を本実験の結果と比較できるように計算すると約 0.58±0.17 kg/h となる。藤島・大垣の実験とは心拍数, 気温がやや異なるものの, 発汗量は本実験結果と概ね一致する。しかし, 本実験における補給水量と発汗量の比である水分摂取率は 37 % (=0.13 kg/0.35 kg) である。運動は異なるが, RMR が同程度であるアメリカンフットボール練習時の水分摂取率は 60 %程度と報告されている⁽⁹⁾。アメリカンフットボールの練習は屋外で行ったものであるため, 水分補給には十分注意していたと予想されるが, 水分摂取率は 100 %ではない。また, 窪田ら⁽¹⁰⁾ が無効発汗を考慮した発汗量を検討しているように, 無効発汗が存在するため発汗による除熱効率は 100 %ではない。屋内バイクトレーニングを行う場合は屋外トレーニング以上に水分摂取に注意が必要があることが示唆された。

3.3 体表面温度の測定

ペダリング 1 によって生じたエネルギーが体外に放散しないと仮定すると, 身体の比熱 0.83 kcal/(kg・°C)より, 被験者の体温は約 4 °C上昇すると計算される。実験中に撮影したサーモビジョンの画

像を Fig. 3(a) と Fig. 3(b) に示す。温度は 20 °C(青) から 36 °C(白) である。体表面温度は撮影 3 方向とも全て 27 °C 以上であり、被験者は黄色、赤色、白色で示されている。前述の計算のような体温上昇があれば体温は 40 °C となるが、サーモビジョンの映像から求めた体表面温度は最高で 36 °C である。これは、運動中の自然対流伝熱や汗の蒸発によって熱が除去され、体温上昇が抑えられたためである。なお、気温は 22 °C 程度であり、壁などの背景はほとんどが 25 °C 以下で青色を中心とした色になっている。

安静状態である時刻 0 分と時刻 20 分を比べると、高温を示す白色が頭部、背中、脛で広がっている。また、手首から指先にかけて、黄色から赤色に変化している一方で、前腕部は白色から赤色に変化している。その他の部位については撮影 3 方向とも大きな変化は見られない。このことから、安静にしている状態においても頭部、背中、手首から指先付近の温度が上昇したことがわかった。次にペダリング 1 中の時刻 20 分、40 分、50 分の画像を比べると、特に顕著な温度変化を示しているのは腰部、大腿前部、脛である。時間の経過とともに腰部の色は赤色から黄色に、脛の色は白色から赤色に変化した。これらの変化はペダリングによる温度低下であると思われる。一方、大腿前部は赤色から白色に変化した。腰部および脛の体表面温度の低下については発汗による冷却効果であると考えられる。大腿前部についても発汗による冷却効果が考えられるが、ペダリング運動によってそれ以上の熱が発生していると予想される。運動終了直後の時刻 50 分と安静にしている時刻 70 分の画像を比較すると、体表面は赤色を中心とする色に戻った。これは体表面温度が上昇したことを示している。特に顕著な部位は頸部と大腿前部の変化である。大腿前部については運動終了後も熱が発生していることを示している。ペダリング 2 を開始すると体表面温度は急激に減少し、実験開始 83 分後、85 分後では体表面温度がほぼ黄色で表される温度(26–27°C)となった。

定量的な評価を行うため、部位ごとに表面温度を求めた。全身を頭部、胸部、腕部(右上腕部、左上腕部)、手首、腹部、脚部(右大腿前部、左大腿前部)、背中の 7 部位 9 ヶ所に大別した。Figs. 4.5 に身体の各部位の温度変化を示す。時刻 0 での脱衣後、20 分間の安静で温度上昇が認められた部位は頭部、手首、背中であった。脱衣により体表面が直接外気に触れる状態になるため、体表面からの放熱量が増える。体温を一定にしようと発熱量が増加したためであると思われる。一方で、胸部、腕部、腹部、脚部はほぼ一定のままであった。これらは、体の中で

も皮下脂肪が多めの部位であり、発熱量の増加が体表面温度の上昇に反映されづらかったものと思われる。ペダリングを開始すると、体表面温度は指数関数的に低下する傾向が見られた。これは発汗により体表面の熱が奪われていたものと思われる。運動開始から 20 分間で頭部、腕部、背部、腹部、脚部は約 2 °C の温度低下が見られた。しかし、手首については運動開始 10 分で約 1.5 °C 低下するものの、その後温度は上昇し、運動前よりも高くなった。ペダリング開始から 20 分以降は体表面温度が若干高くなった。この時間帯では汗が滴となって床に落ちる現象が確認されており、体表面温度の上昇は無効発汗量の増加が原因と考えられる。手首についてはさらに温度が上がっている。この傾向は寄本⁽⁶⁾ の報告と類似しており、運動によって血流が増加したためと考えられる。30 分のペダリング 1 終了後、安静にしていると体表面温度は上昇したが、ペダリング前の温度までに戻らなかった。しかし、脚部については運動終了後 5 分で体表面温度が 2 °C 上昇し、ペダリング前よりも 1 °C 程度高くなった。

実験開始後 75–85 分のペダリング 2 では、約 5 分で頭部および腹部はペダリング 1 と同じレベルの体表面温度まで低下した。ペダリング 2 における体表面温度の低下速度はペダリング 1 の場合と比べておよそ 4 倍である。その他の部位については、ペダリング 1 に比べて体表面温度の低下速度が速い上、ペダリング 1 よりも対表面温度がさらに 1°C 程度低くなった。特に背部の体表面温度は顕著に低下しており、これは心拍数を上げたことによって発汗量が増え、汗による体表面の冷却が行われたものと考えられる。寄本⁽⁶⁾ は自転車エルゴメーターによる運動で、心拍数 100 程度の運動の場合、手部・前腕部皮膚温は安静時(HR=80)に比べてほとんど同じか若干低下するのに対して、心拍数 130–140 の運動中に手部・前腕部皮膚温が大幅に低下(1°C 程度)し、それ以上心拍数を上げてても手部・前腕部皮膚温は変化しないことを実験的に示している。本実験も同様の傾向を示しており、被験者の AT レベル(HR=162) を境に発汗速度が変化したものと思われる。また、時刻 85–90 分の安静で体表面温度の急激な回復が見られた。これは発熱量に応じて汗の蒸発速度が大きくなったためであると考えられる。

3.4 体表面温度と平均皮膚温の関係

全身の平均皮膚温を次式で表される 4 点法⁽¹¹⁾ で計算した。

(全身の平均皮膚温)

$$=0.3(\text{胸部温}+\text{上腕部温})+0.2(\text{大腿前部温}+\text{下腿部温})$$

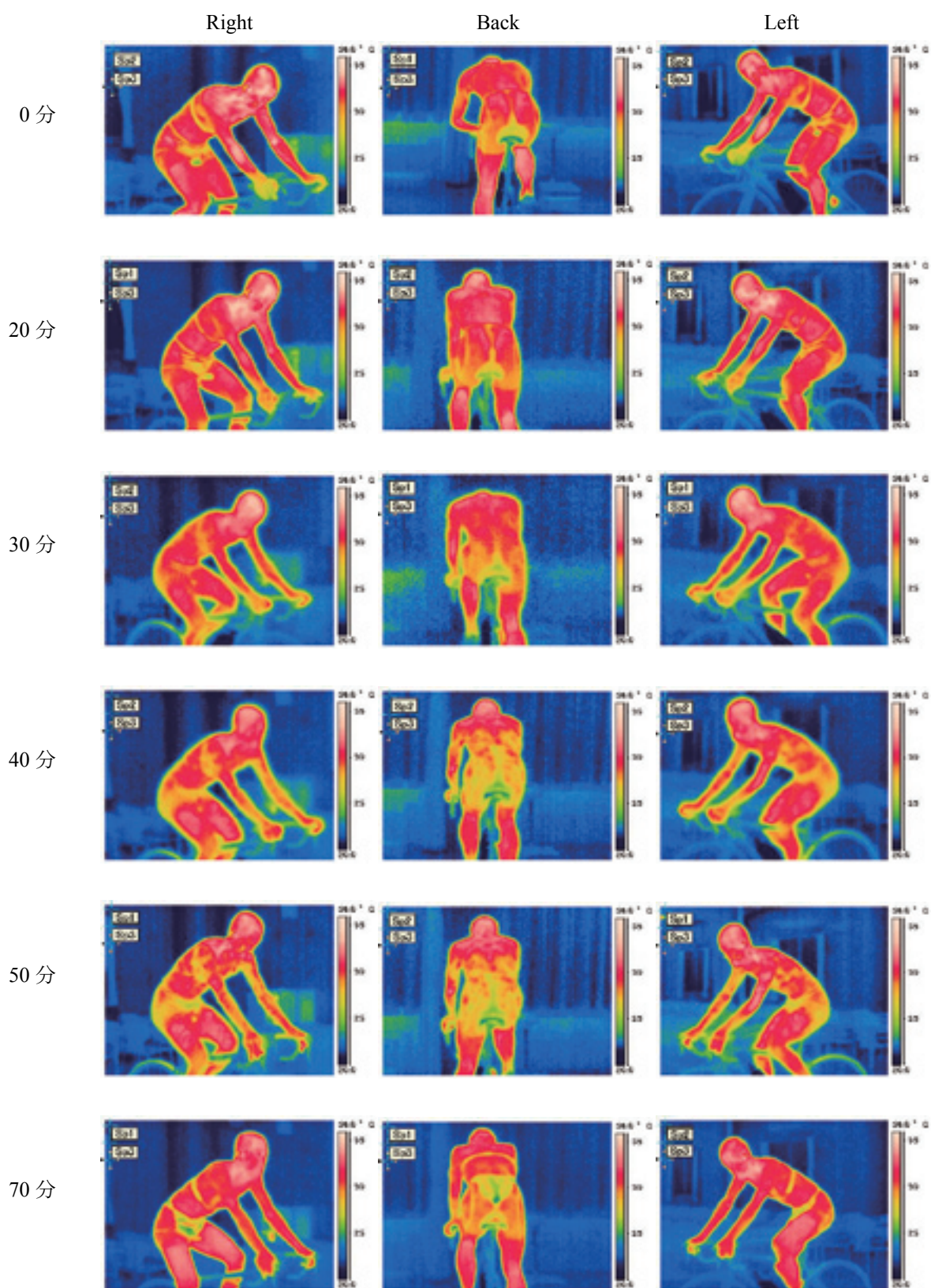


Fig.3(a) サーモグラフによる体表面温度測定画面(ペダリング 1)

安静 : 0-20分
ペダリング : 20-50分
安静 : 50-70分

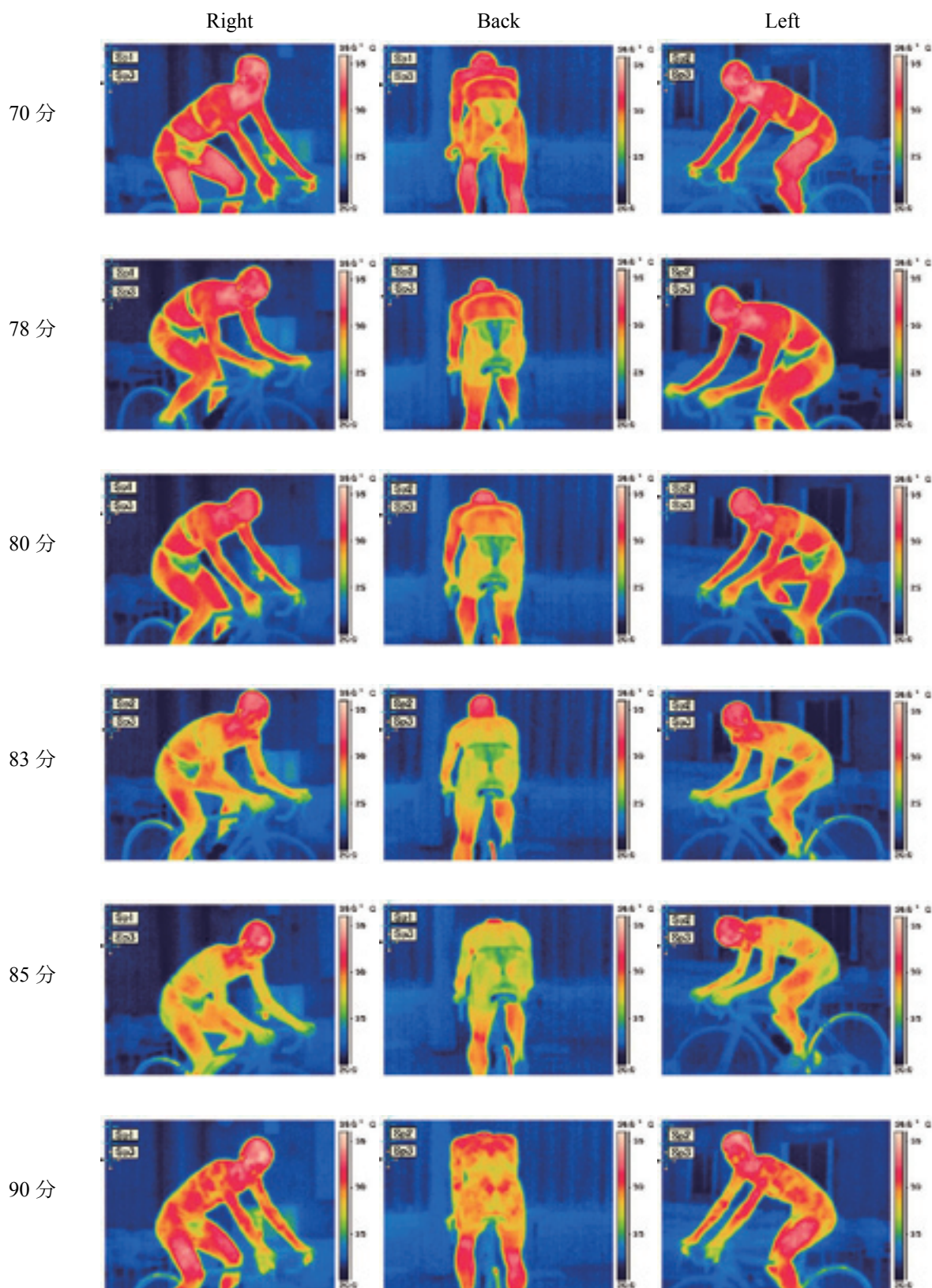


Fig.3(b) サーモグラフによる体表面温度測定画面(ペダリング 2)

安静・準備 : 70-75分

ペダリング : 75-85分

安静 : 85-90分

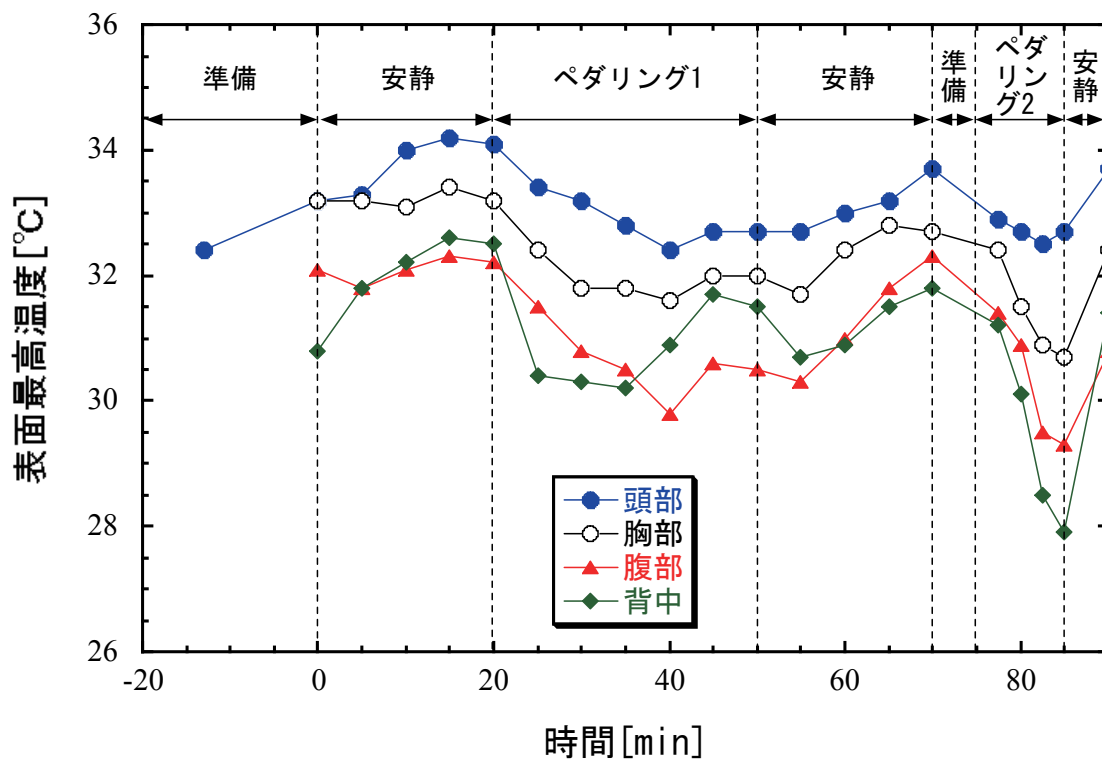


Fig.4 体表面温度(体幹部など)の経時変化

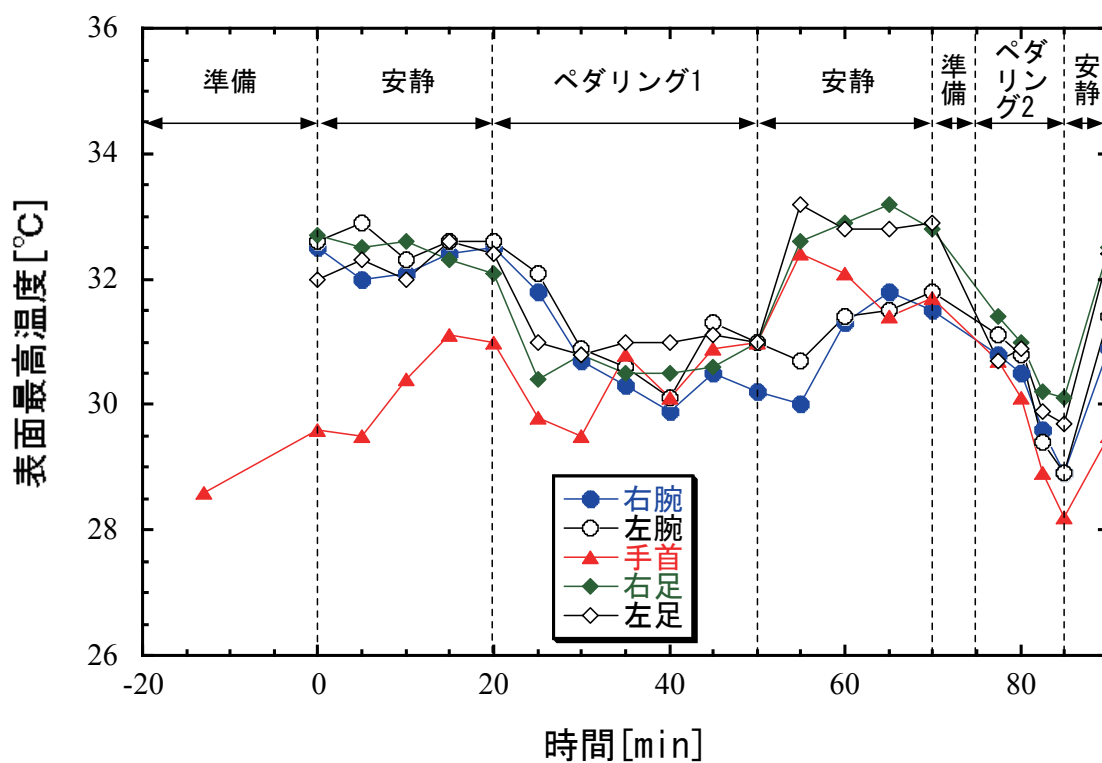


Fig.5 体表面温度(末梢部など)の経時変化

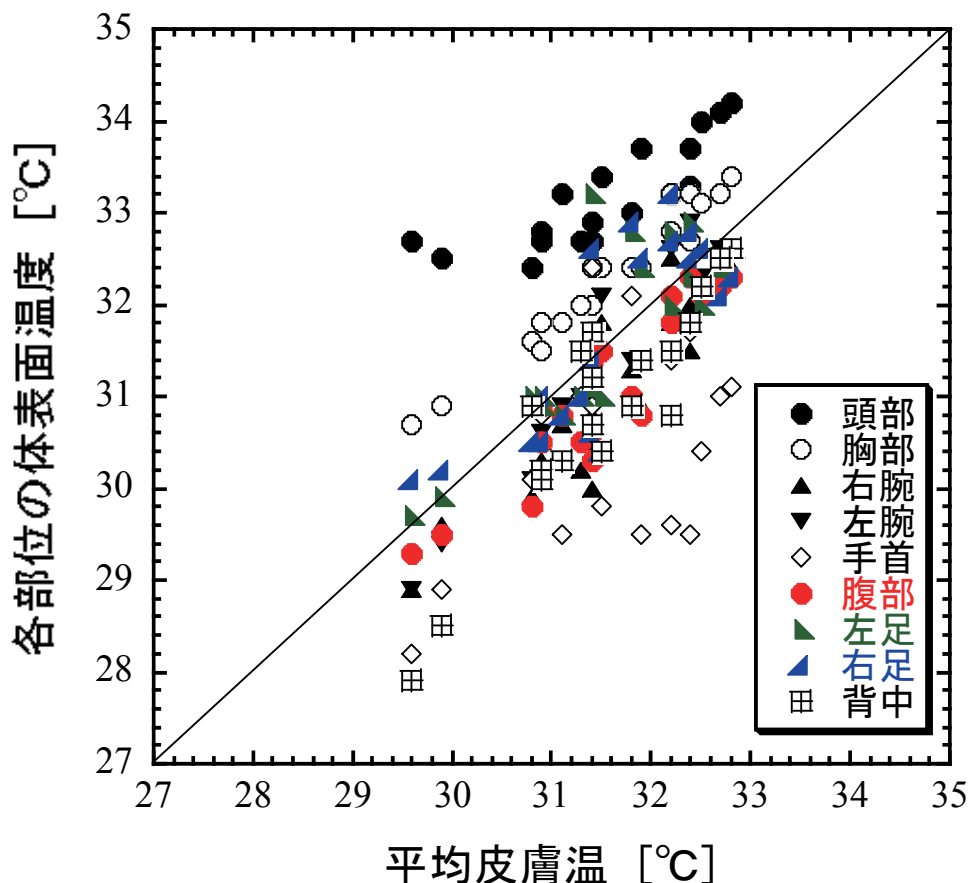


Fig.6 平均皮膚温と身体各部位の体表面温度

なお、この計算を行うにあたり、サーモビジョンの画像から下腿部温度を再測定した。平均皮膚温と各部位の体表面温度の関係を Fig. 6 に示す。腹部、手首、背中は全身の平均皮膚温よりも低い傾向にある。しかし、頭部と胸部の体表面温度が全身の平均皮膚温よりも高く、脚部は全身の平均皮膚温と同等以上である。また、ペダリングの主運動を行った大腿前部は運動後の体表面温度の上昇が著しい。ペダリング中は脚部が上下に移動しており相対的に風を受けている状況であるが、ペダリング後の安静時は無風状態となる。梅林ら⁽³⁾はトレッドミル運動中に全身に風を当てることで体温上昇と発汗量増加を抑制できると報告している。本実験では安静にしたことにより放熱速度が小さくなり、大腿前部の体表面温度が上昇したものと推測される。

4. 結び

屋内に設置した固定バイクを用いてトライアスロン熟練者によるペダリング実験を行い、発汗量測定

とサーモビジョンによる体表面温度の測定を行った。その結果を解析し、次の知見が得られた。

- (1) 屋内トレーニングの場合でも 1 時間あたり 0.70 kg の発汗がある。水分摂取率はトライアスロン熟練者であっても 37%程度と低い。屋内運動中は任意ではなく、意図的に水分を摂取する必要がある。
- (2) ペダリングを行うと発汗によって体表面温度は低下し、心拍数が高いほど体表面温度が低下する。
- (3) ペダリング 2 の実験によって、トライアスロン熟練者は少なくとも 5 分間にわたって AT レベルを超える心拍数でペダリングを行える能力を持っていることが示された。
- (4) ペダリング中は、頭部、大腿前部のほか、胸部や腕部の表面温度が高くなりやすい。ペダリング後は、大腿前部のほか、手首の表面温度が高くなりやすい。

今回得られた知見をもとに、冬期間に行う屋内バイクトレーニングプログラムを作成し、トライアスロンを通じた QOL 向上に貢献してゆく所存である。

引用文献

- 1) 森谷直樹: 市民トライアスロン大会のレース分析—区間記録から見るレース展開—, 文化女子大学室蘭短期大学研究紀要, **31**, (2008), p5-15
- 2) 和多野大, 調枝孝治: トライアスロン選手のレースタイプと心理的競技能力の関係, 大阪体育大学紀要, **34**, (2003), p55-64
- 3) 梅林薫, 木内真弘, 辻田純三, 掘清記: トレッドミル運動における風の効果に関する生理学的研究, 大阪体育大学紀要, **26**, (1995), p21-25
- 4) 菅原正志, 田井村明博, 今中国泰: 運動時の前腕部冷却が体温調節反応に及ぼす影響, デサントスポーツ科学, **13**, (1992), p185-192
- 5) 藤島和孝, 大柿哲朗: 運動時の水分摂取および身体冷却が体温調節反応に及ぼす影響, 健康科学, **18**, (1996), p45-50
- 6) 寄本明: サーモグラフィからみた脚運動時の末梢皮膚温度変動, 滋賀県立短期大学学術雑誌, **26**, (1984), p59-64
- 7) 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩: 基礎運動学第6版, 医歯薬出版株式会社, (2003), p325-326
- 8) 財団法人日本体育協会: スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック, (2002), p12-16
- 9) 財団法人日本体育協会: 夏のトレーニング・ガイドブック, (2002), p29
- 10) 窪田英樹, 山越健弘, 鎌田紀彦, 朝比奈亮, 浜田博之, 若松伸司: 暑熱環境における無効発汗を考慮した人体平均皮膚表面温度の予測, 日本建築学会環境系論文集, **575**, (2004), p83-89
- 11) Ramanathan, N. L. : A new weighting system for mean surface temperature of the human body, *J. Appl. Physiol.*, **19**, (1964), p531-533

図 書 館 委 員

委員長	附 属 図 書 館 長	教 授	丸 山 博
委 員	建 設 シ ス テ ム 工 学 科	准 教 授	後 藤 芳 彦
〃	機 械 シ ス テ ム 工 学 科	教 授	臺丸谷 政 志
〃	情 報 工 学 科	准 教 授	魚 住 超
〃	電 気 電 子 工 学 科	〃	加 野 裕 (紀要編纂部会委員)
〃	材 料 物 性 工 学 科	教 授	中 川 一 夫 (紀要編纂部会長)
〃	応 用 化 学 科	准 教 授	日 比 野 政 裕
〃	共 通 講 座	〃	前 田 潤 (紀要編纂部会委員)
〃	情報メディア教育センター	〃	石 田 純 一
〃	図 書 ・ 学 術 情 報 室	事 務 室 長	藤 田 隆 (紀要編纂部会委員)

平成21年 2月20日 印 刷 (非売品)
平成21年 2月20日 発 行

編 集 室 蘭 工 業 大 学
発 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) 4 7 - 8 3 0 8

表紙デザイン 目 黒 泰 道

