



ATR-GG推進剤供給系の検討  
(室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター一年  
次報告書 2014)

メタデータ	言語: ja 出版者: 室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター 公開日: 2016-12-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 林, 祐一郎, 佐藤, 大樹, 今井, 良二, 中田, 大将, 東野, 和幸 メールアドレス: 所属: 室蘭工業大学, 室蘭工業大学
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00009122">http://hdl.handle.net/10258/00009122</a>

## ATR-GG推進剤供給系の検討

○林 祐一郎（航空宇宙総合工学コース 博士前期1年）  
佐藤 大樹（航空宇宙システム工学コース 学部4年）  
今井 良二（航空宇宙システム工学ユニット 教授）  
中田 大将（航空宇宙機システム研究センター 助教）  
東野 和幸（航空宇宙機システム研究センター 教授）

### 1. はじめに

室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター(APReC)では、小型無人超音速実験機オオワシIIの研究・開発を通じて次世代クリーン宇宙輸送システムの革新的基盤技術の確立を目指している。なお、本機にはバイオエタノール(BE)/液体酸素(LOX)を組み合わせた推進システム使用が検討されている。このBEは表1-1で分かるようにスペースシャトルでも使用された液体水素(LH<sub>2</sub>)と比べて密度比推力が優れている。そのため、燃料タンクを小型にでき、機体重量の削減が期待できる。また、燃料自体のコストが安く、今後のさらなる値段の低下も期待出来る。単位質量あたりの炭素含有量がケロシンと比較して少ないので、煤の発生量が少なく整備コストの低減に寄与することが出来ると考えられる。更に、LH<sub>2</sub>は極低温液体であるため取り扱いが難しい。一方、BEは常温液体なので機器への負担も小さく部品コストも抑えることが出来る。

表 1-1 推進剤の製造コストの比較

	比推力 (sec)	密度比推力 $\times 10^3(\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^3)$	整備性	コスト (円/kg)	安全性
LH <sub>2</sub>	455	145	○	4000	△
BE	328	328	○	215	○
ケロシン	368	368	△	450	○
ヒドラジン	397	397	△	8800	△

また、本機体は1号機と比較して機体が大型化しているためタンクも大型化している。その結果、タンクを含む推進剤供給システムの中ではタンク重量の増大とBEへの耐腐食性、タンク内の液体揺動、ガス巻き込みが問題になると考えている。そのため、これらの問題を解決した推進剤供給システムが求められている。その解決策として、タンク材料には炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とニッケルメッキを組み合わせたものを採用する。さらには、液体揺動にはタンク内部に板など挿入することを検討している。また、ガス巻き込みに関しては配管形状を工夫することを検討している。

そして、今回はこの推進剤供給システムの研究の中でも、タンクの構造設計とスロッシングのCFD解析、ガス巻き込みに関する実験結果の報告を行う。

## 2. タンク構造について

### 2-1. タンク設計指針

本項では、CFRPを使用したタンクに構造設計・解析の結果を報告する。まず、タンク構造設計の設計指針は以下の表 2-1 に記す。

表 2-1 タンク設計指針

許容ひずみ	0.4%
タンク内圧力	2.6MPa
安全率	2.0
タンク直径	203mm
タンク全長	700mm
口金開口直径	23mm

更に、タンクの設計に使用した材料の物性値を表 2-2 に記す[1]。

表 2-2 材料物性値

炭素繊維方向ヤング率	$1.67 \times 10^{11} \text{Pa}$
炭素繊維直交方向ヤング率	$1.28 \times 10^{10} \text{Pa}$
ポアソン比	0.2646
せん断応力	$4.62 \times 10^9 \text{Pa}$
破断ひずみ	1.0%

また、このタンクに使用する炭素繊維方向を決め、表 2-1 と表 2-2 の数値をもとに肉厚の計算を行なった[2]。その計算結果を表 2-3 に記す。

表 2-3 繊維方向と肉厚

	繊維方向	肉厚
円筒部	$[\pm 45^\circ / 0^\circ]$	3.0mm
鏡板部	$[\pm 45^\circ]$	1.0mm

### 2-2. タンク構造解析の結果

上記の条件のもとに構造解析ソフト NASTRAN を用いて行った解析の結果として、図 2-1 に応力分布、図 2-2 にひずみ分布を記す。解析対象は、半割モデルとする。

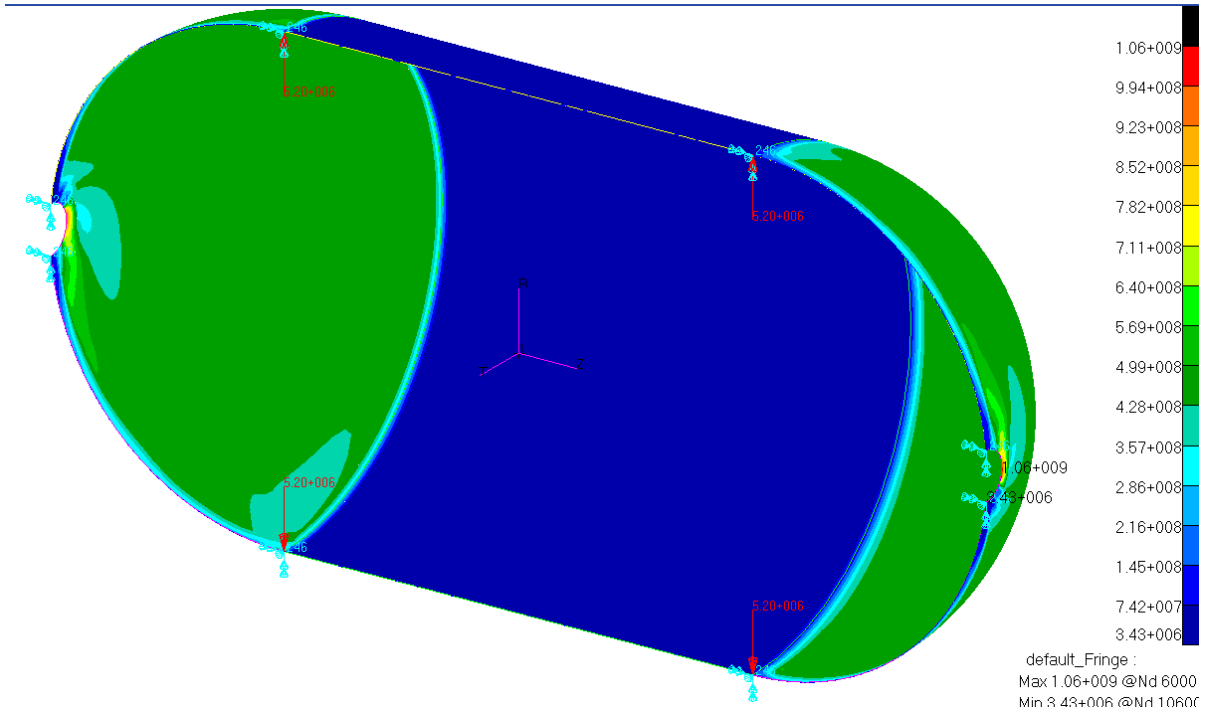


図 2-1 応力分布

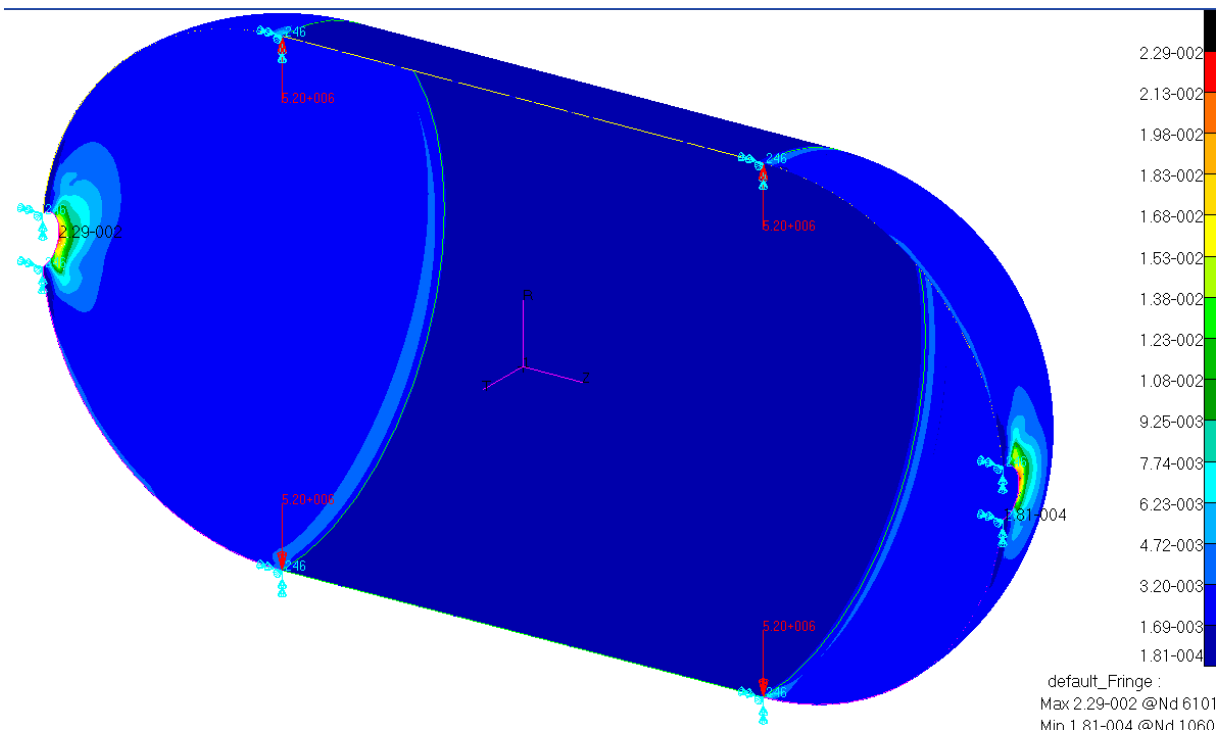


図 2-2 ひずみ分布

開口部周辺で 1.0 %以上と許容ひずみ 0.4 %を超えている．今後の対策課題とする．

### 3. 推進剤のマネジメントについて

#### 3-1. スロッシングに関する検討

##### 3-1-1. 検討概要

本機体に使用されるタンクの長さは約 700 mm と予想されている。その結果、加速度が加わることによるスロッシングなどの推進剤揺動は、機体重心位置の変化、ガス巻き込みなどを引き起こすことが懸念されている。そのため、飛行時にかかる加速度の影響を軽減する機構が求められる。今回は、スロッシングの CFD 解析とガス巻き込みに関する報告を行なう。

今回のスロッシング解析には、解析ソフトとして OpenFOAM を使用した。本ソフトを使用した目的としては、ライセンスフリーであるため解析コストの低減に寄与することである。また、界面追跡法として Volume of Fluid (VOF) を利用した。また、ANSYS 社 Fluent を用いた解析も実施し、OpenFOAM による解析結果との比較を行なった。なお、ANSYS 社 ICEMCFD と VAINAS pointwise を使用し解析メッシュ作成を行なった。[3,4]

##### 3-1-2. 解析結果の比較

本項では、OpenFOAM を用いた解析結果と Fluent による解析結果との比較・検証を行なった。解析諸元を表 3-1 に記す[5]。

表 3-1 解析諸元

タンク全長	700mm
タンク直径	200mm
液体 粘度	$1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
密度	$1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
空気 粘度	$1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
密度	$1.0 \text{ kg/m}^3$
重量加速度	$9.8 \text{ m/s}^2$
液体積	$0.015 \text{ m}^3$
解析時間	10sec

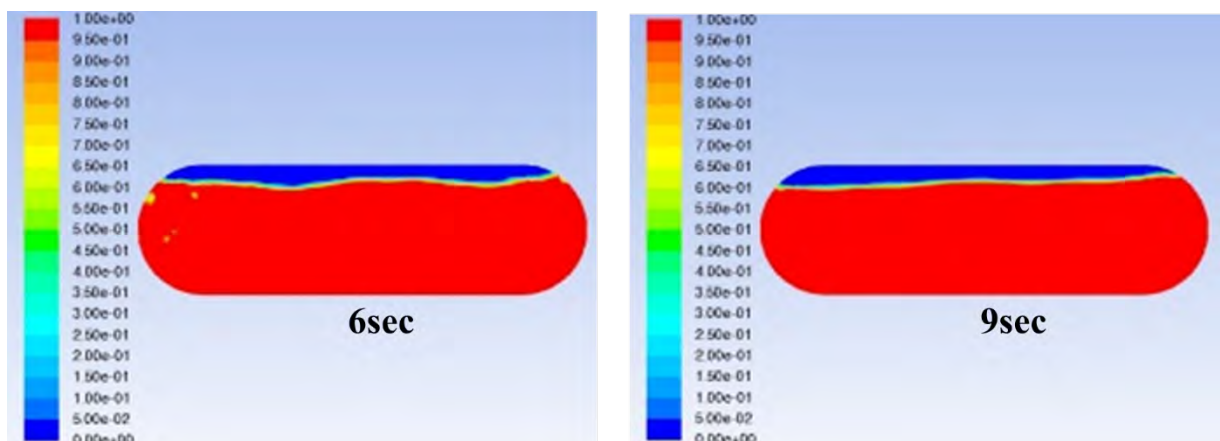


図 3-1 Fluent 解析画像

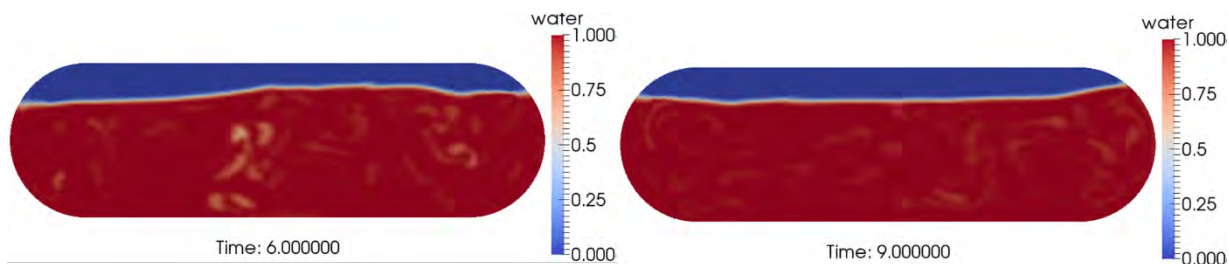


図 3-2 OpenFOAM 解析画像

図 3-1 と図 3-2 の解析結果より Fluent と OpenFOAM の結果を比較し考察する．まず 2 つの解析結果画像から右端の波の高さが最大となる秒数を 2 点測り，周期を算出した．周期を算出した範囲は波の動きが安定している 6～9 s 間とした．その結果を以下の表 3-2 に示す．

表 3-2 Fluent 解析と OpenFOAM 解析における周期

	液の高さが最大の時の時間①[s]	液の高さが最大の時の時間②[s]	周期
Fluent	6.87	8.03	1.16
OpenFOAM	6.85	8.10	1.25

表より，Fluent と OpenFOAM で周期に 0.9 の違いがあった．これは Fluent と OpenFOAM の界面の追跡方法の違い等が原因であると考えられる．

また，上記の解析を行なった円筒タンクに近い長さ 700mm，高さ 200mm の長方形モデルにおけるスロッシング周期の理論値は 1.19 sec となった．この数値は，表 3-2 の OpenFOAM と Fluent の周期と近い値になっており，本数値解析結果は妥当と言える．このことよりスロッシング解析技術を習得したと考える．

### 3-2. ガス巻き込みに関する検討

今回の推進剤供給システムでは，残液を 3% 以下にすることが求められる．そのため，残液を減らすような液供給方法を提案し，縮小モデルタンクを作成し実験を行なった結果を報告する．

今回の実験で使用した鏡板部が板となっている縮小モデルタンクの諸元を表 3-3 に示し，実験条件を表 3-4，タンク縮小モデルを図 3-3 に示し，タンク内残液の結果を図 3-4 に記す．

表 3-3 タンク諸元

	実機モデル	縮小モデル
円筒部長さ	500mm	200mm
直径	203mm	100mm
配管内径	18.4mm	10.7mm

表 3-4 実験条件

使用液体	水
初期液量の充填率	50%
加圧ガス	窒素
加圧圧力	0.05MPaG
下流流量	15L/min

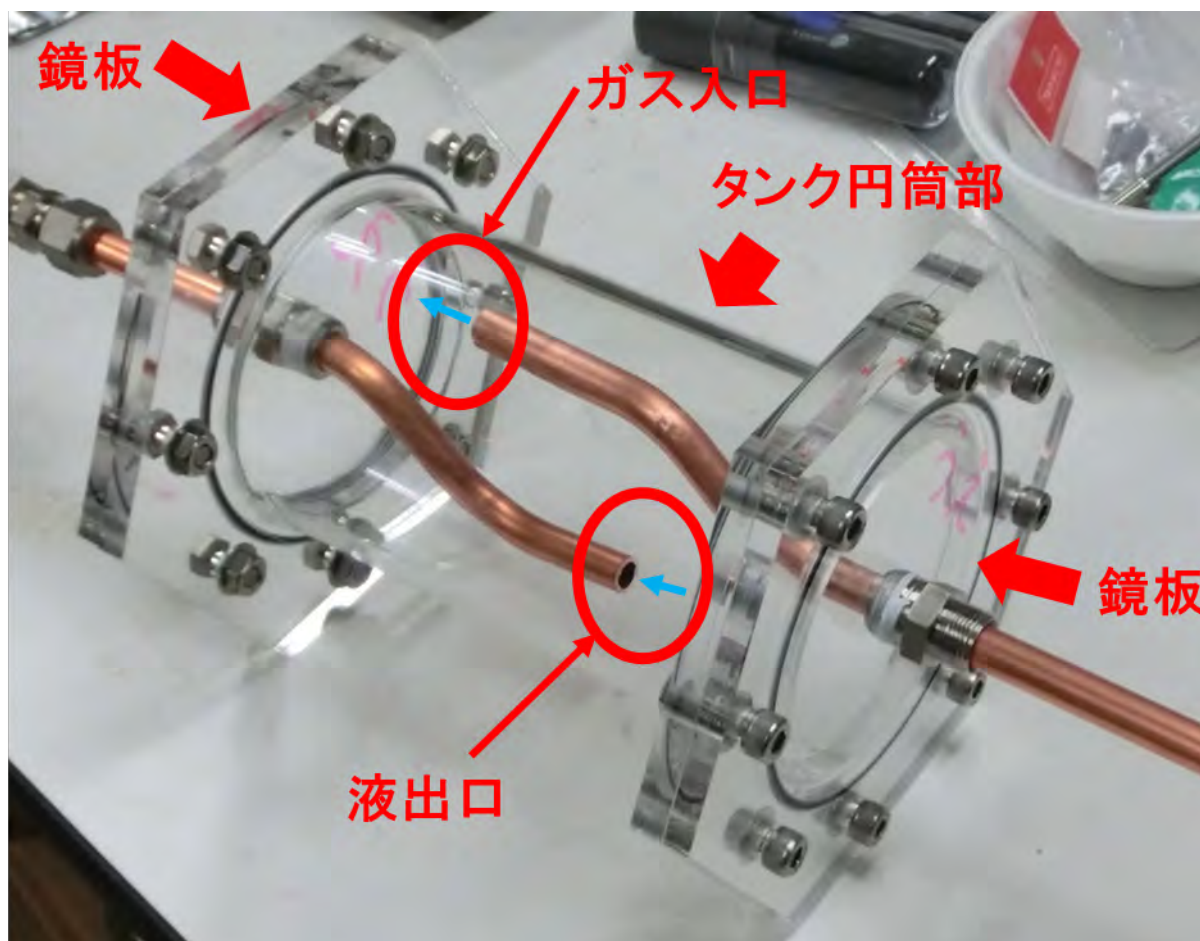


図 3-3 縮小モデルタンク

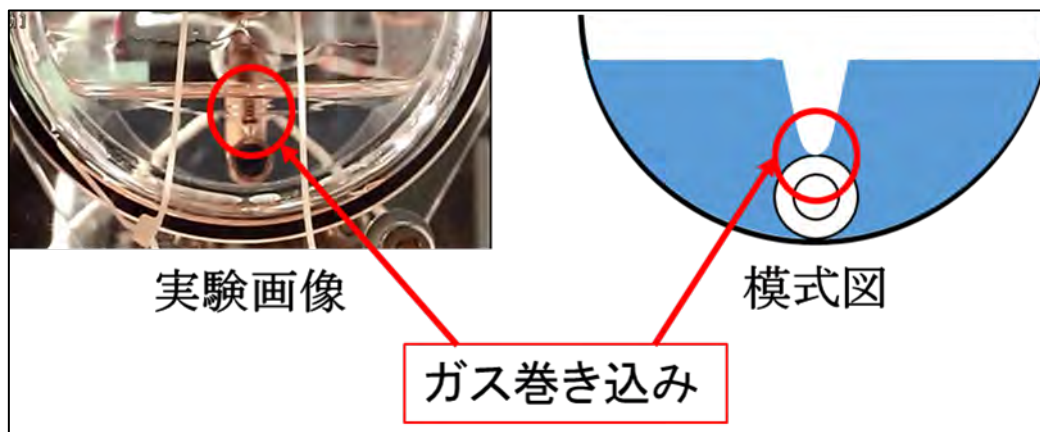


図 3-4 ガス巻き込み画像

図 3-4 よりガス巻き込み時において、画像から得られた液面高さの計測値からタンク体積に対し、約 17 %の残液を確認した。今後更なる改善が求められる。

#### 4. まとめ

タンク構造については、構造設計・構造解析を実施し、口金周辺部で設計指針を超えているため今後更なる検討を行なう。

推進剤のマネジメントについては、スロッシング解析を実施し、解析技術を習得した。さらには、ガス巻き込みに関する実験を行ない、今後への課題を確認した。

#### 参考文献

- [1]吉村彰記, 小笠原俊夫, 末益博志, 液体窒素浸漬試験による複合材料極低温推進剤タンクの熱応力軽減設計の検討, 2013.
- [2] JAXA, 宇宙用高圧ガス機器技術基準, 2009, pp42-43.
- [3] OpenFOAM Foundation Ltd, OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide, 2014.
- [4] ANSYS, Inc, ANSYS FLUENT 12.1 チュートリアルガイド, 2010.
- [5]佐藤大樹, オオワシII 向け液体タンク内スロッシング特性予測技術に関する研究, 室蘭工業大学平成 26 年度卒業研究論文.