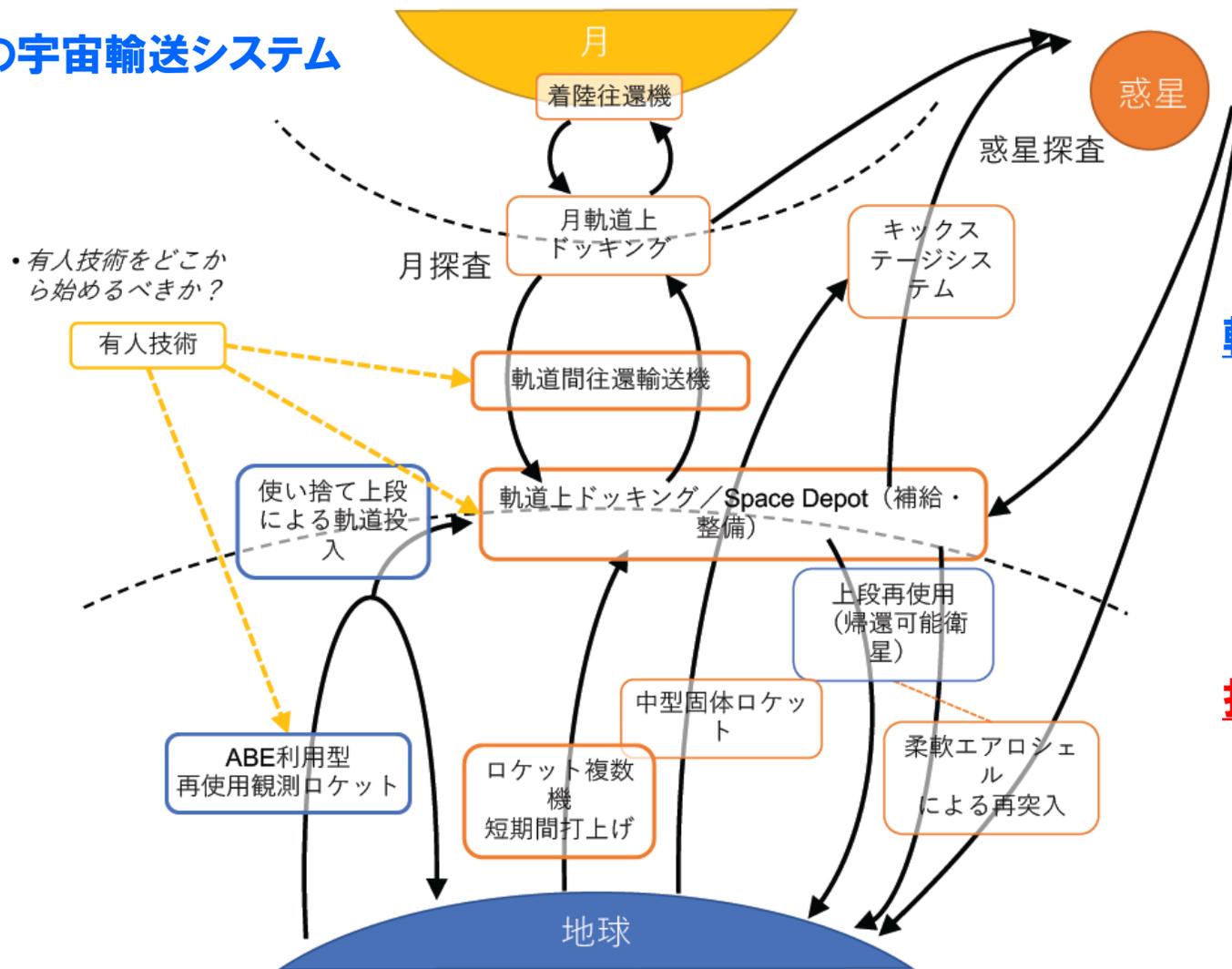


# 軌道間輸送システムを実現する 推進薬マネジメント研究に関する提言

東京大学 航空宇宙工学専攻 姫野 武洋

# 軌道間輸送・軌道上再補給・推進薬マネジメント

## 2030年代の宇宙輸送システム



## 軌道間輸送システムの構築

〔2030年代の主戦場〕

上段ロケット→再使用・軌道間輸送へ  
 試行錯誤の機会はまだ限られている  
 競争に備えた技術蓄積が重要

## 打上輸送システムの再使用化

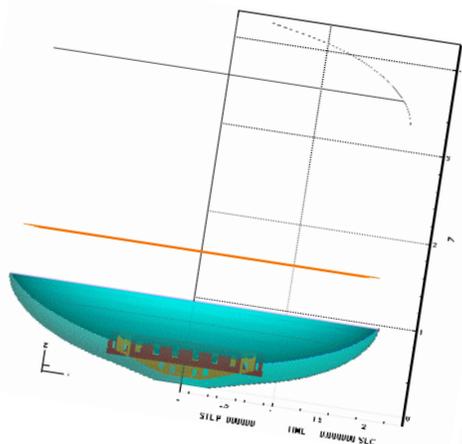
〔2020年代の主戦場〕

初段ロケットの高頻度再使用化は重要  
 試行錯誤と失敗も許容する開発  
 民間事業者も参画する大競争時代

引用：JAXA/ISAS 宇宙輸送専門委員会 報告資料 より

# 軌道間輸送・軌道上再補給・推進薬マネジメント

軌道間輸送機 (OTV) 軌道上再補給拠点 (Depot)

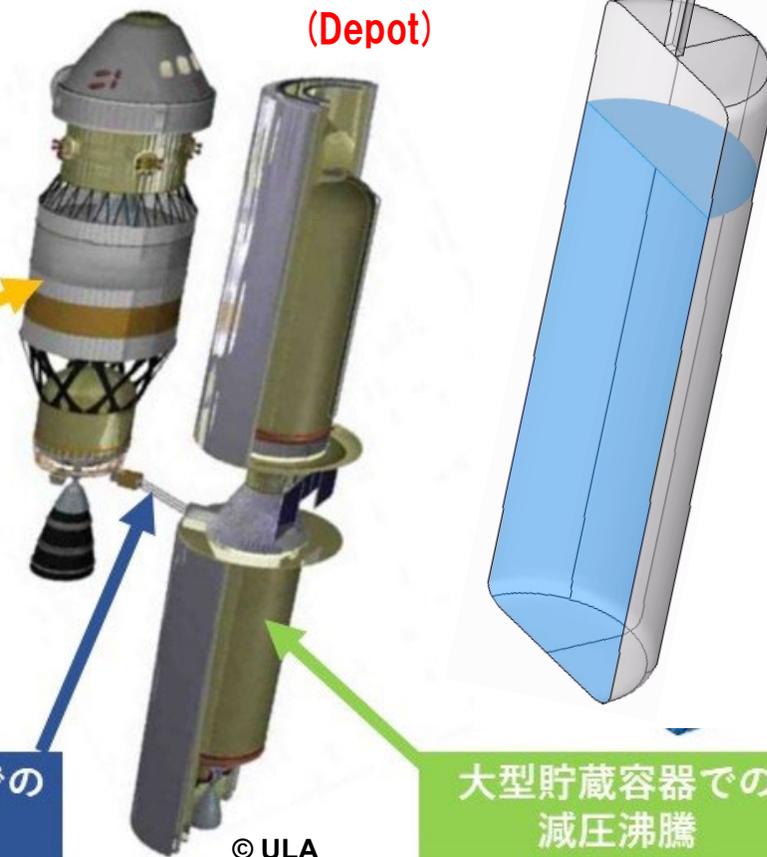


回転運動に伴う  
大振幅スロッシング

- + 挙動・圧力予測
- + 液体捕獲デバイス
- + 揺動減衰デバイス

低流量予冷条件での  
管内沸騰流

- + 熱伝達・管路抵抗予測



© ULA

大型貯蔵容器での  
減圧沸騰

- + サブクール維持・突沸抑制

## 軌道間輸送システムの構築

- + 軌道間輸送機 (OTV)
- + 軌道上再補給拠点 (Depot) の実現が必須。

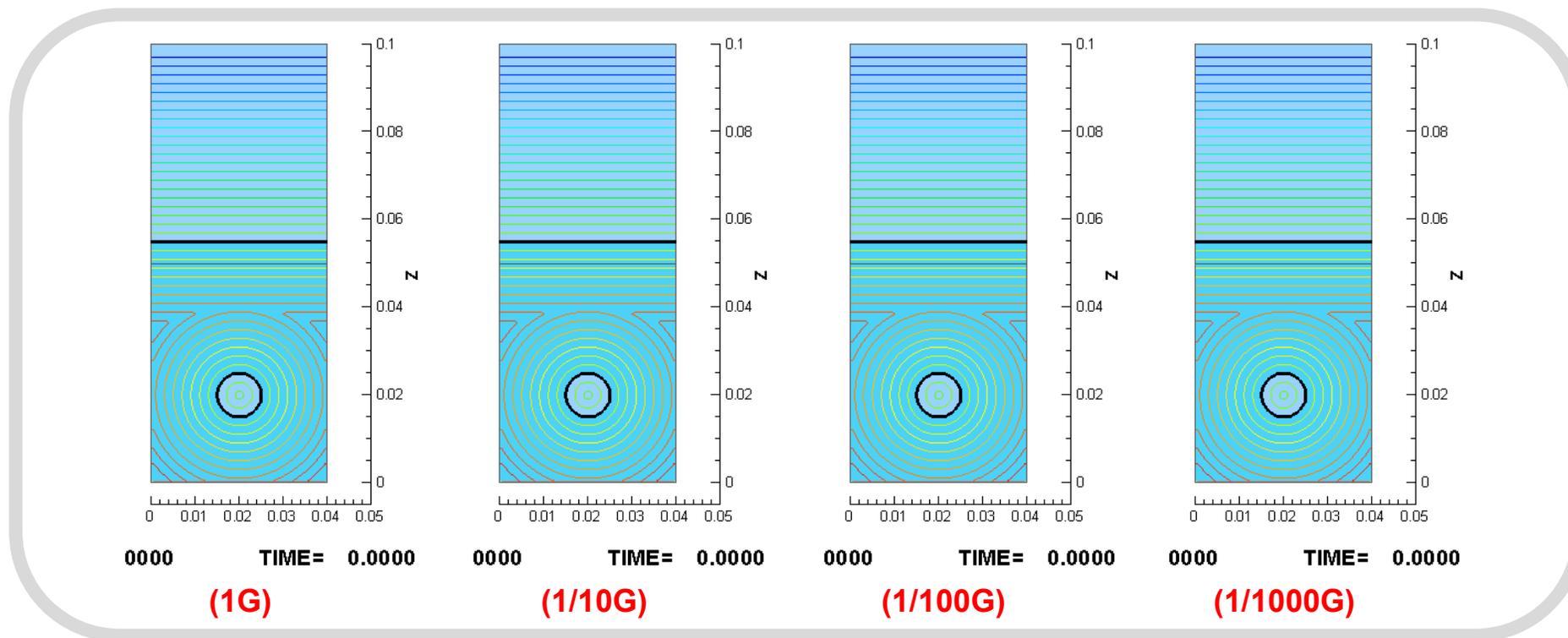
[キー技術]

- + ドッキング技術
- + 推進薬マネジメント技術

に加えて  
が重要。

地上とは異なる加速度環境で、  
極低温推進薬の熱流動を制御する

# 軌道間輸送・軌道上再補給・推進薬マネジメント

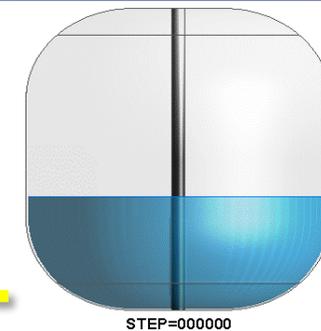
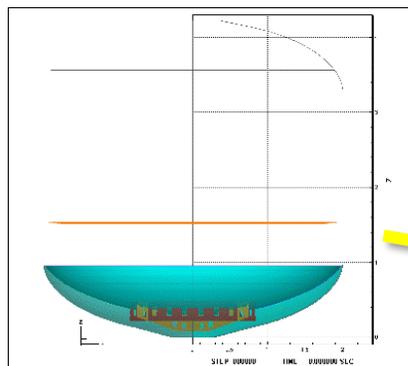
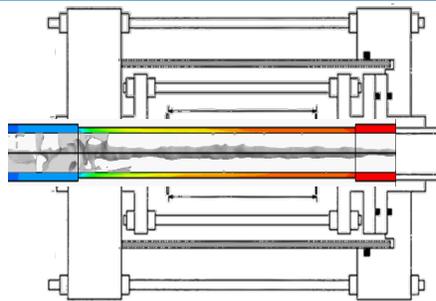
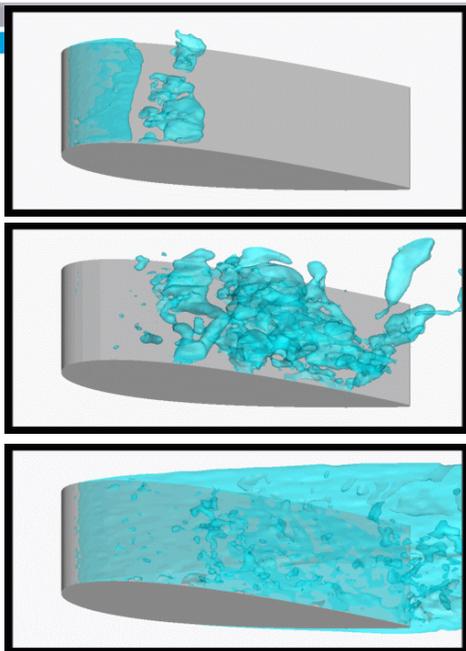


推力や姿勢変動を伴うロケット飛行中の**非定常加速度環境**や、  
比重差による液体駆動を期待できず、界面張力が相対的に卓越する**低重力環境**では、

- 液体を、
- ① 望ましい位置に保持し (捕獲)、
  - ② 思い通りに移し替え (搬送)、
  - ③ その温度と圧力を制御すること (熱制御) が難しくなる。

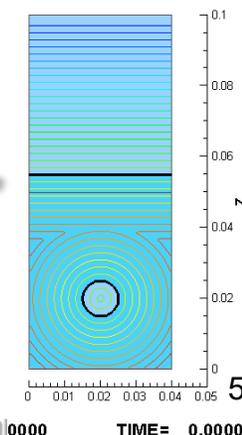
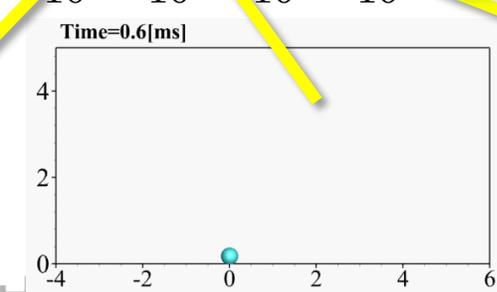
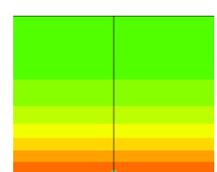
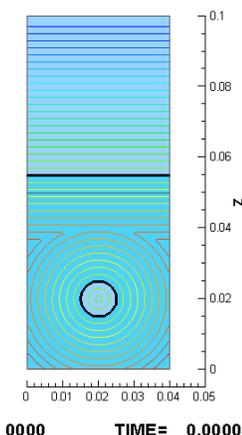
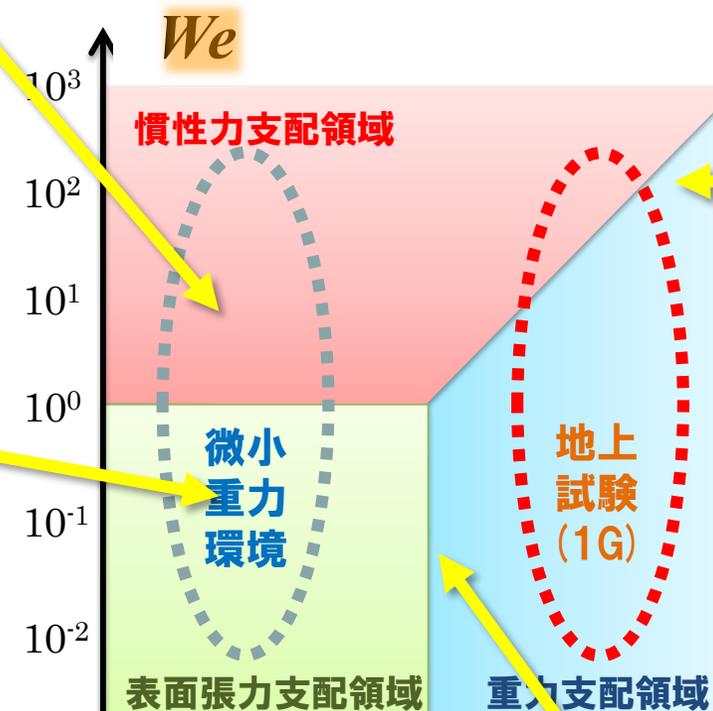
地上での「試運転」ができない

# 軌道間輸送・軌道上再補給・推進薬マネジメント



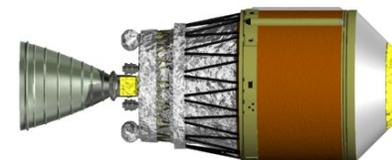
地上での経験と試運転に基づいて設計された流体機器は、軌道上で想定した性能を発揮できないことが珍しくない。

軌道上で運用される流体機械の開発段階での試行錯誤と試運転を難しくしており、勢い設計は保守的にならざるを得ず、宇宙開発利用の技術革新を阻んできた。



## 技術課題

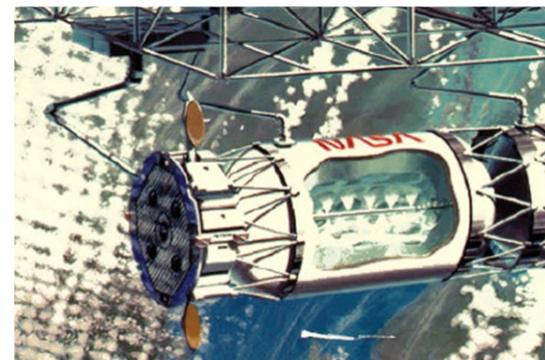
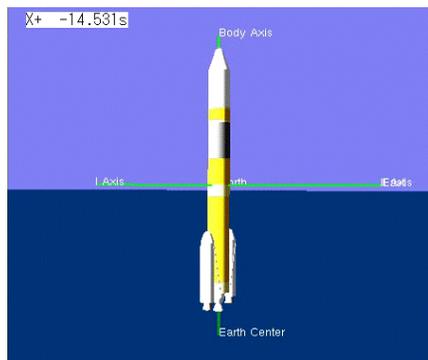
未だ実現に至っていない宇宙輸送システム開発のためには、流体力学や伝熱学などの様々な学理を動員し、「**試運転**」の難しさを克服し、試行錯誤により獲得した知見を**設計に反映**させなくてはならない。



## 技術動向

関連する設計クライテリアに対し**理論式**や**実験式**に基づく根拠が与えられるのは、容器や流路の形状、流動様式が**単純な場合に限られており**、実際の動的加速度環境における熱流動特性に関する**知見の蓄積は十分でない**。気液二相流の**数値シミュレーション**も数多く試みられているが、気液間の相変化および固体の内部伝熱との連成までを考慮した解析例は少なく、世界的に見ても、未だ**宇宙機の設計に有用な域に到達していない**。

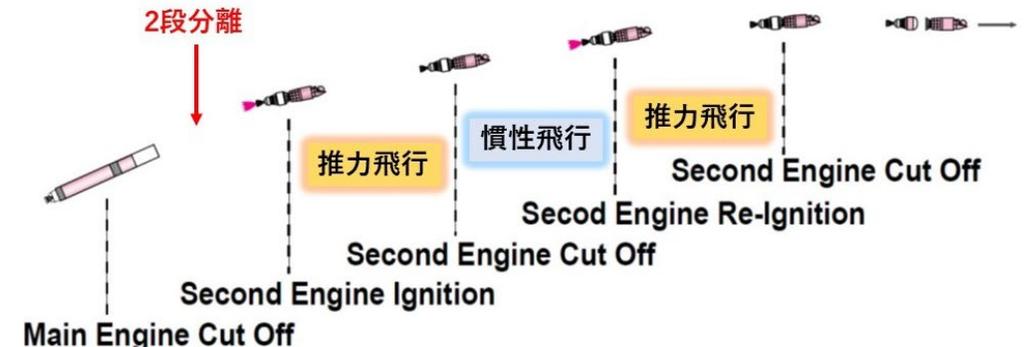
## ELV, RLV, OTV 共通課題



## 過去取組

- 我が国においては、JAXAと大学、メーカーが協力し、
- + 落下塔や加振機を用いた地上実験、
  - + 観測ロケットを用いた微小重力実験、
  - + 基幹ロケットそれ自体を用いた軌道上試験

など、技術実証を継続的实施。部分的ではあるが、世界的にも優れた上段推進系技術を保有。



### H-IIA上段

TF1号機

液体水素タンク可視化 (スロッシング、加圧ヘリウム噴射、スピナップ)  
20000秒慣性飛行後の再々着火実験

4,5,6号機

1200~4300秒慣性飛行中のデータ取得 (入熱量、予冷特性、アイドルモード燃焼)

8号機

7000秒慣性飛行後の再々着火実験、少量残推進薬

### 再使用ロケット実験機

例①



RVT-9

横風突風時のスロッシング予測技術獲得 (加振実験、CFD)

RV-X

転回飛行時アンチ・スロッシュバツフル性能予測技術獲得 (加振実験、CFD)

CALLISTO

帰還飛行時のスロッシング予測技術獲得 (落下塔実験、加振実験、CFD) **進行中**

### H-IIA上段高度化

例②



S310-43

複雑形状流路内沸騰現象可視化 (観測ロケット実験、CFD)

29号機

長秒時慣性飛行中のデータ取得 (入熱量、トリクル予冷特性、タンク圧履歴、CFD)

### 深宇宙探査

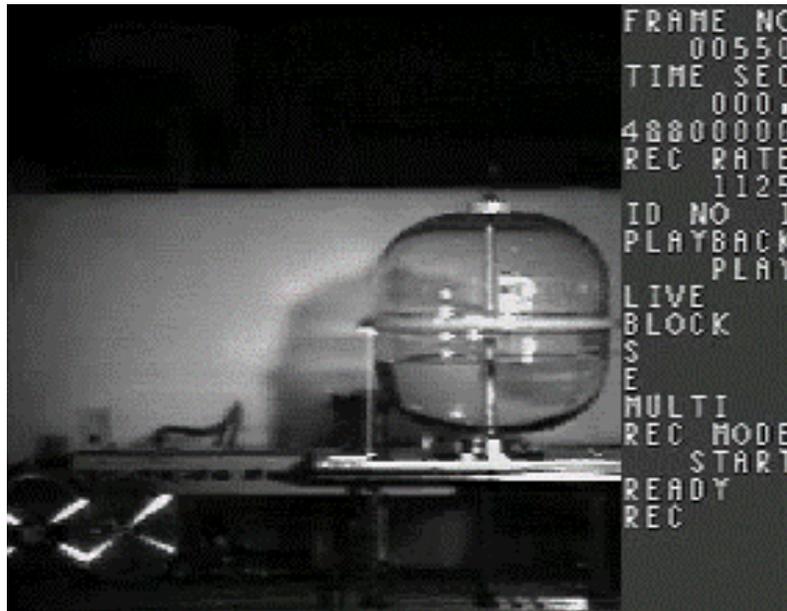
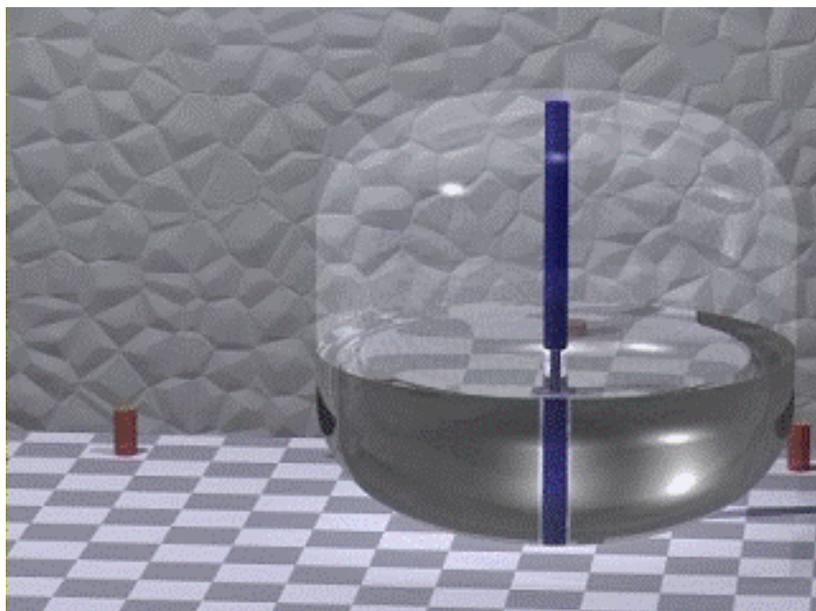
例③



MMX

火星衛星降着時のスロッシング予測技術獲得 (落下塔実験、CFD) **進行中**

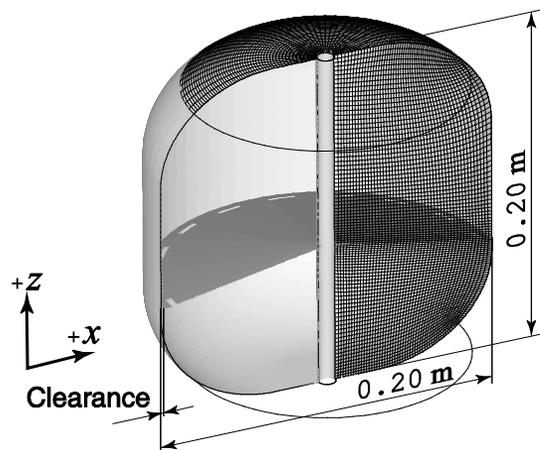
例①



```

FRAME NO
00550
TIME SEC
000.
48800000
REC RATE
1125
ID NO 1
PLAYBACK
PLAY
LIVE
BLOCK
SE
MULTI
REC MODE
START
READY
REC

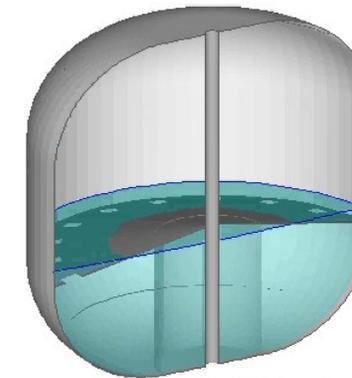
```



Ref. AIAA 2005-3931 (Himeno)

- 相似流れについて
- 実験と計算の相関を確認
- 実機飛行条件を計算で予測

CIP-LSM (東大コード) で計算

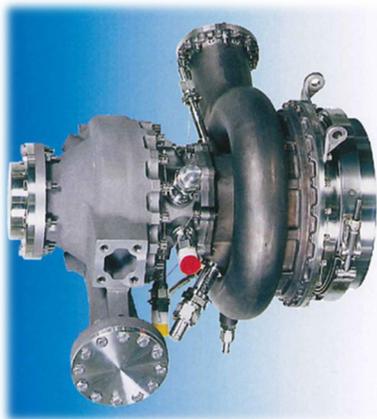


8.000000[sec]

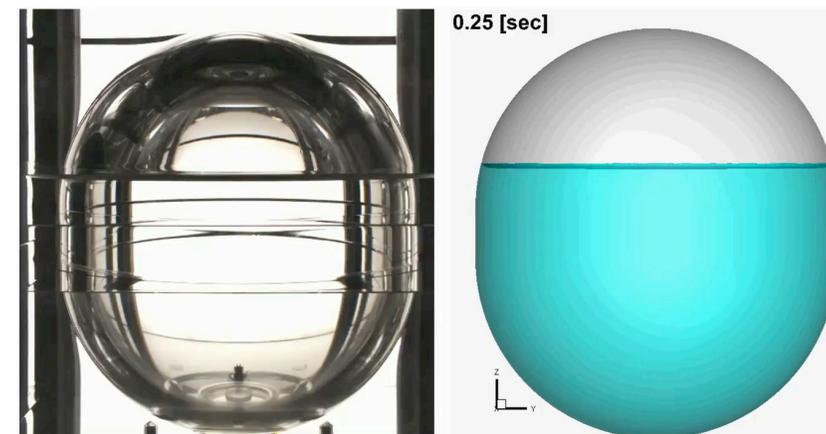
例② 観測ロケットを用いた極低温熱流動の微小重力実験



微小重力環境で、複雑形状流路内の極低温流体沸騰流を観察。  
H-IIA高度化の予冷に必要な推進薬量を決定する根拠のひとつ。



## 50m 落下塔 @ (株)植松電機



タッチダウンに遅れて発生する液柱が  
タンク上壁を叩き、機体を浮き上がらせ、  
最悪の場合には転倒の可能性がある。



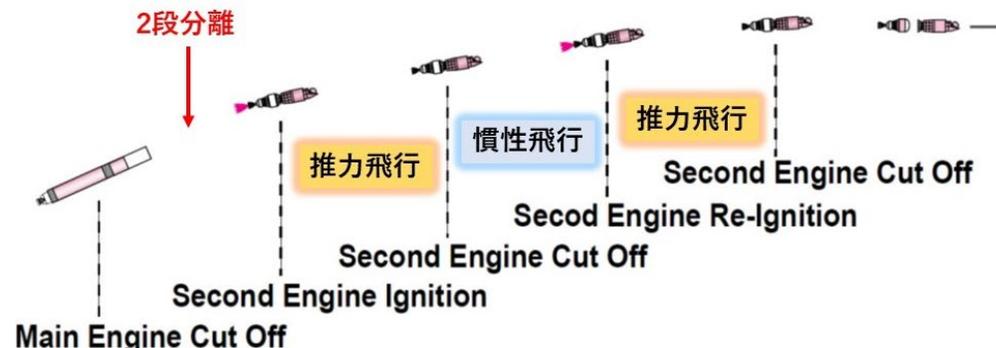
落下塔と昇降機付の実験装置を工夫し、タッチダウン時の現象を「試運転」。

## 過去取組

我が国においては、JAXAと大学、メーカーが協力し、

- + 落下塔や加振機を用いた地上実験、
- + 観測ロケットを用いた微小重力実験、
- + 基幹ロケットそれ自体を用いた軌道上試験

など、技術実証を継続的实施。部分的ではあるが、世界的にも優れた上段推進系技術を保有。



## 現状課題

我が国においては、**推進薬マネジメント**を打上輸送と軌道間輸送システムの共通基盤技術として位置づけ、機体設計や開発プロジェクトに先行し、**恒常的かつ体系的に取り組む研究実施体制が構築できていない。**

軌道間輸送システムの開発研究では、上段推進系技術をさらに発展させる必要があるが、

- ① 軌道上で長期間にわたり繰返し運用される点 (蒸発抑制、冷凍機)、
- ② **長秒時の低重力環境**を地上で模擬できず、**試行錯誤的な開発が難しい点**、など、  
技術的にも学術的にも未知の開発研究課題を残している。

※ 米国と欧州では、軌道間輸送システムに関する研究プログラムや技術実証プロジェクトが開始されている。

## 提言

- (1) 推進薬マネジメントを、打上輸送システムの多機能化と高信頼化だけでなく、軌道間輸送システムの実現にも重要な共通基盤技術として位置づけるのが望ましい。
- (2) 推進薬マネジメントに関わる開発研究を、産官学連携で体系的に推進する体制を構築し、専門的な人材育成と併せて実行することが望ましい。

具体的に、以下の3点を挙げる。

### 〔実験設備〕について

各機関が保有する落下塔、加振機、真空チャンバー等の大型共通試験設備を維持・拡充するとともに、各機関が連携して極低温試験を実施できる試験場の拡充することが望ましい。

※ JAXA能代、JAXA角田等を想定。

### 〔デジタル技術〕について

数値シミュレーションを分析手法として使用するだけでなく、推進薬マネジメントの開発研究で得られた知見の統合先として改良を重ね、「デジタルツインによる試運転」を可能とすることを目指すとともに、成果物を国内の研究機関と開発企業に対して共有するのが望ましい。

### 〔軌道上実証〕について

基幹ロケットや観測ロケットを積極的に活用し、推進薬マネジメント開発研究の技術実証の機会を資金と共に創出して欲しい。

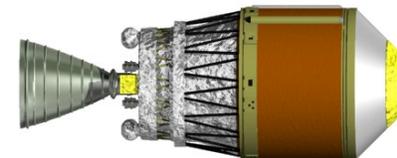
※ 飛行データの活用、副ペイロードを搭載した軌道上実験等を想定。 12

# (補足) 液体ロケットと将来宇宙輸送インフラのための 技術課題の解決に果たすアカデミアの役割



## 技術課題

未だ実現に至っていない宇宙輸送システム開発のためには、  
流体力学や伝熱学などの**様々な学理**を動員し、  
**「試運転」の難しさを克服し**、試行錯誤により獲得した知見を  
**設計に反映**させなくてはならない。



## 解決方針

そのためには、  
**分析技術**(分析科学)と**統合技術**(設計科学)の**両方が必要**。  
力学的な考察(**無次元化**)に基づく**縮小模型実験**による現象理解、  
数値流体解析をはじめとする**計算力学的手法の援用**が強く期待されている。

現象の理解とモデリング、および、解析技術を検証するため、  
**実験が果たす役割は広がっており、一層重要度を増していることを強調したい。**

アカデミアの役割 = 推進系共通基盤技術 の 担い手、継承者

加振環境試験機、落下塔 などの **基盤実験設備の整備**、**開発研究への提供**  
**数値シミュレーション技術の開発と高度化**、**開発研究への提供**