



5年間の活動のまとめ 推進薬熱流動解析技術開発

○ 梅村 悠(JAXA/JEDI)
姫野武洋(東京大学)

背景



◎ JAXAの研究開発部門としての役割

今後の「国際協力での宇宙開発」「国産ロケットの国際競争力」などに応えていく為に
しっかりと研究開発し、開発費用を抑えながら今後の宇宙輸送機を実現しなければならない！

↓
どんな宇宙輸送機を作るのか？

↓
どんな不具合が発生するか事前に把握し、効率的に技術開発を行う

↓
どんな新規技術の開発が必要か？

シミュレーション技術の活用

長所

ヴィジュアル的に認識できる為
多くの人々と課題を共有化が可能

短所

設定次第で誤った解(ヴィジュアル)を示す



研究会課題設定：輸送システムと物理現象の関係



今後の宇宙輸送機のシステム評価に向けて、物理モデルの研究対象とする現象を選択

どんな宇宙輸送機？

システム

システムへの効果

どんな新規技術開発？

システム技術

システム技術の実現手段

要素技術

どんな評価？

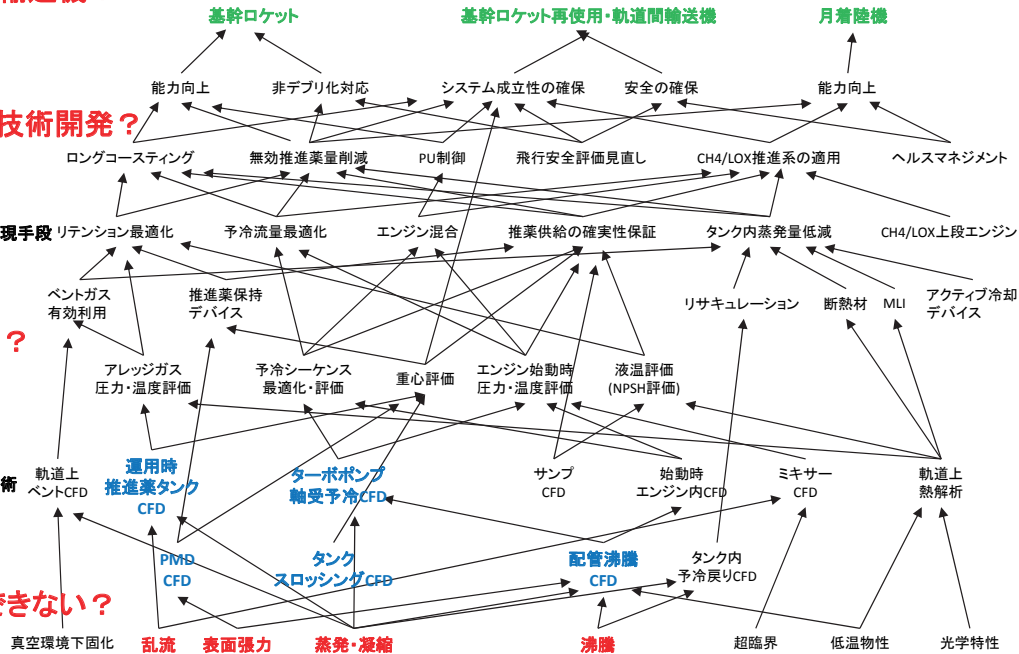
設計技術

システムの解析技術

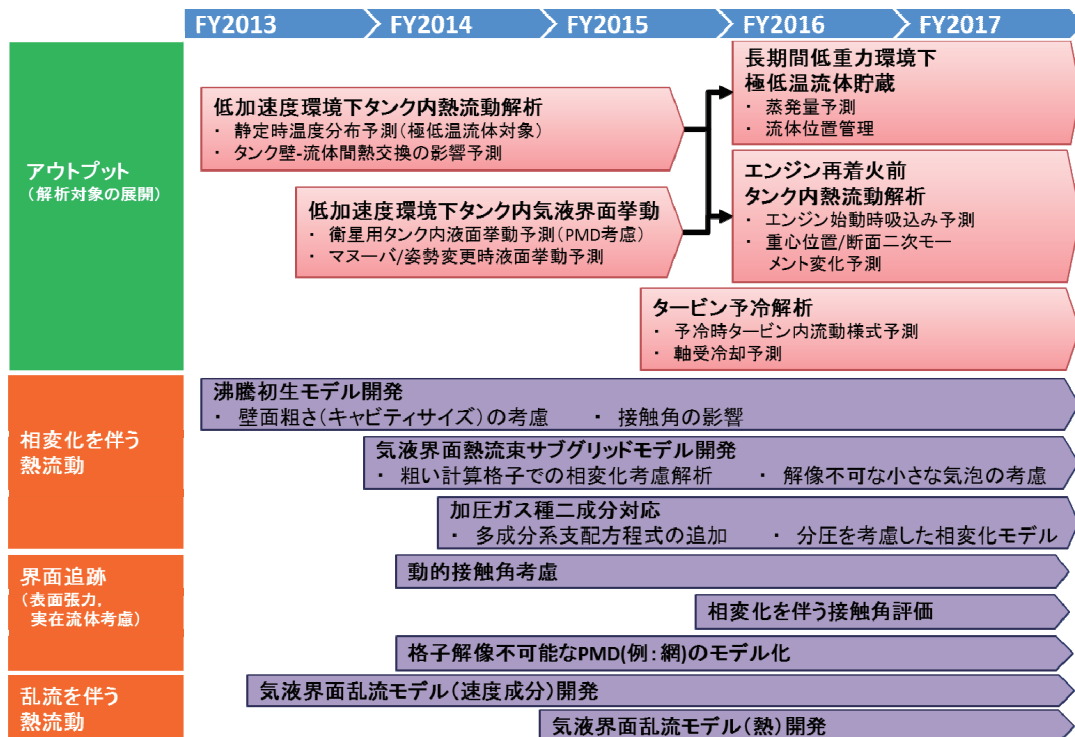
要素的解析技術

何が考慮できない？

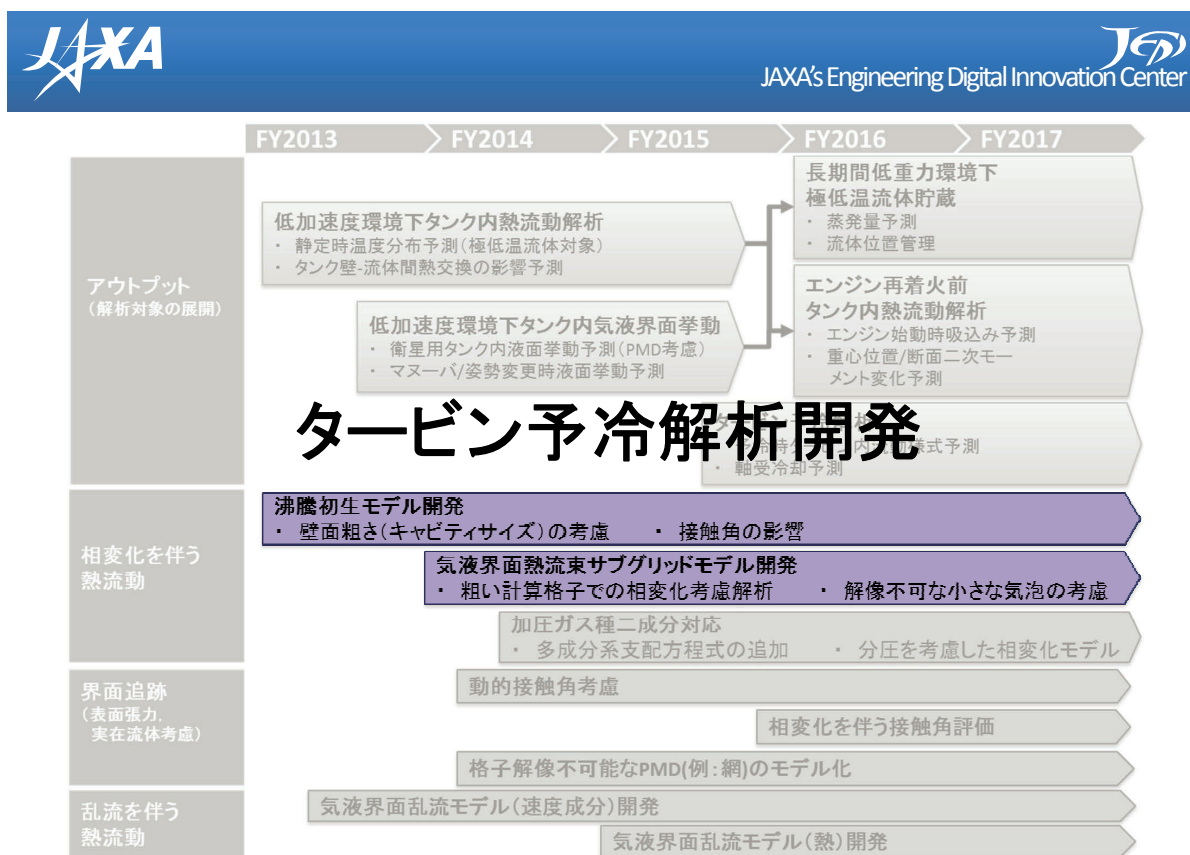
物理現象



研究会ロードマップ



5年間でできるようになったこと・・・とは？



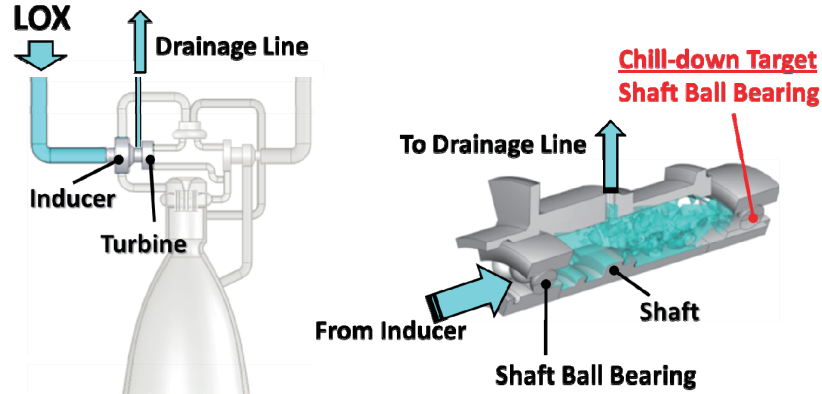
エンジン始動前の冷却



極低温流体は、配管温度が高いと圧損が大きくなり、意図した通りに液を流せない

基幹ロケット上段

計画通りエンジンを立ち上げる為にエンジン停止中は配管やターボポンプを冷却している



シミュレーション予測を可能にする為には・・・

- ① 沸騰様相変化による圧力損失の違いを再現
- ② 沸騰流冷却特有の急冷効果を再現

できる必要がある

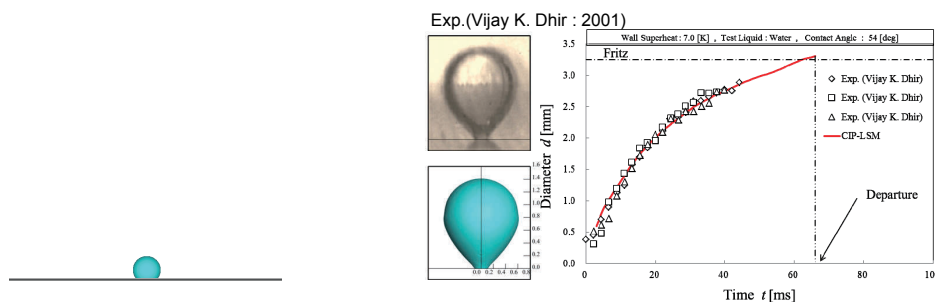
沸騰初生のモデル化



沸騰流は壁から発生する泡が合体と分離を繰り返しながら形成される



壁での泡の成長を再現する為には液膜の蒸発再現など高い解像度のCFDが求められる
課題：ターボポンプ予冷解析に高解像度のCFDは計算コスト的に得策ではない

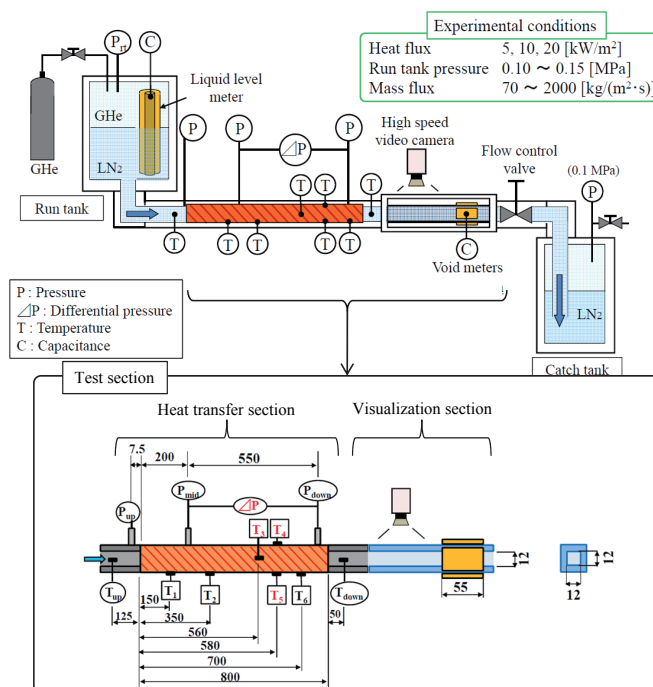
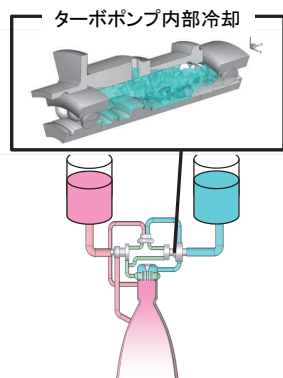


解決策：泡一個についてのCFDを実施して、沸騰初生に感度が高い要素を抽出し、低解像度CFDで再現する為の物理数値モデルを提案！

沸騰初生モデルを搭載して沸騰流予測へ



軸受の予冷解析に向けて
 ・センチスケールの流路
 ・極低温流体
 を対象に計算が行えるか検証



沸騰初生モデルを搭載して沸騰流予測へ



流動様式マップ

壁面熱流束5kW/m²

0.58 m/s

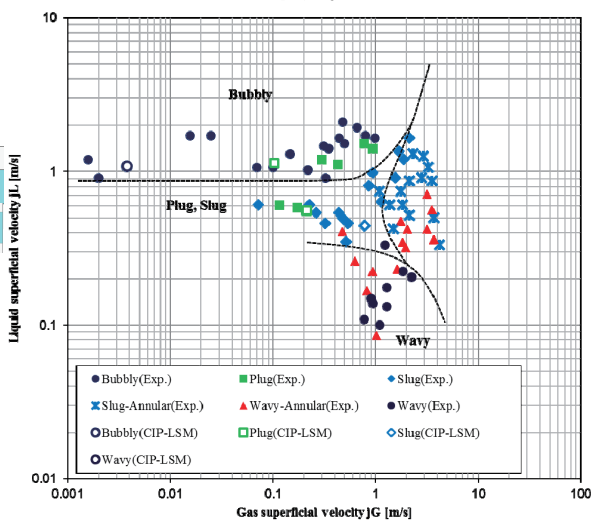
1.09 m/s

写真とは少し異なっている
 (条件が異なっている可能性有)

壁面熱流束10kW/m²

0.58 m/s

1.09 m/s



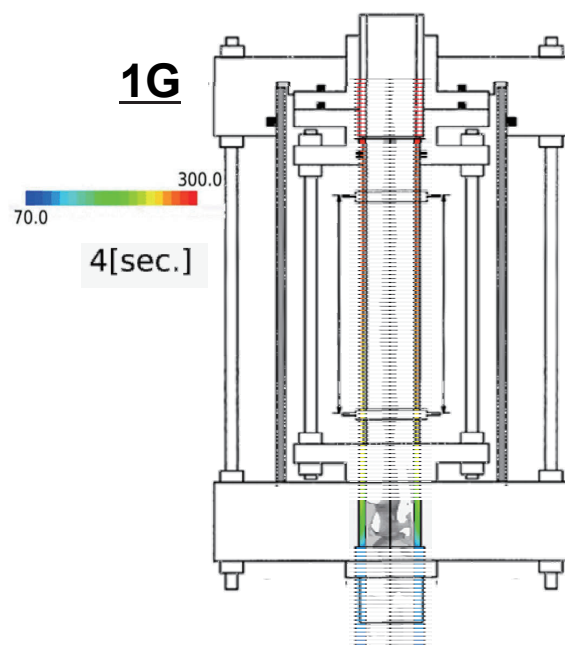
$$\text{見かけの気相速度: } j_g = \frac{x_g \cdot G}{\rho_g}$$

$$\text{見かけの液相速度: } j_L = \frac{(1 - x_g) \cdot G}{\rho_L}$$

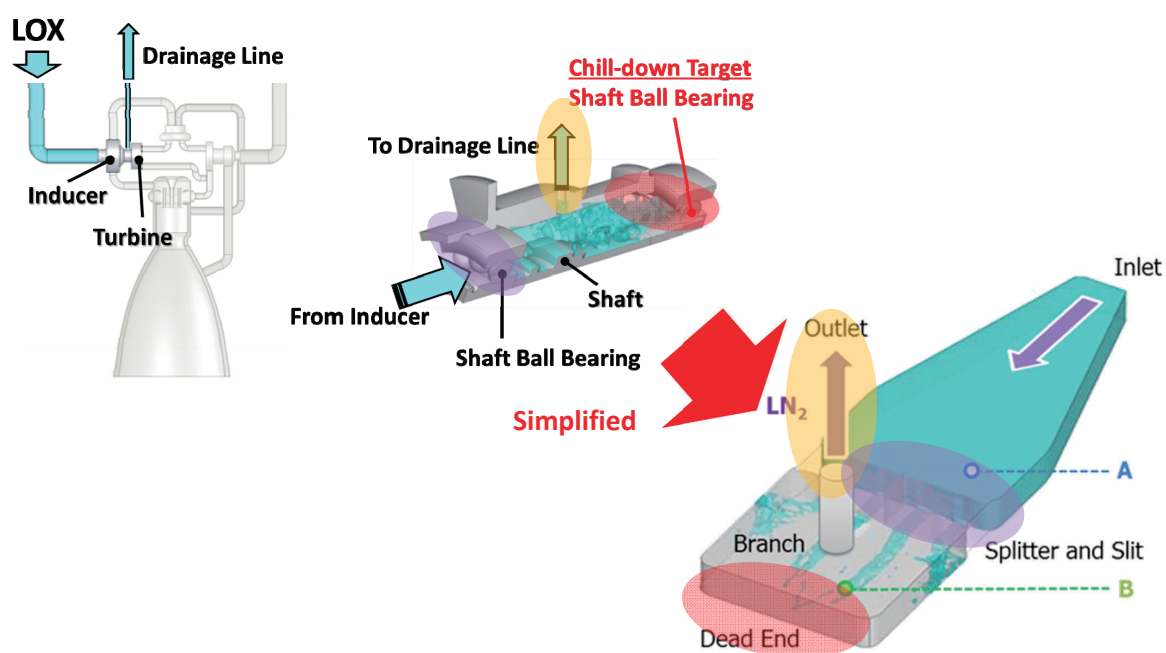
G : 質量流束[kg/m²·s]
 ρ : 密度[kg/m³]

添え字
 G : 気相
 L : 液相

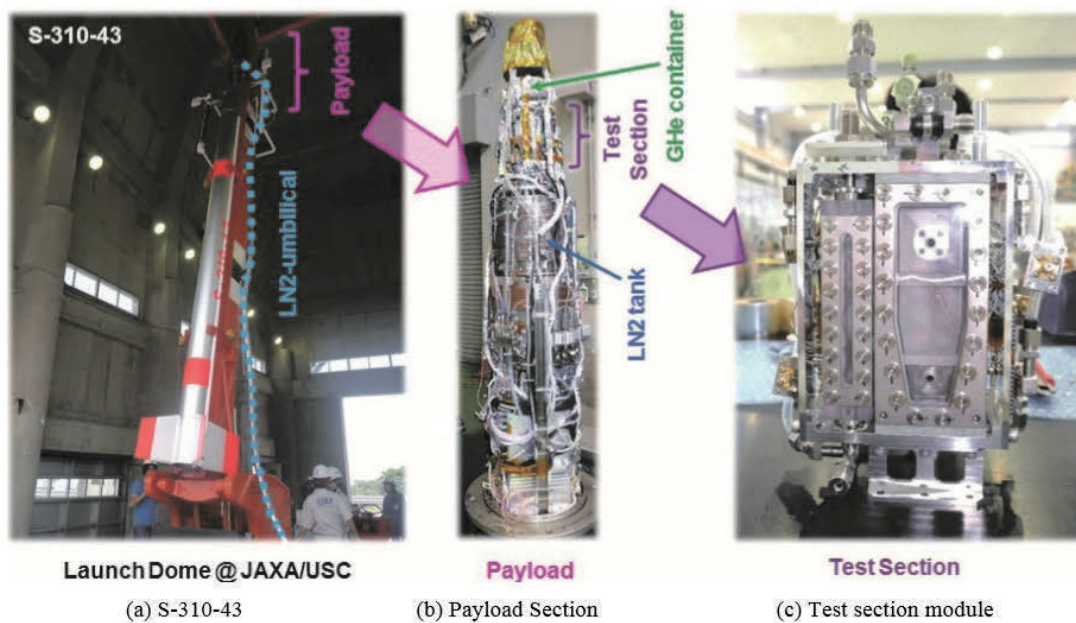
そして、予冷解析へ



エンジン内冷却流量のモデル化

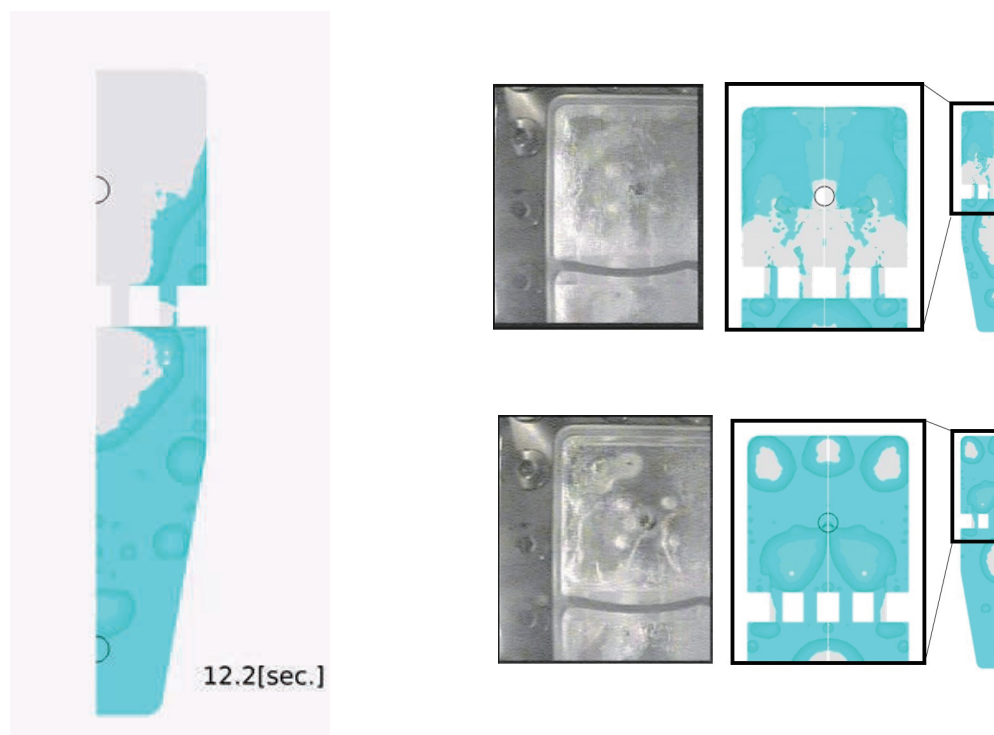


観測ロケットを活用した微小重力沸騰実験装置

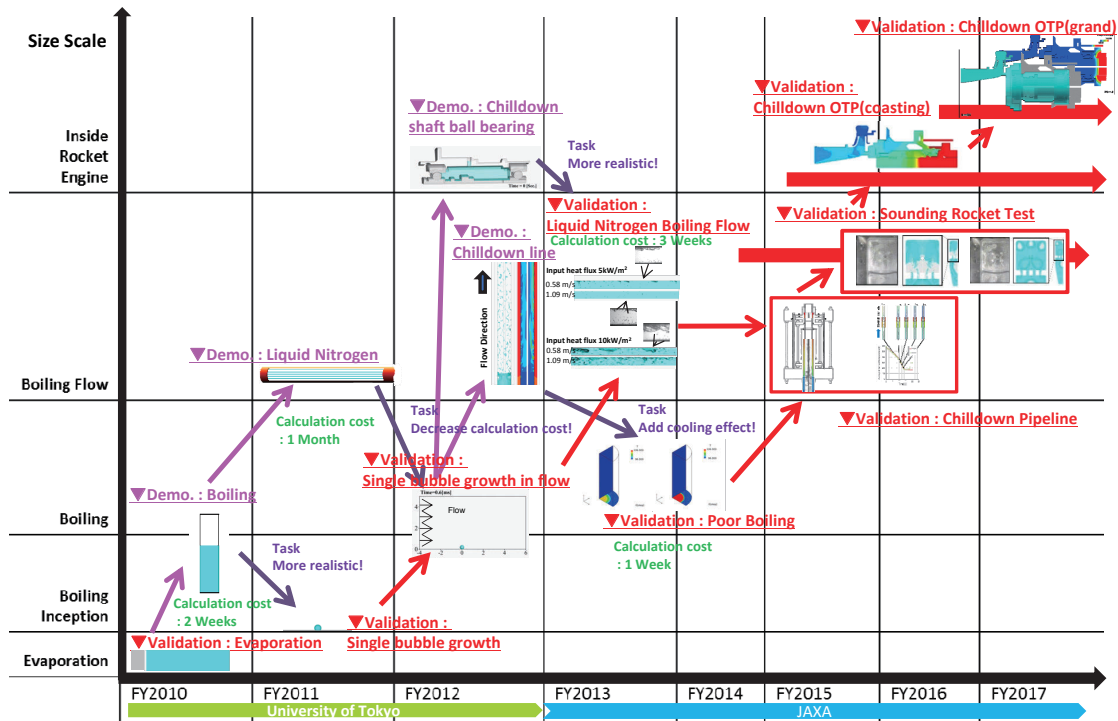


Discussed and proposed by the joint team of JAXA, the University of Tokyo and Waseda University.

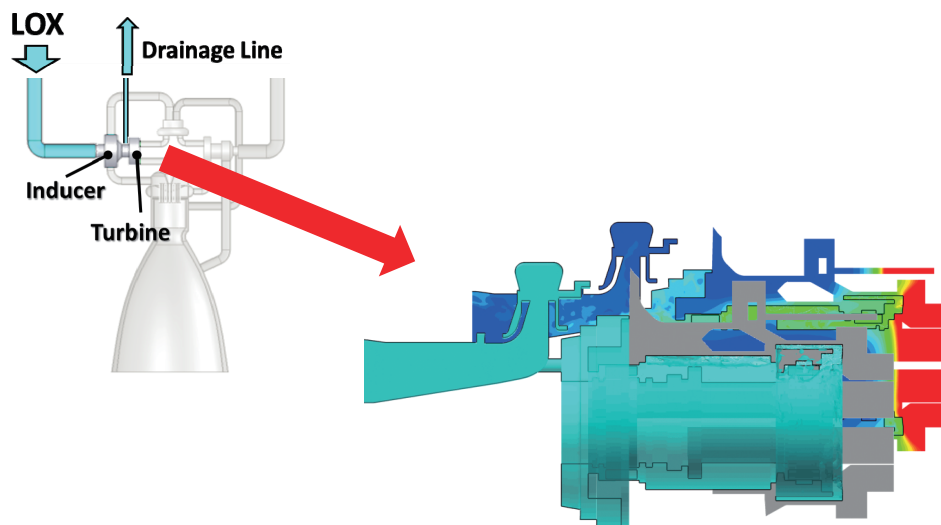
微小重力沸騰実験検証の可視化



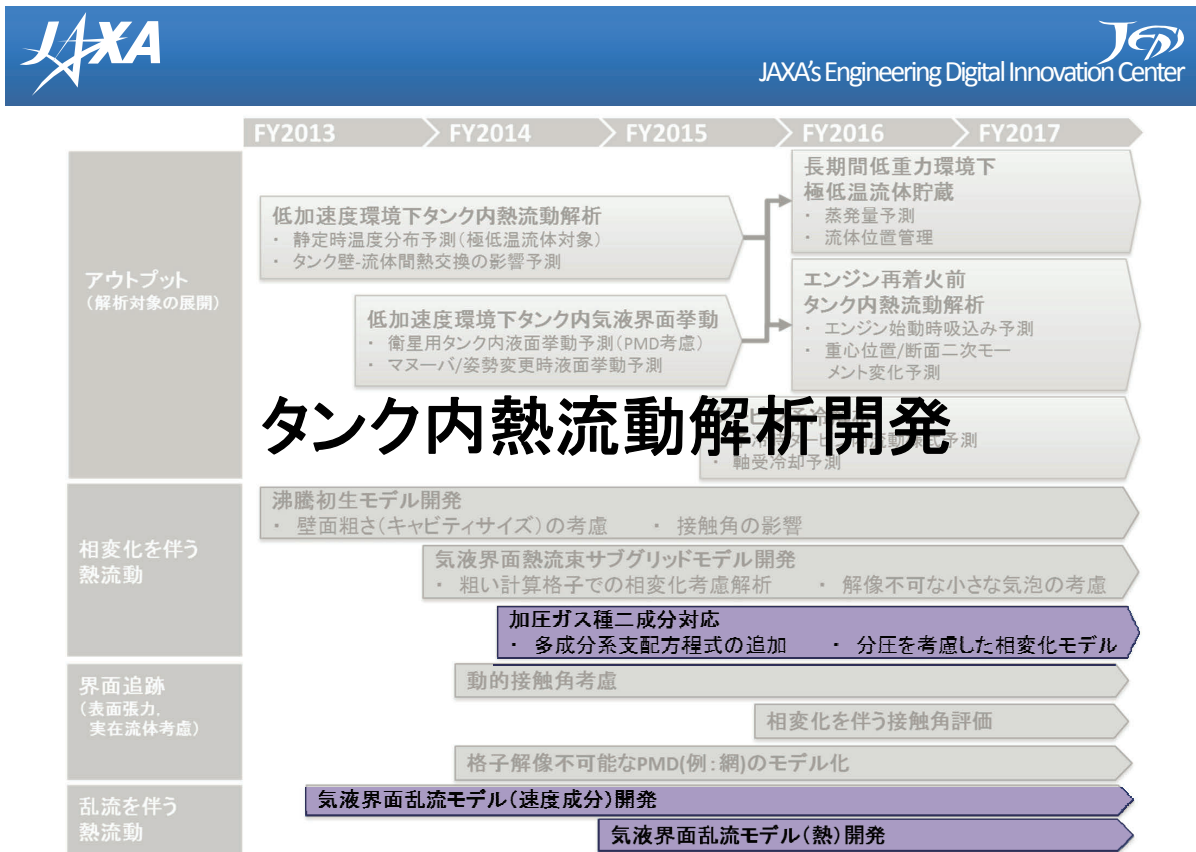
沸騰解析から予冷解析への流れ



ロケットエンジン内の沸騰の様子



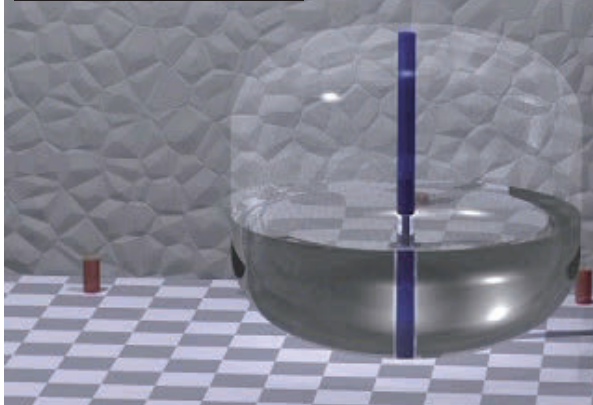
地上試験やフライトでのエンジン内の沸騰を調査する事が可能になった



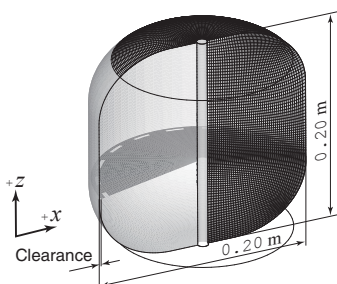
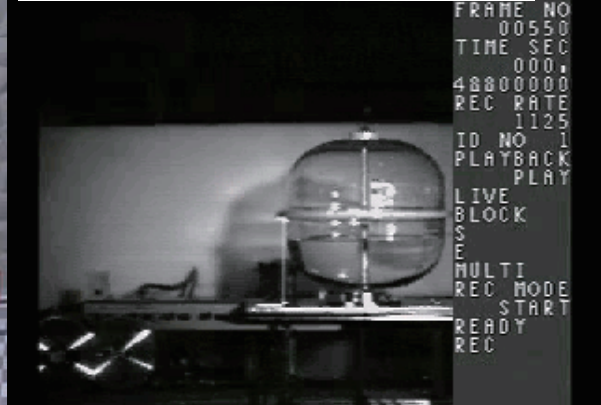
模型タンクによるスロッシング観察実験と数値解析



計算: (Himeno, 2003)

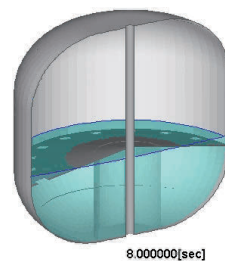


実験: (Himeno, Nonaka and Naruo, 2002)

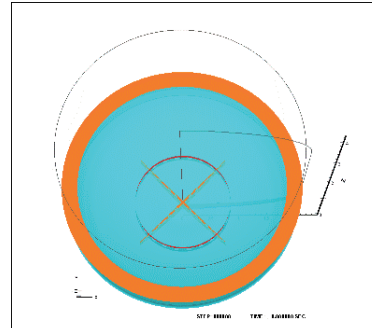
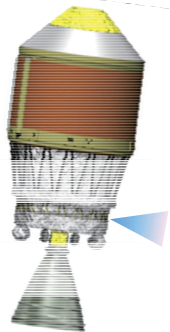


Ref. AIAA 2005-3931 (Himeno)

- ・ 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



液体推進薬のタンクスロッシング 実機運用事前検討への適用

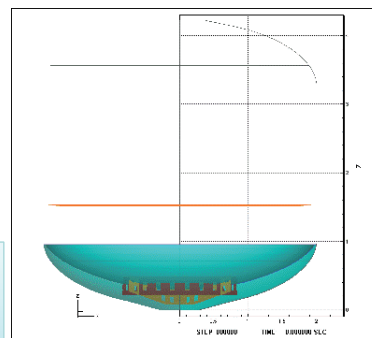


Sloshing caused by slight disturbance in lateral direction under low-g condition during coasting flight of upper stage.

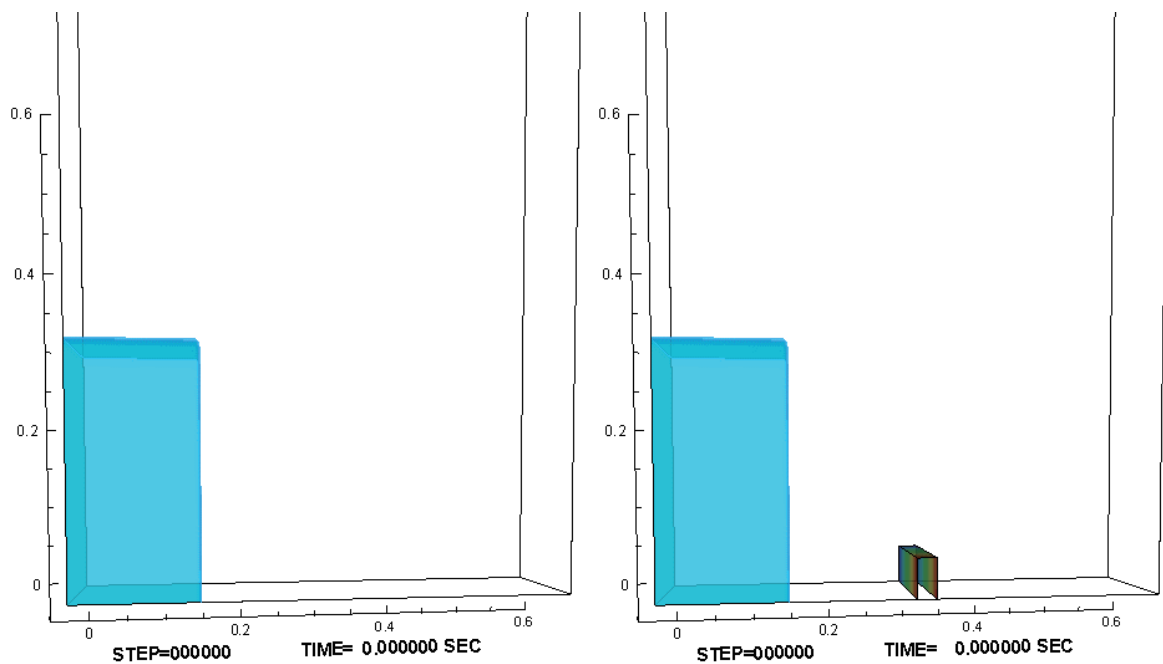
Numerical code : **CIP-LSM**

Hybrid PLIC-VOF and level-set
 developed in University of Tokyo

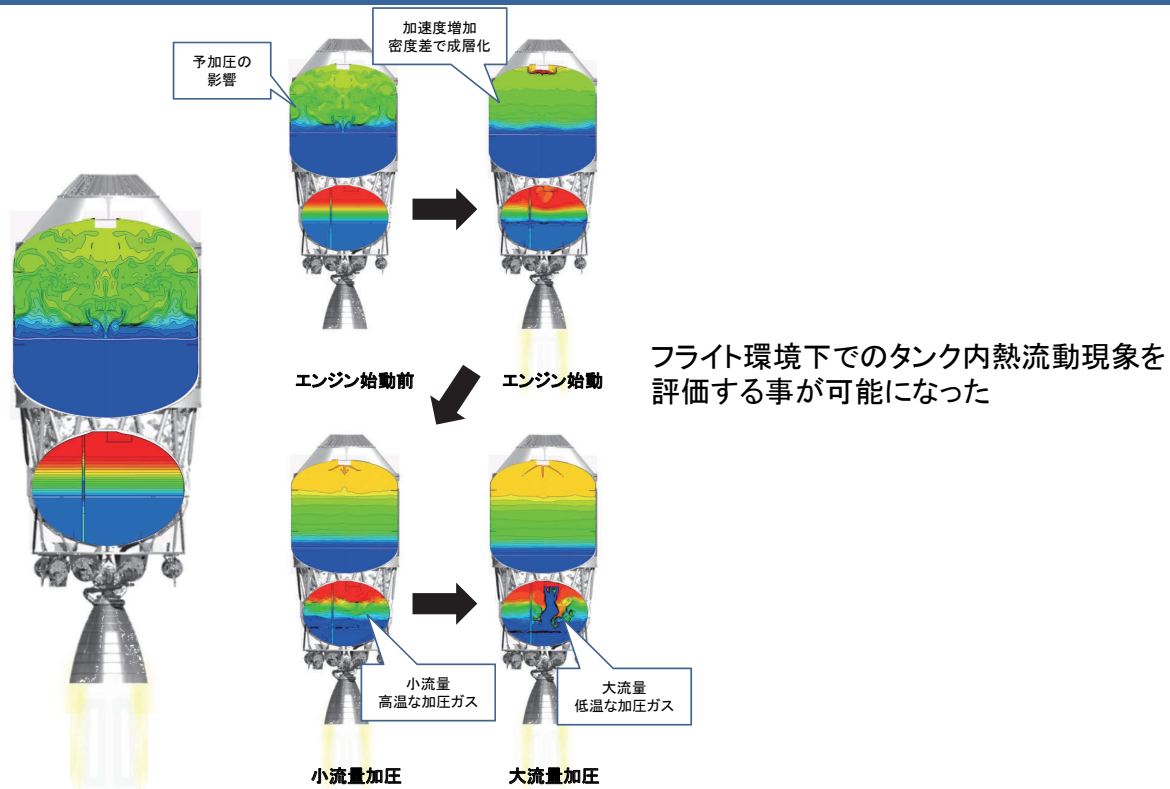
東大コードをJAXAおよびメーカーに供与
 H-IIA上段高度化ミッションの成立性検討・
 バッフル配置最適化検討に使用



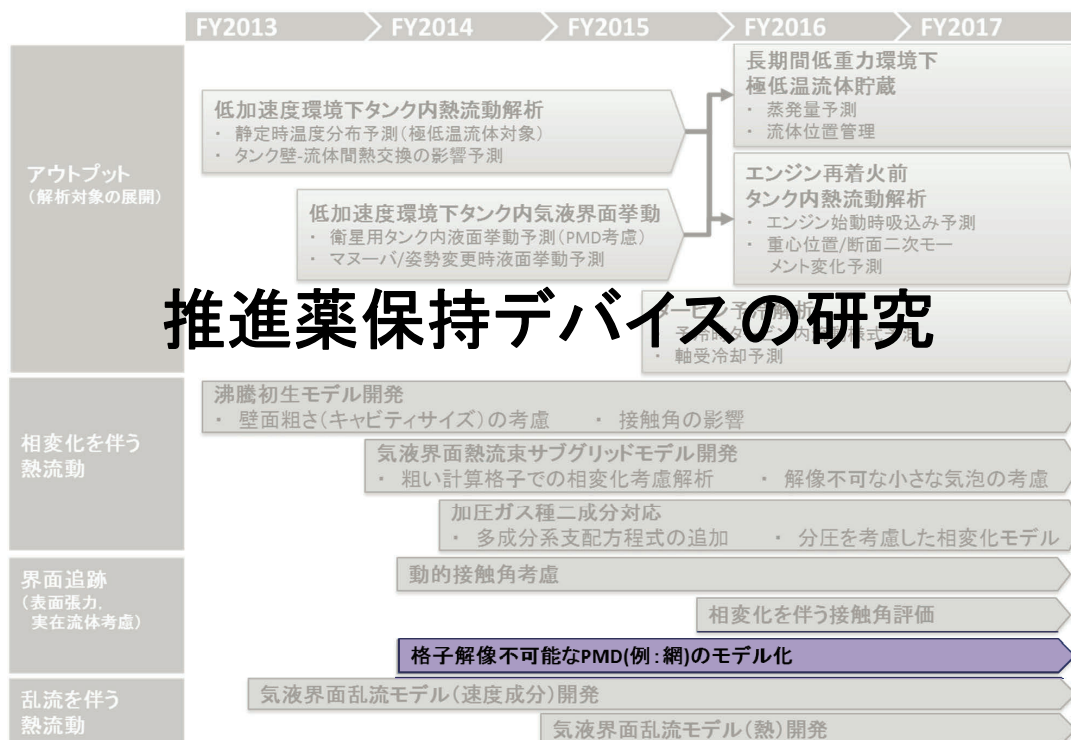
界面捕獲：乱流モデルの導入：高精度な界面捕獲の発展性



基幹ロケット 2段 推進薬タンク内熱流動



JAXA's Engineering Digital Innovation Center



推進薬保持デバイスの研究

タンク内流動に関して現象整理



極低温推進薬を利用するロケットは液体が大きく暴れない様に運用する事を想定すれば・・・
 タンク内の熱流動現象は下記の3つの影響で作り出される。

- A) 蒸発・凝縮などの相変化 ... ミッション時間が短い為にタンクは冷えたまま
- B) 表面張力 ... 低加速度環境では支配的になる
- C) 加速度 ... H-IIAロケットと大きく異なる

流れ場は運動方程式で記述され、各力の比率を無次元数で整理できる。

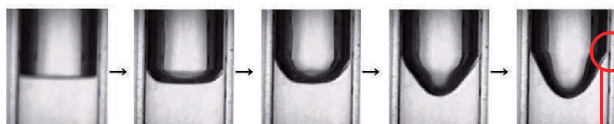
Navier-Stokes方程式 (運動量)

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \underbrace{\rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}}_{\text{対流項}} = -\underbrace{\nabla p}_{\text{圧力項}} + \underbrace{\nabla \left\{ \lambda(\nabla \cdot \vec{u}) \mathbf{I} + \mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) \right\}}_{\text{粘性項}} + \underbrace{\nabla \left\{ \sigma \delta_s (\mathbf{I} - \vec{n}_s \vec{n}_s) \right\}}_{\text{表面張力項}} + \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{重力項}}$$

慣性力	: $I = \rho U^2$	[Pa]		
粘性力	: $V = \mu(U/L)$	[Pa]	ボンド数	: $Bo = G/S = \rho g L^2 / \sigma$ [-]
加速度力	: $G = \rho g L$	[Pa]		
界面力	: $S = \sigma / L$	[Pa]		

今回はB)表面張力とC)加速度の比率であるボンド数を合わせた試験を検討

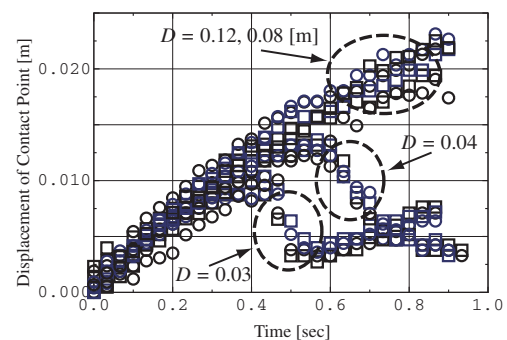
モデル試験の成立性



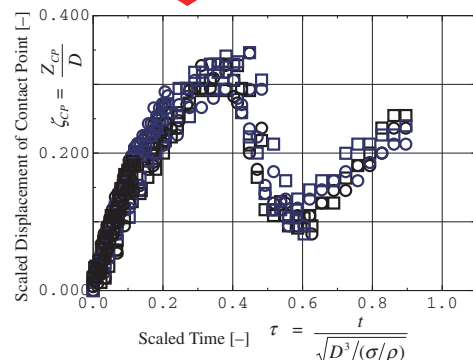
液面端部の位置

流れの相似性を利用した試験の場合、
 小さい容器を用いた場合は現象時間が短くなる。

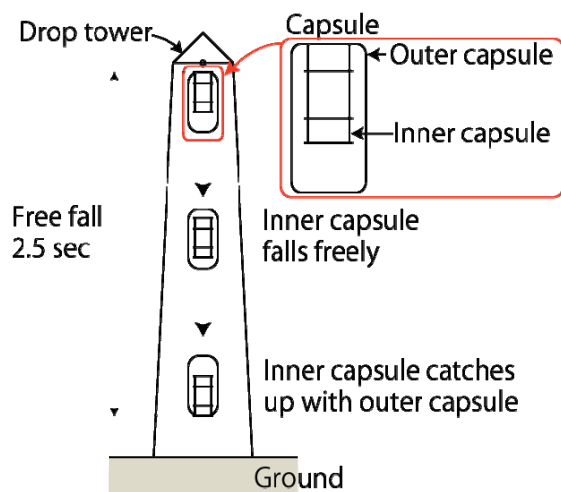
この特性を利用すれば・・・
 短い無重力時間でも実機運用時間の検討が可能



無次元化



無重力環境を得る手段



植松電機 落下塔 コスモトーレ



コスモトーレの諸元

μ G time	2.5-3 sec (45mdrop)
Payload size	$\Phi 50\text{cm} \times 80\text{cm}$
Total weight of capsule	400 kg

界面捕獲：その他

：高精度な界面捕獲の発展性：実験の重要性

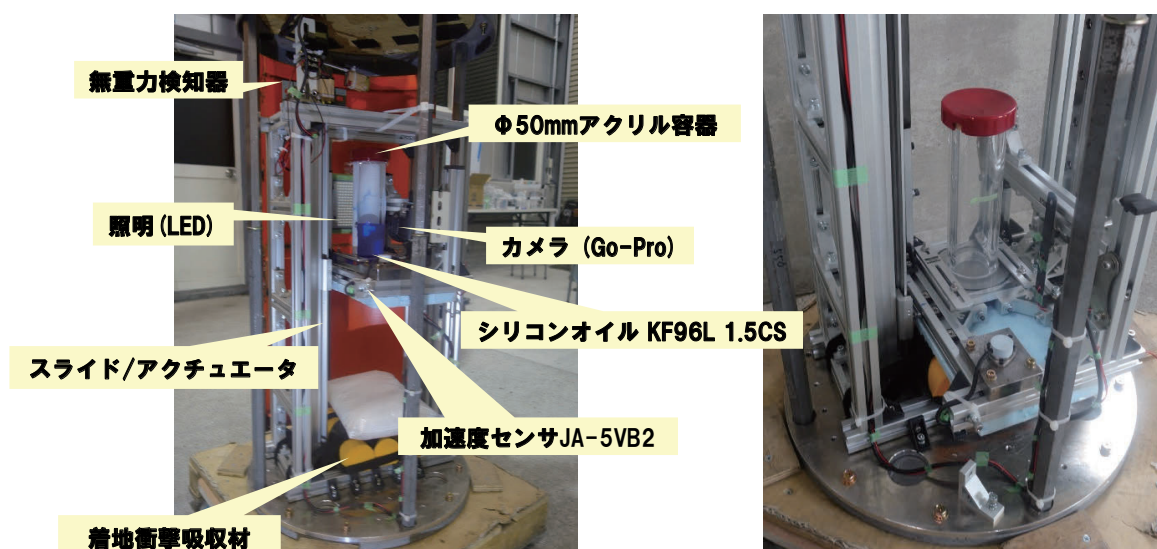


濡れ性駆動 (東大-JAXA)

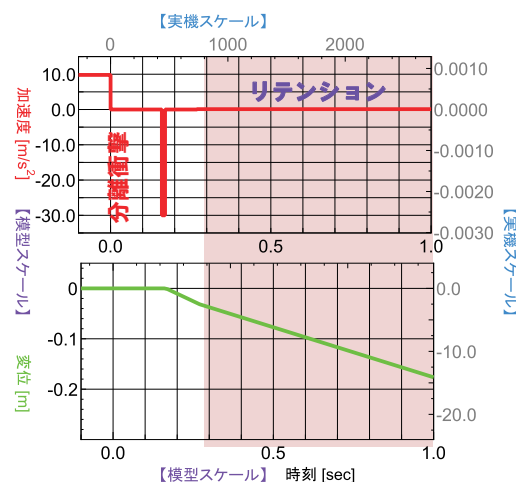
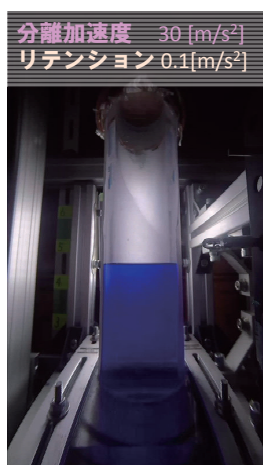
低加速度を加える手段



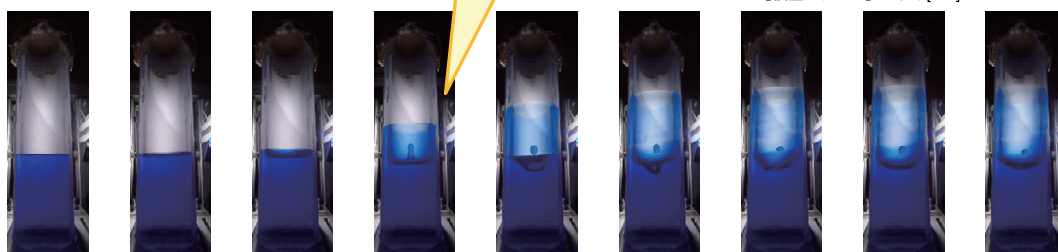
低加速度を加える手段



可視化結果



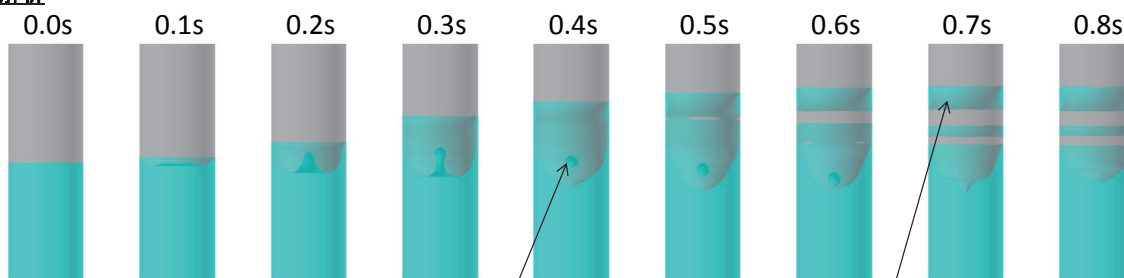
分離衝撃により
タンク壁面を昇る



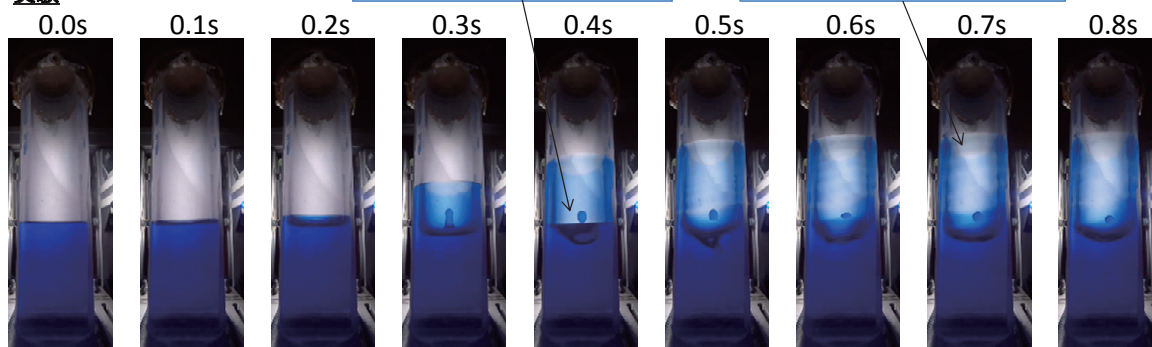
シミュレーション検証結果



解析



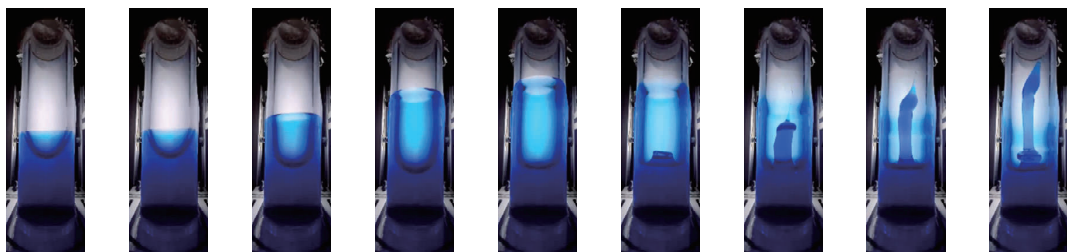
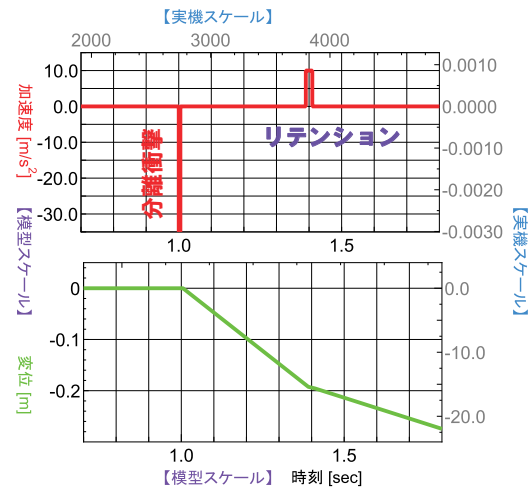
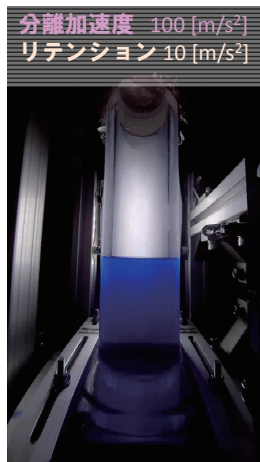
実験



解析と実験共に中心部に液滴

解析と実験で似た這い上がりを示す

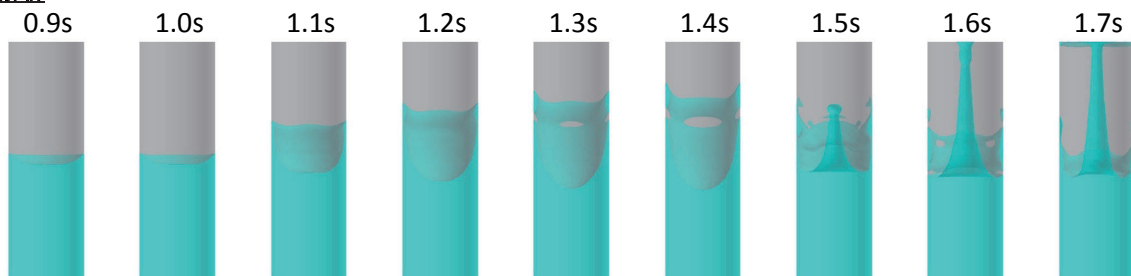
可視化結果



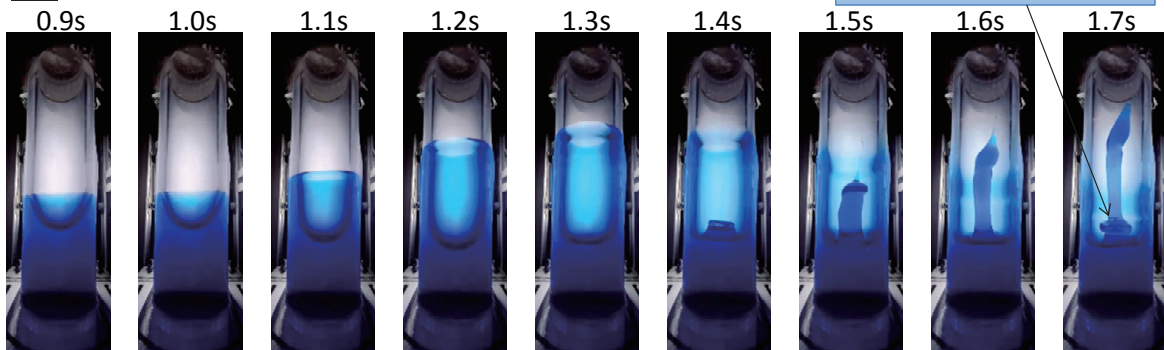
シミュレーション検証結果



解析



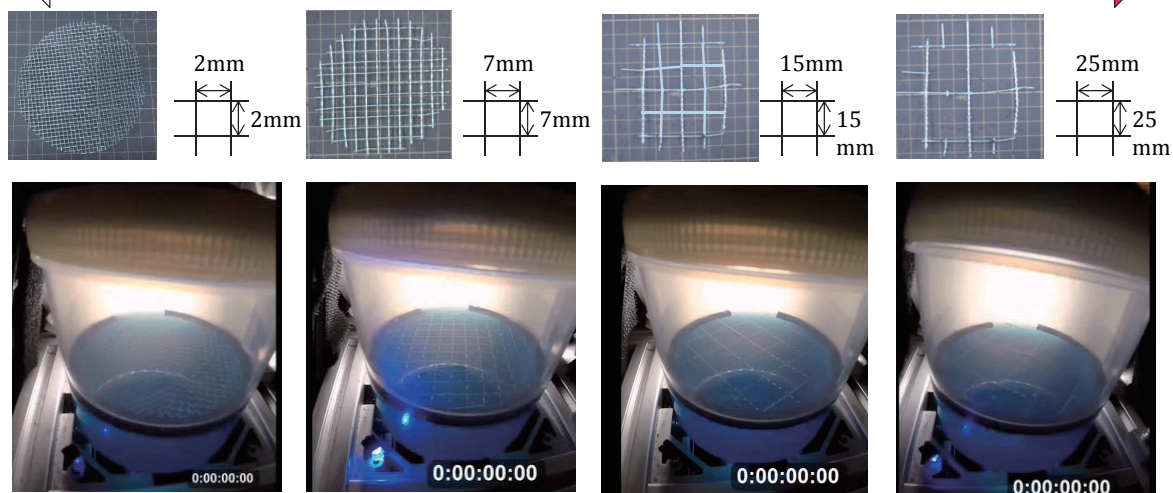
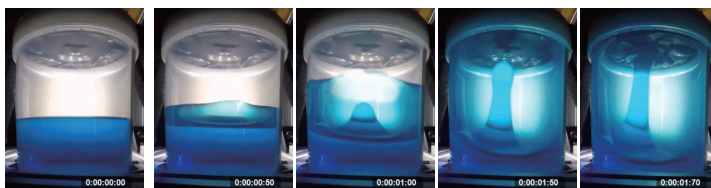
実験



デバイス検討



対策無しでは
液が容器上部へ移動するが...

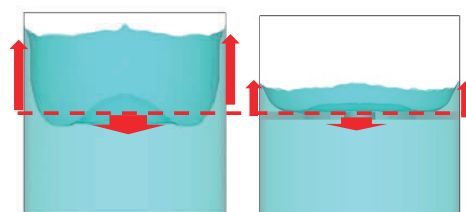


数値シミュレーションで再現



原理

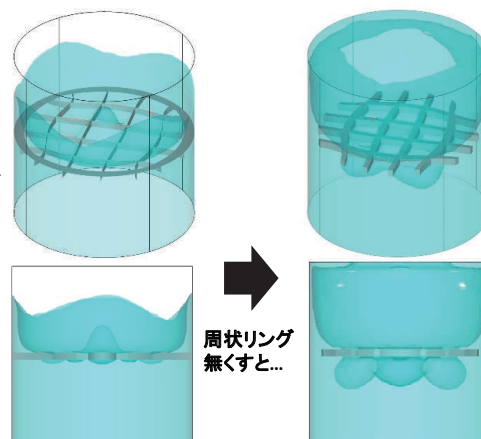
- ① 機軸上向き速度が加わった際、
濡れ性による壁面液膜が上昇する
- ② 液膜が上部に移動した分、
容器中央の液体積が減り、液面が落ち込む
- ③ 液面が表面張力によって網に引っ掛かる

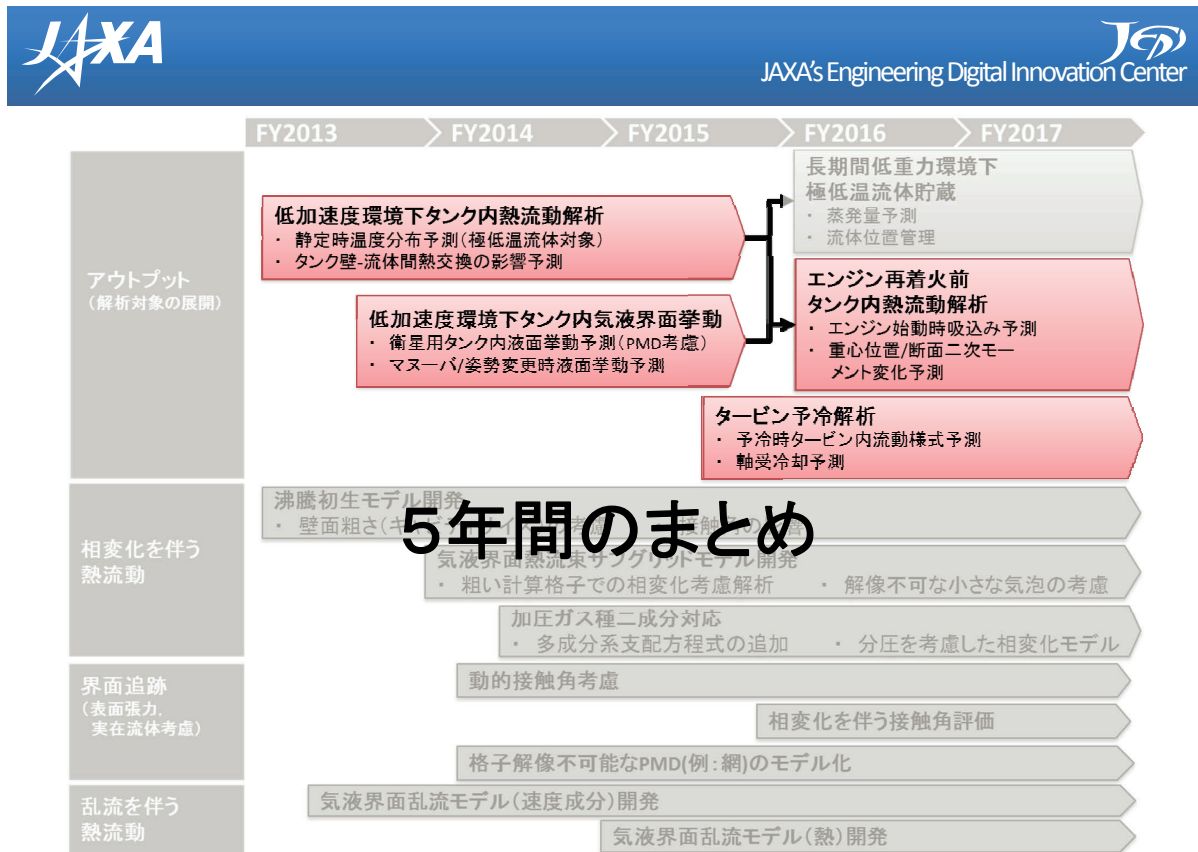


液面保持の有効性

「容器上部に漏れる液体体積」と「液面低下を抑える面積」の
割合で液体保持可否が決まる

本実験デバイスでは網を囲む周状のリングが壁面の液の漏れ量を
調整する効果がある。



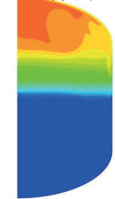


本研究会は高い成長度で終了を迎えられて良かった

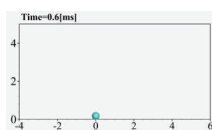


大学とメーカーとの間で意見や技術を活発に交換する事で、JAXA(第三研究ユニット)のツールと人材が成長できました。
研究会にご参加頂いた皆様のお陰で、JAXA(第三研究ユニット)として本講座に期待する成果をフルに得る事ができました。

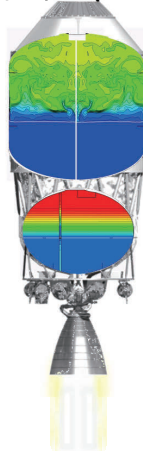
講座開始(FY2013)
タンク用の計算格子を作る事さえ
手探り状況だった...



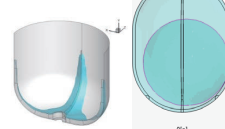
泡の成長計算だった...



講座終了(FY2017)



④ 衛星タンク推進薬挙動解析



⑤ 推進薬タンク内熱流動解析

⑥ ターボポンプ軸受熱流動解析

