

東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

東京大学JAXA社会連携講座シンポジウム(2012/09/27 東京)

宇宙輸送機の推進薬挙動予測に関する研究

東京大学 航空宇宙工学専攻 姫野 武洋
JAXA/JEDI 谷 直樹
JAXA/ISAS 野中 聡
JAXA/輸送本部 杵淵 紀世志

UT JET PROPULSION LABORATORY

液体ロケットに関する自由表面流

自由表面流

とても身近ではあるが、
形を説明したり予測するのはとても難しい。



STEP=000000

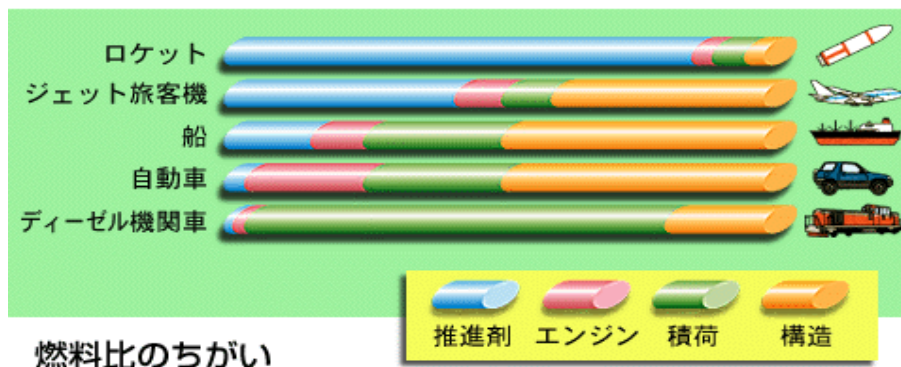


東京大学とJAXAは協力して、
航空宇宙推進機関内部の
自由表面流の熱流動を予測できる知見と技術の
獲得に努めている。



UT JET PROPULSION LABORATORY

ロケットが搭載している推進剤



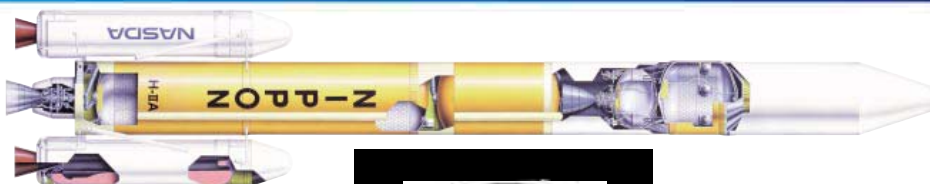
缶ビール 4.6%



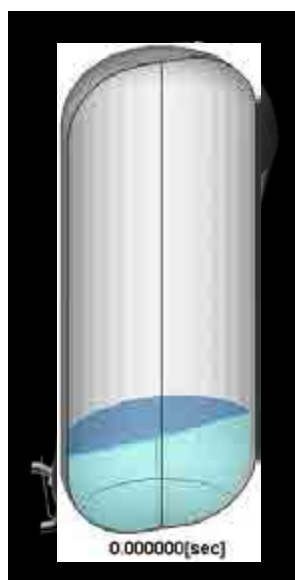
卵 11%



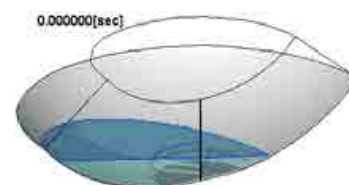
液体ロケットに関する自由表面流 (1/5) 推進薬タンクでのスロッシング



宇宙輸送機の
姿勢変化と推力変動に伴って
内部加速度は時間的に変化する。



スロッシングは
重心移動に伴う
推力ミスアライメント
を伴うため、
航法誘導上有害
意図せぬ
熱伝達促進を伴うため、
タンク圧制御上有害



(Himeno and Watanabe 2004)

重力支配の流れと 界面張力支配の流れ 流体管理



… 着眼点

宇宙開発利用の進展に伴い、宇宙輸送システムの推進機関や軌道上構造物の熱管理機器など、**地上とは異なる加速度環境**で液体を利用する場面が増えつつある。

これらの流体機器を構成する液体貯蔵容器や蒸発・凝縮器の内部は、気液両相の共存系となるが、推力や姿勢変動を伴う宇宙機内部の動的加速度環境や、比重差による液体駆動を期待できない軌道上の低重力環境では、液体を望ましい位置に保持し、思い通りに搬送するという、**流体管理 (fluid management)** が非常に難しくなる。

今後、軌道上で運用される流体機器の信頼性を向上させ、同時に開発コストと運用リスクを低減するためには、その設計・計画段階から作動流体の挙動を適切に予測する技術が求められる。特に、貯蔵容器や流路内部の自由表面流を考える場合、液体の重心移動などの動力学特性に注目するだけでなく、伝熱や相変化までも考慮し、共存する気体との熱交換に起因する熱流動特性を把握することが重要である。

5



東京大学
The University of Tokyo

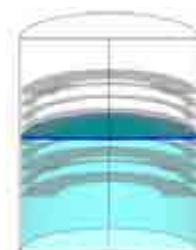


JAXA

UT-JAXA Collaboration



液体挙動予測
圧力変化予測
沸騰現象予測



UT JET PROPULSION LABORATORY

Sloshing Prediction in a Model Tank with Baffles

RSR : Sub-orbital Reusable Sounding Rocket



As the evolutionary program of **RVT**,
JAXA/ISAS worked out
the conceptual design of reusable launch vehicle for sounding missions.



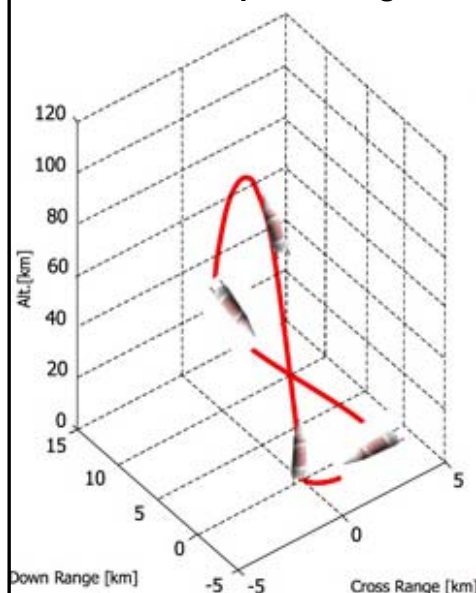
RVT : Reusable Vehicle Testing
VTVL flight demonstrator

Sloshing Prediction in a Model Tank with Baffles

RSR : Sub-orbital Reusable Sounding Rocket



As the evolutionary program of **RVT**,
JAXA/ISAS worked out
the conceptual design of reusable launch vehicle for sounding missions.



Reusable sub-orbital rocket vehicle was designed
for **upper-air observation** around 120 km height,

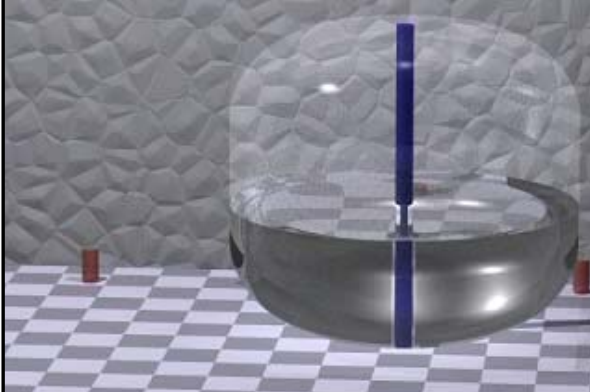
for **microgravity experiments**
during its weightless flight for 180 sec and

as a **test bed** to clarify
the actual costs and reliability
of the reusable launch systems.

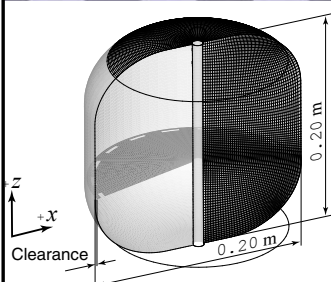
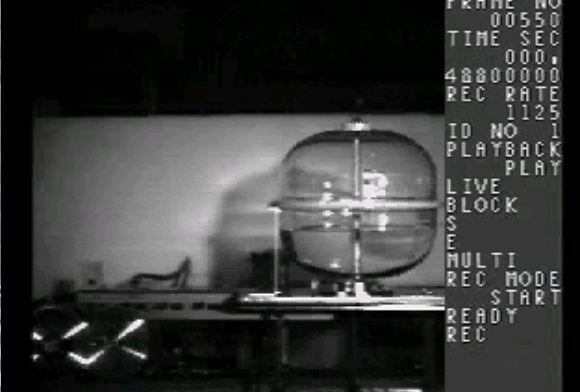
液体推進薬のタンクスロッシング 実験と数値解析によるアプローチ



計算: (Himeno, 2003)



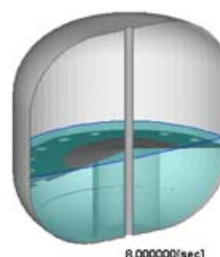
実験: (Himeno, Nonaka and Naruo, 2002)



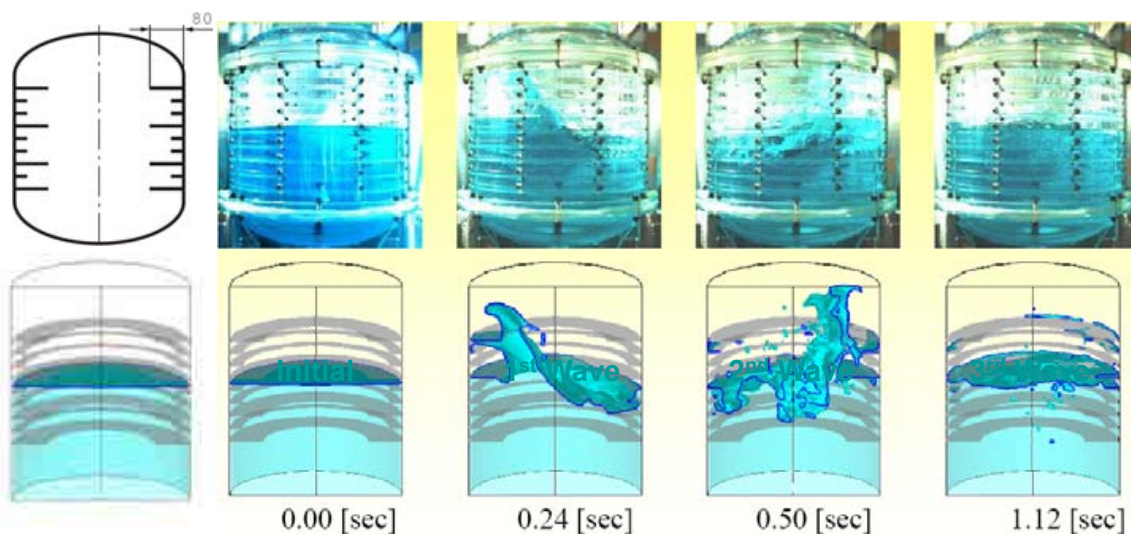
Ref. AIAA 2005-3931 (Himeno)

- 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

CIP-LSM (東大コード) で計算



液体推進薬のタンクスロッシング 実験と数値解析によるアプローチ



Ref. AIAA 2007-5557 (Himeno & Watanabe)

AIAA Liquid Propulsion Best Paper Award, 2008

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

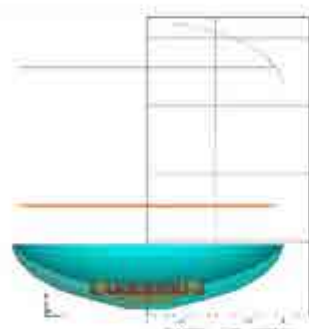
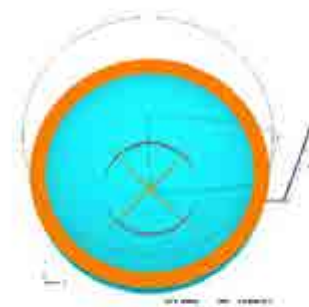


Sloshing caused by slight disturbance in lateral direction under low-g condition during coasting flight of upper stage.

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・
バップル配置最適化検討に使用



UT JET PROPULSION LABORATORY



CIP-LSM

流体解法 : **Thermo CIP-CUP (TCUP)**

界面捕獲 : **MARS + LSM**

相変化 :

UT JET PROPULSION LABORATORY



東京大学
The University of Tokyo



CIP-LSM

流体解法 : Thermo CIP-CUP (TCUP)


界面捕獲 : **MARS + LSM**

相変化 :

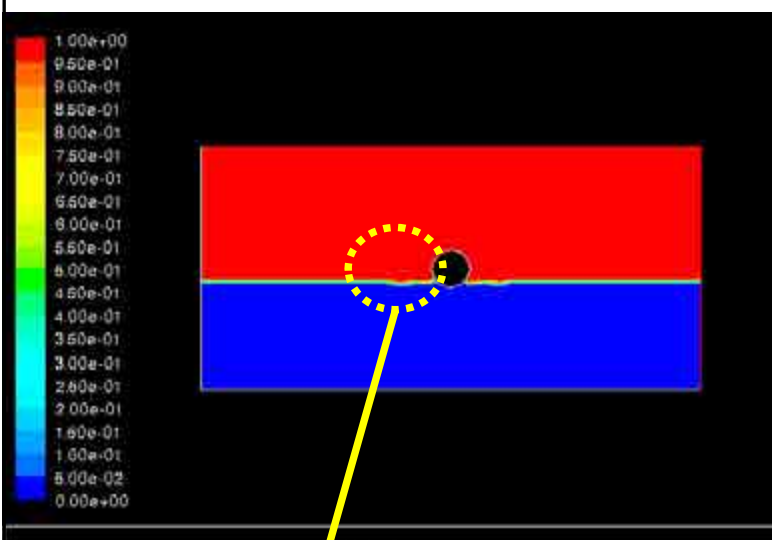


UT JET PROPULSION LABORATORY

界面捕獲 : Original-VOF

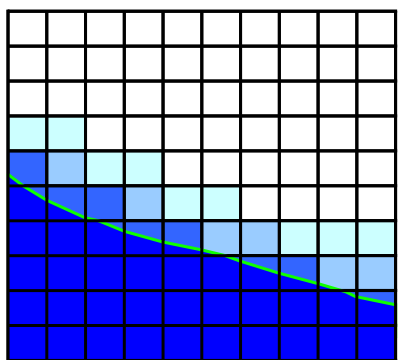


VOF関数の数値的散逸



Contours of Volume fraction (air) (Time=1.0000e-01)
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, vof, lam, unsteady) Jul 15, 2005

セル内部の
液体の偏在が
考慮されていない。



界面勾配を考慮すべき
→ **PLIC-VOF**

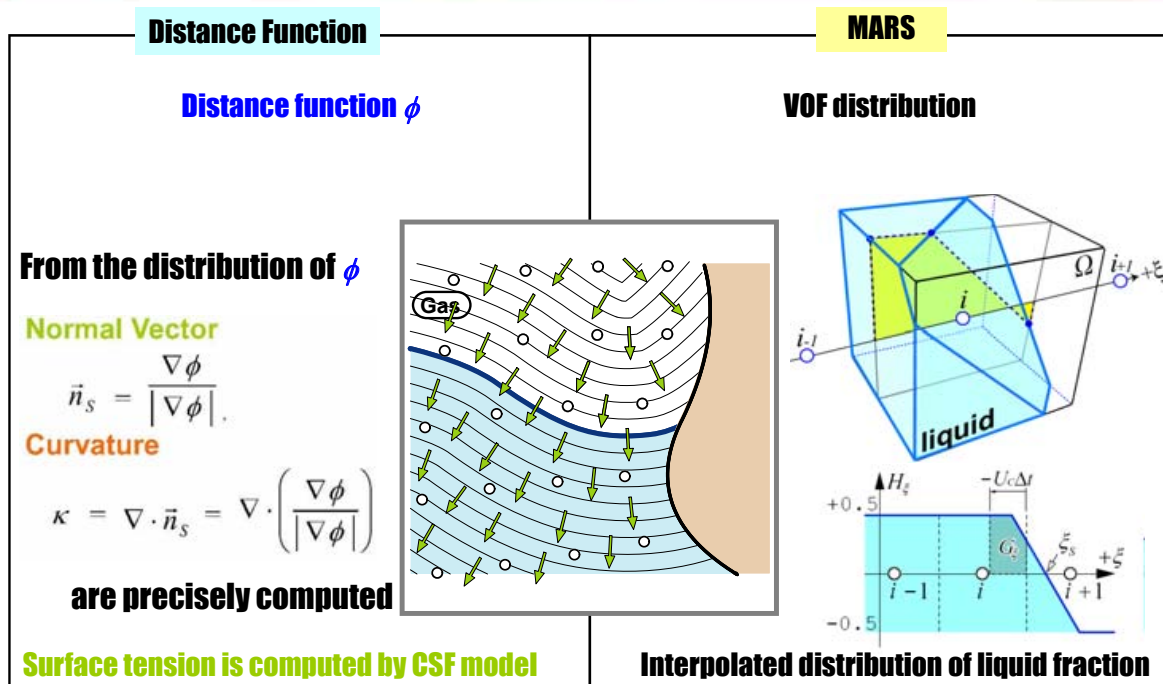
VOFの数値的散逸

気液の非物理的かつ不可逆な混合

UT JET PROPULSION LABORATORY

界面捕獲 : MARS + LSM

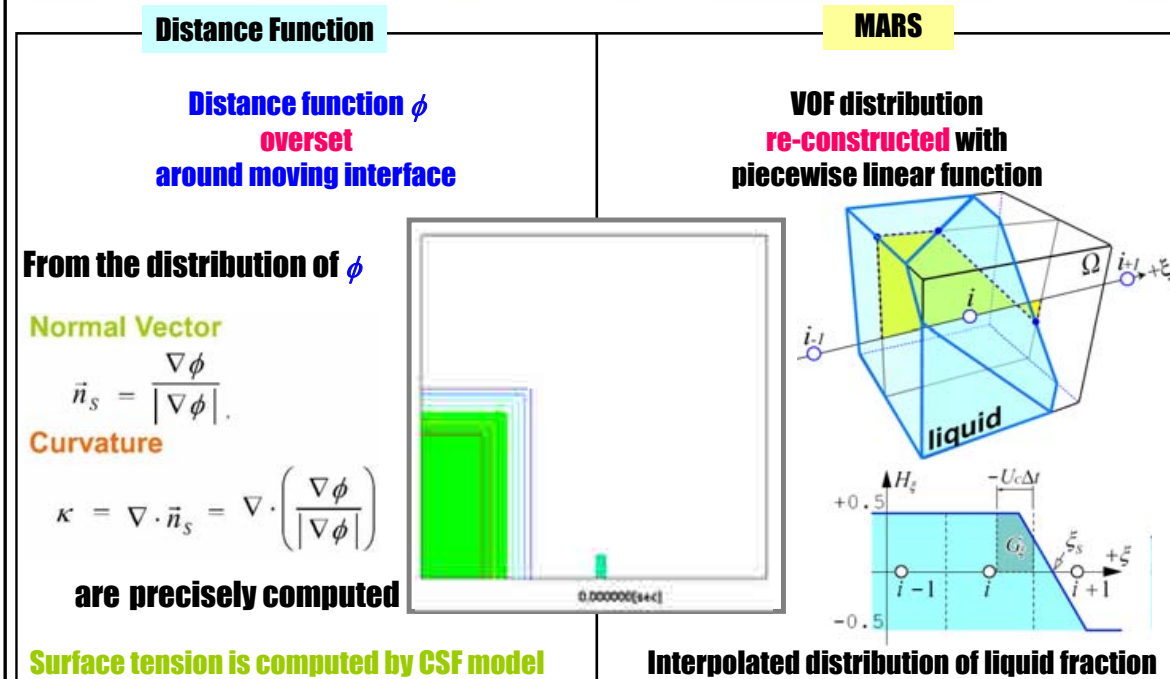
(Himeno, 2003)



UT JET PROPULSION LABORATORY

界面捕獲 : MARS + LSM

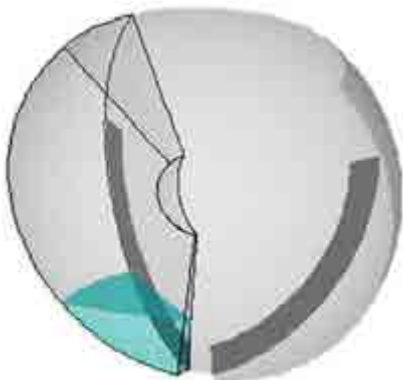
(Himeno, 2003)



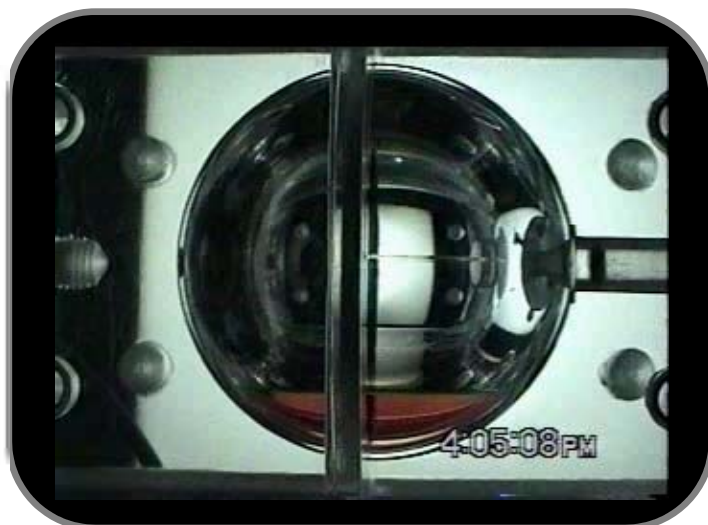
UT JET PROPULSION LABORATORY

Simulation for Surface Tension Devices

Future Works on Satellite Tanks



数値計算 (姫野)



落下塔実験 (IHI・今井ら)

We are now conducting the simulation
to design surface tension devices for satellite tanks.

UT JET PROPULSION LABORATORY



東京大学
The University of Tokyo



JAXA



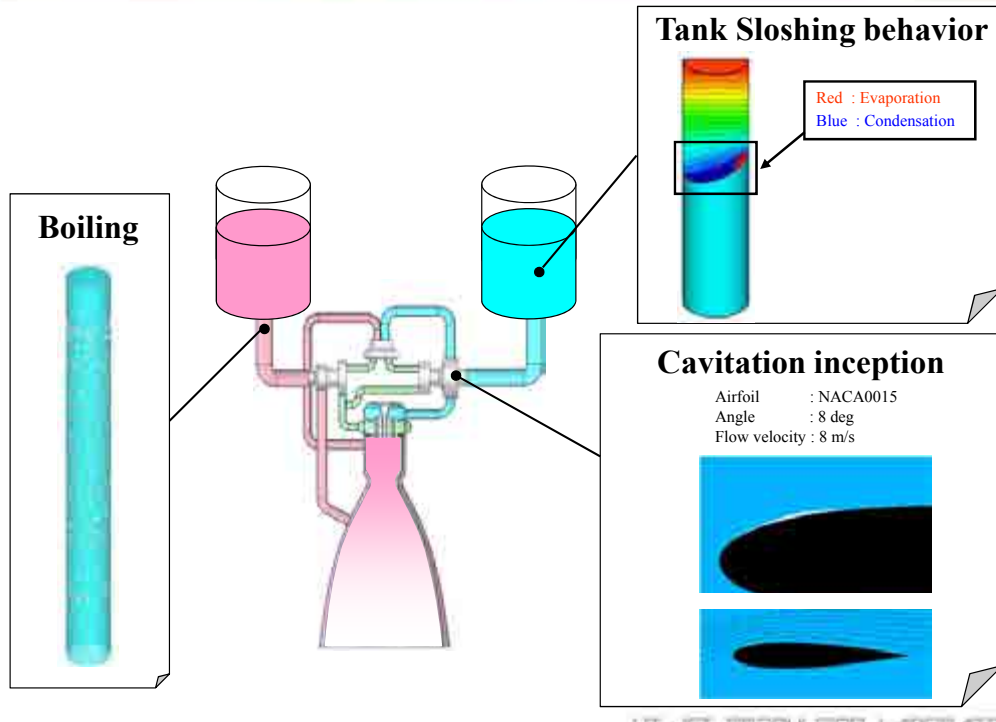
UT-JAXA Collaboration



液体挙動予測
圧力変化予測
沸騰現象予測

UT JET PROPULSION LABORATORY

液体ロケットに関する自由表面流 相変化を伴う熱流体管理・予測



液体ロケットに関する自由表面流 微小重力・長秒時飛行の実現



ロングコースト、エンジン再々着火を実現するための上段推進系の技術開発

ベント水素ガスによる推薬静定(リテンション)

- ✓従来はヒドラジンガスジェット推力のGによりタンク底部に推薬を静定
- ✓高度化ではロングコースト中、LH2蒸発ガス噴射の推力を活用(ガスジェット推薬の節約)

LOX予冷量の削減

- ✓機外へ投棄する予冷用推薬量の削減
- ✓長時間コースト中の小流量予冷の適用(従来は大流量)

低液位でのエンジン着火

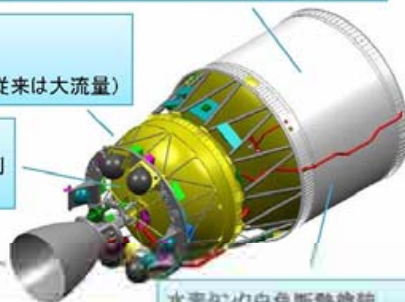
- ✓再々着火時の低液位でのスロッシング抑制(ターボポンプガス吸込みリスクの低減)

エンジン再々着火およびスロットリング

- ✓加圧制御・液温制御

解析技術の高度化

- ✓予冷・蒸発・液温・スロッシング解析の高度化(微小G等により地上試験が困難な事象に対する予測・検証)



水素タンク白色断熱塗装
＜液体水素の蒸発量低減＞

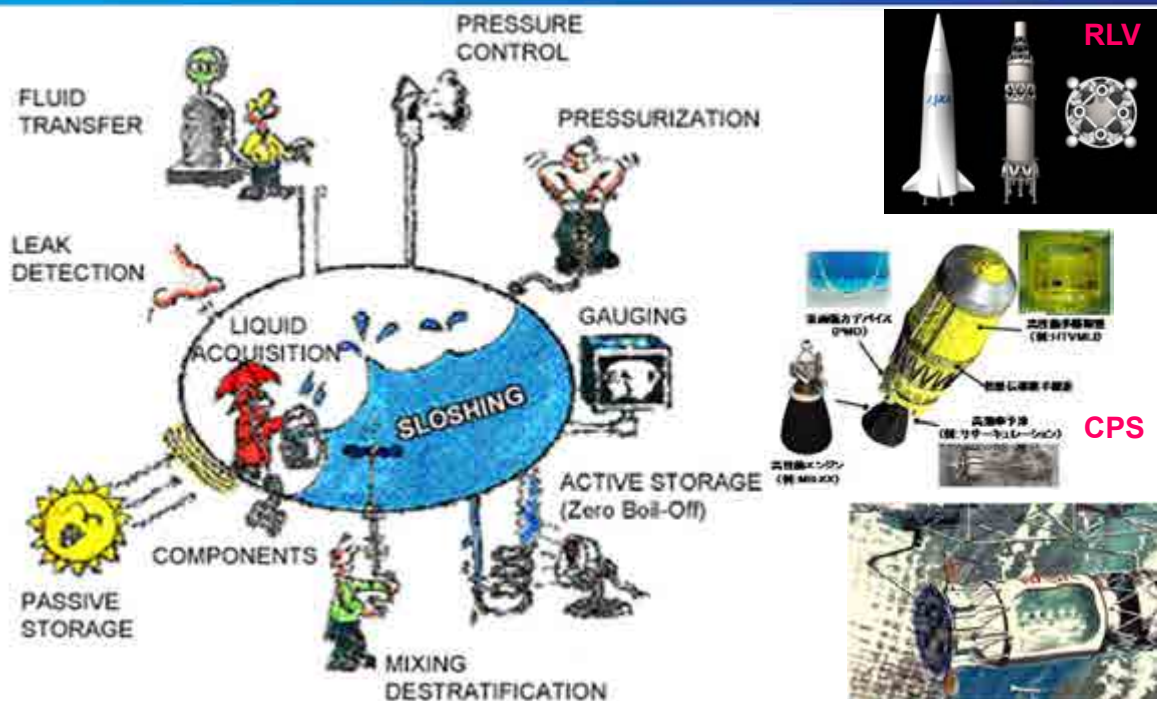
サーマルロール
(太陽光入熱均一化)

高度化H-IIA

無効推進薬の最小化
低重力下での液体捕獲
がカギ



液体ロケットに関する自由表面流 将来宇宙輸送インフラのための課題



AIAA-2005-1148 (David J. Chato)

Re-fuel on orbit

液体ロケットに関する自由表面流 将来宇宙輸送インフラのための課題

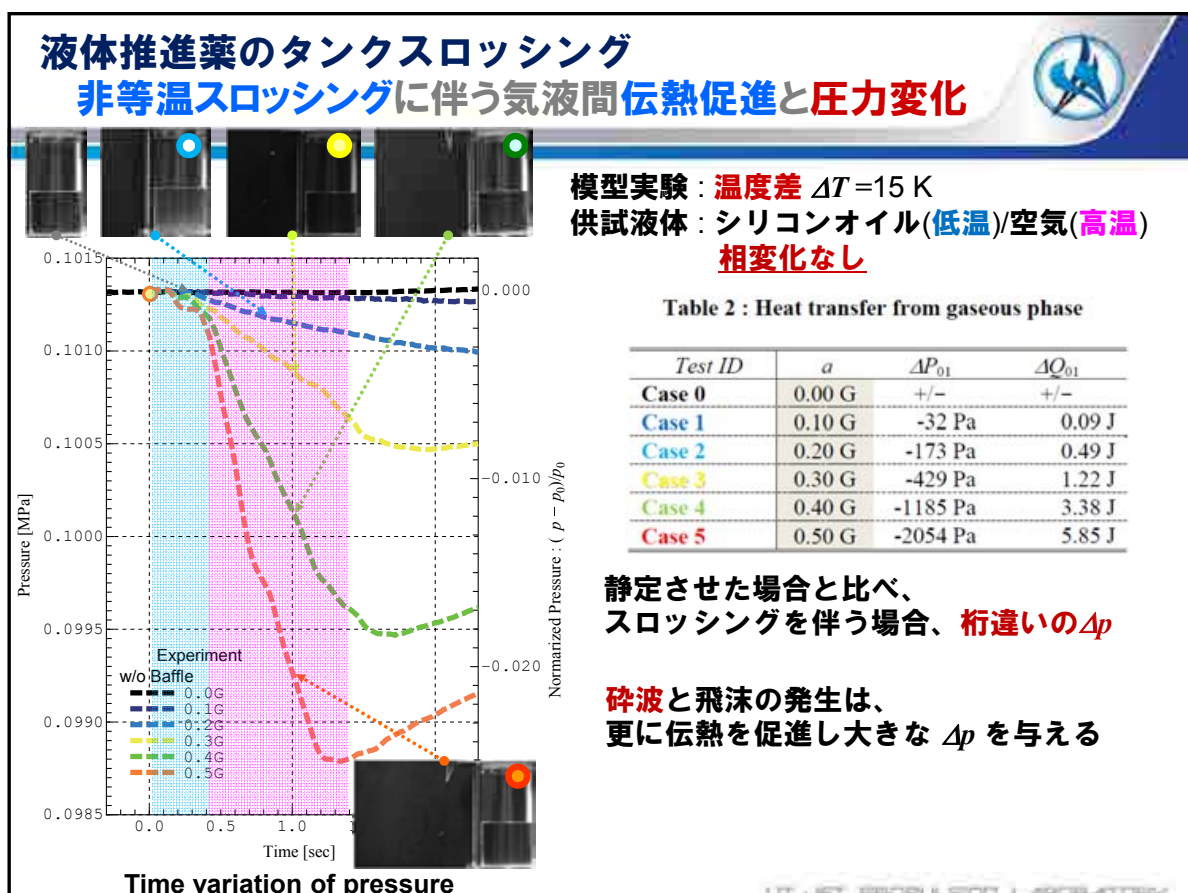
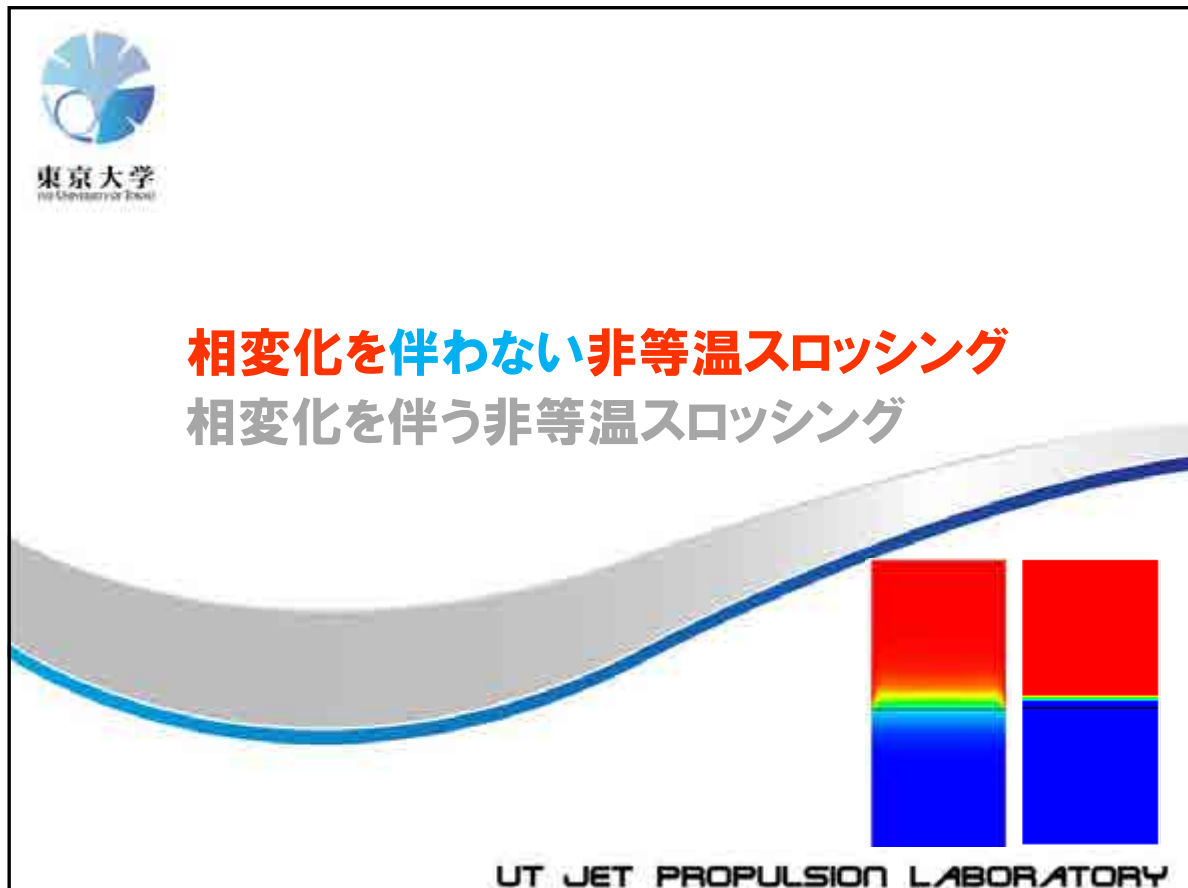


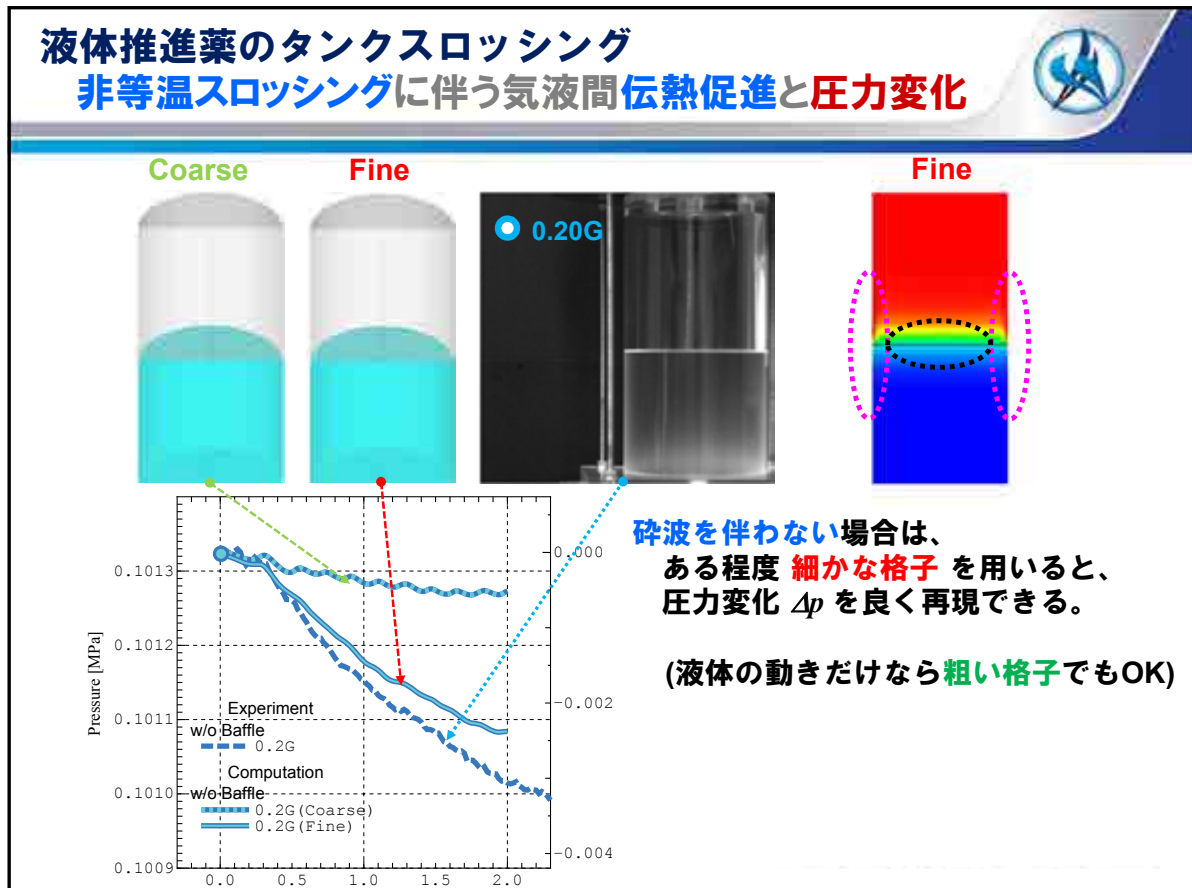
上段推進系(推進マネジメント) 技術ロードマップ

宇宙輸送ミッション マイルストーン	H-IIA高度化 	次期基幹ロケット(H-X) CPS Bk 1 	CPS Bk 2 
目的地	静止軌道	静止軌道・月周辺	小惑星・火星
ミッション時間	～5時間	～1週間	～1年
蒸発量抑制	白色断熱塗装 タンク熱流体解析(簡易モデル)	MLI断熱(展開機構等開発) タンク熱流体解析(詳細モデル) 軌道上入熱解析	極低温冷凍機 バントガスシールド
微小G下での 液体推進制御	バントリテンション ブルーム希薄流解析 スロッシング解析	PMD(バーン/メッシュ) 表面張力支配流解析	推進コンディショニング
エンジン予冷	トリクル予冷 アイドル予冷 予冷解析(簡易モデル)	ブリード予冷効率化 予冷解析(詳細モデル)	リサーキュレーション
タンク与圧 エンジン高機能化	極低温He与圧 エンジンスロットリング	高Ispアイドル燃焼	タッポフ与圧 アイドル/スロットル立上げ

JAXA 杵淵 (2012[宇科連発表予定])

U.S. JET PROPULSION LABORATORY







東京大学
The University of Tokyo



JAXA

UT-JAXA Collaboration



相変化を伴わない非等温スロッシング 相変化を伴う非等温スロッシング



UT JET PROPULSION LABORATORY

液体推進薬のタンクスロッシング 極低温スロッシングに伴う気液間相変化促進と圧力変化



LN₂ および LH₂ を用いた実験を実施
@ 能代多目的実験場(2011)

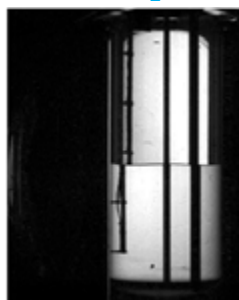
クライオスタットをローラースライダに載せ、
電動加振機で揺さぶる



液体推進薬のタンクスロッシング 極低温スロッシングに伴う気液間相変化促進と圧力変化



異種加圧 (LN₂/GHe)



見た目は
シリコンオイルの場合
(不揮発性=相変化なし)
と変わらない

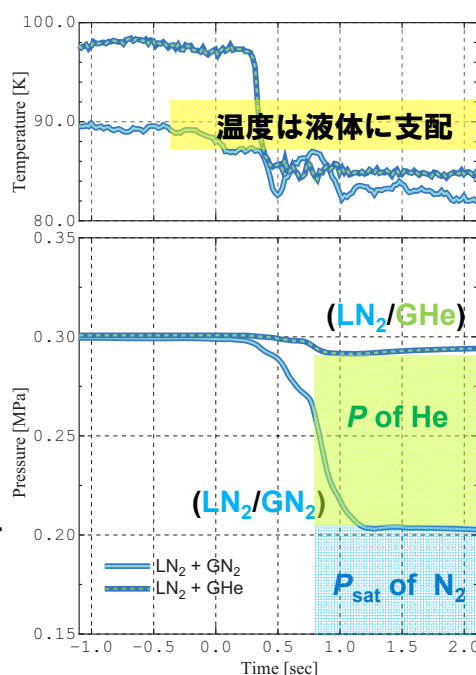
同種加圧 (LN₂/GN₂)





霧の発生 !!

同時に、タンク圧が
0.7 秒間に 0.1 MPa 急降下

温度は10%低下なのに
圧力は30%以上低下
凝縮が発生した

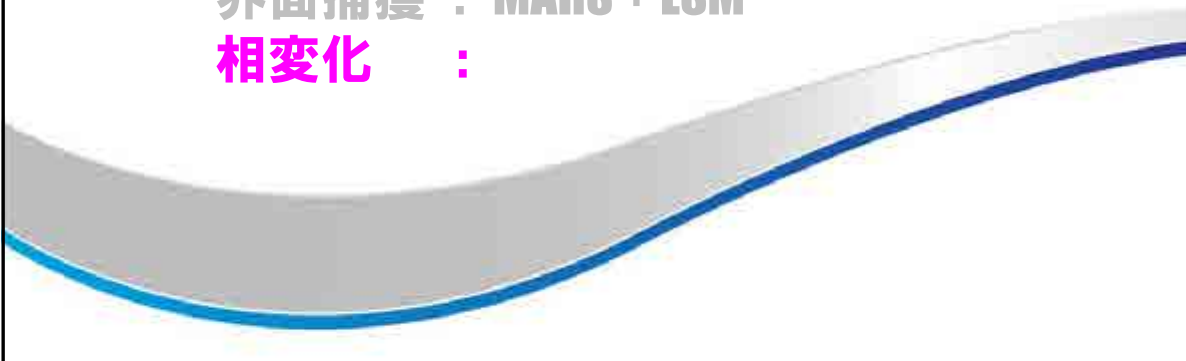


東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO


CIP-LSM

流体解法 : Thermo CIP-CUP (TCUP)
 界面捕獲 : MARS + LSM
 相変化 :



UT JET PROPULSION LABORATORY

相変化 : CIP-LSM の特長



：高精度な界面捕獲の発展性：相変化モデルとの親和性

CIP-LSM (CIP based Level Set method and MARS)

MARS(PLIC-VOF)で移流

↙

level-set 関数を用い
液体の形状を把握

→

VOFを基に
level-set 関数を再生成

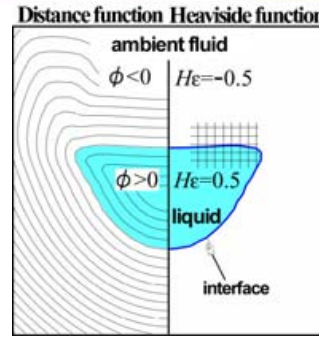
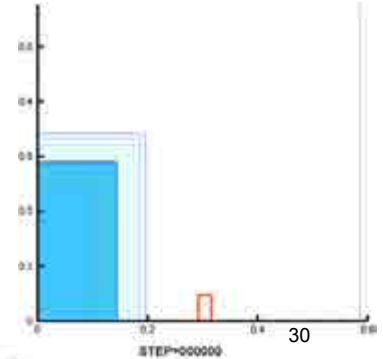
↘

利点

- ・ 移流時の液体の体積保存性が良い
⇒ 相変化による界面移動が
数値的な散逸なのか差別化する上で重要
- ・ 界面に数値的 (人工的) な厚みがない
⇒ 物性値や密度の不連続をシャープに取り扱える

※ 1 つ分のセル間で気液が切り替わる

Distance function Heaviside function

UT JET PROPULSION LABORATORY

相変化：支配方程式の記述 → 潜熱項の離散化モデル ：高精度な界面捕獲の発展性



- ・エネルギー式 (顕熱の式)

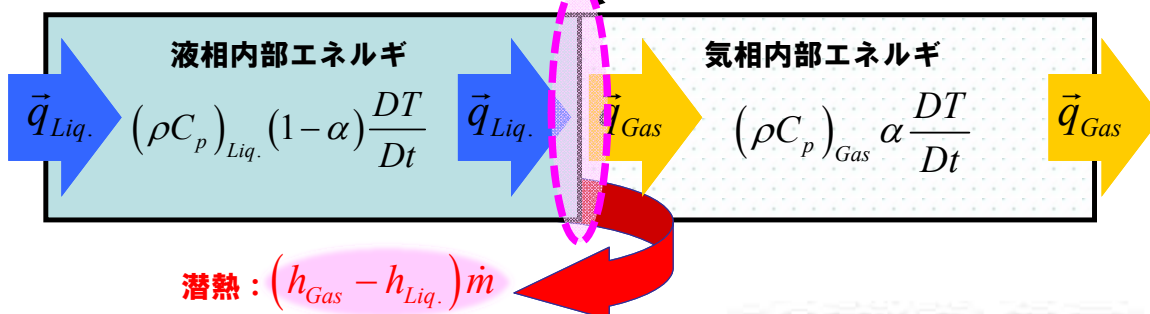
潜熱項

界面でのみ $\delta_S = 1$ となる

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{q} + \dot{Q} - (h_{Gas} - h_{Liq.}) \dot{m} \delta_S$$

界面を挟んで成立する
顕熱と潜熱のジャンプ条件

$$\vec{q}_{Gas} - \vec{q}_{Liq} = \dot{m} (h_{Gas} - h_{Liq.}) \vec{n}$$



東京大学
The University of Tokyo



液体挙動予測
圧力変化予測
沸騰現象予測



UT JET PROPULSION LABORATORY

液体推進薬の配管内対流沸騰熱伝達予測へ向けて 相変化モデルの構築と自由表面流直接解析



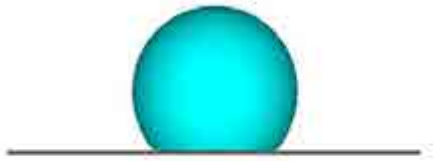
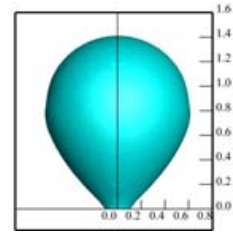
検証 : 沸騰離脱気泡 (CIP-LSM+相変化+界面張力+多次元+重力) 梅村 (2012)

Bubble Shape Prior to Departure

Exp.(Vijay K. Dhir : 2001)



Calc.



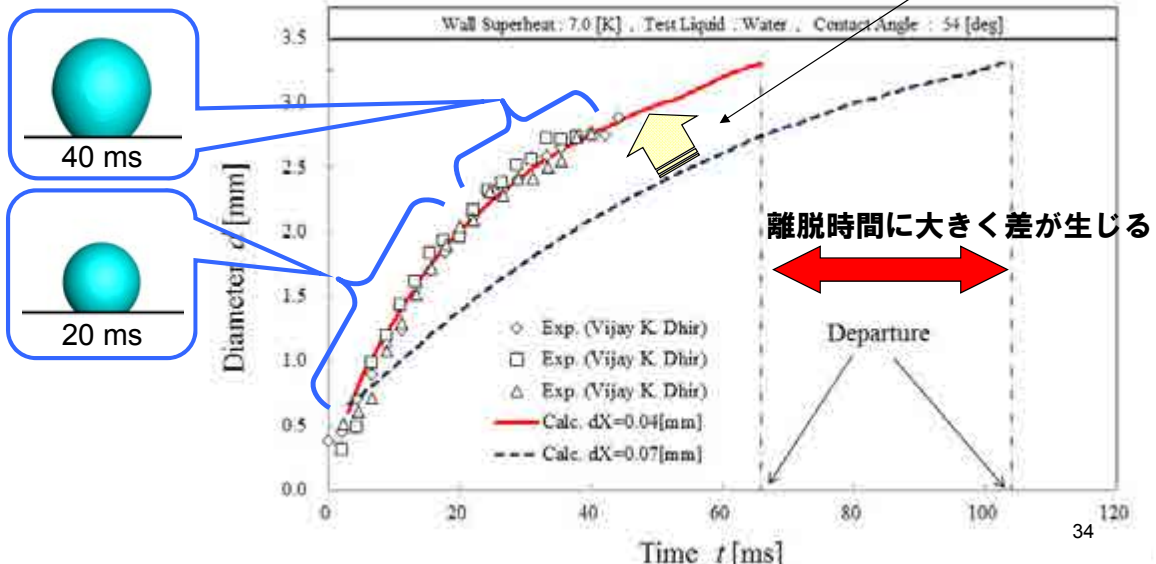
梅村・姫野 (2011)

液体推進薬の配管内対流沸騰熱伝達予測へ向けて 相変化モデルの構築と自由表面流直接解析



検証 : 沸騰離脱気泡 (CIP-LSM+相変化+界面張力+多次元+重力) 梅村 (2012)

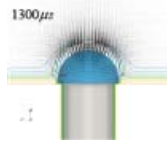
ステファン問題と同様に格子の幅を小さくするに従い実験結果に漸近する
浮力によって気泡が上昇を開始すると成長速度が遅くなる



液体推進薬の配管内沸騰熱伝達 沸騰気泡成長モデルの構築による大スケール解析



沸騰現象解明を目的とした解析

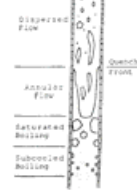


解析対象のスケール : 数 μ m~数mm

トリクル予冷を考える際に必要な解析

蒸発や表面張力が支配的であり
泡が合体しながら流れていく様子

解析対象のスケール : 数cm~数m

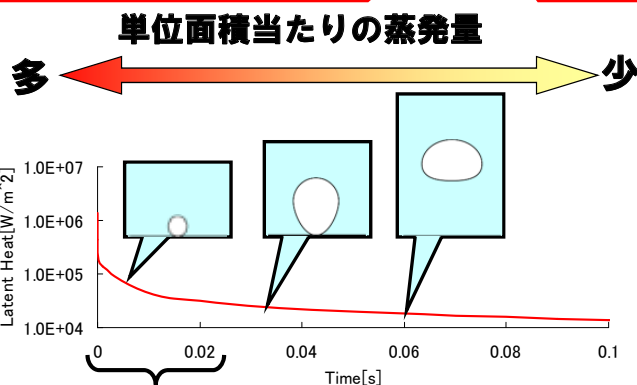
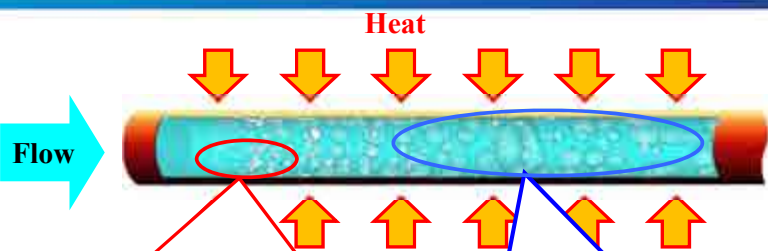


計算領域が数cmオーダーの沸騰流解析に適する相変化モデル構築が必要

微小重力環境における少質量流量での沸騰流解析手法の構築を目指す



液体推進薬の配管内沸騰熱伝達 沸騰気泡成長モデルの構築による大スケール解析



高格子解像度が必要

泡の動き・合体調査のため
計算領域を広く取りたい

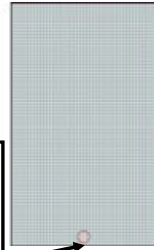
壁面上の気泡生成・
気泡成長をモデル化
することで計算負荷を
軽減させる！！

液体推進薬の配管内沸騰熱伝達 沸騰気泡成長モデルの構築による大スケール解析



流体 水
最小格子幅 0.4 mm

キャビティサイズ 0.03 mm
接触角 54.0 deg
壁面過熱度 7.0 °C



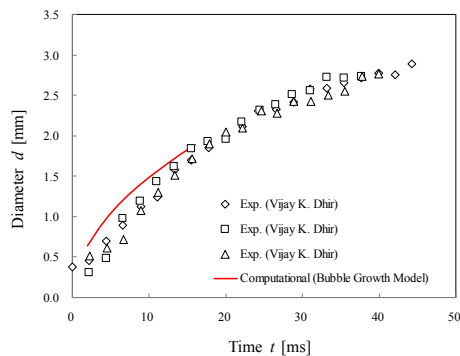
格子幅 10倍

実験と良い一致を見せた
気泡離脱の解析



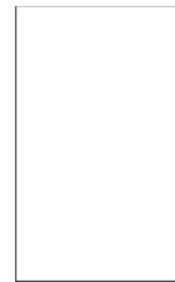
最小格子幅
0.04 mm

気泡発生・成長モデル



CIP-LSM

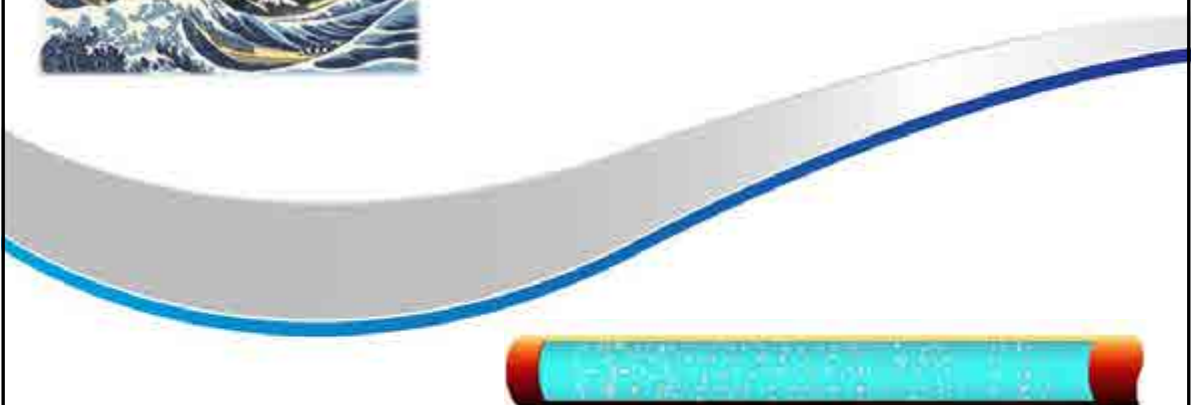
+
気泡発生・成長モデル



東京大学
The University of Tokyo

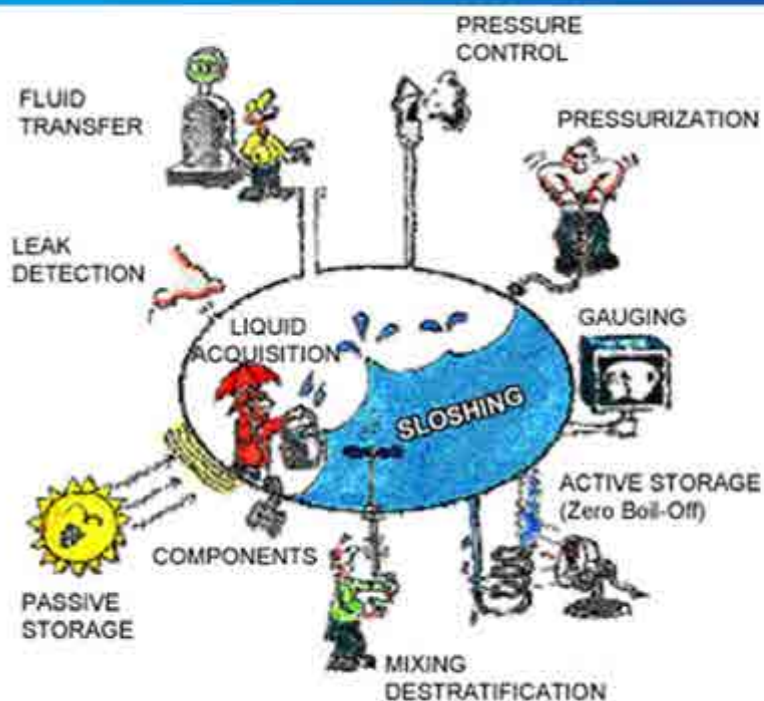


まとめ



UT JET PROPULSION LABORATORY

液体ロケットに関する自由表面流 将来宇宙輸送インフラのための課題



RLV



Re-fuel on orbit

AIAA-2005-1148 (David J. Chato)

まとめ



界面追跡に**MARS**を採用し、形状捕捉に**LSM**を援用した自由表面流解析手法として、界面厚みを排除した**CIP-LSM**を提案した。

界面を挟む熱流束のジャンプ条件に基づきスタッガード位置に集中した**相変化モデル**を考案した。

三次元物体適合格子を用いて、様々な加速度環境に置かれた自由表面流を、相変化と表面張力を考慮して模擬できる可能性を示した。

微粒化など格子スケールと同等の現象を適切に模擬できるか、さらに微小スケールの現象をどのようにモデル化できるかが今後の課題。

ベンチマークとしての実験データはますます重要。

過去の開発で蓄積された試験のトレース = **温故知新**、
クライテリア理解の深化と再構築 = **世代間継承**
が重要。次期社会連携講座での活動。

