UT-JAXA Symposium
28-29 October, 2010

推進薬の高圧噴射と微粒化に関連した熱流動現象

姫野 武洋, 井上 智博
宮下 陽輔, 渡辺 紀徳
東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻
寺島 洋史, 根岸 秀世
宇宙航空研究開発機構 情報・計算工学センター

推進薬の高圧噴射・微粒化
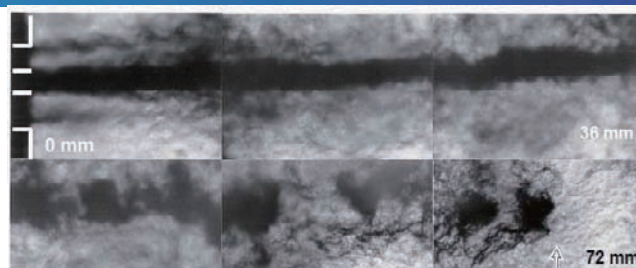
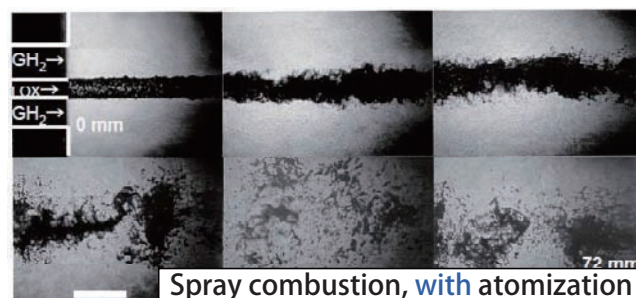*Supercritical Pressure*
- 1st stage booster engines
- rated operation

Subcritical Pressure
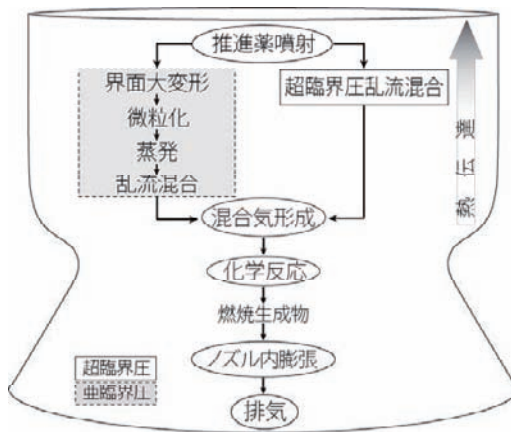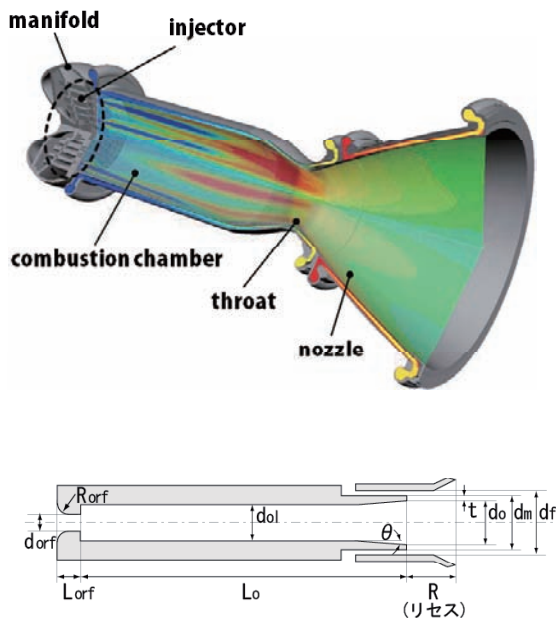- upper stage engines
- Off-design operation
  (deep throttling)

Turbulent diffusion combustion, w/o atomization
LOX/GH2 supercritical pressure (10 MPa)

Spray combustion, with atomization
LOX/GH2 subcritical pressure (1.5 MPa)
Mayer and Tamura 1996

推力室構成と現象フロー

manifold
injector
combustion chamber
throat
nozzle

推進薬噴射
超臨界圧乱流混合
界面大変形
微粒化
蒸発
乱流混合
混合気形成
化学反応
燃焼生成物
ノズル内膨張
排気
超臨界圧
亜臨界圧

R_{orf}
d_{orf}
L_{orf}
L_o
d_{ol}
θ
t d_o d_m d_f
R
（リセス）

噴射器周りの現象

超臨界圧噴射

JPP Vol12 No6 (1996)

噴射　　　　　　　乱流拡散燃焼

保炎　　　乱流混合　　　　　　燃焼

移流　拡散（熱,物質,運動量）　化学反応

亜臨界圧噴射

JPP Vol12 No6 (1996)

噴射　　　　　　　噴霧燃焼

保炎　　微粒化　　　　　蒸発　　　　混合　　　　燃焼

一次分裂　二次分裂　　　熱伝達　熱伝導　拡散（熱,物質,運動量）　化学反応

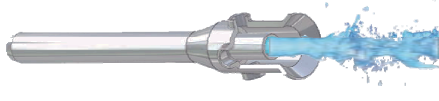液柱分裂　液糸分裂

液滴分裂　液滴衝突

高圧噴射・微粒化Gに関連した諸問題

・従来のエレメント設計においては、噴射速度比や水素噴射温度の下限値に、経験的な設計クライテリアを用いることが多かった。しかし、<u>クライテリアの推奨値は、必ずしも物理的根拠に基づいて算出されたものではなく、適応範囲も明確ではない</u>。

・<u>水流し試験結果と実機燃焼試験結果との物理的相関は、完全には把握されておらず</u>、現状では、<u>これらの設計開発プロセスに出戻りのリスクが内在</u>している。

・今後は、不適合予防の観点から、開発に先立って、発生し得るリスクを可能な限り低減するとともに、より自由度の高い設計空間を獲得するために、これまで経験的に引用されてきたクライテリアの適応範囲を明確にすることが求められている。

・エレメント形状や噴射条件によって決まる推進薬の微粒化（亜臨界圧）および混合特性（超臨界圧）は、下流の混合気組成や燃焼特性と強い相関があり、ひいては推進性能に大きく影響する。

・噴射器近傍の熱流動現象に関する知見に基づいて、合理的なエレメント設計を行うことは、更なる高機能かつ高信頼性エンジンの実現を目指す上で極めて重要である。

・合理的にエレメントを設計する観点から、極低温推進薬の微粒化および混合に関して、実験に基づく基礎現象理解と、シミュレーション技術向上の双方に期待が寄せられている。
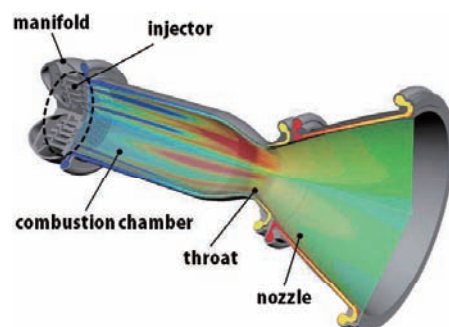
連携講座における高圧噴射・微粒化研究の目的

合理的なエレメント設計に資する知見の獲得という出口を見据えて、エンジン開発への貢献を目指す。
①数値解析技術を継続的に発展させることで、詳細に基礎現象を理解すること。
②下流の燃焼解析との融合や、噴射から燃焼まで一貫した数理モデルの構築といった、工学的に有益な知見へと統合すること。

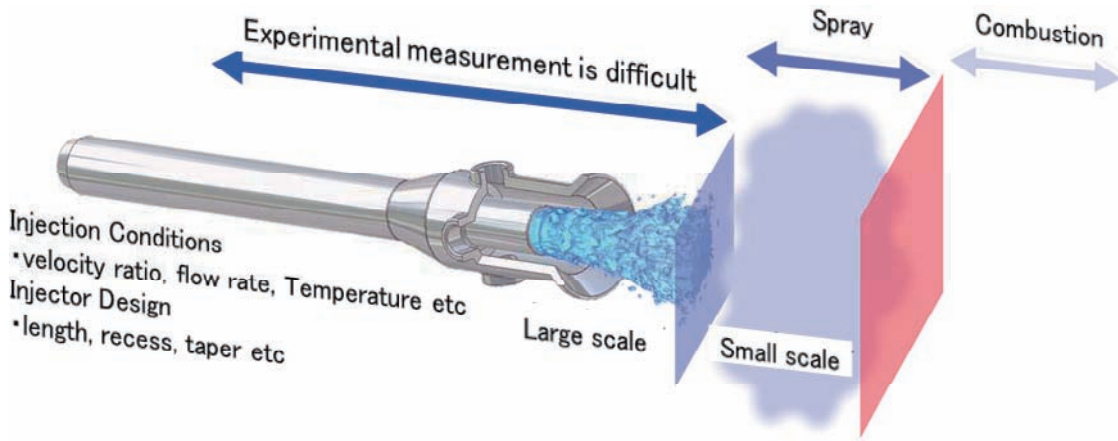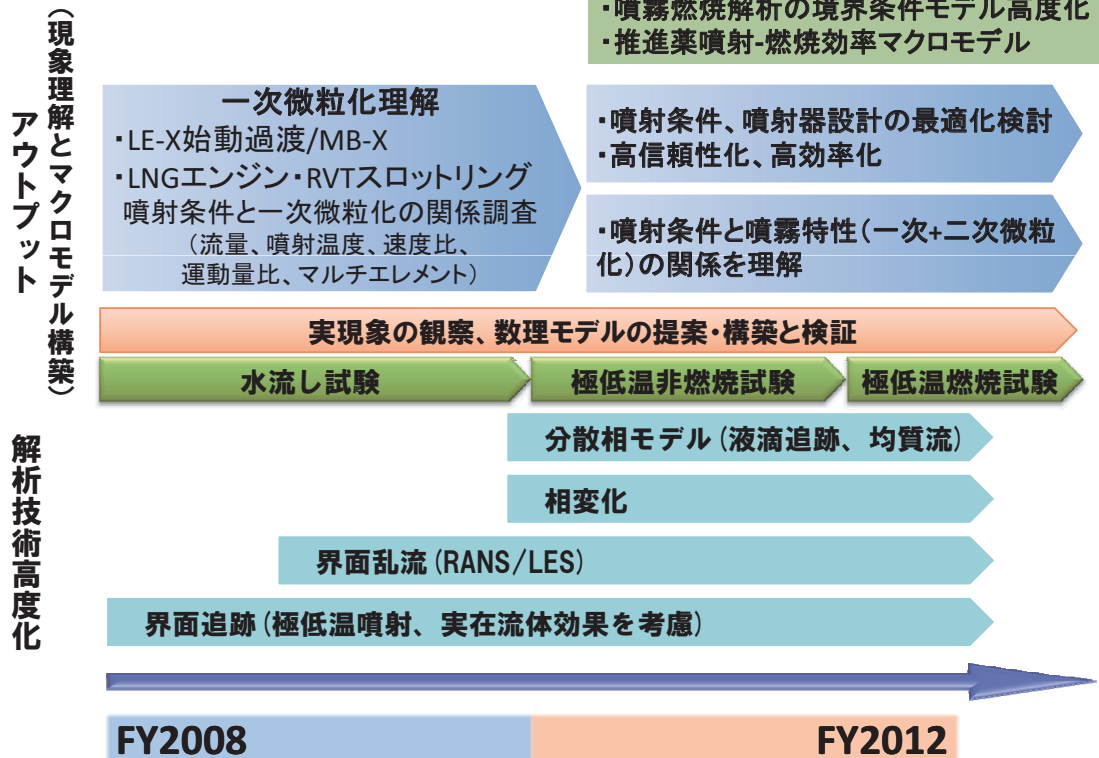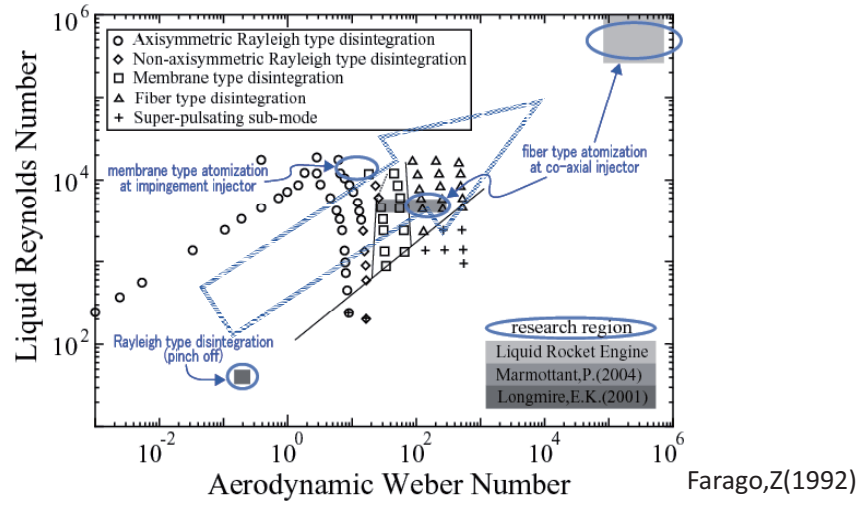単一エレメントスケール　　　　　　　　推力室スケール

ロケットエンジン内の微粒化研究の目的

Experimental measurement is difficult

Spray　Combustion

Injection Conditions
・velocity ratio, flow rate, Temperature etc
Injector Design
・length, recess, taper etc

Large scale　Small scale

☑噴霧特性に大きく影響する、噴射器の近傍における一次微粒化は、特に実験的計測が難しい。

☑液体ロケットエンジンの非設計点作動まで見据えて、噴射条件と噴射器近傍の微粒化の関連、およびその流体力学的機構を明らかにする。

☑噴射器内部あるいはその上流の影響までも考慮する。

研究課題のフローイメージ

（現象理解とマクロモデル構築）

アウトプット

・噴霧燃焼解析の境界条件モデル高度化
・推進薬噴射-燃焼効率マクロモデル

一次微粒化理解
・LE-X始動過渡/MB-X
・LNGエンジン・RVTスロットリング
噴射条件と一次微粒化の関係調査
（流量、噴射温度、速度比、
運動量比、マルチエレメント）

・噴射条件、噴射器設計の最適化検討
・高信頼性化、高効率化

・噴射条件と噴霧特性（一次+二次微粒化）の関係を理解

実現象の観察、数理モデルの提案・構築と検証

水流し試験　極低温非燃焼試験　極低温燃焼試験

解析技術高度化

分散相モデル（液滴追跡、均質流）

相変化

界面乱流（RANS/LES）
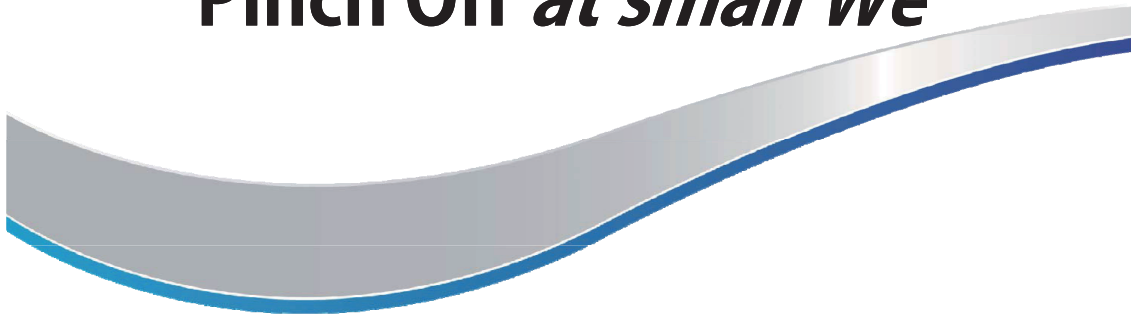
界面追跡（極低温噴射、実在流体効果を考慮）

FY2008　FY2012

Farago,Z(1992)

Classification of liquid jet atomization at coaxial type injector

・数値解析とあわせて、対応する実験を実施。
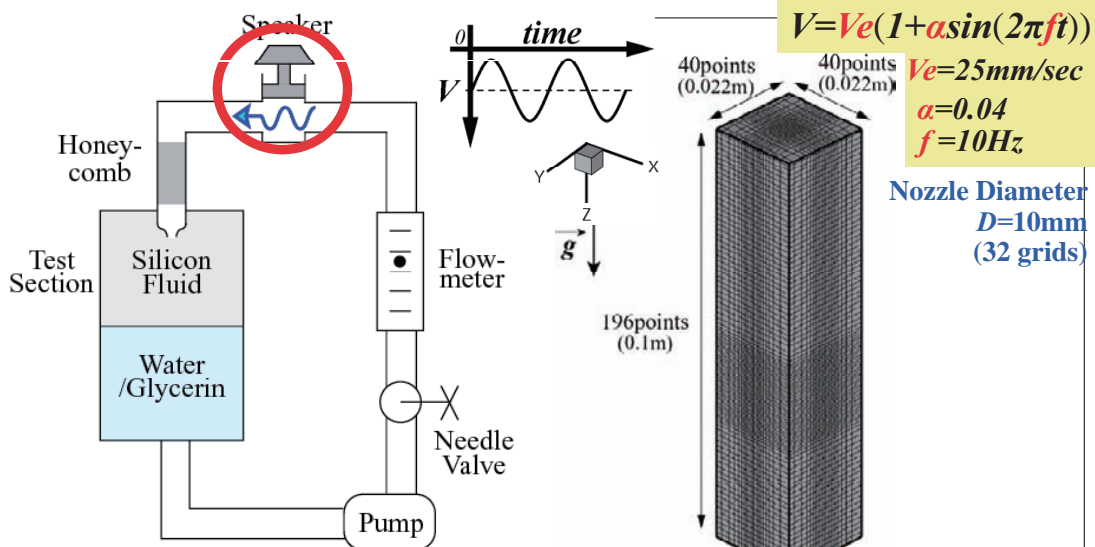・低Weber数の比較的単純な単一液滴分裂現象から、段階的に高Weber数の液膜微粒化、液柱微粒化現象を対象として、微粒化現象の知見を蓄積。
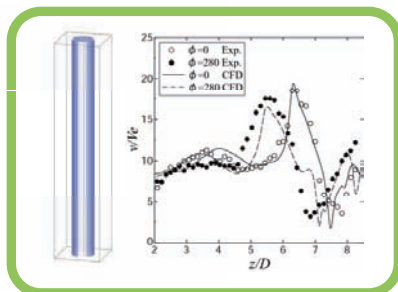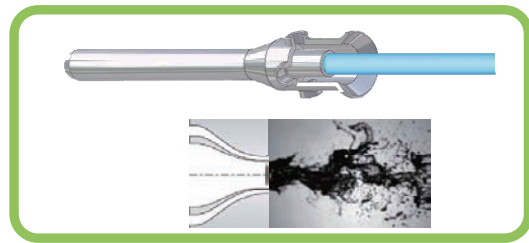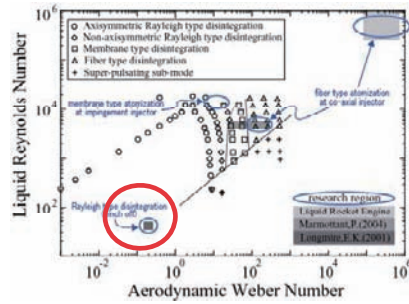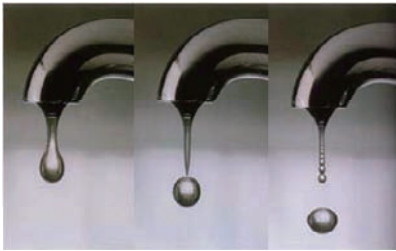
Pinch Off *at small We*

解析対象と条件

$$V = Ve(1 + \alpha \sin(2\pi f t))$$

Ve=25mm/sec
α=0.04
f =10Hz

Nozzle Diameter
D=10mm
(32 grids)

Experimental Apparatus
We=0.26, Re=35
Longmire,E.K.,et al. (2001)
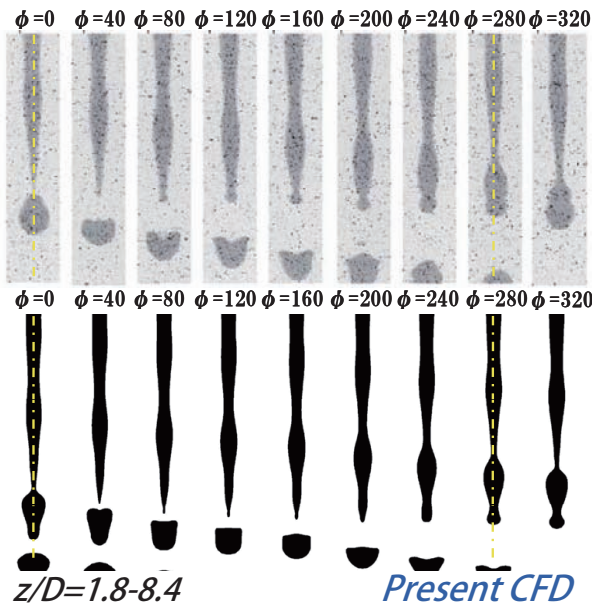
Present Numerical Conditions
40 × 40 × 196 stencils
Inoue,C.,et al., AIAA-2007-5461

実験結果との比較

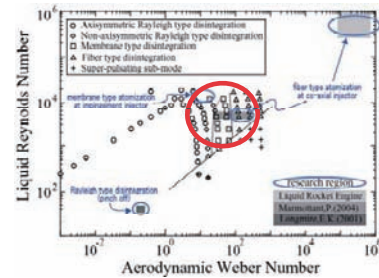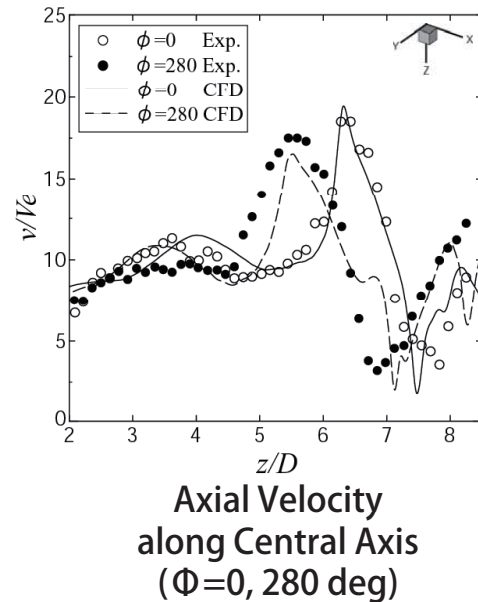## ① Liquid Shape (cross section)

Experiment by E.K.Longmire et al.

$\phi=0$ $\phi=40$ $\phi=80$ $\phi=120$ $\phi=160$ $\phi=200$ $\phi=240$ $\phi=280$ $\phi=320$

$\phi=0$ $\phi=40$ $\phi=80$ $\phi=120$ $\phi=160$ $\phi=200$ $\phi=240$ $\phi=280$ $\phi=320$

z/D=1.8-8.4　　　　*Present CFD*

② Axial Velocity Profile

Axial Velocity along Central Axis (Φ=0, 280 deg)

Atomization of Liquid Sheet
at large We
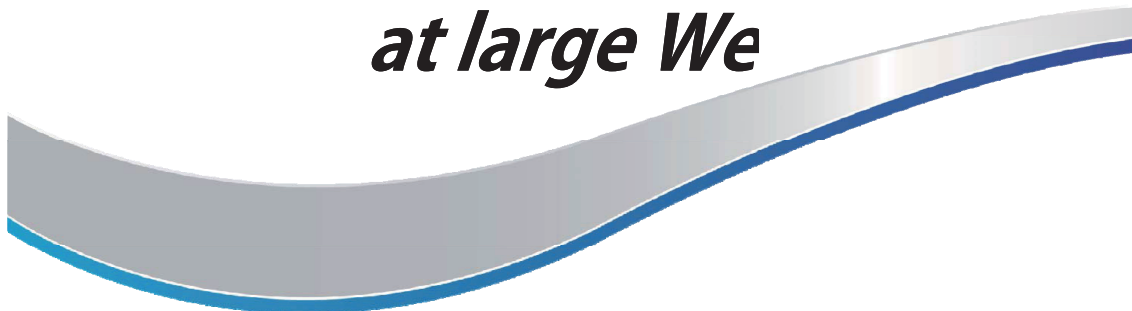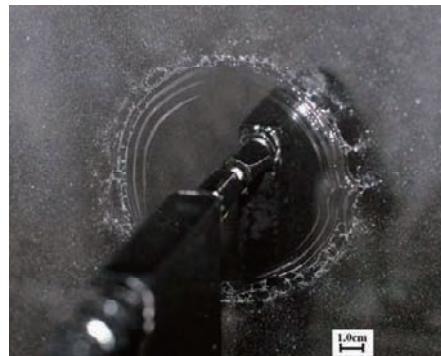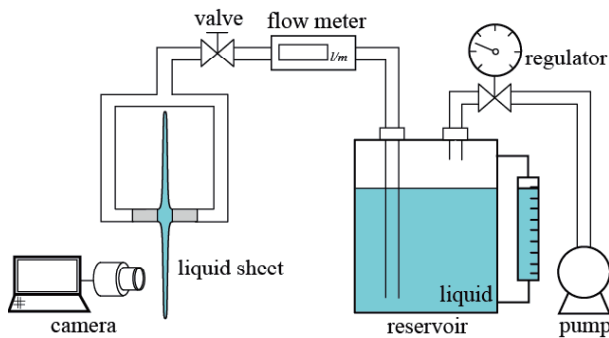
円盤状自由液膜微粒化の可視化

・二液の衝突によって円盤状自由液膜を形成することで、複雑な微粒化現象 を、軸対称二次元の現象に帰結。

・可視化、集霧、線形解析、数値解析を相互に簡便に比較可能。

Inoue,C.,et al., AIAA-2009-5041

Experimental Apparatus

$We = \rho U^2 D/\sigma > 1000$

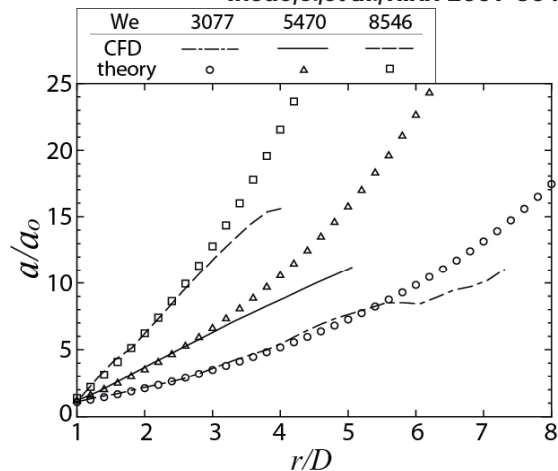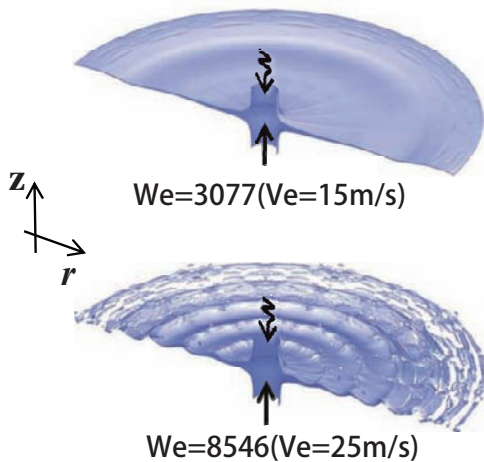(ρ :liquid density, D :nozzle dia.(1mm), σ :surface tension cef.)

円盤状自由液膜の数値解析

-amplitude of sheet ; $\dfrac{a}{a_o} = \dfrac{a_1}{a_o}\exp\left(G(\hat{r})\right) + \dfrac{a_2}{a_o}\exp\left(-G(\hat{r})\right)$
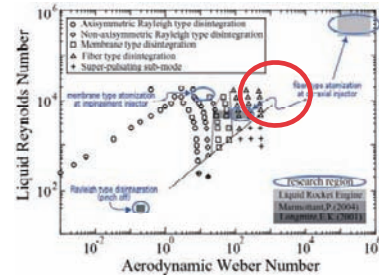
-max. growing ratio ; $G(\hat{r})\max = \dfrac{2\sqrt{2}}{3}\rho_r We^{0.5}\hat{r}^{1.5}$ $\left(f = \dfrac{\rho_g V^3}{4\pi\sigma}\right)$

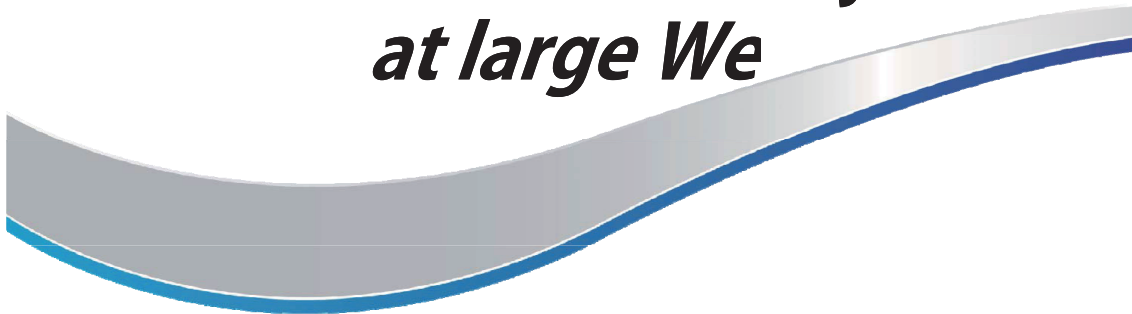-<u>with injection</u> perturbation (same amplitude in each case)

Inoue,C.,et al., AIAA-2009-5041

We=3077(Ve=15m/s)

We=8546(Ve=25m/s)

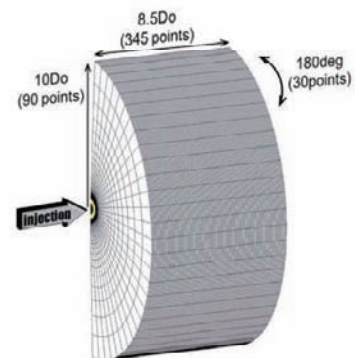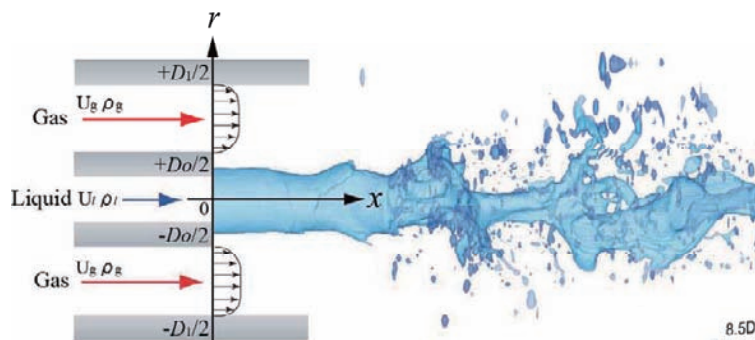| We	3077	5470	8546
CFD	—·—·—	——	———
theory	○	△	□

Atomization at Coax. Injector
at large We

同軸噴射解析モデル

✓高速気流を伴う液柱ジェットの微粒化。
✓噴射器内部で発達した乱流渦は、噴射器近傍の液面大変形には寄与しない。

様々な噴射条件下の微粒化

Case 1: baseline
Ul=0.8m/s
Ug_{max}=42m/s

Case 2: 高密度低速気流
Ul=0.8m/s
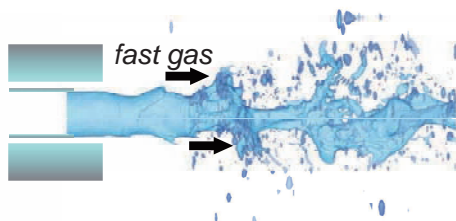Ug_{max}=14m/s
3-time denser gas
(at same flow rate)

⇒高速気流が液面付近
に存在しない
⇒液面変形が抑制

Case 3: リセスあり
Ul=0.8m/s
Ug_{max}=42m/s
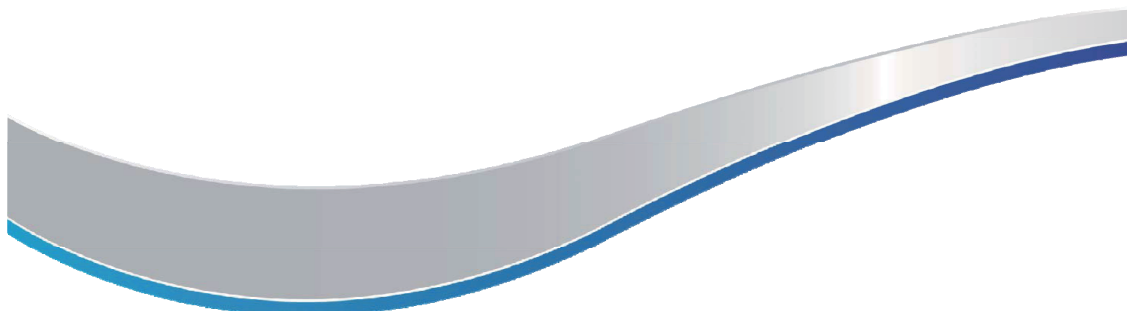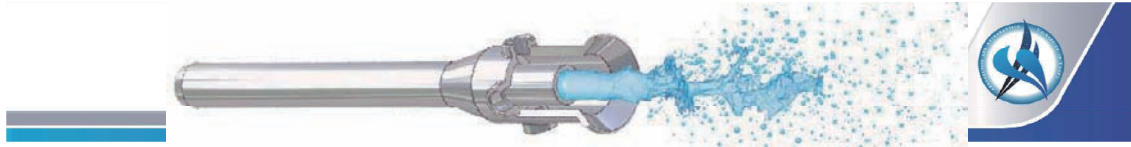with 1D recess

fast gas

⇒リセスに導かれた高速
気流が、下流まで液柱近
傍に存在
⇒微粒化促進

東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

相変化モデルと粒子追跡モデルの
ハイブリッド界面追跡法について

Simulation of Atomization Process / Simulation of Spray

Simulation of Atomization Process		Simulation of Spray	
Fixed Grid System	Moving Grid System	LHF Model	SF Model
capture and track motions of liquid/gas interface	grids move following motions of liquid/gas interface	Averaged equations of two phase flow are solved	Track particle dynamics
○ breakup of liquid column, droplet ○ large transformation of interface △ computational time × analysis of spray	○ liquid and gas phase can be described by different equation × large transformation of interface × analysis of spray	○ mist flow with lots of droplets × analysis of atomization process	○ spray behavior △ analysis of atomization process with breakup model × dependence on model

Capture Interface Precisely with Volume Conservation
- HLSM(Level Set & MARS) [Himeno(2003)]-

Distance Function
Osher,S.(1988)

Distance function ϕ is generated from moving interface

Owing to distribution of ϕ

Normal Vector

$$\vec{n}_S = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}.$$

Curvature

$$\kappa = \nabla \cdot \vec{n}_S = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$

are computed exactly

Surface tension is computed by CSF model

MARS
Kunugi,T.(2000)

VOF is interpolated with a piecewise linear function

Distance function / Heaviside function

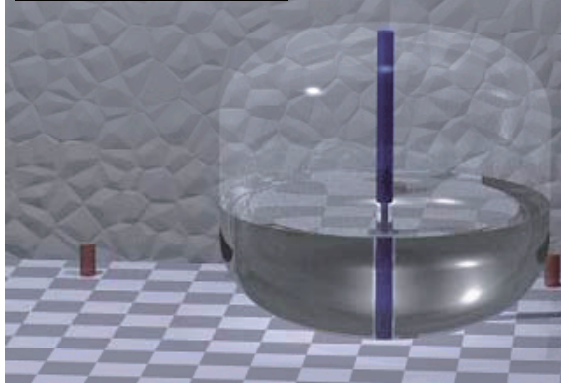ambient fluid
$\phi < 0$　$H\varepsilon = -0.5$
$\phi > 0$　$H\varepsilon = 0.5$　liquid
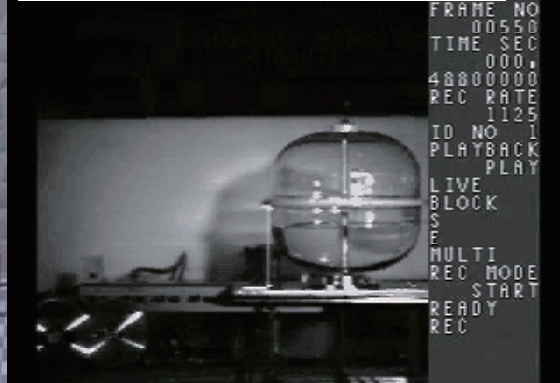interface

Distribution of heaviside function

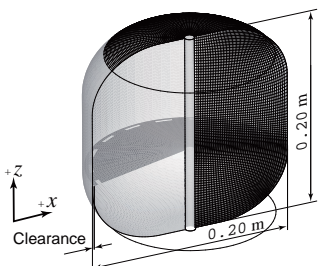## 界面追跡法 (CIP-LSM)：液体ロケットタンク内部熱流動

計算：（ Himeno, 2003 ）

実験：（ Himeno, Nonaka and Naruo, 2002 ）

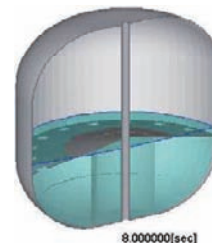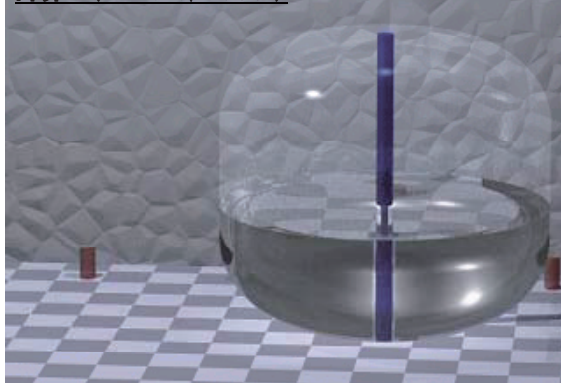Ref. AIAA 2005-3931 (Himeno)

・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

界面追跡法 (CIP-LSM)：液体ロケットタンク内部熱流動

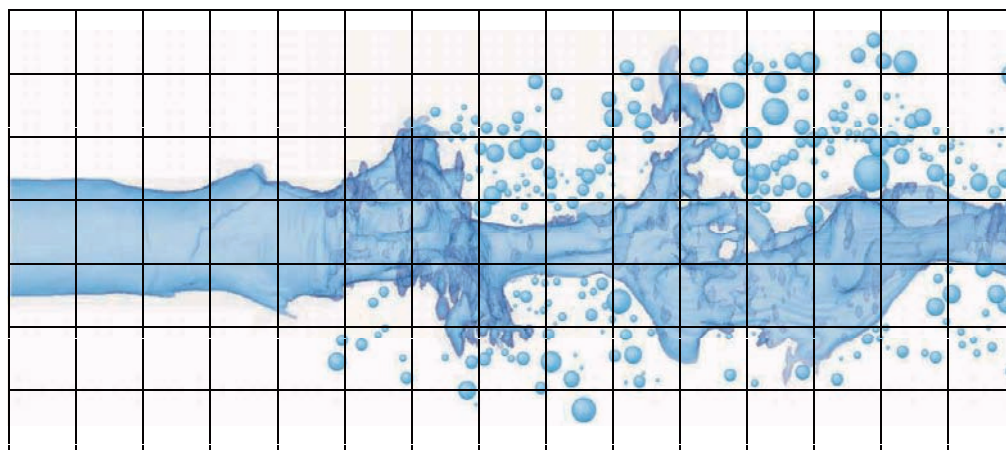計算：（ Himeno, 2003 ）

実験：（ Himeno, Nonaka and Naruo, 2002 ）

Ref. AIAA 2005-3931 (Himeno)

CIP-LSMの特徴
その１ ：　形状と体積保存性を保ちつつ界面追跡が可能である。
その２ ：　界面をシャープに取り扱い物性値の変化を１セル以内とする
その３ ：　液体の占有率だけでなく界面まので距離の情報を持っている

24

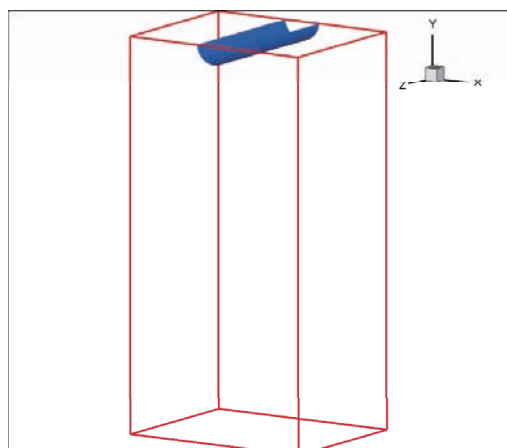# 界面追跡-分散相ハイブリッド解析法

・格子サイズ以上の現象→界面追跡法(オイラー的)
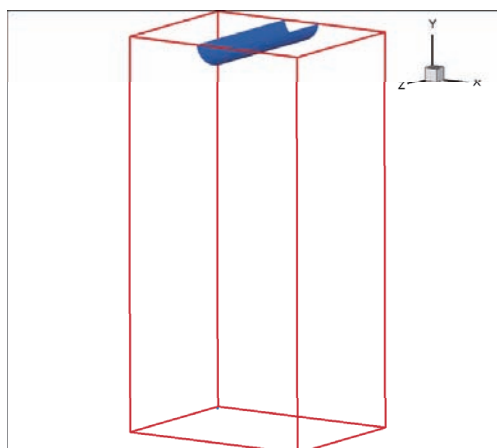**・格子サイズ以下の現象→液滴追跡(ラグランジュ的)**

界面追跡-分散相ハイブリッドモデル

実機スケールの同種・異種衝突型噴射器における微粒化解析に向けて

CIP-LSM　　　　　　　　　　　CIP-LSM/DDMハイブリッド

粒子への切り替え方法をはじめ課題は多いが、下流遠方の質量流束
分布など、実機スケールを意識した微粒化特性の取得を実施予定。

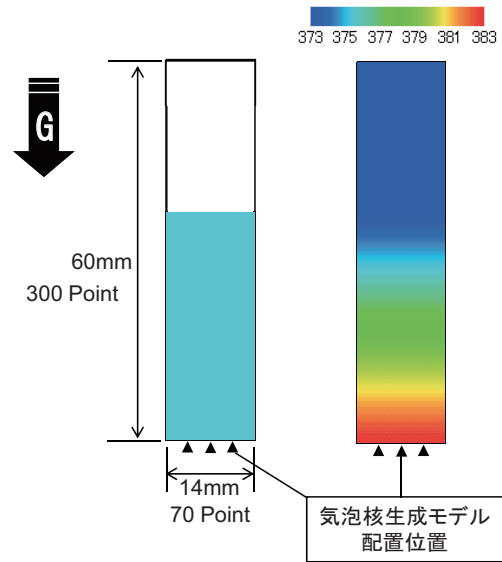by 宮下 陽輔(M2)

沸騰の数値シミュレーション

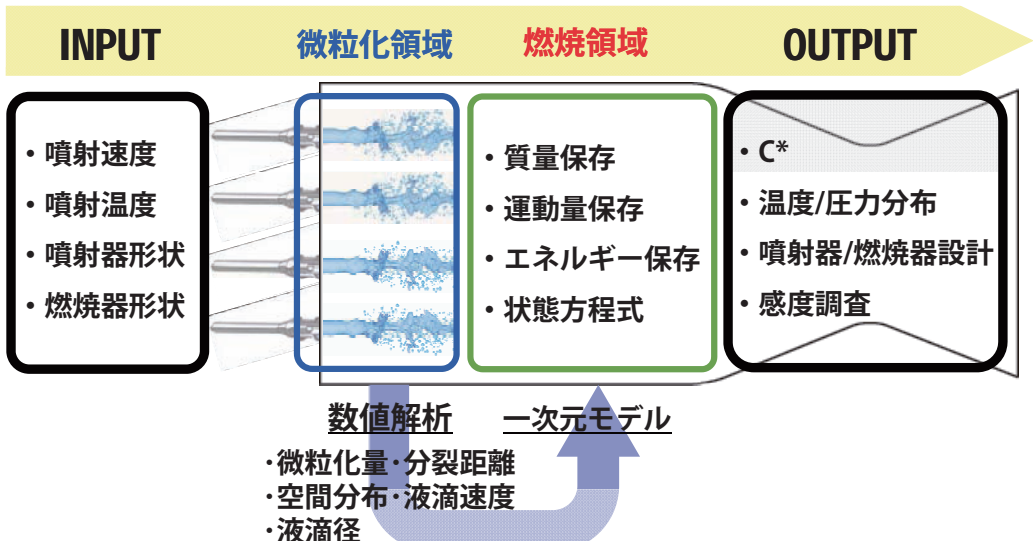相変化モデル
○　潜熱項の追加
○　体積湧き出し項の追加

✚

気泡核生成モデル

設定したセルが過熱度ΔTを上回った際
セルの温度を飽和温度に下げ、
それによって失ったエネルギーを潜熱として
一つのセル内に気相を生成させる

❚❚

沸騰

373　375　377　379　381　383

60mm
300 Point

14mm
70 Point

気泡核生成モデル
配置位置

G

アウトプットイメージ

INPUT　　　　微粒化領域　　　燃焼領域　　　　**OUTPUT**

・噴射速度
・噴射温度
・噴射器形状
・燃焼器形状

・質量保存
・運動量保存
・エネルギー保存
・状態方程式

・C*
・温度/圧力分布
・噴射器/燃焼器設計
・感度調査

<u>数値解析</u>　　<u>一次元モデル</u>
・微粒化量・分裂距離
・空間分布・液滴速度
・液滴径

・実験計測が困難な微粒化過程の諸量を一次元モデルの初期値に反映(CFD→マクロ)
・微粒化・蒸発・混合現象が燃焼特性に与える感度を調査(マクロ→CFD)
・噴射器設計・燃焼器設計指針を獲得
・LOX/LH2、LOX/LCH4、同軸型噴射器、衝突型噴射器に適応可能

まとめ

　　設計開発技術の高度化に向けた取り組みの中で、合理的にエレメントを設計する観点から、推進薬の微粒化に関して、実験に基づく基礎現象理解と、シミュレーション技術向上の双方を継続的に実施している。

①実機環境における極低温推進薬の微粒化現象を模擬することは、未だに難しく、これからの研究に期待するところが大きい。

②対応する実験との比較に基づいて、数値解析技術を継続的に発展させることで、詳細な基礎現象理解を試みることが重要である。

③下流の燃焼解析との融合や、噴射から燃焼まで一貫した数理モデルの構築といった、工学的に有益な知見へと統合することが必要である。

④合理的なエレメント設計に資する知見の獲得という出口を見据えて、エンジン開発への貢献を目指す所存である。今後とも、企業、JAXA、大学からのご協力をお願いする次第である。