

JAXA社会連携講座シンポジウム(9/26, 9/27)@東京大学 武田ホール



## 二液スラスタに関する基礎試験および数値解析

株式会社 IHI

熱流体研究部 高和\*, 松野

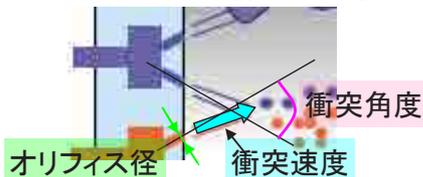
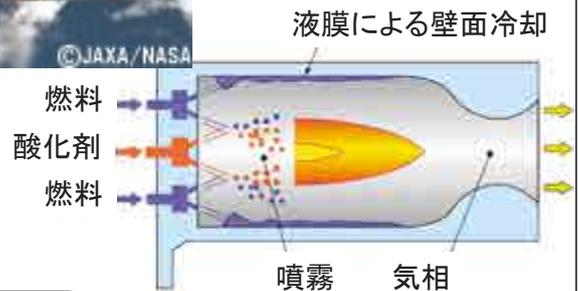
東京大学

井上助教, 姫野准教授, 渡辺教授

Copyright © 2012 IHI Corporation All Rights Reserved.

### 研究ビジョン

- 対象製品
  - 人工衛星・宇宙探査機の姿勢制御用スラスタ/ロケットエンジン燃料噴射ノズル
  - IHIエアロスペースで開発中のHTV用スラスタ
- 研究背景
  - 設計パラメータと推進性能との現象論的關係性が完全には解明されていない



関係性: ?



計測が困難

- 噴霧が高密度
- 燃料(ヒドラジン)が毒性, NTOとの組み合わせで 自発着火

数値解析的なアプローチであれば計測の困難さを解消⇒現象解明が可能

#### ビジョン

人工衛星・宇宙探査機の姿勢制御用スラスタ/ロケットエンジンの燃料噴射ノズルの解析評価手法の開発

# 研究ロードマップ



H26年度IAに技術移管!

出資元	H23年度		H24年度		H25年度		H26年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
基盤研	CIP-LSM法の社内への導入 検証解析 (同種衝突、IHIデータ)		各現象の試験による再現(データ取得) 検証試験 (同種ペネトレーション) 検証試験 (ミスアライメント) スラスト性能の簡易予測手法確立		LNGエンジンへの適用検討・性能評価 検証試験 (異種ペネトレーション) 微粒化状態からスラスト性能評価手法確立		燃焼まで解析! キャピテーションなどの影響評価 化学反応考慮	
			2相3種流解析のためのソルバ改修 並列化対応		異種液体衝突解析対応のソルバ 気相乱流考慮 液相蒸発考慮			

### H24

ミスアラインメントなし  
ミスアラインメントあり

ミスアラインメント時の噴霧特性の定性的評価・傾向知見の獲得

噴霧特性  
設計位置からのずれ量 (製造誤差)

### H25

$\Delta P_o = 25 \text{ psig}$   
Oxid  
Fuel  
 $\Delta P_f = 11 \text{ psig}$

運動量比とオリフィス径比の関係でペネトレーションの発生が判断できる、また液体の混合比を判断できるなど

運動量比  
オリフィス径比  
噴霧角

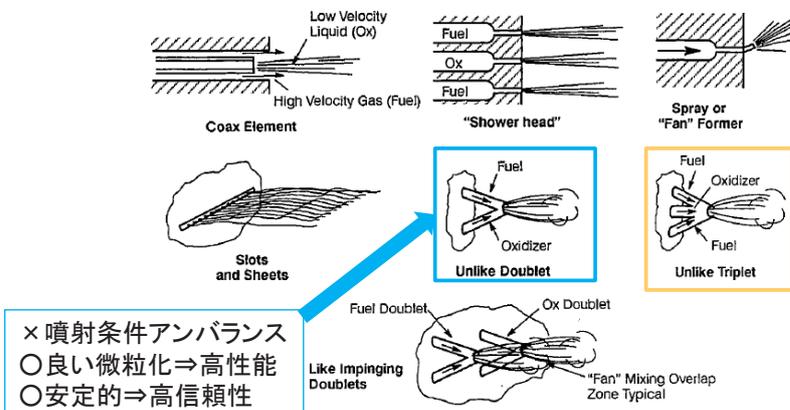
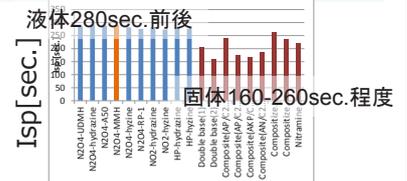
アウトプットイメージ

# 背景



- 推進器: 人工衛星の軌道変更・姿勢制御
- 液体推進器: 自己着火性を用いた二液式が安定かつ高性能
- 噴射器タイプ (Impinging type)
  - 適切な混合比, 急速な微粒化, 速やかかつ安定的な燃焼

	長所	短所
液体	点火系が必要なし 推力調整が容易	構造が複雑 取り扱いが困難
固体	構造が簡単 取り扱いが容易	点火系が必要 推力調整が困難



× 噴射条件アンバランス  
○ 良い微粒化 ⇒ 高性能  
○ 安定的 ⇒ 高信頼性

○ 比較的噴射条件をそろえられる  
○ 良い混合  
× 微細な孔の数が多くなる  
× 酸化剤リッチになり易い  
× 安定性に問題

D. K. Huzel, D. H. Huang, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 147

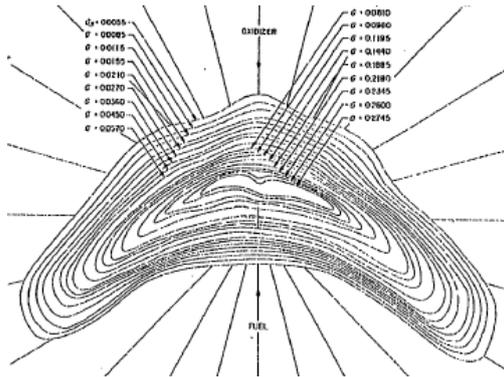
二液式 Unlike Doublet タイプに焦点を当てる

## 過去の研究①



J. H. Rupe, An Experimental Correlation of the Nonreactive Properties of Injection Schemes and Combustion Effects in a Liquid-Propellant Rocket Engine Part I. The Application of Nonreactive Spray Properties to Rocket Motor Injector Design, NASA Technical Report, No. 32-255

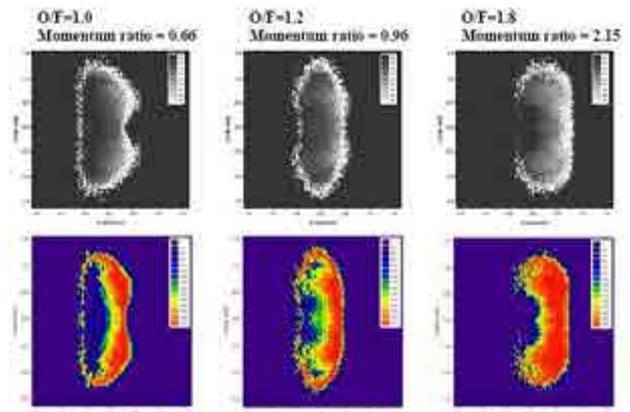
- いくつかの噴射器形状・噴射条件で非燃焼異種衝突試験
- 下流位置での質量Flux分布
- スラスト設計の指針を構築
- 可視化はないため、現象として不明な点がある



Fuel: 径2.5mm, 41.6m/s  
 Oxi.: 径4.5mm, 26.2m/s 44°, 15.2cm下流

T. Yuan, C. Chen, B. Huang, A PLIF Observation of the Impingements of NTO/MMH Simulants for a 5-lbf Rocket

- 非燃焼, 異種, 同径(0.3mm), 運動量比(1.0 ~ 2.2), 衝突角60°
- PLIF法を用いた質量分布および混合比
- 高混合比を実現する条件などを明らかにしている
- 同径かつ液相の可視化はなし



質量分布

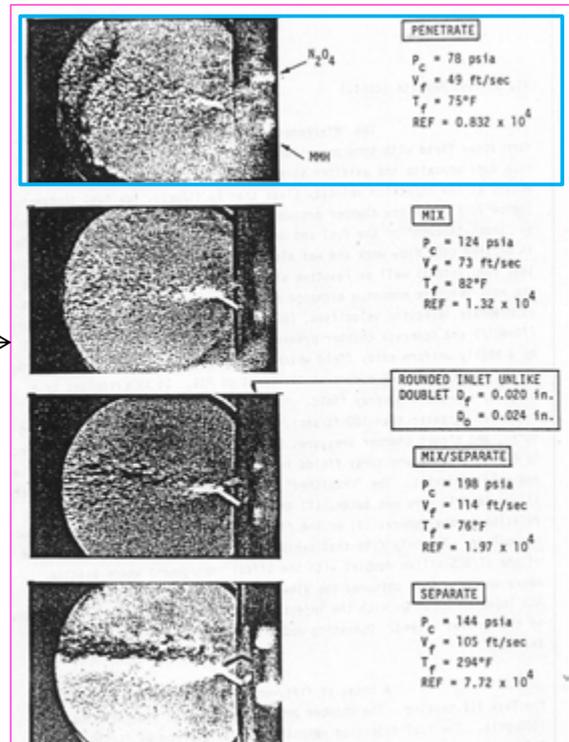
## 過去の研究②



B. R. Lower, High Performance N2O4/AMINE Elements "BLOWAPART", NASA CR-160273

項目	単位	値, 種類
液体		N2O4/MMH, N2O4/A-50, N2O4/N2H4
チャンバ圧力	kPa	400 - 7,000
燃料温度	°C	12.7 - 148.9
燃料噴射速度	m/s	9.1 - 61.0
衝突角度2θ	°C	32, 60, 90

- 非燃焼
- 可視化
- 衝突条件により変化する衝突後の二液の状態を4種類に種別化
- その一つにペネトレーション現象を確認
- 以降においてペネトレーション現象について調査された例は少ない

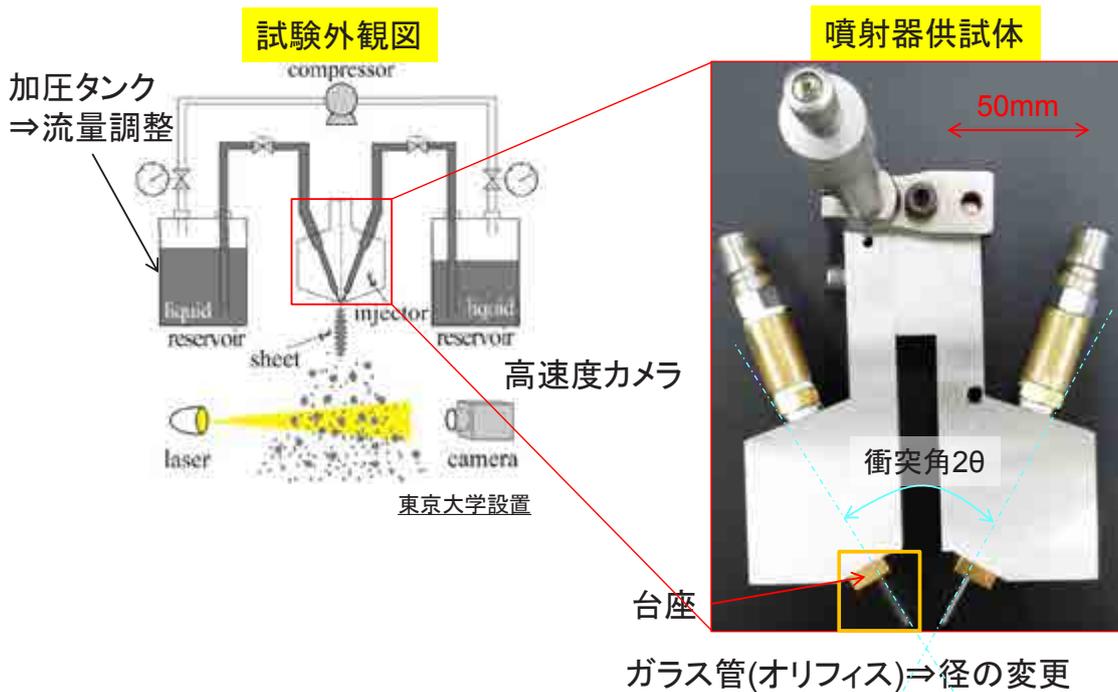


## 目的



- ・ 噴流衝突実験において径比および運動量比を大きく変化させ微粒化現象の変化を調査する
  - ペネトレーション現象を含めた包括的な条件
- ・ 実験と対応する条件下の数値解析を実施し解析的再現性を評価する
  - 自由界面法(CIP-LSM法)を用いた解析

## 噴流衝突試験方法



## 計測項目



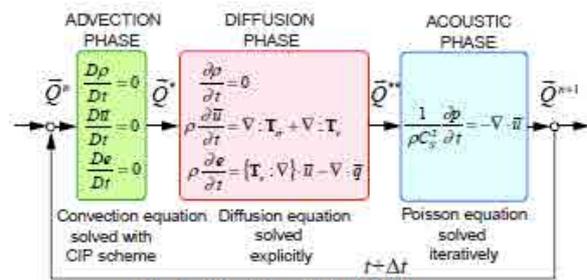
	項目	計測技術	目的	本発表
定性的 ↓ 定量的	可視化	ハイスピードカメラ Photron FASTCAM APX-RS	衝突点近傍および微粒化の様子を撮影する	○
	断面液相通過領域可視化	レーザー DANTEC DYNAMICS DualPower 135-15	下流方向断面における水が通過した領域の可視化	×
	混合状態	蛍光剤の使用 Rhodamine B	2液の混合状態を把握する	×
	質量Flux	パタネータ法 自作	下流方向任意の面で通過する質量Flux分布を計測	×
	粒径・速度	画像処理	微粒化効率にどのような影響があるか調査する	×

## 衝突微粒化解析方法



姫野 武洋, 根岸 秀世, 野中 聡, 井上 智博, 渡辺 紀徳, 鶴沢 聖治, 「様々な加速度環境における自由表面流の数値解析 (CIP法, MARS法, Level-set法を協調した解法の改良, 日本機械学会論文集B編, Vol. 76, No. 765, pp. 778-788, 2010

- ・ CIP-LSM法(姫野ら)
  - 移流項: CIP法
  - 界面追跡法: Level-set法 + MARS法
  - 表面張力計算法: CSF法



- ・ 過去の解析例
  - 噴流の速度分布の違いによる衝突後の微粒化傾向の変化をCIP-LSM法により調査(井上ら)
- ・ 衝突微粒化の適用性はあるが、今回は径比や運動量比の幅広い条件での適用性を検証

スラスト設計における非設計点への対応力

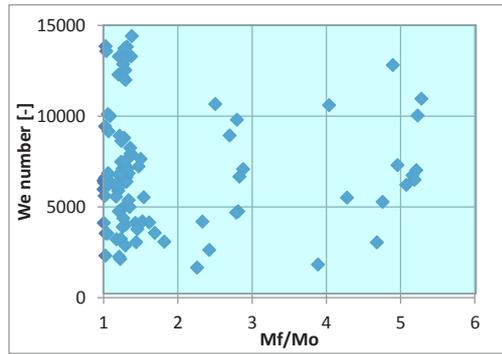
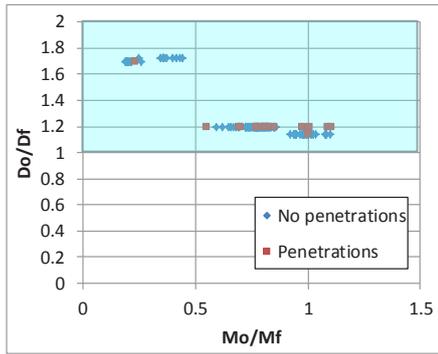
井上 智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋, 「燃料噴射弁近傍における液膜挙動と微粒化特性の数値解析」, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009





### 噴射条件

NASAデータの  
試験条件



運動量比=(相手噴流の運動量)/(基準噴流の運動量)

本研究の  
試験条件

径	運動量	衝突角度	We数	Re数
1mm	0.009	40°	200	6,000
1.2mm	~	50°		
1.6mm	0.07 [kg/s m/s]	60°	13,000	45,000
2.0mm				

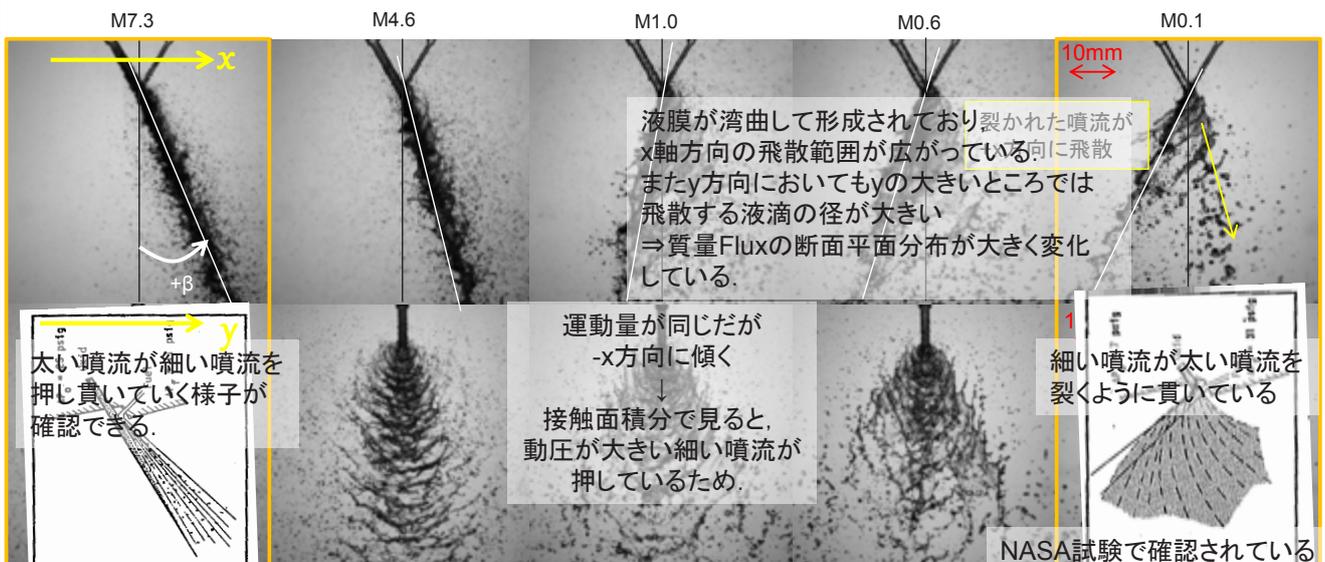
本発表における条件

- ・ 比の大きい領域を実施した
- ・ 今後他の条件においても実施する

### 可視化結果(1mm径規準, 径比2.0)



太い噴流の運動量が高い ← → 細い噴流の運動量が高い



NASAの試験で確認されている  
上図のモードに対応している。

$$\tan \beta = \frac{\dot{w}_1 v_1 \sin \theta_1 - \dot{w}_2 v_2 \sin \theta_2}{\dot{w}_1 v_1 \cos \theta_1 + \dot{w}_2 v_2 \cos \theta_2}$$

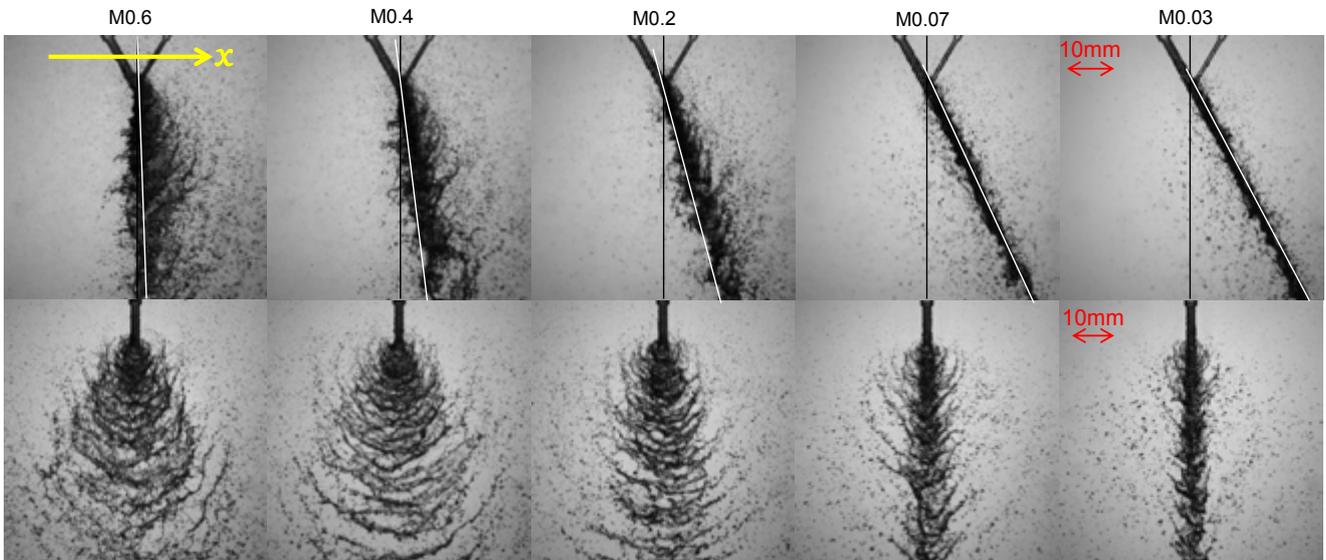
	基準	#1	#2	#3	#4	#5	#6
運動量比	-	7.33	4.55	1.37	0.97	0.58	0.12
流速	m/s	17.6	22.3	17.6	9.66	8.12	6.26
We数	-	3674	13457	8364	2520	1783	1058
衝突後角度β	°	18.9	13.6	-5.1	-10.4	-17.0	-26.9

NASA試験で確認されている  
上図モードに対応している。

## 可視化結果(2mm径規準, 径比0.5)



細い噴流の運動量が高い ← → 太い噴流の運動量が高い

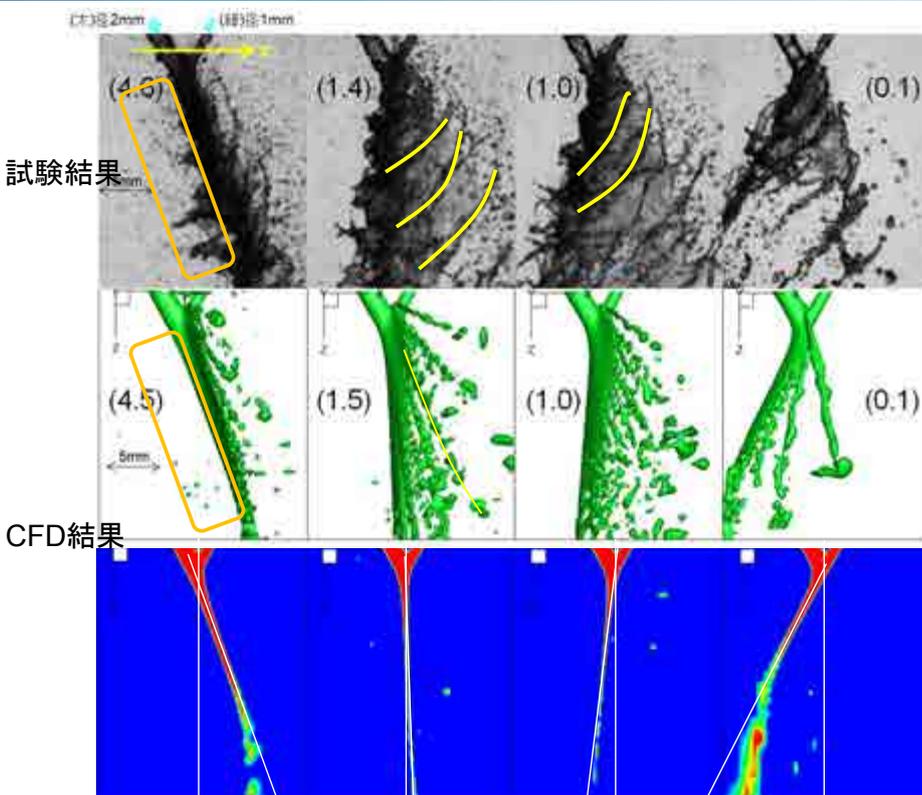


太い噴流が運動量で勝っているため  
 +x方向に傾き, 大きくなるにつれて  
 正面(下段)での液膜の形成が  
 小さくなる.

		基準	#1	#2	#3	#4	#5
径	mm	2	0.5 (径比2:1)				
運動量比	-		0.57	0.4	0.23	0.07	0.03
流速	m/s	17.6	26.5	22.4	16.9	9.1	5.89
We数	-	8364	9478	6771	3871	1121	469
衝突後角度 $\beta$	°		1.2	6.6	14.6	24.9	27.8

## 解析結果(1mm径規準, 径比2.0)

( )内数字は運動量比

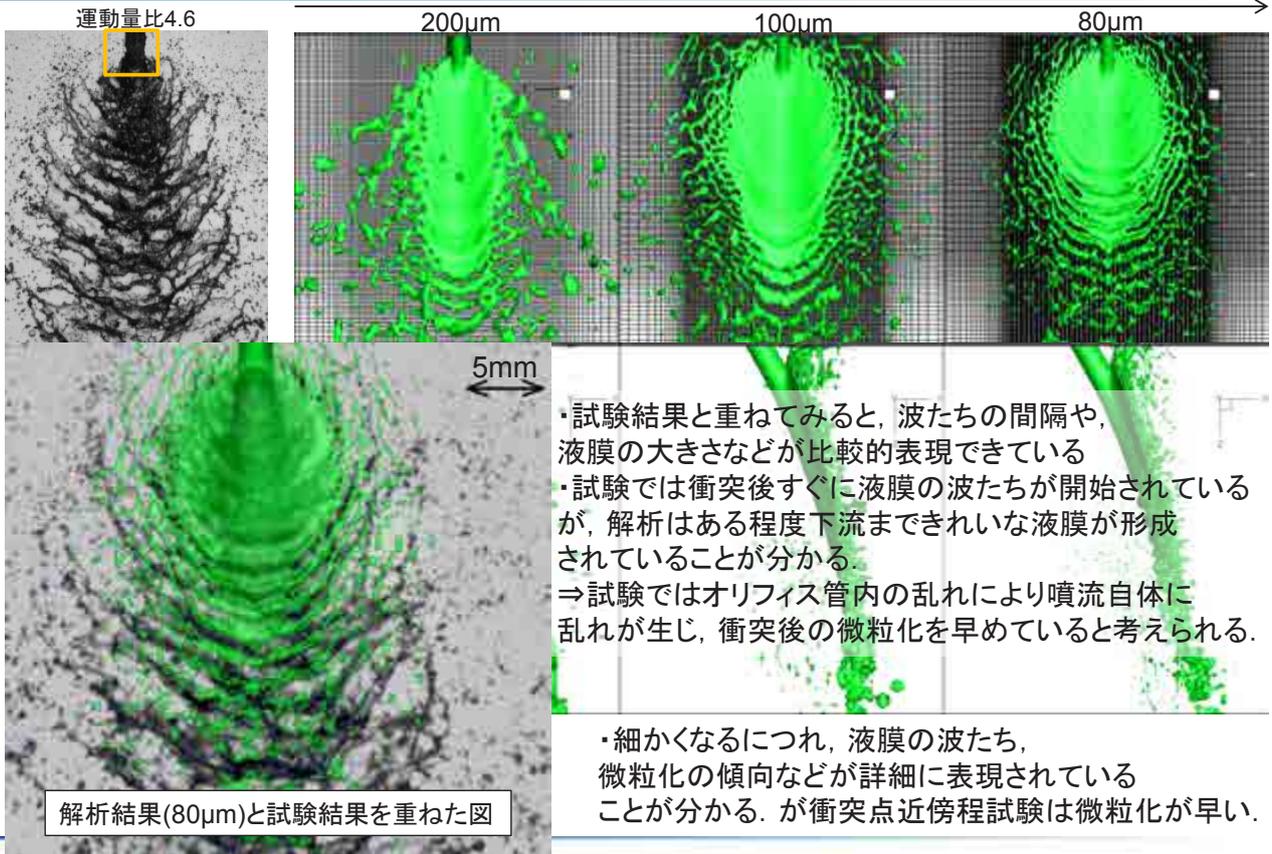


- ・ 衝突後の傾きなどの傾向は再現できていると考えられる.
- ・ しわの方向や液滴の飛散状況がやや異なる  
 ⇒メッシュ粗密の適性がないためと考えられる

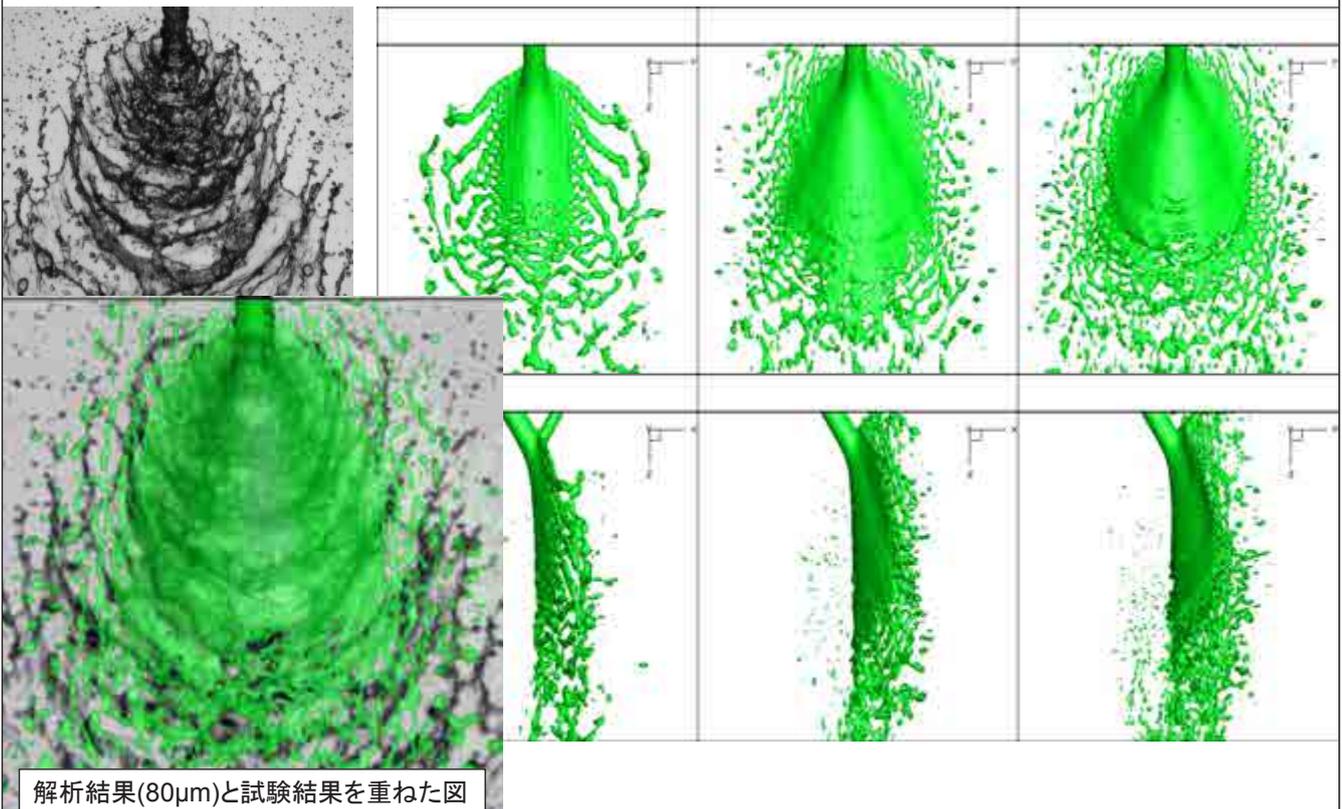
噴流の中心断面の距離関数値コンター図

### メッシュ依存性(1mm径規準, 径比2.0, 運動量比4.5)

→ 細



### メッシュ依存性(1mm径規準, 径比2.0, 運動量比1.5)

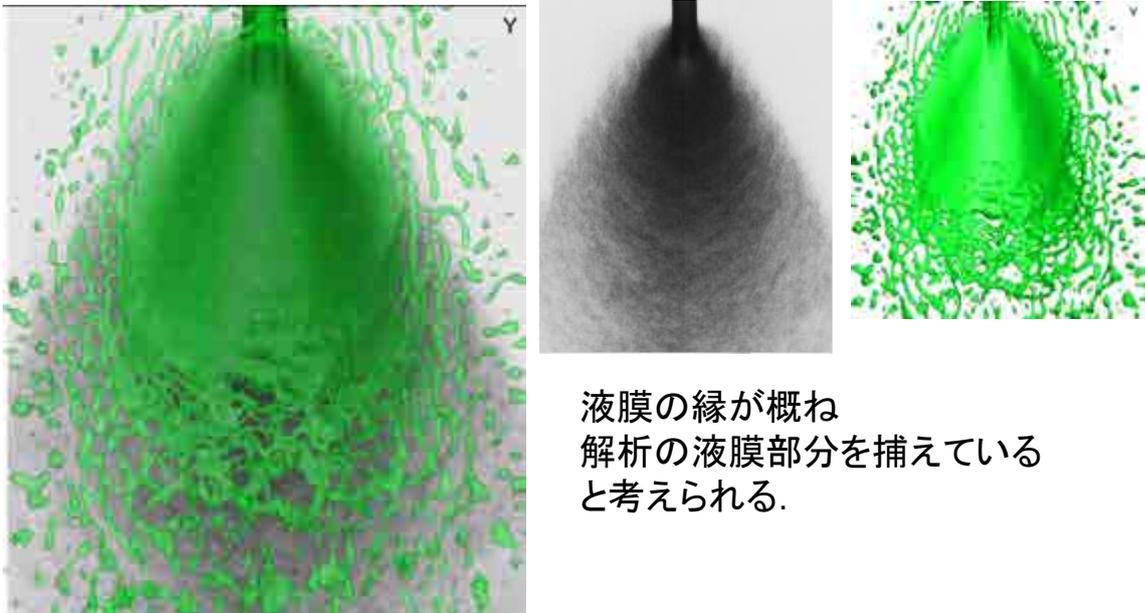


## 解析結果と試験結果の比較(1mm径規準, 径比2.0, 運動量比1.5)



### 連続撮影画像を平均化した画像と解析結果を比較

- 数値解析は噴流に乱れがなく, 定常的な液膜の形成のため, 瞬時結果で比較する



液膜の縁が概ね  
解析の液膜部分を捕えている  
と考えられる。

## まとめ



- ・ 径比2で運動量を広く変化させる二液噴流衝突実験を実施し, 以下のよ  
うな結果を得た
  - 太い噴流の運動量と細い噴流の運動量のぶつかり合いで最終的な角度が  
決まる
    - ・ 径比による接触面積の違いのため, 接触部分の動圧の大きさによって角度は決  
まる
    - ・ 概ね理論式で算出できる角度となることが分かった
  - 運動量を振っていく中で, 液膜の形成に起因して液滴が飛散する領域が変  
化し, 質量の断面平面分布が大きく変わる傾向であることが, 本結果からも  
わかる
  - ペネトレーション現象は径の大小に関わらず運動量比の大きな差で発生す  
ることが分かり, 貫き方は径と運動量の大小関係により変化する
- ・ 実験と対応する条件下の数値解析をCIP-LSM法を用いて実施した
  - 衝突後の傾き角度に関しては概ね再現性がある
  - 細かくすると液膜の状態などが詳細に表現され, 試験結果にも一致する傾向  
が見られた
- ・ 本連携講座の研究成果を応用することで実機設計評価のめどが  
得られた