

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



二液スラスト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

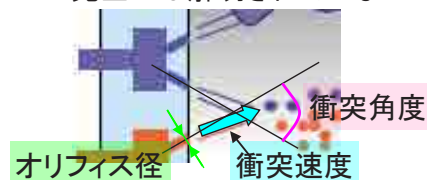
井上助教, 姫野准教授, 渡辺教授

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ト/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用スラスト

- 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ト/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



液膜による壁面冷却

燃料
酸化剤
燃料

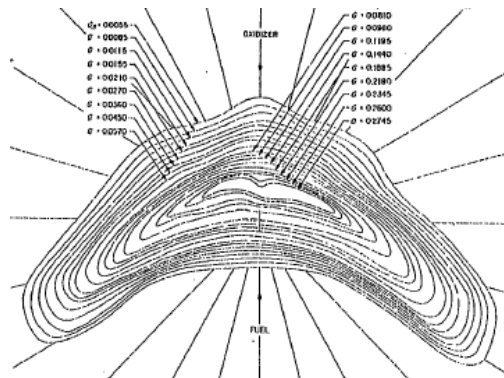
噴霧 気相

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

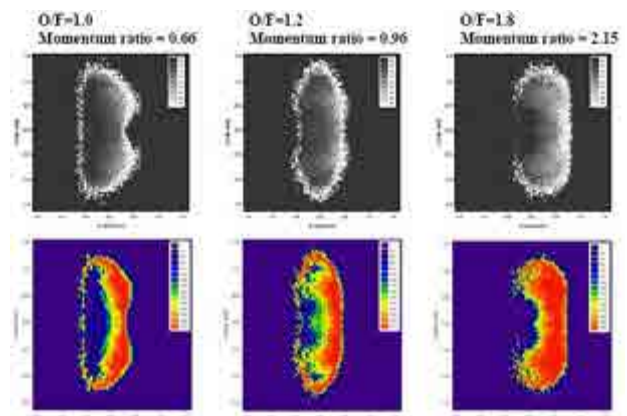
- ・ いくつかの噴射器形状・噴射条件で非燃焼異種衝突試験
- ・ 下流位置での質量Flux分布
- ・ スラスト設計の指針を構築
- ・ 可視化はないため、現象として不明な点がある



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

- ・ 非燃烧, 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

Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

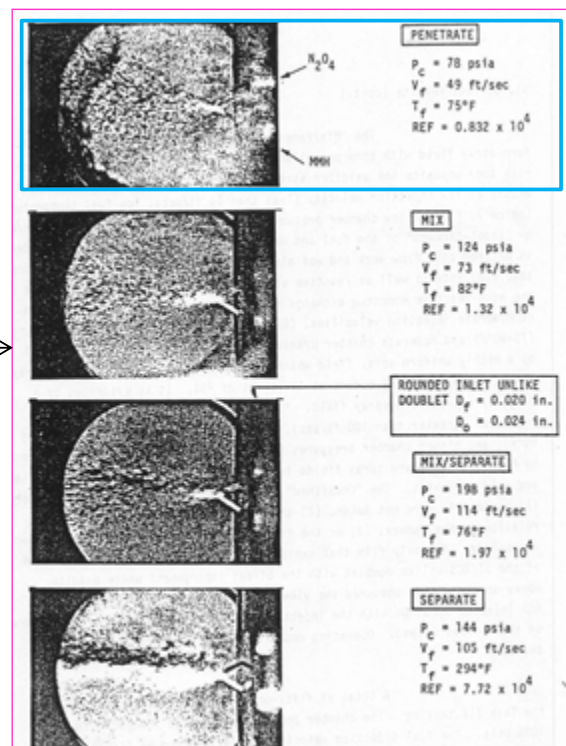
過去の研究②



B. R. Lowver, 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



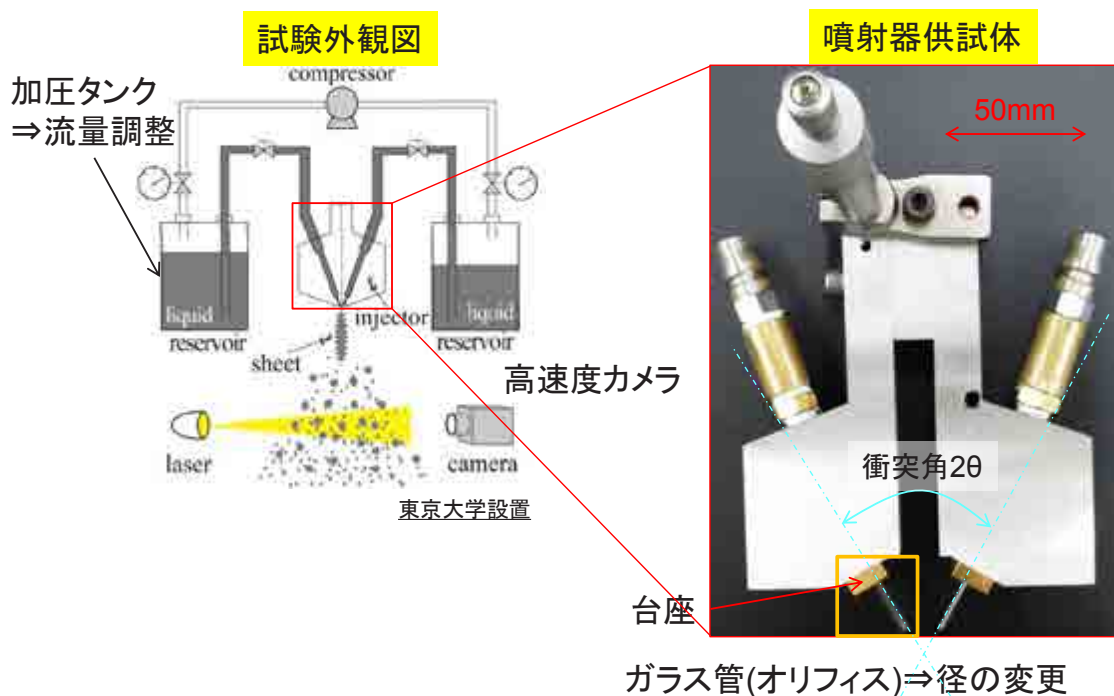
Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

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	×

Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

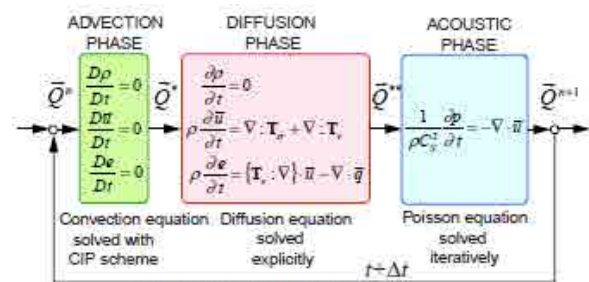
9

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

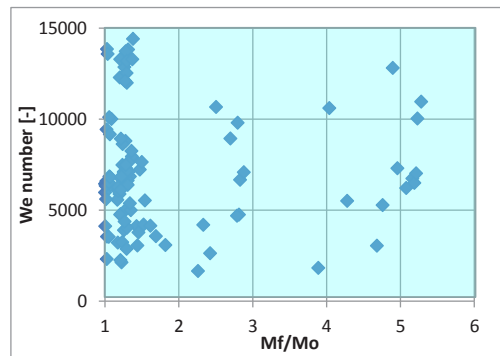
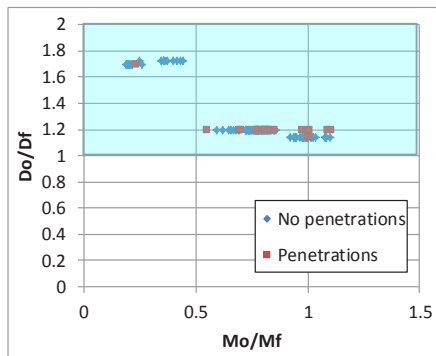
井上 智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋, 「燃料噴射弁近傍における液膜挙動と微粒化特性の数値解析」, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009



Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

10

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 ~ 13,000	6,000 ~ 45,000
1.2mm	~	50°		
1.6mm	0.07 [kg/s m/s]	60°		
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

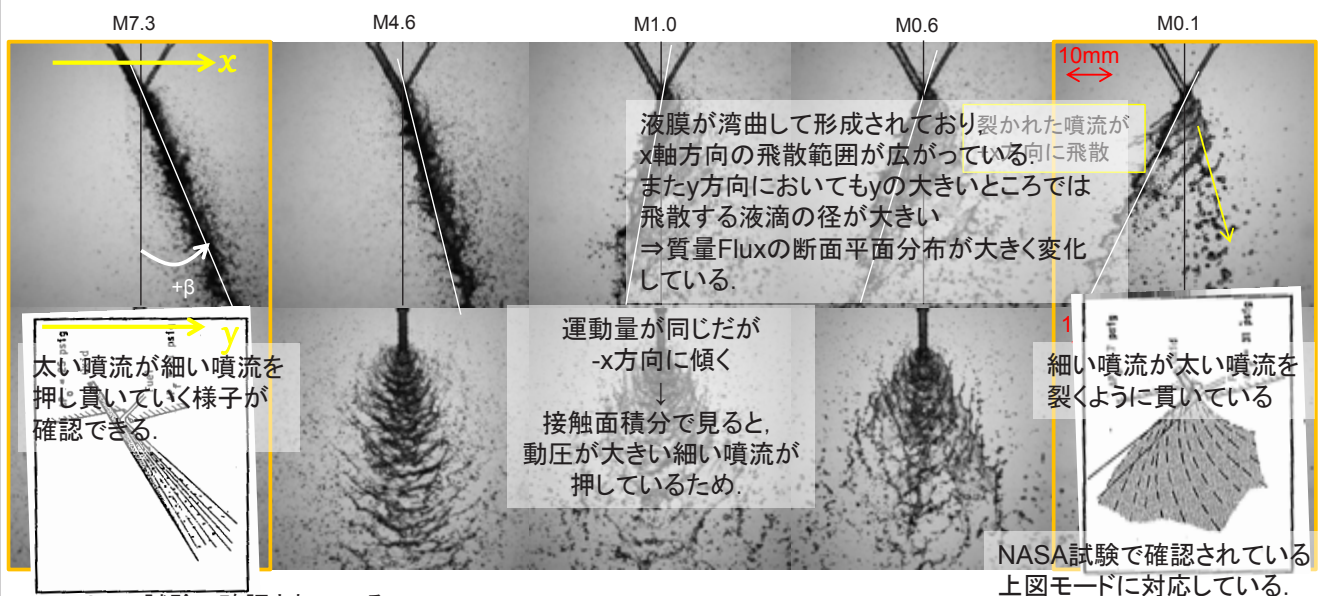
Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

11

可視化結果(1mm径基準, 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	2.87
We数	-	3674	13457	8364	2520	1783	1058	223
衝突後角度β	°	18.9	13.6	-5.1	-10.4	-17.0	-26.9	

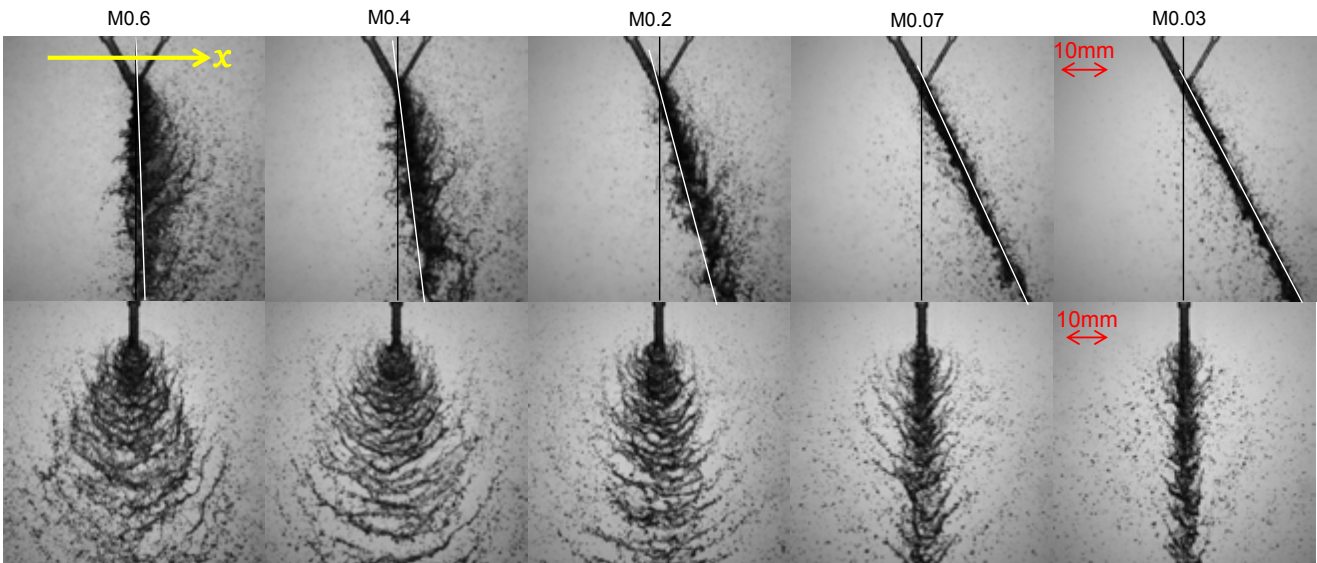
Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

12

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。

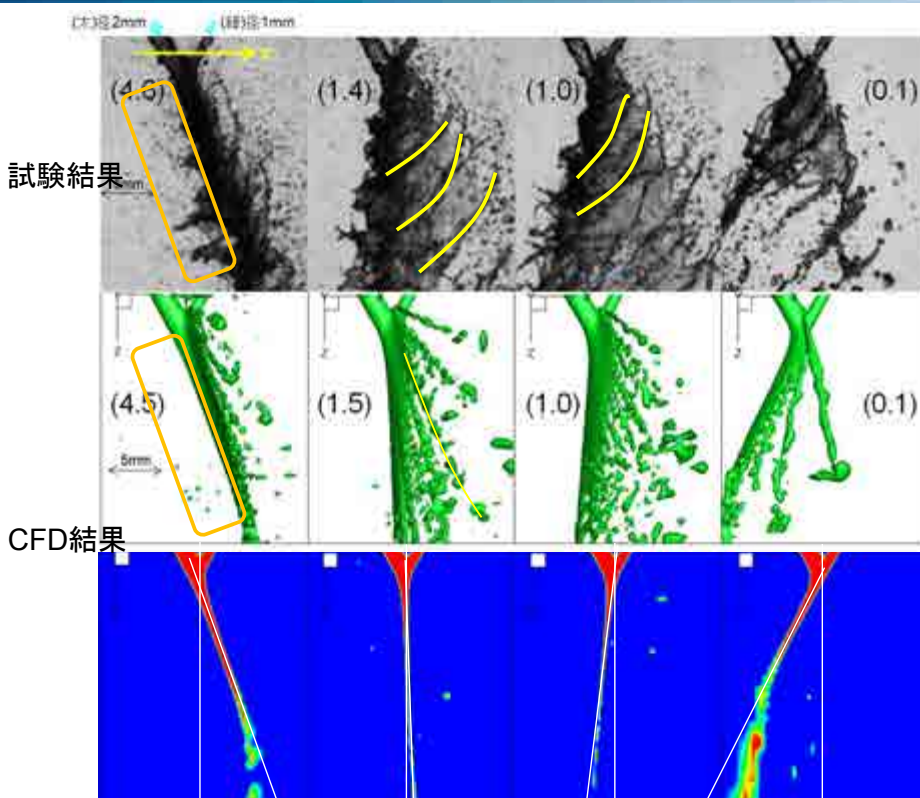
		基準	#1	#2	#3	#4	#5	
径	mm	2	0.5 (径比2:1)					
運動量比	-		0.57	0.4	0.23	0.07	0.03	
流速	m/s	17.6	26.5	22.4	16.9	9.1	5.89	
We数	-	8364	9478	6771	3871	1121	469	
衝突後角度 β	°		1.2	6.6	14.6	24.9	27.8	

Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

13

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

Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

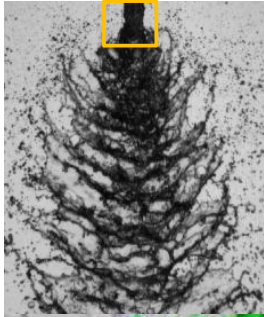
14

メッシュ依存性(1mm径規準, 径比2.0, 運動量比4.5)

IHI

→ 細

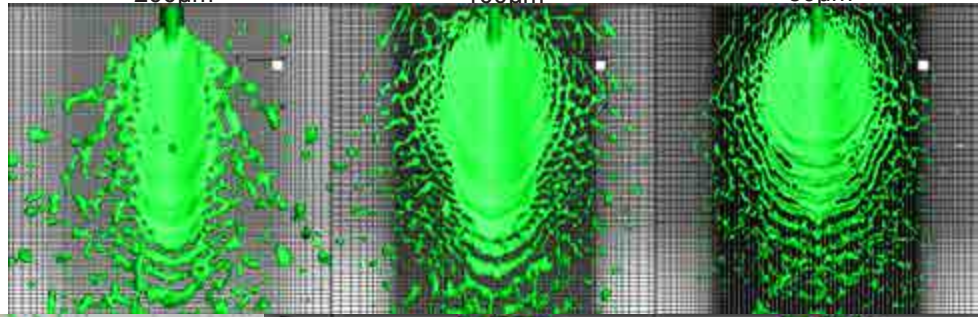
運動量比4.6



200μm

100μm

80μm



5mm

・試験結果と重ねてみると、波たちの間隔や、液膜の大きさなどが比較的表現できている
 ・試験では衝突後すぐに液膜の波たちが開始されているが、解析はある程度下流まできれいな液膜が形成されていることが分かる。
 ⇒試験ではオリフィス管内の乱れにより噴流自体に乱れが生じ、衝突後の微粒化を早めていると考えられる。

解析結果(80μm)と試験結果を重ねた図

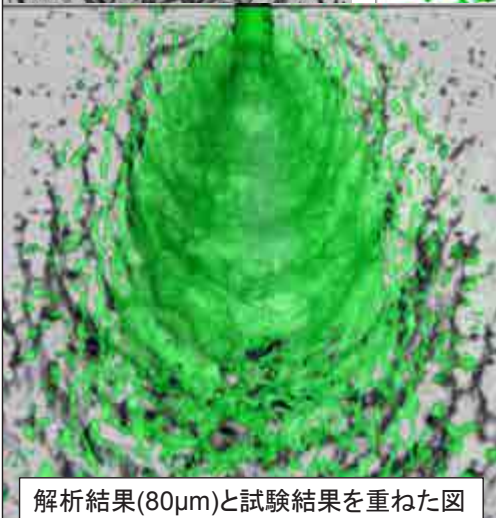
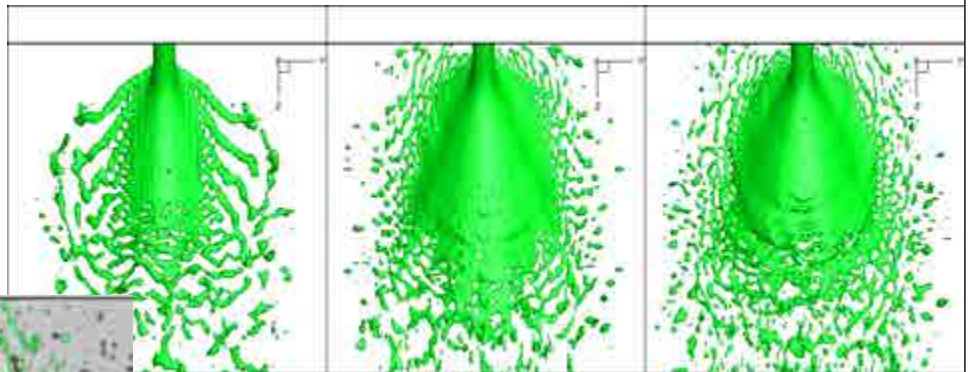
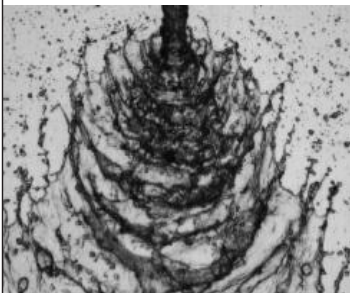
・細くなるにつれ、液膜の波たち、微粒化の傾向などが詳細に表現されていることが分かる。が衝突点近傍程試験は微粒化が早い。

Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

15

メッシュ依存性(1mm径規準, 径比2.0, 運動量比1.5)

IHI



解析結果(80μm)と試験結果を重ねた図

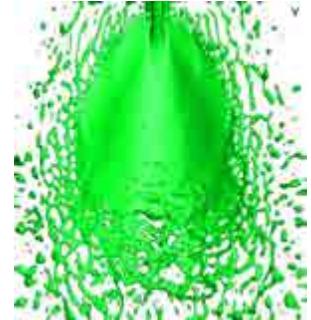
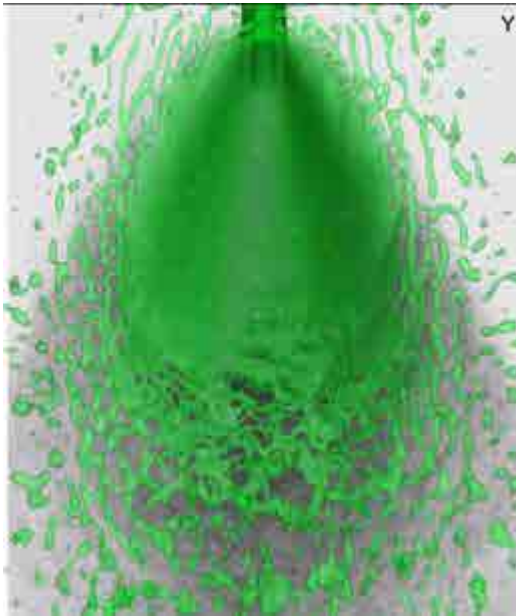
Copyright © 2009 IHI Corporation All Rights Reserved.

16

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