

衝突微粒化における液膜と液糸の形成過程 (液体噴流に重畳された擾乱の影響)

Formation Process of Sheet and Ligament by Impinging Jets (Effect of Corrugated Liquid Jets)

井上 智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋, 鶴沢 聖治, 山中 翔太
(Chihiro INOUE) (Toshinori WATANABE) (Takehiro HIMENO) (Seiji UZAWA) (Shota YAMANAKA)
東京大学 東京大学 東京大学 東京大学 東京大学大学院
(Univ. of Tokyo) (Univ. of Tokyo) (Univ. of Tokyo) (Univ. of Tokyo) (Univ. of Tokyo)

A formation process of a sheet and ligaments produced by impingements of corrugated jets are investigated by an experimental visualization and a numerical analysis. Clear images taken by a high-speed video camera reveal that the liquid sheet oscillates driven by the impingement of corrugated liquid jets, even when the Weber number is enough small and the interactions between liquid and gas are negligible. It is also clarified that ligaments are created close to the impingement point, and the outer shape of the spray is constructed by fragmented drops from the ligaments. Corresponding numerical analyses elucidate that the periodical deformation of liquid jets enhances not only the oscillation of the sheet but also the production of ligaments. Therefore, corrugations of jets are shown to be an important factor for the phenomena in impinging atomization.

Keywords: Impinging Atomization, Liquid Sheet, Ligaments, Corrugated Jets

1. 緒 論

打上ロケットと人工衛星の推進薬噴射装置には、同軸型と並んで衝突型が広く採用されている⁽¹⁾⁽²⁾。衝突型の中で頻繁に利用される二液衝突微粒化において、定格作動時に推進薬を高速で噴射する場合には、液体噴流同士が斜めに衝突して形成された液膜が激しくはためきながら分裂し、良好な微粒化を達成することができる⁽³⁾⁽⁴⁾。一方で、部分負荷作動時に、推進薬流量が減少して、低速噴射を避けられない場合の微粒化は悪化し、所定の噴霧特性を実現することは難しい。過去の研究により、平滑な二液を低速で噴射した際には、衝突後に平滑な液膜が形成され、鎖状に液膜が続く chain, あるいは、液膜の側方から液糸が成長する fish bone と呼ばれる特徴的な形態が現れることが知られている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。他方、実機に適用されるノズルは、機械的な穴開け加工によって製作されることが多いことから、ノズル内部および端面は必ずしも滑らかではなく、また、推進薬供給系の非定常的な変動とも相まって、噴流には擾乱が重畳されると考えられる。その結果、衝突時の噴流は平滑ではなく、ある程度の変形を有していると推測することができる。単孔から液柱を噴射する場合、噴射時の擾乱によって、液柱形状や液滴径が変化することが知られている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これと同様に、衝突微粒化においても、衝突前の噴流の液面変形が衝突後の液膜挙動に影響することが、可視化結果に基づき指摘されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかしながら、液面変形の性状と、液膜の振動や液糸の伸長方向との関係について、明確に理解されているとは言い難い。

そこで本研究では、二液衝突微粒化における衝突前の噴流が有する液面変形に着目して、変形の有無や位相が、衝突後の液膜挙動および液糸形成に与える影響を基礎的な観点から明らかにする。気液間の流体力学的不安定が顕在しない、ウ

ェーバー数が 500 以下の現象に注目し、可視化実験と数値解析を実施したので報告する。

2. 実験および数値解析手法

ハイスピードビデオカメラを用いた可視化と、数値流体解析を実施した。それらの手法について述べたのち、数値解析手法の妥当性を示す。

2.1 実験装置

実験装置の概観を図 1 に示す。コンプレッサーで加圧したリザーバータンクに、所定の圧力で水を保持する。その後、バルブを開き、直径 $D=1\text{mm}$ の二つのノズルを通じて、静止雰囲気中に二液を定常的に噴射し、下流で衝突して液膜を形成した。用いたノズルは、機械的な穴開け加工を行って製作した。衝突点近傍の様子を図 2 に示す。二つのノズル中心を原点として、図に示すように、 x , y , z 軸方向をそれぞれ、膜厚方向、液膜横方向、衝突点方向に定義する。二噴流は頂角 $2\theta=40\text{deg}$ をなし、噴射面から 22.5mm 下流で衝突する。ノズルは、噴流軸を微調整可能な機構を備えており、常時 y - z 平面内に液膜を形成することができる。供試液体として用いた水の物性値を、表 1 に示す。界面張力係数は、噴射後の水を採取して、Wilhelmy 法(プレート法)に基づき界面張力計(協和界面科学(株) CBVP-Z)により実測した。噴射条件を、表 2 に示す。噴射速度 V_e は数 m/s であり、次式で定義したウェーバー数は、いずれも $We=1000$ 以下である。

$$We = \rho_{\text{liq}} V_e^2 D / \sigma \quad (1)$$

可視化を行う際には、ハイスピードビデオカメラ(Photron FASTCAM APX-RS)を用いて、液膜および噴霧の背景散乱光影写真を取得した。代表的なフレームレートとシャッタースピードは、それぞれ $10,000\text{fps}$, $1/100,000\text{s}$ である。

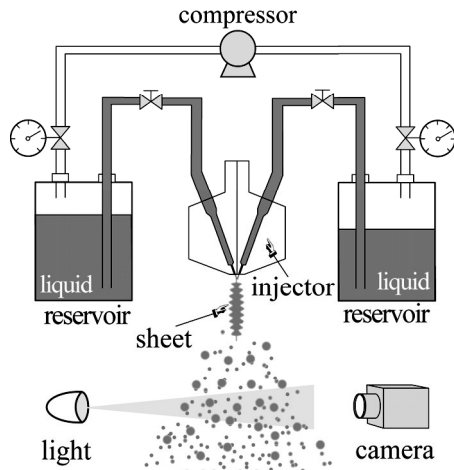


Fig.1 Experimental apparatus⁽¹¹⁾

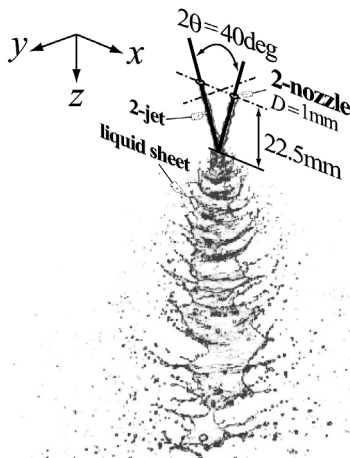


Fig.2 Close-up view near the impingement point⁽¹¹⁾

Table 1 Physical properties of working fluids⁽¹¹⁾

fluid	density ρ [kg/m ³]	viscosity μ [Pa·s]	surface tension σ [mN/m]
air	1.2	1.8×10^{-5}	72.4±0.4
water	1000	1.0×10^{-3}	

Table 2 Injection conditions

V_e [m/s]	We	Re^*	Fr^{**}
1.9	50	1900	370
3.8	200	3800	1500
6.0	500	6000	3700

* $Re = \rho_{liq} V_e D / \mu$, ** $Fr = V_e^2 / gD$

2.2 数値解析手法

衝突点近傍の連続液体挙動を捉えるために、気液界面をオイラー的に捕捉する固定格子法を採用した。自由表面を含む流れ場は、均質二相流の支配方程式(2)-(4)および二相の識別関数に関する移流方程式(5)により記述される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \rho = -\rho \nabla \cdot \bar{u} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \nabla : \Pi + \rho \bar{g} \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \nabla) e = [\Pi : \nabla] \cdot \bar{u} - \nabla \cdot \bar{q} \quad (4)$$

Table 3 Physical properties in Eq.(10)

Physical properties		X
ρ	Density	ρ
C_p	Specific heat at constant p	ρC_p
C_s	Sound velocity	$(\rho C_s^2)^{-1}$
B	Volume expansion coefficient	B
μ	Coefficient of viscosity	μ
λ	Thermal conductivity	λ

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) H_s = 0 \quad (5)$$

ここで、式(3)と式(4)中の応力テンソル Π は圧力テンソル pI 、粘性応力テンソル T_v 、及び界面張力テンソル T_σ の和であり、それぞれ式(6)-(8)で表される。

$$\Pi = -pI + T_v + T_\sigma \quad (6)$$

$$T_v = \lambda (\nabla \cdot \bar{u}) I + \mu (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \quad (7)$$

$$T_\sigma = \sigma \delta_s (I - \bar{n}_s \bar{n}_s) \quad (8)$$

但し、 δ_s は界面でのみ値を持つ delta 関数、 \bar{n}_s は界面上で液相側に向けた単位法線ベクトルである。式(5)の H_s は、系の各点が気液のどちらの相に属するかを表す関数で、以下のように定義される。

$$H_s = +0.5 \quad (\text{in liquid phase})$$

$$H_s = 0 \quad (\text{on liquid/gas interface})$$

$$H_s = -0.5 \quad (\text{in gas phase})$$

本研究では、自由表面流の数値解法として、高精度な界面形状捕捉と高い体積保存性の両者を満足できる、CIP-based Level Set & Mars (CIP-LSM)⁽¹²⁾を採用した。CIP-LSMは、流体解法としてCIP Combined Unified Procedure (CCUP法)⁽¹³⁾の一種であるTCUP法⁽¹⁴⁾を、界面追跡法として、Level Set Method⁽¹⁵⁾ (LSM)とMulti-interface Advection and Reconstruction Solver (MARS法)⁽¹⁶⁾を融合したHybrid LSM & MARS(HLSM)を用いている。界面張力はContinuum Surface Force (CSF)モデル⁽¹⁷⁾により体積力として扱う。

各格子点における流体の物性値 \bar{X} は、式(9)で定義される液相占有率を用いて式(10)から算出した。物性 X を、表3に示す。

$$H_v / J = \int_{\Omega} H_s dV \quad (9)$$

$$\bar{X} = 0.5(X_{liq} + X_{gas}) + H_v(X_{liq} - X_{gas}) \quad (10)$$

ここで、 J はヤコビアン、 Ω は検査体積を表す。気液界面セルにおける、密度と粘性係数を単純平均で与えた。本解析では、界面厚さ(surface thickness)を導入することなく、気液界面を横切る物性値の不連続を、1格子幅以内で捉えている⁽¹²⁾。この特徴は、微粒化のように、現象のスケールと格子サイズが同等になる現象を模擬する際に、特に重要である。

2.3 数値解析手法の妥当性

低ウェーバー数環境下の微粒化に対する、数値解析手法の適用可能性を調べるために、Longmire, E.K.ら⁽⁸⁾が行った、液柱からの単一液滴分裂実験(pinchoff)を対象に、三次元非定常解析を実施した⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。供試液体であるグリセリン水溶液を、シリコンオイル(Dow Corning 200)中に噴射した。物性値および噴射条件を、それぞれ表4、表5に示す。表中で、 $\Delta\rho$ は二流体の密度差を表し、添え字 i, o はそれぞれ噴流と周囲流体を指す。

Table 4 Physical properties

Fluid	ρ [kg/m ³]	μ [Pa·s]	σ [mN/m]
Water/Glycerin	1140	8.33×10^{-3}	27.3
Dow Corning 200	970	4.85×10^{-3}	

Table 5 Dimensionless parameters

Re	$\rho_i V_e D / \mu_i$	35
Fr	$V_e (\rho_i / g D \Delta \rho)^{0.5}$	0.21
We	$\rho_i V_e^2 D / \sigma$	0.26
density ratio	ρ_i / ρ_o	1.2
viscosity ratio	μ_i / μ_o	1.7

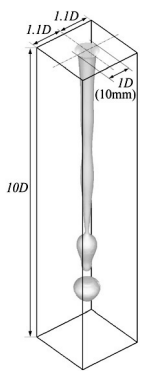


Fig.3 Analysis Model⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

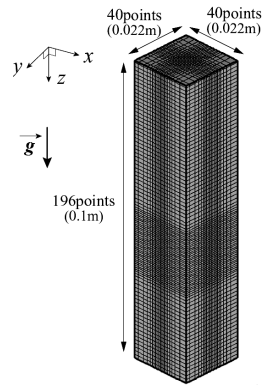


Fig.4 Grid System⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

いずれの無次元数も小さく、慣性力と界面張力、粘性力、そして重力が同程度に作用する。図3に解析対象を示す。境界条件として、上面のノズル出口部に流入条件を、下面に自由流出条件を課し、他は滑り壁とした。実験において流入速度に重畳された正弦的な擾乱を模擬するために、噴射速度 V を式(11)に従って与えた。

$$V = V_e (1 + \alpha \sin(2\pi f t)) \quad (11)$$

ここで、 $V_e = 25 \text{ mm/s}$ 、速度変動振幅 $\alpha = 0.04$ 、周波数 $f = 10 \text{ Hz}$ である。図4に示す計算格子において、液柱部分と分裂位置近傍に格子を密に配置した。ノズル直径 $D = 10 \text{ mm}$ を、32格子で解像している。座標系はノズル中心を原点として、重力加速度方向と同じく下向きを正とした。本解析では、慣性力、界面張力、粘性力、重力のいずれも考慮した。

はじめに、実験結果と数値解析結果の液柱および液滴の断面形状を、図5に示す。上段の実験結果において、流入速度変動によって液柱が軸対象に変形し、最終的に分裂する(位相 $\phi = 0 \text{ deg.}$)。分裂後の液柱先端部が界面張力によって上方に引き上げられるのと同時に、分裂点の上流側に存在する太い液柱部分が下方へと至り、両者が $\phi = 240\text{--}320 \text{ deg.}$ において合体することで、“だるま型”になる。液滴は上面の振動を伴って落下する。数値解析結果は、実験の分裂距離をほぼ再現するとともに、特徴的な液面形状を定性的な観点から捕捉しており、pinch off 現象の動的な挙動を良く模擬していると評価できる。続いて、液柱および液滴の中心軸上における軸方向速度分布を、実験と数値解析で比較して、図6に示す。解析結果は、実験結果の速度分布の傾向のみならず、最大・最小速度およびその軸方向位置を捉えている。以上の実験結果との比較を通して、低ウェーバー数環境における微粒化現象に、CIP-LSM を適用する妥当性が示された。

3. 液膜挙動と液糸形成

はじめに、可視化実験により、噴流の変形が液膜および液糸挙動に与える影響を定性的に示す。続いて、数値解析を用いて、噴流に特定の変動を加えた場合について、液膜内部構造にも着目しながら流れの詳細を説明する。

3.1 実験結果

y - z 平面における微粒化全体の様子を可視化して、図7に示す。 $We = 200$ の場合、二噴流が衝突して形成された液膜は、面に広がり、液膜の下端に一旦集まった後、粗大な液滴が分裂する。 $We = 500$ においては、液膜の側面から、斜め上方向に伸びる液糸の存在を認めることができる。液糸と液膜下方の両者から液滴が分裂する。更に速度が増し、 $We = 1700$ になると、多数の液糸が形成される。ウェーバー数の増加とともに、液滴径が小さくなる。

次に、衝突点近傍を可視化して、図8に示す。総じて、ウェーバー数の増加とともに液膜が広がる。 $We = 50$ および $We = 200$ の場合、液糸の生成は明確には認められない。液膜は平滑でなく皺を有し、界面張力の影響で、中央に比べて膜端部が厚くなる。 $We = 500$ の場合には、液糸が伸長して分裂する。

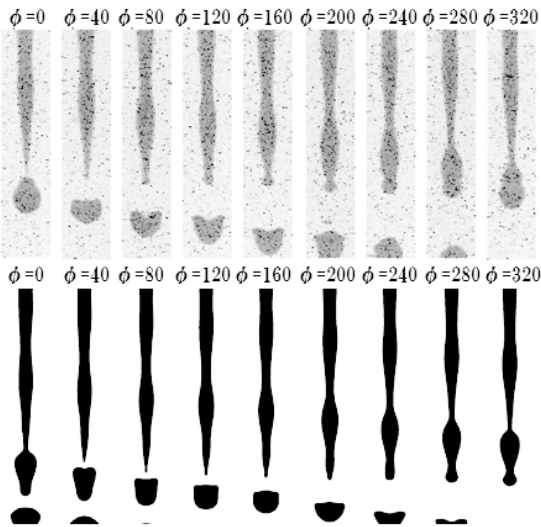


Fig.5 Phase-locked flow images on cross sections (upper; experiment⁽⁸⁾, lower; present CFD⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾)

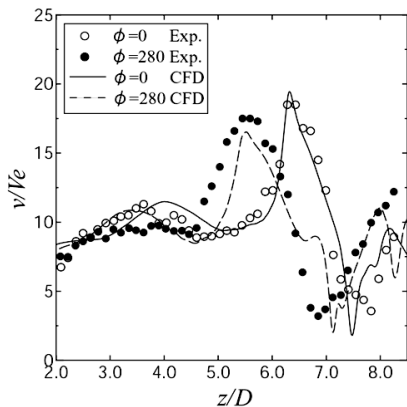


Fig.6 Axial velocity profiles along central axis⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

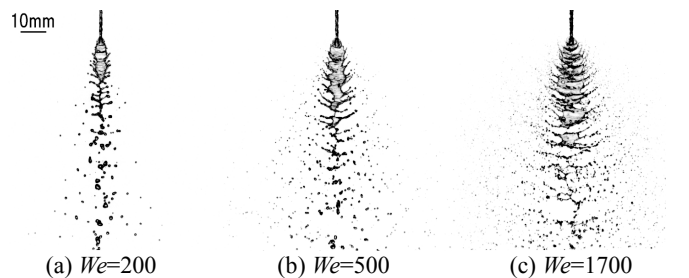


Fig.7 Front view in y - z plane

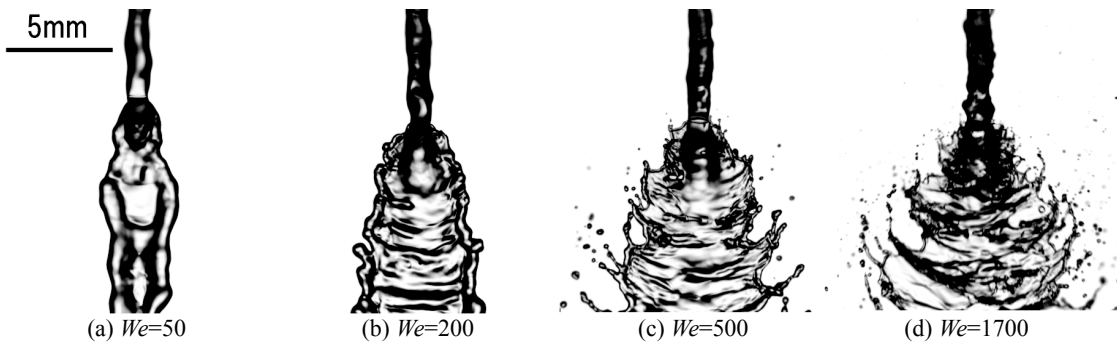


Fig.8 Close-up view in y - z plane

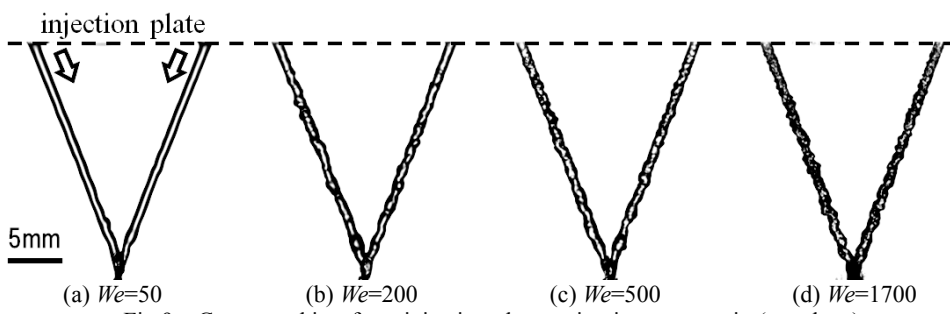


Fig.9 Corrugated jets from injection plane to impingement point (z - x plane)

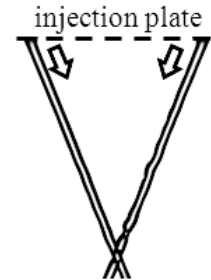


Fig.10 Without impingement ($We=50$)

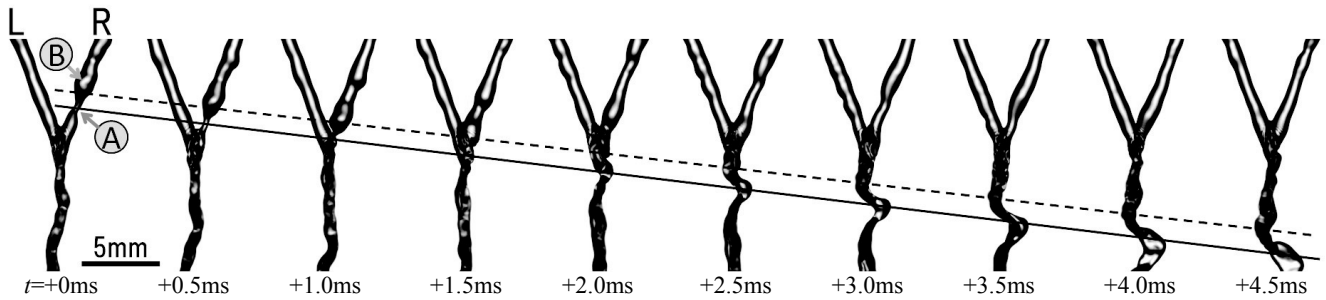


Fig.11 Time series of sheet motion driven by impingement of corrugated jets in z - x plane ($We=50$)

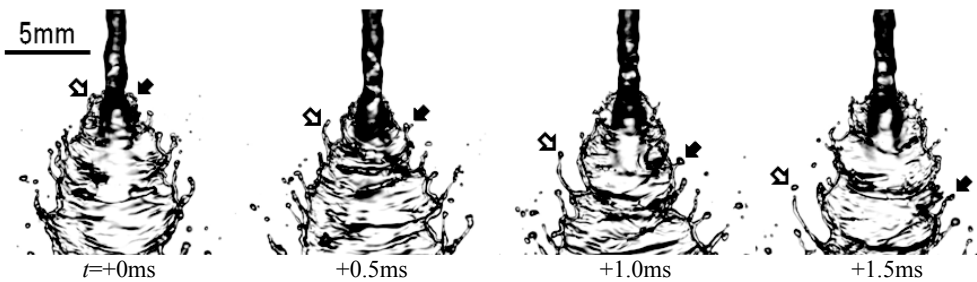


Fig.12 Ligaments formation process at $We_L=500$ (y - z plane)

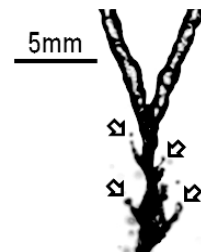


Fig.13 Elongation direction of ligaments at $We=500$ (z - x plane)

液膜には衝突点を中心として、同心円状の変形が生じている。 $We=1700$ では、液膜が一層激しく変形し、同時に液糸が分裂して多数の液滴が生成される。

続いて、噴射面から衝突点までの噴流の様子を、図 9 に示す。いずれのウェーバー数においても、噴流は完全には平滑でない。 $We=50$ の場合、二噴流はほぼ平滑であるものの、擾乱が次第に発達し、衝突点近傍で変形を有する。 $We=200$ 以上の噴流は、複雑な液面形状を有しており、ウェーバー数が増加するにつれて、より細かい変形を認めることができる。ここで、一方のノズルを、 y 方向にわずかに動かし、二噴流が衝突しない場合について可視化を行った結果を、図 10 に示す。衝突が無い場合にも噴流が変形していることから、噴流の変形は衝突に起因するものではなく、ノズル内部で生じた様々な擾乱の結果生じているものと推察される。

3.1.1 液膜の振動

$We=50$ の場合に、 z - x 平面内の衝突点近傍の様子を、図 11

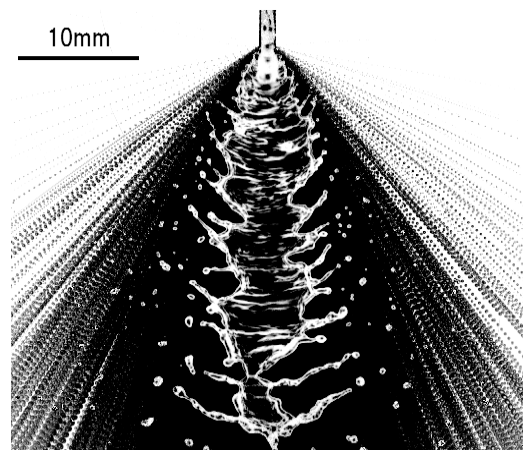


Fig.14 Time integrated view (black) overlapped with instantaneous sheet (white) at $We=500$

に示す。ここでは、図中の左側の噴流を噴流 L、右側を噴流 R と呼ぶ。時刻 $t=+0\text{ms}$ において、噴流 R の収縮部 A と拡大部 B の存在を確認できる。 $t=+1.0\text{ms}$ において、収縮部 A が、それよりも径の太い噴流 L と衝突すると、 $t=+2.0\text{ms}$ において、衝突後の液膜は右に振れる。逆に、拡大部 B が、それよりも径の細い噴流 L と、時刻 $t=+1.5\text{ms}$ で衝突すると、 $t=+2.5\text{ms}$ では、液膜が左に振れる。このように、雰囲気との干渉が小さい低ウェーバー数環境においても、衝突前の二噴流の変形によって、衝突後の液膜が振動することが明らかになった。ここで、噴流の変形は、ほぼ噴射速度で移流すること、また、約 4000Hz 以下になだらかなピークを持つ周波数特性を有することを確認している。なお、ウェーバー数が大きい場合には、図 9 に示すように、噴流形状が複雑になるため、液膜振動との相関を明らかにすることは困難であった。

3.1.2 液糸の形成

液糸の形成が明確に認められた $We=500$ において、衝突点近傍を時系列に可視化した結果を、図 12 に示す。 $t=+0\text{ms}$ に二種類の矢印で示された膜端部を時系列に追跡すると、衝突点直下から液膜側方へと液糸が伸長して分裂する。図 13 に示すように、液糸は液膜の厚み方向にも傾いている。いずれの液糸も、衝突点近傍における膜端の凸部から発達し始めることを確認した。過去に、Bremond, N and Villermaux, E⁽⁶⁾は、平滑な液膜の端部に微小な振動を加えることで、液糸の生成が誘起されることを報告している。従って、本実験では、噴流自身の非定常的な変形が起点となって、膜端部に擾乱が誘起された結果、液糸が生じたと推察できる。

3.1.3 液糸の分裂と噴霧形状

$We=500$ の場合に、20ms 間の可視化結果を時系列に重ねた画像(黒)に、瞬時の液膜(白)を合わせて、図 14 に示す。飛散した個々の液滴の軌跡が黒点線で表わされる。衝突点近傍から発達した液糸が、液膜側方へと伸長し分裂する。分裂後の液滴は、液膜の左右へと斜め下方向にほぼ直線的に飛散し、遠方へと到達する。その結果、噴霧の外縁は、より衝突点に近い位置で液糸から分裂した液滴によって形成される。

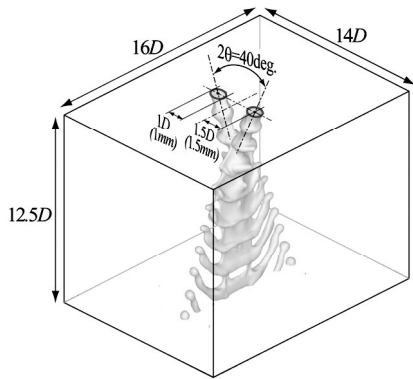


Fig.15 Analysis Model

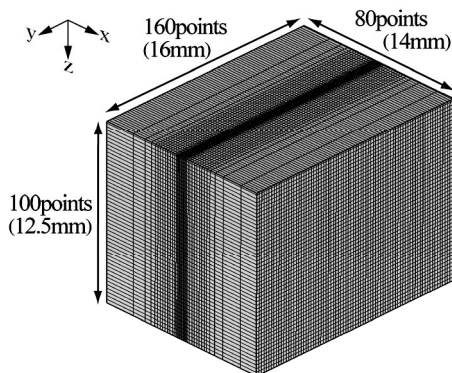


Fig.16 Grid System

3.2 数値解析結果

衝突前の液噴流に特定の変動を付加した場合の液膜と液糸の形成過程を、数値解析によって調べる。図 15 に解析対象を示す。ノズル径および衝突角は実験と等しく、それぞれ $D=1\text{mm}$, $2\theta=40\text{deg}$ である。二つのノズル中心は 3mm 離れており、大気圧下の静止雰囲気中に噴射された二噴流は噴射面から 4.4mm 下流で衝突する。図 16 に、用いた計算格子を示す。ノズル中心を原点として、実験と同様に座標系を定義する。液膜が存在する領域に格子を密に配置した。計算格子は $x \times y \times z = 80 \times 160 \times 100$ 点(計 128 万点)から成り、このとき液膜および液糸の挙動を追跡できる。境界条件は、計算領域上面のノズル出口部に流入条件を、下面に自由流出条件を課し、他は滑り壁とした。計算条件をまとめて、表 6 に示す。二種類のウェーバー数(Case1: $We=50$, Case2: $We=500$)について、それぞれ三種類の変動(Type A, B, C)を付加した。図 17 に示すように、Type A では、平滑な二噴流が衝突する。他方、Type B では、二噴流は同位相の変形を伴って衝突する(same phase)。Type C では、逆位相に変形して衝突する(inverse phase)。本解析では、噴射時の液柱径は $D=1\text{mm}$ で一定としたが、噴射速度を時間的に変動させることによって、下流の液柱径を変化させた。例えば、図 18 の上段に示すように、ある流体要素の噴射速度が、その

Table 6 Injection conditions

Case	We	V_e	corrugation	f	α	ϕ
1-1	50	1.9	A	-	0	-
			B	1300	0.10	0
			C	1300	0.10	180
1-2	50	1.9	A	-	0	-
			B	1300	0.25	0
			C	1300	0.25	180
2-1	500	6.0	A	-	0	-
			B	4000	0.10	0
			C	4000	0.10	180
2-2	500	6.0	A	-	0	-
			B	4000	0.25	0
			C	4000	0.25	180

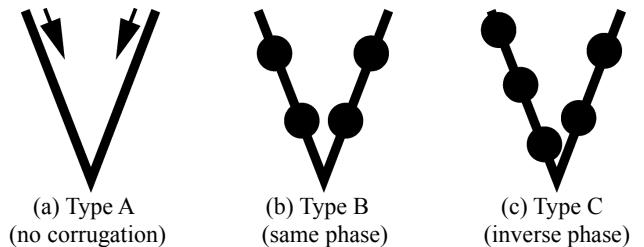


Fig.17 Three-type of liquid jet corrugation

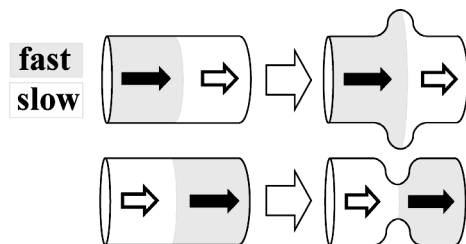


Fig.18 Deformation of jet due to injection velocity variance

前方よりも速いとき、下流で追い付き液柱径は太くなる。次式で与えられる噴射速度は、正弦的な変動を有する。

$$V=V_0(1+\alpha\sin(2\pi ft-\phi)) \quad (12)$$

ウェーバー数毎に V_0 を与え、噴射時の速度分布は一様とした。速度変動振幅 α は、Case1-1 と Case2-1 では $\alpha=0.10$ とし、Case1-2 と Case2-2 では $\alpha=0.25$ に設定した。周波数 f は、式(13)で定義されるストローハル数が、 $St=0.67$ になるように、各 V_0 に対して決定した。

$$St=f \times D/V_0 \quad (13)$$

本解析では、慣性力と界面張力、粘性力を考慮し、影響の小さい重力は無視した。

解析結果の気液界面($H_v=0$)を可視化して、図 19 に示す。あわせて、ノズル中心断面における液膜形状を示す。二噴流に、白黒二色の非混和性トレーサーを混入して追跡することで、左右どちらのノズルから噴射された流体要素によって液膜が構成されるかを判別できる。はじめに、Case1-1 ($We=50, \alpha=0.10$) を見ると、液膜形状に大きな違いはなく、二液衝突後にできた液膜の下部で膜端が衝突して、再び断面内に広がる。液膜の左右は、多少の差異はあるものの、それぞれ左と右から噴

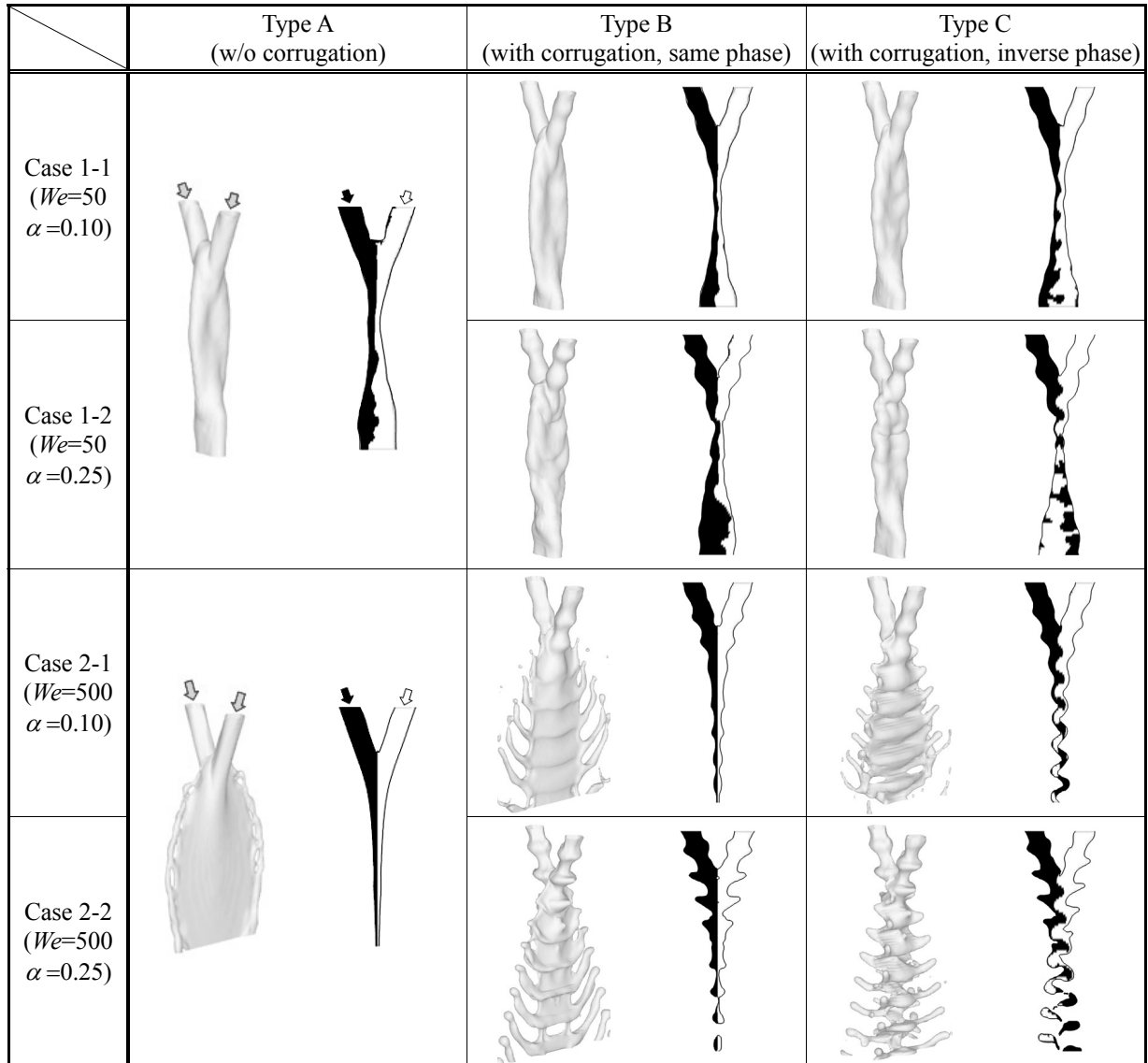


Fig.19 Numerical results of liquid sheet and cross sectional view(z-x plane)

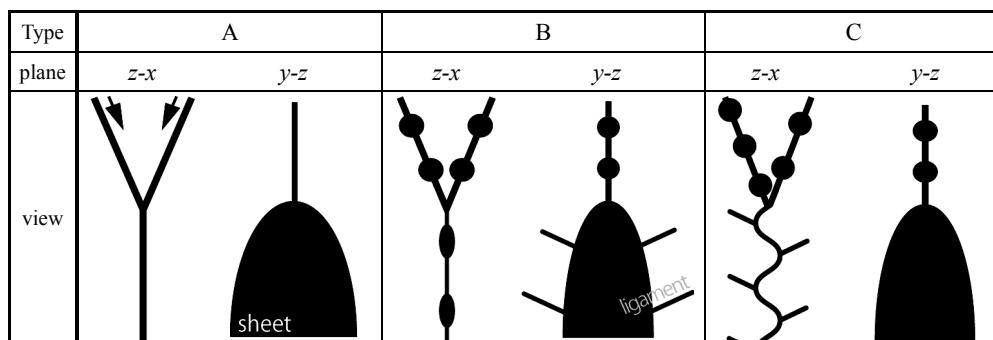


Fig.20 Schematic of sheet and ligaments

射された流体要素から成る。他方, Case1-2 ($We=50, \alpha=0.25$)では, 液柱の変形によって液膜挙動が異なる。いずれの場合も液系の生成は認められない。同位相の変形を有する Type B の場合, 液膜の中央部分に周期的な凹凸が現れる。二噴流の拡大部が衝突すると液膜は厚く, 縮小部が衝突すると薄くなる。逆位相の変形を有する Type C の場合は, 液膜が膜厚方向に周期的に振動する。液膜断面図を見ると, 左(右)の噴流における拡大部の流体要素は, 最終的に液膜の右(左)部分を構成することが分かる。次に, Case2-1($We=500, \alpha=0.10$)において, 噴流に変形が無い場合(Type A)の液膜は平滑であるのに対して, 変形を有すると(Type B, C), 液糸が形成される。図 20 の模式図にも示すように, 二噴流の変形が同位相の場合(Type B), 周期的に膜厚が変動しながら, 液膜側方に液糸が発達する。液糸の根元は, 液膜の厚い部分, 即ち, 二噴流の拡大部が衝突した箇所に位置する。液糸は, 液膜側方から対で生じることを考慮して, 生成される個数は $2f$ 個/s である。液膜の左右は, それぞれ左と右から噴射された流体要素から成る。他方, 二噴流の変形が逆位相の場合(Type C), 衝突時の運動量差に起因して, 二噴流の拡大側から縮小側に向かって液膜が振動する。これは, 図 11 の実験結果と定性的に一致する。液糸は膜厚方向に伸長し, 生成個数は $4f$ 個/s である。液膜断面において, 左右のノズルから噴射された流体要素は, 液膜内部で交差するように液膜内部を流れる。図 12 および図 13 において実験的に観察された, 液膜振動と液糸の横手方向および膜厚方向への発達, 定性的には, Type B と Type C の場合が複合した結果であると考えられる。最後に, Case2-2 ($We=500, \alpha=0.25$) の場合, 液膜の挙動と液糸の生成に関して Case2-1 と同様である。しかし, 噴流の変形が大きいため, 液糸の生成が促進される。

4. 結 言

低ウェーバー数環境下の二液衝突微粒化において, 衝突前の噴流の変形が, 下流の液膜挙動と液糸の生成過程に与える影響を明らかにするために, 実験と数値解析を実施した。結果を以下にまとめる。

実験により次の知見を得た。

1. 衝突前の液体噴流の変形は, 衝突後の液膜振動と液糸形成を誘起する。
2. 雰囲気との干渉が小さい低ウェーバー数環境においても, 液噴流の非定常的な変動に起因して, 衝突後の液膜が振動する。
3. $We > O(10^2)$ において, 衝突点近傍から液糸が発達した。液糸は, 膜厚方向にも傾きながら, 液膜の横手方向に成長し, 分裂する。
4. 衝突微粒化によって形成された噴霧の外縁は, 衝突点に近い位置で液糸から分裂した液滴によって構成される。
数値解析によって次の知見を得た。
5. 二噴流の変形が同位相の場合, 液膜厚さが周期的に変化しながら, 液糸は液膜の横手方向に成長する。
6. 二噴流の変形が逆位相の場合, 液膜は振動し, 液糸は膜厚方向に成長する。

本研究によって, 変形を有する噴流が衝突した際に形成される, 液膜および液糸の挙動について, 定性的な観点からは明らかになった。今後は, 噴流に特定の擾乱を重畳した際の微粒化現象を実験により調査することで, 定量的な議論が可能になると期待される。

謝 辞

本実験で使用した噴射器を製作して頂いた(有)北野製作所の小野沢順一氏に, 心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) Sutton, G.P. and Biblarz, O.: Rocket Propulsion Elements (8th edition), Wiley (2010).
- (2) 木村逸郎: ロケット工学, 養聖堂 (1993).
- (3) Huang, J.C.P.: The break-up of axisymmetric liquid sheets, *J. Fluid Mech.*, 43(1970), 305-319.
- (4) 棚沢泰: 衝突による液体微粒化の研究(第 1 報 微粒化機構に就て), *機論* 8-33(2)(1942), 87-99.
- (5) Bush, J.W.M. and Hasha, A.E.: On the collision of laminar jets: fluid chains and fishbones, *J. Fluid Mech.*, 511(2004), 285-310.
- (6) Bremond, N. and Villermaux, E.: Atomization by jet impact, *J. Fluid Mech.*, 549(2006), 273-306.
- (7) Rohani, M., Jabbari, F., and Rankin, D.D.: Breakup control of a liquid jet by disturbance manipulation, *Physics of Fluids* 22 (2010), 1071103, 1-11.
- (8) Longmire, E.K., Norman, T.L., and Gefroh, D.L.: Dynamics of Pinch-Off in Liquid/Liquid Jets with Surface Tension, *Int. J. of Multiphase Flow*, 27(2001), 1735-1752.
- (9) Yasuda, N., Yamamura, K., and Mori, Y.: Impingement of liquid jets at atmospheric and elevated pressures: an observational study using paired water jets or water and methylcyclohexane jets, *Proc. R. Soc. A*, 466 (2010), 3501-3526.
- (10) Anderson, W.E., Ryan, H.M. and Santoro, R.J.: Impinging jet injector atomization, in *Liquid Rocket Engine Combustion Instability* (Eds. Yang, V., and Anderson, W.E.), *Prog. Astro. Aero.*, 169(1995), 215-246, AIAA.
- (11) 井上智博, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 越光男: エネルギー保存則に基づく噴霧粒径推算法, *機論 B*, 78-788(2012), 850-861.
- (12) 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), *機論 B*, 76-765(2010), 778-788.
- (13) Yabe, T. and Wang, P.Y.: Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid, *J. Phys. Soc. Japan*, 60-7 (1991), 2105-2108.
- (14) 姫野武洋, 渡辺紀徳: 低重力環境における熱流体管理に関する研究(第 1 報, 熱流動解析に適した CCUP 法-TCUP 法の提案), *機論 B*, 69-678(2003), 266-273.
- (15) Osher, S. and Sethian, J.A.: Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations, *J. Comp. Phys.*, 79(1988), 12-49.
- (16) Kunugi, T.: MARS for multiphase calculation, *Comp. Fluid Dynamics J.*, 9-1(2000).
- (17) Brackbill, J.U., Kothe, D.B. and Zemach, C.: A Continuum Method for Modeling Surface Tension, *J. Comp. Phys.*, 100 (1992), 335-354.
- (18) Inoue, C., Watanabe, T. and Himeno, T.: Atomization and Flow Characteristics of Liquid Sheet Produced by Jet Impingement, *J. Prop. and Power*, 28-5(2012), 1060-1070.
- (19) 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過程に関する研究, 第 17 回微粒化シンポジウム(2008), 1-8.



井上 智博
東京大学大学院工学系研究科
総合研究機構
JAXA 社会連携講座特任助教
住所：東京都文京区本郷 7-3-1
Tel/Fax：03-5841-6624
email：inoue@aero.t.u-tokyo.ac.jp

略歴：2007年東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 博士後期課程中途退学後，同専攻助教に着任。2012年より現職。宇宙航空推進機関内部の微粒化の研究に従事。



鵜沢 聖治
東京大学大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻 学術支援職員
住所：東京都文京区本郷 7-3-1
Tel/Fax：03-5841-6624

略歴：1970年より東京大学勤務。2012年同大学定年退職。同年より現職。航空宇宙推進学，内部流体力学等の教育研究に従事。



姫野 武洋
東京大学大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻准教授
住所：東京都文京区本郷 7-3-1
Tel/Fax：03-5841-6576

略歴：2001年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，博士(工学)。宇宙開発事業団特別研究員を経て，2004年より東京大学講師，2007年より現職。航空宇宙推進学，内部流体力学等の教育研究に従事。



山中 翔太
東京大学大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻 修士課程
住所：神奈川県相模原市中央区由野台
3-1-1
Tel：042-751-3911
Fax：042-759-4251

略歴：2012年東京大学工学部航空宇宙工学科卒業。宇宙推進工学の研究に従事。



渡辺 紀徳
東京大学大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻教授
住所：東京都文京区本郷 7-3-1
Tel/Fax：03-5841-6584

略歴：1987年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，工学博士。東京農工大学講師・助教授を経て，1993年より東京大学勤務。航空宇宙推進学，内部流体力学等の教育研究に従事。