

### VOF を用いた平面液膜の気流微粒化現象の数値解析

首藤, 智太郎 / SHUTOU, Tomotaro

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00012924>

# VOF を用いた平面液膜の気流微粒化現象の数値解析

Computational fluid dynamics for plane liquid sheets atomization phenomenon caused by the current of air using the VOF method.

首藤 智太郎  
Tomotaro shutou  
指導教員 林 茂

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis using the Volume of Fluid (VOF) method was conducted to study the behavior and atomization of a liquid sheet sandwiched by air jets from rectangular nozzles, which is the simplest model of a filming type air-blast fuel nozzle for aero engines. Effects of ambient pressures of 0.1 and 0.8 MPa, strength of shear of air jets by different vane angles of zero and 45 degrees on the behavior and atomization of the liquid sheet were investigated. The behavior of the sheet predicted agrees with that observed in the experiments using a 2-dimensional air-blast nozzle. No effects of ambient pressure or strength of shear on SMD were predicted while the SMD is independent of strength of shear at atmospheric pressure but becomes smaller at the stronger shear conditions. Inaccuracy of the value of surface tension used in CFD is thought to be one of the major reasons for the inconsistency in the values of SMD by CFD prediction and experiment.

**Key Words:** CFD, liquid sheets, Atomization, shear

## 1. 結論

近年, ICAO (国際民間航空機関) CAEP (航空環境保全委員会) による条約等による環境問題への関心によって航空用エンジンから排出される窒素酸化物である NO<sub>x</sub> の排出規制が厳しくなっている. NO<sub>x</sub> の排出を避けるためには NO<sub>x</sub> が発生しやすい当量比付近を避けて燃焼させる必要があり, そのためには燃料の微粒化, 空気と混合を狙い通りに行う微粒化ノズルが必要となる.

気流微粒化燃料噴射ノズルの一形態である液膜式気流微粒化ノズルは, 環状の液膜をその内側と外側に配された空気流路を流れる気流により挟み込み, 液体と気流の速度差などの影響によって微粒化させるものであり, 燃料の微粒化・混合性能に優れているとされ NO<sub>x</sub> の排出量削減が期待されている. 液膜式気流微粒化ノズルは, 空気流路に配された外周旋回羽根の角度を変更することで気流のせん断力の強さを変化させることが可能であり, それによって燃料粒径が変化するという微粒化特性が報告されている.

鈴木ら [1] は, 同心軸円状に内外逆旋回の 2 重スローラを配置した液膜式気流微粒化ノズルを用いて, 旋回羽根の角度と微粒化性能の影響を調査し, 旋回羽根の角度がある値以上になると微粒化性能

が悪くなるという結果を見いだした. 微粒化性能の劣化の原因として鈴木らは, 旋回羽根の角度の増加によって, 気流に遠心力が働き液膜と気流の干渉が弱まるということを考察している. また, ノズルから放出された気流は, 遠心力により外側に流れるため, ジェットの断面積が拡大し, 速度が減少する. 鈴木らは, その速度減少が, 気流のせん断力を弱め, 結果として, 液滴の微粒化性能の劣化の原因となる可能性についても述べている. このように, 通常のコピー状の液膜式気流微粒化ノズルは, 遠心力のため, 旋回羽の角度の増加に伴い必ずしも気流のせん断力が強くなるわけではない.

吉田 [2] は上記のコピー状の微粒化ノズルを二次元化させ, 遠心力の影響をなくし, 気流のせん断力のみが微粒化特性に及ぼす影響を調査するため, 図 1 に示す平面液膜式気流微粒化燃料噴射弁を開発し調査を行なった. この装置は気相流路にある案内羽根の角度 (以下羽根角度) を調整することにより気流にせん断力を与えられるようにしたものである. 調査の結果, 雰囲気圧力が低い場合にはノズルから 30 mm 下流における微粒化液滴のザウタ平均粒径 (以下 SMD) の値は羽角度に依存せず, 高雰囲気圧力下では羽角度が 45 deg のとき 0 deg の SMD と比較すると小さくなっている傾向が見られ

た. 図 2 は, 実験で可視化された液膜の分裂の様子を上から可視化したものとなっている. 吉田は, この可視化画像から, 高雰囲気圧力下では, 低雰囲気圧力下の液膜と比較して, その構造に間欠性が存在することを見出した. しかし, 気流速度が約 80 m/s と非常に速いため, 液膜が分裂するまでの長さが約 3 mm 以下となっており, 分裂過程の詳細なメカニズムについては明らかになってはいない.

本研究では平面液膜式気流微粒化燃料噴射弁の数値解析を行い実験での観察が困難な, ノズル出口近傍における液膜構造に着目し, 低圧, 高圧下でせん断力がどのような影響を及ぼしているかを理解することを目標とする.

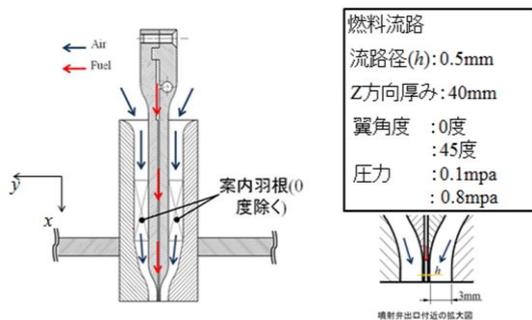


図 1. 平面液膜式気流微粒化ノズル概略図

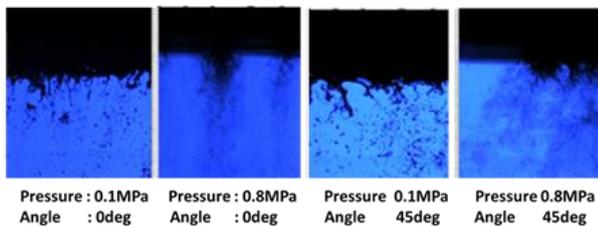


図 2. 液膜の分裂の様子

## 2. 計算条件

本研究では Hirt ら [3] が開発した Volume of Fluid method (VOF 法) を用いた CFD コードを使用して, 気液二相流の計算を行い, 液膜の微粒化過程を調査した.

本計算では, 案内羽根角度が 0 deg (気流のせん断力がないもの) と 45 deg (気流のせん断力があるもの) の 2 通りの条件と雰囲気圧力が大気圧下 (圧力 0.1 MPa, 空気密度 1.24 kg/m<sup>3</sup>) と高圧力下 (圧力 0.8 MPa, 空気密度 10.0 kg/m<sup>3</sup>) の 2 通りの条件で計 4 通りの組み合わせの条件で調査を行った. また計算の際ナビエ-ストークス方程式の対流項を保存系, 非保存系でそれぞれ分散化し計算した. 大気圧と高圧, 羽根角度 0 deg と 45 deg, 対流項の保存系と非保存系のそれぞれの組み合わせ

で計 8 ケースの計算を行った. 図 3 に解析領域とその境界条件, 表 1 に計算条件を示す. 本研究では流れ方向を x 軸, 横方向を y 軸, スパン方向を z 軸とするまた, 羽角度 0 deg の際は z 軸方向の計算範囲は 4 mm, 羽根角度 45 deg の際には 6 mm となっており, これは羽根角度 45 deg の際は案内羽根の影響による気流速度の勾配が約 6 mm おきに周期的に発生していたことが実験の際に確認されていたためである.

気相の流入条件は, 高橋 [4] が行った宇宙開発機構 (JAXA) 開発の CFD プログラムである UPACS (Unified Platform for Aerospace Computational Simulation) を用いたノズル入口から出口までの圧力損失を 4 % としての気相の解析結果を使用した.

液相の流入条件はケロシン (温度 288 K, 密度 780 kg/m<sup>3</sup>, 表面張力 0.0227 N/m, 粘性係数 2.42e-3 Pa·s) が流速 0.05m/s で定常状態として流入していると仮定した. また, 液膜の間欠性の調査を実施するために, 液相の流入条件設定位置は, ノズル出口より 1 mm 上流としている.

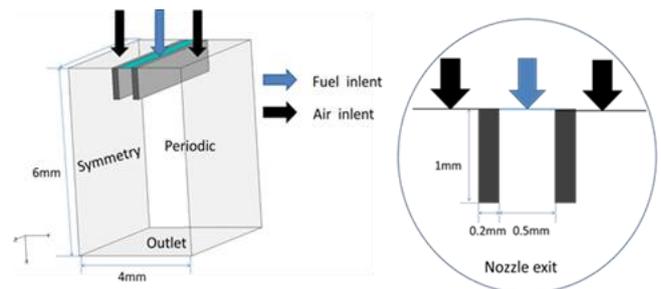


図 3. 境界条件

表 1. 計算条件

流体モデル	非圧縮粘性流体
乱流モデル	Direct Numerical Simulation (DNS)
格子幅	10 μm
計算格子	スタッガード格子
時間積分法	Euler 陽解法
対流項分散化法	1 次風上差分
ポアソン方程式解法	SMAC 法
液体輸送方法	PLIC 法
表面張力項	CSF モデル

### 3. 液膜の様子

8 ケースの液膜の様子を図 4, 図 5 に示す. 図 2 に示した実験の様子を見ると, 雰囲気気圧力 0.1 Mpa ではノズル出口から流路方向にほぼ一様に燃料液体が流出しており, 雰囲気気圧力 0.8 Mpa ではノズル出口から燃料液体が流出している場所としていない場所に別れており間欠性が表れている. これは Fernandez ら [5] が平面液膜微粒化ノズルにおいて液膜の形は気相と液相の運動量比が支配的であると述べている通りであり, 高圧力下では, 空気の密度が上昇しており, 気相の運動量が低圧力下の場合と比較して約 9 倍となっているため運動量が増加し, 気流の逆流による押し込みが強くなっているためである.

計算結果においては羽根角度 0 deg のケースだと判断しづらいが羽根角度 45 deg の非保存形のケースでは雰囲気気圧力 0.1 MPa では液膜がノズル出口から全体的に飛びだしており間欠性がなく, 雰囲気気圧力 0.8 MPa のケースでは間欠性が表れ実験の液膜の様子を再現できている.

大気圧下での羽根角度 45 deg の NS 方程式対流項保存形と非保存形で離散化した計算結果を時間毎に比較した図を図 6 に示す. これを見ると非保存形の方は, 液膜がノズル出口から一様に出ており, 実験の様子に近い状態となっている. これは SMAC 法を行った際に, 保存形と非保存形では, 気流と液膜のような速度が速い流れと遅い流れが衝突する場所では速度の予測子が異なるためである. 予測子を用いて, ポアソン方程式を解く際にその差が修正される必要がある. 保存形と非保存形で液膜の形が一致しない問題は 2 次元のモデルを用いて, 計算格子幅を小さくし, 精度を上げることで気流の押し込みの強さが弱くなり非保存形のような液膜になることを確認しているが, スタガード格子における気液界面における密度の求め方等のさらなる調査が必要である.

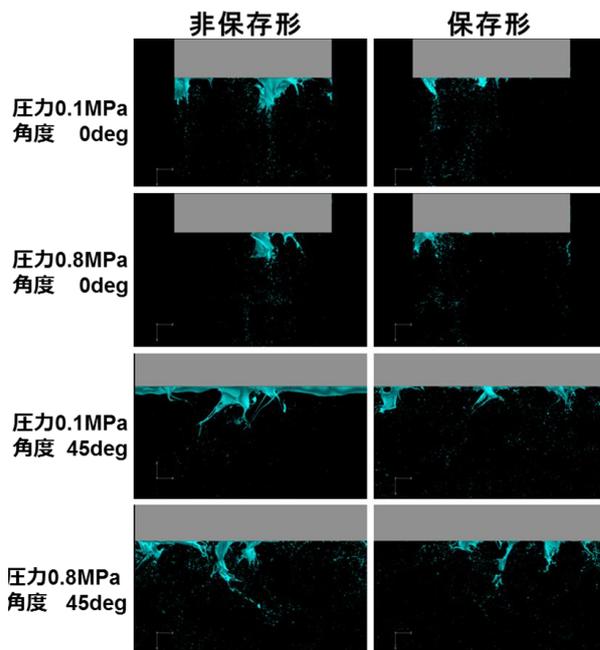


図 4. CFD 解析による液膜の分裂の様子

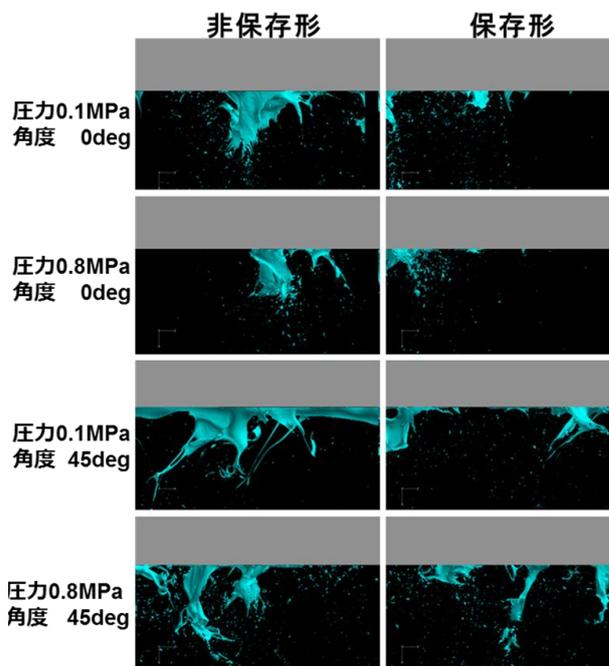


図 5. CDF 解析による液膜の分裂の様子(拡大図)

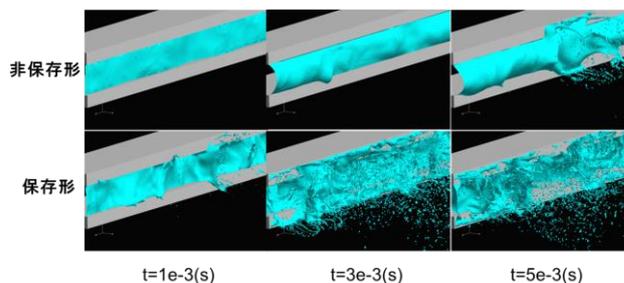


図 6. 保存形と非保存形での液膜の比較

#### 4. 微粒化性能

本計算で計測された微粒化液滴の SMD と実験で計測された SMD の値を表 2 に示す. 本計算では, メッシュの格子幅を  $10\ \mu\text{m}$  としているが,  $10\ \mu\text{m}$  以下の液滴も採取液滴としてカウントし, 各ケースでそれぞれ 4 万前後の液滴数から SMD を計算した. また, 実験ではノズル出口から流路方向に  $15\ \text{mm}$  の位置で微粒化液滴の SMD を計測しているが, 本計算では計算範囲の関係上ノズル出口から  $2.5\ \text{mm}$  下流の位置で計測している.

実験で測定された SMD は, 雰囲気圧力  $0.1\ \text{Mpa}$  では, 羽根角度に依存せず約  $38\ \mu\text{m}$ , 雰囲気圧力  $0.8\ \text{Mpa}$  の場合には, 羽根角度  $0\ \text{deg}$  では, 約  $18\ \mu\text{m}$ , 羽根角度  $45\ \text{deg}$  では約  $14\ \mu\text{m}$  であった. 本計算では, 全ての条件において  $25\ \mu\text{m}$  前後と実験における傾向は見られなかった.

図 7 は, 液膜から液滴が分裂した際のせん断方向である Z 軸方向の速度  $W$  を横軸に, 分裂した際の液滴の数密度を縦軸に示したものである. この統計分布は SMD の主要となる直径  $10\ \mu\text{m}$  以上の粒子を対象としており, この図から雰囲気圧力  $0.8\ \text{MPa}$  の方が分裂時により多くの液滴が, 強いせん断力下分裂していることがわかる. しかしせん断の影響は SMD に反映されてはいなかった. 計算で測定される SMD は液体輸送法や格子の大きさ等の影響によって変わることが確認されており現象通りの値を出すことは困難であるため, 正確な表面張力の見積もり等の様々な改善が必要である.

表 2. SMD の比較

雰囲気圧力 (MPa)	0.1	0.8	0.1	0.8
案内羽根角度 (deg)	0		45	
非保存形 SMD (CFD) ( $\mu\text{m}$ )	25.9	27.2	22.6	24.6
保存形 SMD (CFD) ( $\mu\text{m}$ )	26.7	26.0	25.2	23.3
SMD (実験) ( $\mu\text{m}$ )	36.0	36.0	18.0	14.0

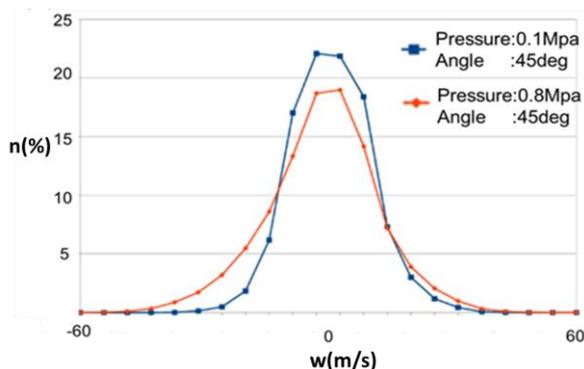


図 7. 分裂時液滴速度の統計分布

#### 5. まとめ

平面液膜式気流微粒化ノズルの CFD 解析を行った結果, 大気圧下では気流による液膜の押し込みが弱い間欠性が低く, 高圧下では気流に液膜が押し込まれ間欠性が表れており特に, 案内羽根角度が  $45\ \text{deg}$  の場合, 明らかに表れている. この液膜の様子は実験結果と一致した.

微粒化の際に大気圧下より高圧力下の方がせん断による影響を受けていることを確認したが, 全ての条件において, 液滴の粒径のザウタ均粒径は  $25\ \mu\text{m}$  となっており, 吉田[2]が実験で計測した値は本研究からは得られなかった. これは格子依存性や表面張力の見積もりなどに問題があったためであると考えられる.

#### 参考文献

- [1] 鈴木俊介, 須田充, 松浦一哲, 林茂, 液膜式気流噴射弁の設計パラメータ・作動条件が噴霧特性に与える影響-第二報 気流・旋回の旋回及び噴射出口形状の影響 -, JAXA-RM-08-015 (2009), JAXA
- [2] 吉田 圭佑 液膜式気流微粒化燃料噴射弁の噴霧特性に関する研究
- [3] Hirt, C. and Nichols, B.D (1981): Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Journ. of Computational 39, 2 01-225
- [4] 高橋信平 平面液膜式気流微粒化ノズルの噴霧特性に関する数値解析
- [5] Vital G. Fernandez P. Berthoumieu, G. Lavergne: Primary Atomization in Water and Kerosene Liquid Sheets At High Pressure