

衛星推進系二液スラスタの噴霧計測および数値解析

Spray Measurements and Numerical Analysis of Bi-Propellant Thrusters for Spacecraft Propulsion Systems

松野 伸介 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
 松田 奈緒己 株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペース 宇宙技術部
 梅田 浄二 株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペース 宇宙技術部 主幹
 長田 泰一 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部
 梶原 堅一 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 グループ長

数値流体解析技術を二液スラスタに適用し、性能予測を行った。液体推進剤の噴射、蒸発および燃焼を取り扱うため、気液二相流モデルとして DDM 法を使用した。二液スラスタに用いられる推進剤は自発的な着火を伴うため、数値解析に必要な初期噴霧特性を実際の推進剤を用いた噴霧計測によって取得した。推進剤の噴霧粒径は自発的な着火によって、従来数値解析に用いられてきた模擬液による非燃焼噴霧粒径に比べて半分程度に小さくなる。これらの初期噴霧特性は解析結果に大きな影響を与えることが分かった。

The performance prediction for bi-propellant thrusters was investigated using CFD. The DDM (Droplet Discrete Model) method was applied as two-phase model to calculate injection, evaporation and combustion of liquid propellants. The initial spray characteristics of the actual propellants were obtained by experimental measurements because the impact of hypergolic ignition, or automatic ignition due to high reactivity of the propellants, on the spray characteristics was unknown. The mean droplet diameter was much less than that of a non-combusting spray of simulants, which has been used as input data for numerical analysis. The initial spray characteristics significantly affect the results of performance prediction by CFD.

1. 緒 言

ガスタービン燃焼器やロケットエンジンなど、液体燃料を用いる燃焼器の設計手法として数値流体解析 (CFD) 技術の応用が多く試みられている。一般にこれらの燃焼器内では液体燃料の噴射、微粒化および蒸発といった現象が高温の燃焼ガスと干渉しながら進行するため、液体と気体の挙動を同時に解く気液二相流の解析技術が必要となる。なかでも噴霧燃焼を行う燃焼器に対しては、噴射された液体燃料の個々の液滴を運動する粒子として扱う DDM (Discrete Droplet Model) 法が最も多く使用される⁽¹⁾。

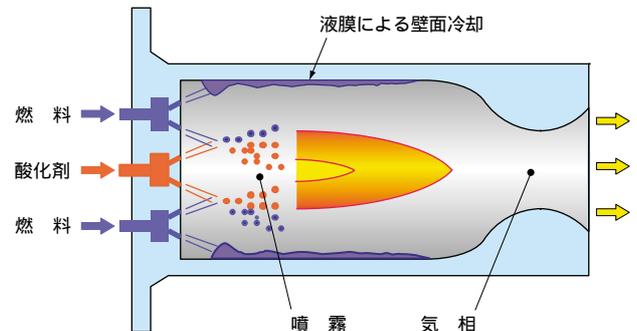
DDM法を使用する場合は、燃料噴射ノズルの初期噴霧特性 (ノズルを出た直後の液滴の粒径、速度、噴霧角など) が数値解析の入力値として必要になる。これらのデータを取得するため理論解析や数値解析を利用した研究も盛んに行われているが、最も直接的かつ精度の高い方法は実際に噴霧特性を計測することである。

近年では位相ドップラー流速計や干渉画像法などレーザーを利用した非接触型の噴霧計測手法がめざましく発達し、特に燃焼を伴わず温度変動が影響しない非燃焼噴霧については、かなり精度の良い計測が実現されてきている。した

がって、点火を行わずにノズルから噴射された燃料の初期特性を計測すれば、その結果を DDM 法の入力値として利用することも可能である。

本研究の対象である二液スラスタ (第1図) は、人工衛星をはじめとする宇宙機器の姿勢制御や軌道変更に利用される推進器で、液体燃料と酸化剤の噴霧燃焼によって推力を発生する装置である。二液スラスタについても同様の考えのもとに CFD を適用した例が幾つか報告されているが^{(2),(3)}、噴霧特性の与え方については課題が残されている。

二液スラスタに多く用いられる衝突噴流式ノズルの概略



第1図 二液スラスタ
Fig. 1 Bi-propellant thruster

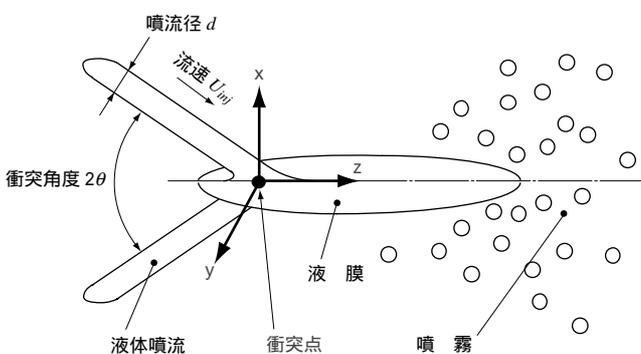
を第 2 図に示す．これは液体噴流の衝突によって微粒化を促進する形式のノズルであり，二液スラストでは燃料噴流と酸化剤噴流を互いに衝突させる unlike 型が一般的である．さらに推薬が自然性とと呼ばれる非常に高い反応性をもつ組合せの場合は，燃料と酸化剤との衝突とともに自発的な着火が生じ，激しい燃焼反応が生じることが知られている．この特性のため自然性推薬を用いた計測は困難であり，従来は物性が推薬に近く反応性のない模擬液による噴霧特性を計測し，その結果を CFD の入力値として利用することが多かった⁽³⁾．

しかし，推薬の自発的な着火が初期の噴霧形成に与える影響は明らかにされておらず，実際の推薬と模擬液の初期噴霧特性が近いかどうかは不明であった．そこで本研究では高速度撮影による噴霧計測手法を燃焼場に応用し，二液スラストの実際の運用条件下で燃焼している推薬の噴霧形成過程を観察した．さらに画像処理技術を用いて噴霧粒径を算出し，二液スラストの CFD に適用して初期噴霧特性が数値解析結果に与える影響について検討した．

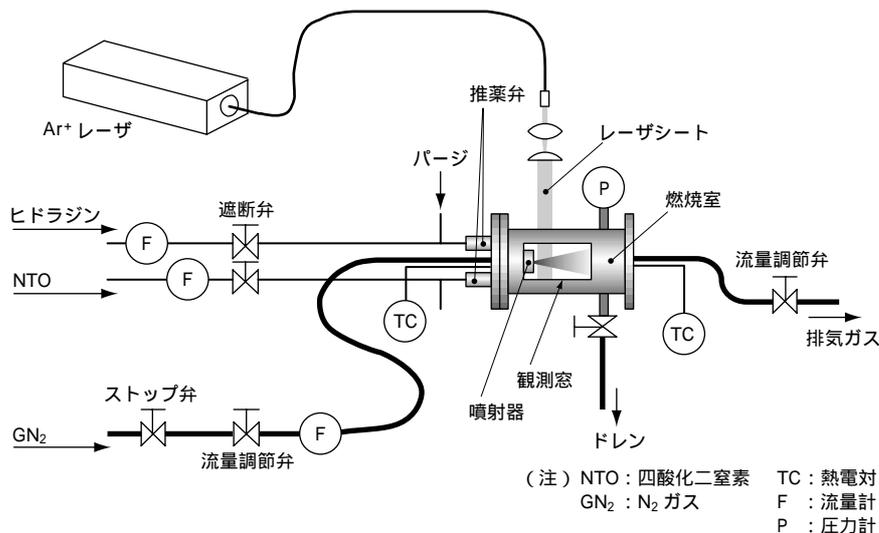
2. 噴霧特性の計測

2.1 試験装置

第 3 図に噴霧計測試験装置の概略を示す．耐熱ガラス製の観測窓を三方に設けた燃焼室には，内部に一組のノズルをもつ噴射器を取り付けた．燃料および酸化剤はタンクから He ガスの加圧によって供給され，流量はタービン流量計で計測された．燃焼圧を高めるため，噴射前に N₂ ガスを燃焼室内に供給し，排気管に取り付けた流量調節弁で燃焼前の圧



第 2 図 衝突噴流式ノズル
Fig. 2 Schematic of impinging jets



第 3 図 噴霧計測試験装置
Fig. 3 Experimental apparatus

力を調節した．試験条件を第 1 表に示す．推薬にはヒドラジンおよび四酸化二窒素（以下，NTO）を使用した．また比較対象として，非燃焼試験では両者に物性の近い水およびハイドロフルオロエーテル（以下，HFE）を使用した．それぞれの液体の物性値を第 2 表に示す．

2.2 計測手法

粒径の計測にはミー散乱法を利用した．波長 488 nm の Ar⁺ レーザによるレーザーシート光と高速度カメラを用いて噴霧の断面画像を撮影した．カメラには干渉フィルタを装着し，火炎からの発光を除去してレーザー散乱光のみを撮像できるように設定した．液滴の像の流れを防ぐため，露光時間は 10 μs とした．

撮影画像と画像処理例を第 4 図に示す．このような画像

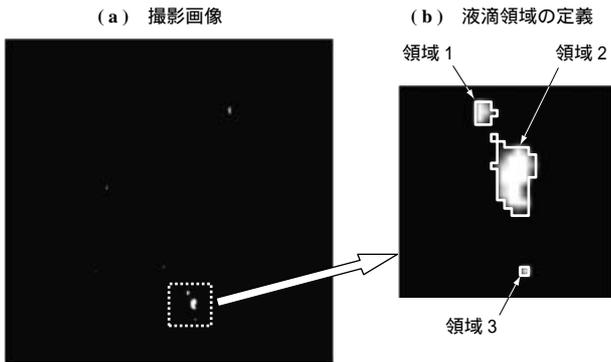
第 1 表 試験条件
Table 1 Experimental conditions

項目	燃料	酸化剤
衝突角度 2θ (°)	60.0	
噴流径 d (mm)	0.5 ~ 0.6	0.55 ~ 0.66
流速 U_{inj} (m/s)	16 ~ 23	10 ~ 18
燃焼室内圧 (MPa)	0.8	

第 2 表 液体の物性値
Table 2 Properties of liquids

液体	密度 (kg/m ³)	粘性係数 (μPa·s)	表面張力 (mN/m)
ヒドラジン	1004	913.0	66.5
水	997	854.4	71.7
NTO	1433	396.0	25.1
HFE	1430	572.0	13.6

(注) 温度：298 K
圧力：0.1 MPa



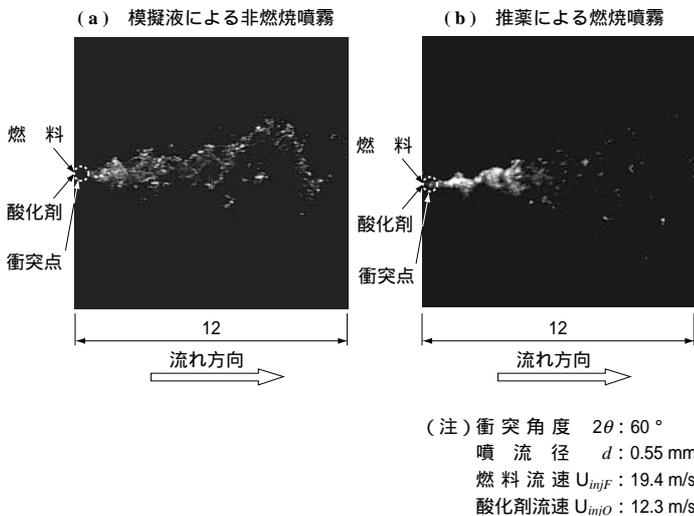
第 4 図 撮影画像と画像処理例
Fig. 4 Image processing

を基に、ミー散乱理論に基づいて散乱光強度が粒径の二乗に比例すると仮定して個々の液滴の粒径を算出した。

2.3 計測結果

第 5 図に非燃焼および燃焼試験における衝突点近傍の噴霧画像を示す。両者の流速、噴流径は同一である。画像は第 2 図の xz 断面であり、撮影視野の一辺は 12 mm とし、衝突点が画像の左端中央位置となるようカメラ位置を調整した。本方式のノズルでは互いに衝突した噴流によって薄い液膜が形成され、液膜に生じる波動の成長によって微粒化が生じるとされている。非燃焼場の画像からは、衝突点から液膜が波立ちながら形成され、下流に進むにつれて振幅が増大し大きい液塊に分離していく様子が観察される。

一方燃焼場でも衝突点近傍では液膜の成長が見られるが、 $z = 4$ mm 付近で急速に崩壊し、液膜は直ちに液滴に分離している。W. Daimonら⁽⁴⁾によるとヒドラジンおよび NTO の着火遅れ時間はおよそ 0.2 ms 前後とされており、本試験の噴射流速から着火位置は $z = 2$ から 5 mm 付近と



第 5 図 衝突点近傍の噴霧画像 (単位: mm)
Fig. 5 Images of spray around impingement point (unit: mm)

推定される。したがって、燃焼場では衝突噴流による微粒化が完了する前に推薬の着火が生じ、微粒化機構に影響を及ぼしていると思われる。

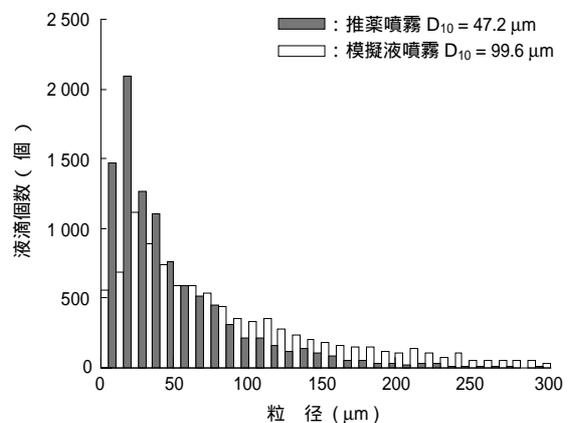
画像処理によって個々の液滴を撮影画像から抽出し、粒径を算出した。燃焼試験では $z = 6$ から 12 mm の範囲における液滴画像を処理対象とした。非燃焼試験では同範囲において個々の液滴が判別不能のため、微粒化がほぼ完了している $z = 50$ mm 近傍の画像から粒径を算出した。第 6 図に粒径分布を示す。非燃焼場の粒径分布は下流であるにもかかわらず、燃焼試験に比べて粗大液滴を多く含んでおり、算術平均粒径 D_{10} は 2 倍程度大きい結果となった。

3. 数値解析

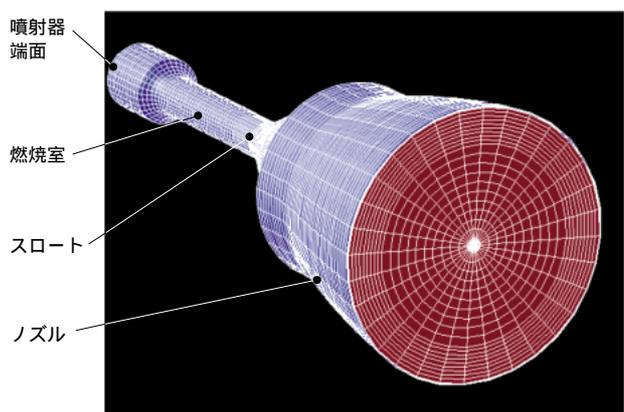
3.1 解析手法

20 N 級二液スラスト解析メッシュを第 7 図に示す。解析領域はスラスト燃焼室内部空間、ノズル内部空間およびその領域を取り囲む固体 (メタル) 部分である。上流側は噴射器端面までを解析領域とし、下流はノズル端面までを領域に含めた。総メッシュ数はおよそ 10 万である。

解析ツールとして汎用熱流体解析ソフトウェアの Star-CD Ver.3.150 を使用し、気液二相流のモデルとして DDM 法を使用した。これは連続相として定義される気相の中を液体粒子 (噴霧液滴) が分散相として運動するもので、気相に対する質量、運動量、エネルギーの各保存式および液滴に対する運動方程式が支配方程式となる。さらに液滴の蒸発や気相との力学的な干渉を表現するため、両相の間には質量、運動量およびエネルギーの交換が考慮される。また、蒸発した推薬の蒸気による化学反応 (燃焼) モデルによって、化学種間の質量移動およびエネルギー (燃焼熱) の発生が計算される。一般的な解析条件を第 3 表に示す。



第 6 図 粒径分布
Fig. 6 Droplet size distributions



(注) 全長：約 130 mm

第 7 図 20 N 級二液スラスタ解析メッシュ
Fig. 7 Computational grid for bi-propellant thruster

第 3 表 解析条件
Table 3 Numerical conditions

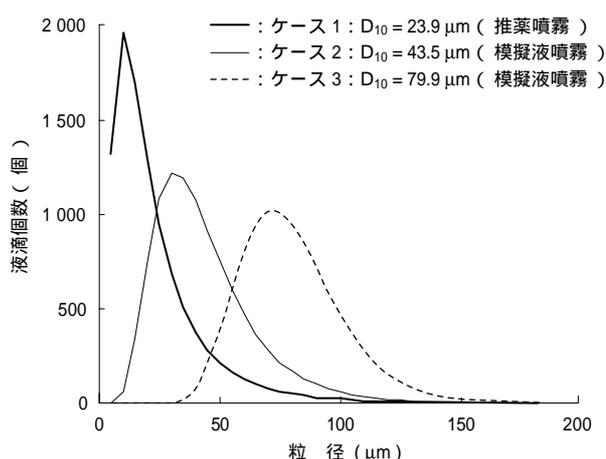
項目	特性値など	
一般条件	<ul style="list-style-type: none"> ・定常解析 (液相のみ擬似非定常解析) ・圧縮性 ・浮力なし ・放射なし 	
乱流モデル	標準 k-ε モデル	
燃焼モデル	渦崩壊モデル	
化学反応スキーム	(1) $N_2O_4 \rightarrow 2NO_2$ (NTO 分解) (2) $N_2H_4 + 2NO_2 \rightarrow 2NO + 2H_2O + N_2$ (二液燃焼 1 段目) (3) $N_2H_4 + 2NO \rightarrow 2H_2O + 2N_2$ (二液燃焼 2 段目) (4) $2N_2H_4 \rightarrow 2NH_3 + N_2 + H_2$ (ヒドラジン自己分解)	
境界条件	スラスタ内壁	壁境界：no-slip (流速 = 0)
	スラスタ外壁	温度境界：放射による放熱を考慮 (雰囲気温度 300 K)
	ノズル出口	圧力境界：500 Pa

計測結果から算出した解析条件 (粒径分布) を第 8 図に示す。実際の推薬による噴霧粒径 (ケース 1)、模擬液を用いた非燃焼噴霧粒径 (ケース 2) およびさらに平均粒径の大きい条件 (ケース 3) の 3 ケースについて噴霧粒径を分布関数で表し、解析結果に与える影響を評価した。

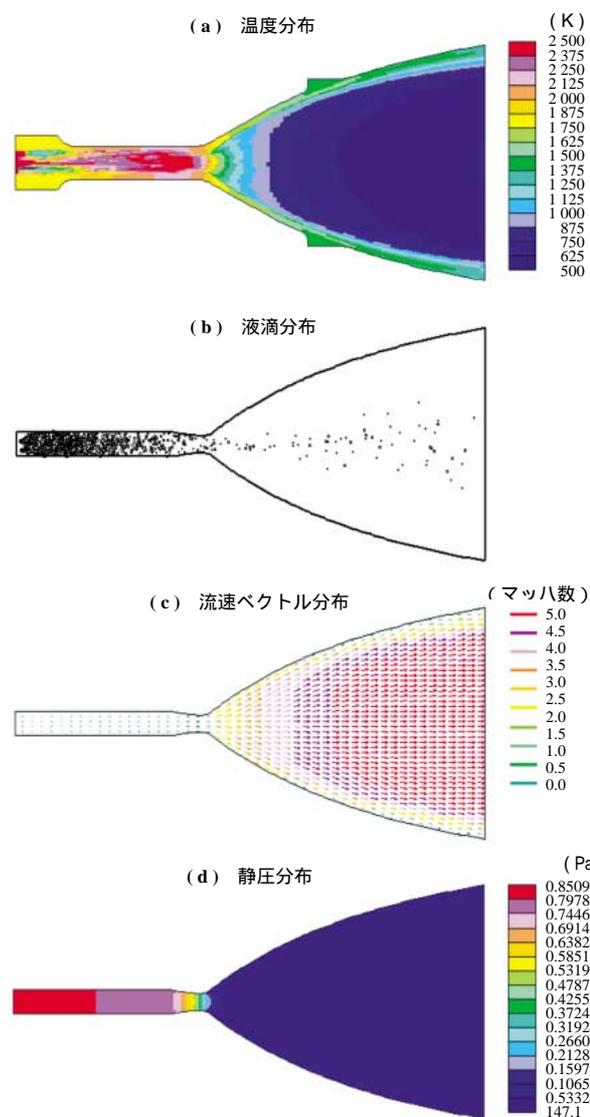
3.2 解析結果

(1) 噴霧挙動および燃焼特性

第 9 図はケース 1 の解析結果であり、いずれもスラスタ中心軸を通る断面上の分布を示している。第 9 図 - (a) の温度分布を見ると、噴射器近傍では推薬噴霧が蒸発とともに潜熱を吸収するため比較的低温の領域ができており、燃焼反応が進むにつれて燃焼室内で温度が上昇している。それに伴い燃焼室内壁の温度もスロート付近で最も高くなり、2 100 K 以上の高温を示している。一方で実際のスラスタでは燃料の一部を燃焼室内壁に衝突させて冷却するため壁温は 1 600 K



第 8 図 解析条件 (粒径分布)
Fig. 8 Numerical conditions of droplet size distribution



第 9 図 解析結果 (ケース 1)
Fig. 9 Numerical results for case 1

程度に抑えられており、この点は本解析の今後の課題の一つである。第 9 図 - (b) は噴霧液滴の分布を示し

ており、燃焼室内の上流では特に推薬噴霧が密集しているが、次第に蒸発して数密度が下がっている。ほとんどが燃焼室内で蒸発を完了するが、ごくわずかにノズル部にも液滴が流出している。第9図-(c)は流速ベクトルの分布であり、色はマッハ数を示している。スロート部でマッハ数は1.0に達し、チョークした後にノズル部で膨張して超音速に加速されていることが分かる。また第9図-(d)の静圧分布から燃焼室内圧がほぼ設計値に近い0.85 MPaを示していることが確認された。

第4表に本解析から得られたスラスタの予測性能(ケース1)を示す。推力および比推力がやや高めに予測されており、化学反応モデルに改良の余地があると思われるが、ほぼ実測値に近い値が得られた。

(2) 噴霧粒径の影響

第8図に示した3ケースについて、噴霧粒径による解析を実施した。第10図に噴霧粒径に対する比推力の変化を示す。実際の推薬に関する計測結果を入力した場合(ケース1)に比べ、模擬液の噴霧粒径を用いた場合(ケース2)では比推力が約5.8s低い結果となった。さらに噴霧粒径を大きく仮定した場合(ケース3)、比推力は著しく低下した。これは噴霧粒径が大きいと蒸発に時間が掛かり、燃焼を完了する推薬量が減少するためである。

以上の結果から、噴霧粒径がスラスタの予測性能に大きく影響を与える。このため初期噴霧特性の正確な評価が重要であることが明らかになった。

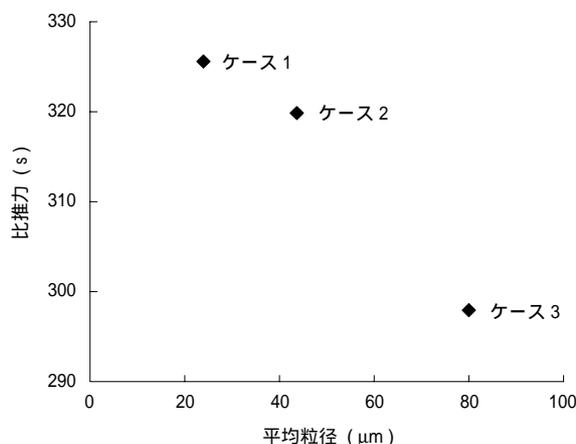
4. 結 言

二液スラスタに関する噴霧計測および数値解析を行い、以下の結論を得た。

- ・自然性推薬の微粒化過程は自着火反応に大きく影響され、噴霧粒径は非反応性の模擬液に比べて非常に小さくなる。
- ・二液スラスタに数値熱流体解析技術を適用する場合には初期噴霧粒径の与え方が重要であり、噴霧粒径が大きくなると推力および比推力の予測値は小さくなる傾向にある。

第4表 予測性能(ケース1)
Table 4 Predicted performance for case 1

特性値	実測値	解析値
推力(N)	22.9	24.6
比推力(s)	303.6	325.6
壁面温度(K)	1618	2163



第10図 噴霧粒径に対する比推力の変化
Fig. 10 Variation of specific impulse for mean droplet diameters

参 考 文 献

- (1) 胡 霄, 高木正英, 森吉泰生: スワールインジェクタによる燃料噴霧の数値解析 日本機学会論文集中(B編) 第69巻680号 2003年4月 pp.925 - 931
- (2) O. Knab, A. Frohlich and D. Wennerberg: Design Support for Advanced Storable Propellant Engines by ROCFLAM Analysis 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit AIAA-99-2459 (1999)
- (3) H. L. Gray: Modelling of Combustion Processes in Small Liquid Bipropellant Thrusters 28th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit AIAA-92-3765 (1992)
- (4) W. Daimon, M. Tanaka and I. Kimura: The Mechanisms of Explosions Induced by Contact of Hypergolic Liquid Propellants, Hydrazine and Nitrogen Tetroxide 20th Symposium (International) Combustion (1984) pp.2 065 - 2 070