

ロケット噴射器内流れ場に関する実験的研究

Experimental Study on Flow Field in a Liquid Rocket Injector

ロケットエンジン技術センター 燃焼器ノズルセクション
Rocket Engine Technology Center, Combustor and Nozzle section

布目 佳央, 坂本 博, 小野寺 卓郎, 田村 洋, 熊川 彰長
Yoshio Nunome, Hiroshi Sakamoto, Takuo Onodera, Hiroshi Tamura,
and Akinaga Kumakawa

Abstract

Two series of experiments were conducted, one using a single liquid jet from a cylindrical nozzle modeled on a liquid oxygen (LOX) post, and the other using gas/liquid jets of a coaxial injector element to study flow characteristics of an injector of liquid rocket engines. Flows inside the nozzle and the coaxial injector were visualized with a high-speed video camera. From the experiments, it was found that the flow in the cylindrical nozzle was affected by cavitation generated by an inlet orifice mounted at the LOX post inlet. Discharge coefficients of coaxial injectors with a recessed LOX post were found to be quite sensitive to a variation of injection pressure drop. It was confirmed that the discharge coefficient was largely affected by the interaction between the gas flow and the liquid jet in the LOX post recess.

1. はじめに

液体ロケットエンジンには高性能な液酸/液水推進剤が広く用いられており、その噴射器には同軸型噴射器が採用されている。同軸型噴射器の構造は非常に単純であるにもかかわらず、噴射器設計に関しては数多くの設計パラメータや作動パラメータが存在する。例えば、燃焼室内の圧力振動が上流の供給系へ伝播するのを防ぐため、LOX ポスト入口にオリフィスを設けて適切な噴射差圧を与えている。また、微粒化・混合の促進を目的に、近年の噴射器では LOX ポスト出口の内壁をテーパ状にしたり、噴射面の内側に LOX ポストを僅かに凹ませるリセス構造にするものが多い。リセスを設けるもう一つの目的に高周波燃焼安定性の向上が挙げられるが、その一方で、それらの形状の僅かな違いがエンジン性能や燃焼特性に重大な影響を及ぼし、低周波・高周波の燃焼安定性やエンジン振動、噴射器の焼損などの問題を引き起こす場合がある。特に近年では、リセス内の燃焼と振動燃焼の関連性が指摘されているが、リセス内の現象を詳細に研究した例は未だに少ない。

本研究では、液体ロケットの噴射器の最適な設計手法を確立することを目的に、噴射器内での微粒化・混合・燃焼の過程をより詳細に理解するため、平成 16 年度より非燃焼場でのコールドフロー試験を行ってきた。実験では、まず LOX ポストの形状に着目し、LOX の模擬液として水を用いて、その内部の流れと噴射された噴流を可視化して、流れ条件が内部の流れや微粒化の特性に与える影響を評価した。本年度には、特にリセス内の流れ特性に着目し、より実機に近い気液同軸型噴射器を用いた実験も行った。この実験では、水素の模擬ガスとして窒素、LOX の模擬液として水を用い、ガスの流れやリセス深さが微粒化に及ぼす影響を評価した。

2. 研究の概要

(1) 円筒形ノズル内の流れ特性

水を模擬液とし、Fig. 1 に示す円筒形ノズルを用いてその内部の流れと噴射された噴流を可視化して、流れ条件の違いが内部の流れや微粒化の特性に与える影響を評価した。ここで言うノズルとは、気液同軸型噴射器の LOX ポスト（中心管）の入口オリフィスと下流直管部および出口部を模擬したものを指す。この円筒形ノズルは透明の亚克力樹脂製で、ノズル内の流れの状況を観察できるようになっている。ノズル内の流れとノズルから噴出される噴流の可視化により、それぞれの過程におけるキャビテーションの発生および噴流の微粒化の様子を観察した。

(2) 気液同軸型噴射器の流れ特性

水および窒素を模擬推進剤とした同軸型噴射器を用いて、流れ条件の違いが内部の流れや微粒化の特性に与える影響を評価した。供試体概要を Fig. 2 に示す。特にリセス内の流れに着目し、主に液とガスの相互作用、およびリセス内での微粒化・混合特性を明らかにすることを目的とし、流れの複雑化を避けるため、LOX ポスト（中心管）内の流れに、キャビテーションがほとんど発生しない条件下で実験を行った。本年度はまず、流出係数データの取得を試みた。リセス内の可視化、および圧力分布データの取得については今後試みる予定である。

本研究で用いたキャビテーション数 (Kc)、レイノルズ数 (Re)、および流出係数 (Cd) はそれぞれ(1)～(4)式で定義した。

$$Kc = \frac{P_b - P_v}{\frac{1}{2} \rho U_L^2} \dots (1)$$

$$Re_x = \frac{U_x W_x}{\nu_x}, \quad (x=L, G) \dots (2)$$

$$\dot{m}_L = A_L C_{dL} \sqrt{2\rho(P_i - P_b)} \dots (3) \quad \dot{m}_G = A_G C_{dG} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} P_i \rho \left\{ \left(\frac{P_b}{P_i} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_b}{P_i} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \dots (4)$$

ここで、 P_b 、 P_i および P_v はそれぞれ背圧、噴射圧および水の飽和蒸気圧である。 ρ は噴射器でのガスまたは水の密度、 γ はガスの比熱比である。また、 U は縮小部での平均流速、 W は縮小部幅、 ν は動粘性係数である。ここで言う縮小部とは、水側では入口オリフィス径、 d_{orf} 、ガス側では環状の隙間間隔、 $(d_G - d_L)/2$ 、を指す。断りのない限り、下付添字のLは水側、Gはガス側を表す。水およびガスの流出係数 C_{dL} 、 C_{dG} は上式(3)、(4)から、水は非圧縮性流体、ガスは圧縮性流体として扱って、実際に計測した流量より求めた。

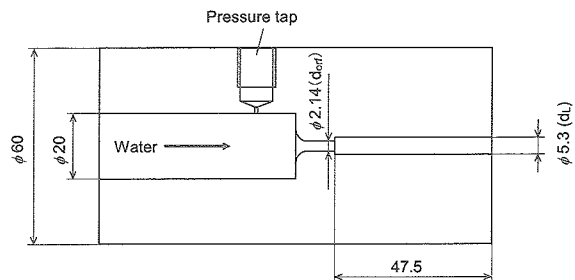


Fig. 1 Cylindrical nozzle with an inlet orifice for single jet flow test.

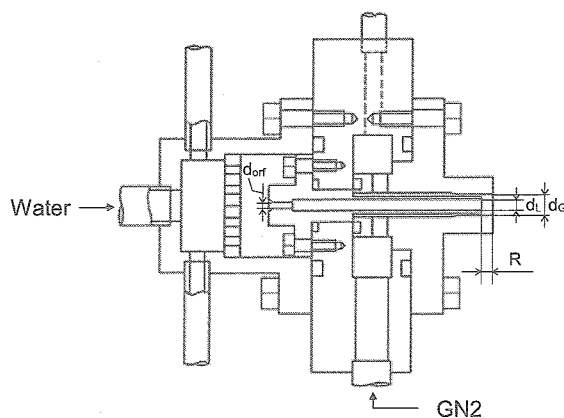


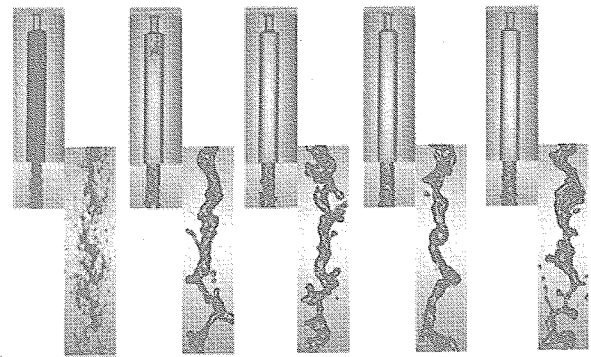
Fig. 2 Injector for coaxial flow jets test.

3. 成果の概要

(1) 円筒形ノズル内の流れと流出係数

チャンバー内の圧力(背圧)を0.1 MPa ~ 0.5 MPaの条件下で、水のレイノルズ数が一定となるように噴射圧を設定した時のノズル内流れとノズル出口後流の水噴流の様子をFig. 3に示す。このときのレイノルズ数 Re_L は70,000である。図には、背圧、噴射圧と一緒にそのときのオリフィス部におけるキャビテーション数(Kc)も示した。 $Kc > 0.541$ の場合には、ノズル内にキャビテーション泡は発生せず、 $Kc = 0.371$ で、オリフィス下流部にキャビテーション泡の発生が確認出来るがノズル出口に至るまでに消失していることが分かる。また $Kc = 0.182$ の時には、オリフィスで発生したキャビテーション泡はノズル出口まで消失することなく持続し、ノズル出口からはキャビテーションにより分裂した噴霧が噴出されているのが分かる。つまり、ノズル内のキャビテーション泡の存在により、水噴霧の微粒化が劇的に促進されている事が分かる。著者らは、弘前大の協力のもと、前年度から今年度にかけて、矩形ノズルによる同様の実験を行っており、背圧をパラメータとし、レイノルズ数とキャビテーション数によって、ノズル内のキャビテーション流れの形態が実験的に概ね4つの領域に分類出来る事を示した。また、キャビテーションが発生する Kc の閾値は背圧やノズル形状に依っても多少異なるが、概ね $Kc = 0.5$ 付近であることを明らかにした。本実験で観察されたキャビテーション流れとキャビテーション数の関係は、矩形ノズルの結果と概ね一致することから、円筒形ノズルについても、キャビテーション数によって、流れの形態を分類できると言える。

次に、背圧が一定の条件下で、水の噴射圧を連続的に増加、あるいは減少させた時のキャビテーション数(Kc)と流出係数(Cd_L)の関係の一例をFig. 4に示す。図より、 $Kc = 0.3$ 付近において流出係数が不連続に変化する、いわゆるHydraulic Flipが確認できる。このHydraulic Flipが発生するFig. 4上での位置にはヒステリシスがあり、水の噴射圧の減少過程と増加過程では、発生する位置にずれが生じる。図にはそのずれ幅を示した。また、 $Kc < 0.3$ と $Kc > 0.3$ の領域での流出係数の変化を比べると、 $Kc < 0.3$ の領域では Kc の増加に伴い、 Cd_L は急激に増加するのに対し、 $Kc > 0.3$ の領域では、 Kc の変化に対する Cd_L の変化量は小さいが、その値は前者よりも大きくなる。つまり、この図において、 $Kc = 0.3$ 付近に、ノズル内にキャビテーションが発生する境界があり、キャビテーションが発生することで、流出係数は減少する。



$P_i = 0.627$ MPa,	0.583,	0.697,	0.777,	0.892
$P_b = 0.1$ MPa,	0.2,	0.3,	0.4,	0.5
$Kc = 0.182,$	0.371,	0.541,	0.734,	0.914

Fig. 3 Photos of flows in the cylindrical nozzle at different back pressures.

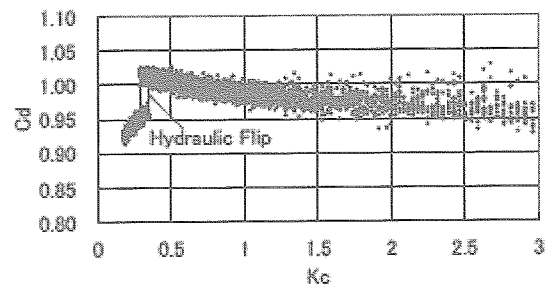


Fig. 4 Variation of discharge coefficient with cavitation number.

(2) 気液同軸型噴射器の流れと流出係数

Fig. 5は、リセス深さ $R = 0 d_L$ 、つまりリセスが無い気液同軸型噴射器において、キャビテーション数による水の流出係数の変化を示したのものである。図の実線は、ガスを噴射させず、水のみを噴射させ、

噴射圧を連続的に変化させた場合の結果である。また、点線はその時のデータのばらつきの範囲を示す。図中の◆や□のように示す点は水の噴射圧を一定とし、ガスの噴射圧を0.55～0.35 MPaと連続的に変化させた場合の C_{dL} の平均値を、エラーバーはその変動幅と変動方向を示す。 $Kc = 0.7$ 付近に C_{dL} の不連続点があり、 $Kc = 0.7$ 付近を境にしてその特性が異なる。前節の円筒形ノズルの結果から、この Kc がLOXポスト内にキャビテーションが発生する閾値であると判断できる。つまり、 $Kc < 0.7$ の領域ではLOXポスト内にキャビテーションが発生し、反対に、 $Kc > 0.7$ の領域では、発生しない。Fig. 6は横軸を水のレイノルズ数、 Re_L 、で整理した時の C_{dL} の変化である。Fig. 6(a)はリセス深さ $R = 0 d_L$ 、(b)は $R = 1.0 d_L$ の結果を示す。Fig. 5とFig. 6(a)を比較すると、 Kc と Re_L の対応から C_{dL} の挙動は両者正反対の形を示すが、Fig. 6(a)においても C_{dL} の不連続点が存在し、キャビテーション発生領域はFig. 5同様に定義できる。これはFig. 6(b)に示すリセス深さ $R = 1.0 d_L$ の場合も同様である。Fig. 6より、 $R = 0 d_L$ の場合は、ガスの噴射による噴射器出口付近の圧力の局所的な低下の影響により、 C_{dL} は水噴射のみの場合よりも2%程度大きい値となり、また、その時のばらつきは Re_L の増加とともに小さくなる傾向を示す。一方、 $R = 1.0 d_L$ の場合、水のみを噴射した時の C_{dL} の値はリセスの有無に関わらず、概ね一致するが、ガスの噴射もした条件下では、 C_{dL} はリセスが無い場合よりも小さくなること、および変動幅が大きくなることから分かる。また、水の噴射圧 $PLinj = 0.49$ MPaおよび0.45 MPaでは、キャビテーション発生時と似たように C_{dL} が不規則に変化する現象が見られた。そして、後述するように C_{dL} が不規則に変化する前後の概ね二つの領域内で変動することから、Fig. 6(b)にはそれぞれの平均値と変動幅を示した。

次に、ガスの流出係数 C_{dG} をガスのレイノルズ数 Re_G で整理したものをFig. 7に示す。Fig. 6同様に (a) リセス無し、(b) リセス深さ $1.0 d_L$ の結果である。リセスが無い場合、 C_{dG} は水の噴射圧によらず、ほぼ一定の値を取る。一方、リセス深さ $1.0 d_L$ の場合、 $0 d_L$ の場合とは大きく異なり、水の噴射圧の違いにより C_{dG} は大きく変化することが分かる。水の噴射圧が低いほど C_{dG} は小さい値を示し、 Re_G が大きくなるにつれて、 C_{dG} は始め減少し、 Re_G が20,000～25,000以上では単調に増加する傾向を示す。また、 $PLinj = 0.45$ MPa および0.49 MPaでは、 C_{dG} は不規則に変化する条件が存在する。この不規則な変化を示す条件

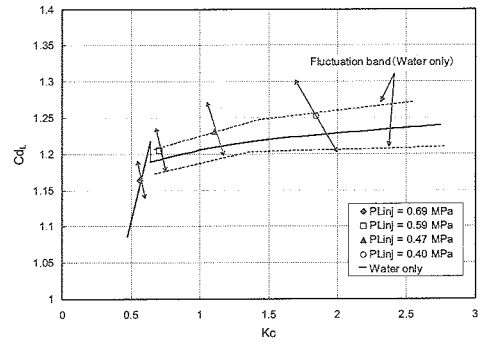
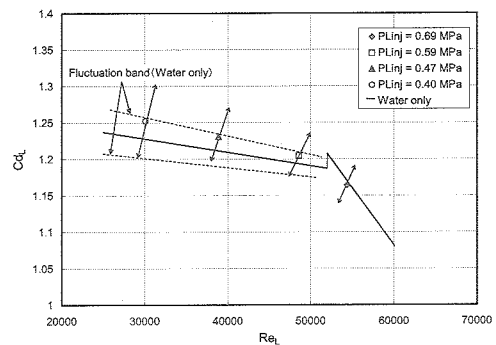
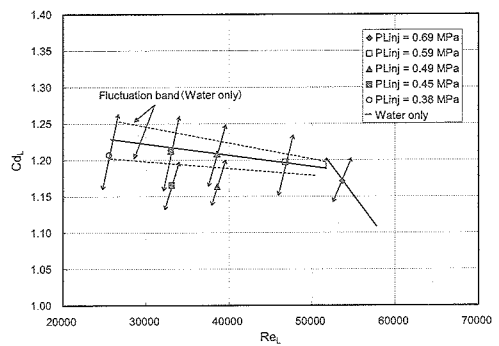


Fig. 5 Variation of discharge coefficient with cavitation number. ($d_L = 3.0$ mm, $d_G = 4.6$ mm, $P_b = 0.3$ MPa, $R = 0 d_L$)

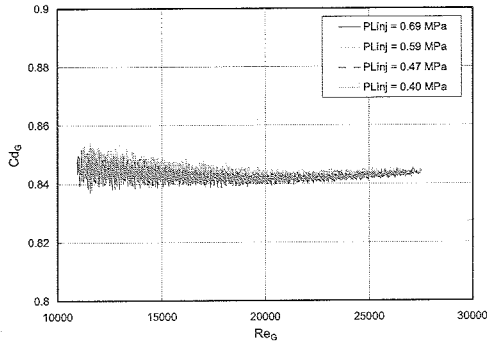


(a) $R = 0 d_L$



(b) $R = 1.0 d_L$

Fig. 6 Variation of discharge coefficient with Reynolds number. ($d_L = 3.0$ mm, $d_G = 4.6$ mm, $P_b = 0.3$ MPa)



(a) $R = 0 d_L$

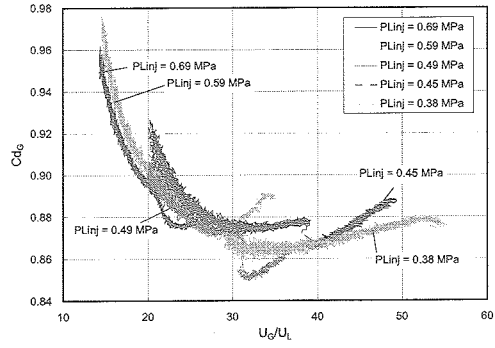
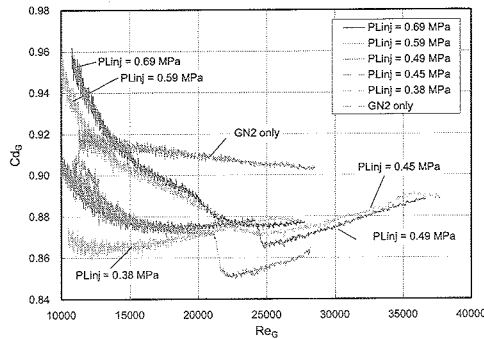


Fig.8 Variation of discharge coefficient with injection velocity ratio.



(b) $R = 1.0 d_L$

Fig.7 Variation of discharge coefficient with Reynolds number. ($d_L = 3.0$ mm, $d_G = 4.6$ mm, $P_b = 0.3$ MPa)

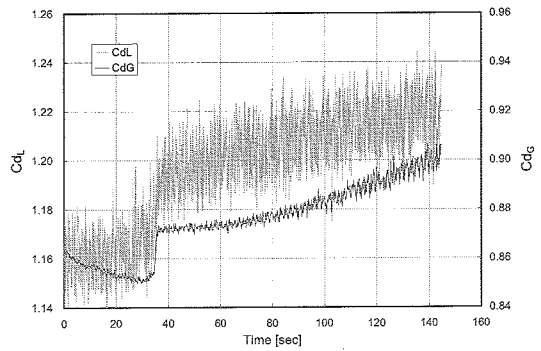


Fig.9 Relationship between elapsed time and discharge coefficient for water and nitrogen.

は一定ではなくばらつきがあり、また、ガスの噴射圧を増加する場合と減少させる場合とでヒステリシスを示した。

水の噴射圧が低いほど Cd_G が小さくなる傾向について次のように考えられる。もし、リセス内の圧力が水やガスの流速に依らず一定であれば、 Cd_L も Cd_G も、それぞれのレイノルズ数 Re_L , Re_G にのみ依存すると考えられる。逆に、水やガスの流れにより、それぞれの流出係数が変化するとすれば、それはリセス内の圧力が水やガスの流れによって変化したことを示す。実験結果からは、水の流量が少ないほど、また、ガス流量が多くなるほど、ガスの流出係数が小さくなることから、 Cd_G は水とガスが相互に影響を受けて変化すると考えられる。そこで、 Cd_G を水とガスの噴射速度の比、 U_G/U_L で整理し、Fig. 8 に示した。すると水の噴射圧に拘わらず、概ね一本の曲線上に載ることが分かった。Fig. 8 には、Fig. 7(b) で述べた $PL_{inj} = 0.45$ MPa および 0.49 MPa において Cd_G が不規則に変化するデータもそのまま載せてあり、それらの不規則変化をするところでは、1 つの曲線にはのらない。この図から、 Cd_G が不規則に変化するところを除くと、ガスの流出係数を支配するパラメータが水とガスの噴射速度比である可能性があることが分かる。 Cd_G が不規則に変化する挙動について、より詳細に検討するため、Fig. 9 には、 $R = 1.0 d_L$ において、 $PL_{inj} = 0.49$ MPa の時の Cd_L と Cd_G の時系列での変化を示した。本図から、 Cd_L と Cd_G は、同じタイミングで不規則に変化することが分かる。 Cd_G にはヒステリシスがあることを上述したが、各実験において、 Cd_G がこのような変化をする場合には必ず同じタイミングで Cd_L も変化した。すなわち、両者に因果関係が存在することが伺える。これと類似な変化は $Kc < 0.7$ の領域で見られる Hydraulic Flip

があり、Hydraulic Flipはキャビテーションの発生により起こる現象であった。今回の現象は $Kc > 0.7$ の領域で発生していることから、中心管内部でのキャビテーションの発生によるものとは考えられない。可能性として、水流とガス流の相互干渉があるリセス内でキャビテーションと類似な現象が発生したと考えることができるが、現時点では不明である。いずれにせよ、リセス内での微粒化・混合過程が影響を及ぼしているものと考えられる。

4. まとめ

液体ロケットの噴射器の最適な設計手法を確立することを目的に、非燃焼場にて気液同軸型噴射器の噴射器形状の違いが微粒化・混合に与える影響について調べた。特に、中心管（LOX ポスト）内の流れ特性と気液同軸型噴射器のリセス深さに着目し、その内部の流れと噴射される噴霧を可視化した実験から、以下の知見を得た。

① 円筒形ノズル内の流れ特性

- 1) 入口にオリフィスを持つノズルでは、流れはオリフィスで発生するキャビテーションによって支配される。
- 2) オリフィス部で定義されたキャビテーション数 (Kc) により、キャビテーション流れの形態を分類できる。
- 3) $Kc < 0.5$ の領域、つまりキャビテーションが発生する領域では、水の流出係数は Kc の減少とともに直線的に減少する傾向を示し、ある位置で Hydraulic Flip が発生する場合がある。

② 気液同軸型噴射器の流れ特性

- 1) リセス深さを深くすることで、リセス内での微粒化・混合は促進されるが、流出係数の減少の要因にもなり得る。
- 2) ガスの流出係数 Cd_G は、噴射速度比により整理することで、水の噴射条件に拘わらず、一本の曲線上に載る傾向を示し、噴射速度比が Cd_G に対して、支配的である可能性が示唆された。
- 3) キャビテーションが発生しない条件下でも、 Cd_G が不規則に変化する場合があり、その際に、同時に Cd_L も不規則に変化する。
- 4) リセス内での微粒化・混合過程が気液同軸型噴射器内流れに及ぼす影響は大きく、リセス内で水流とガス流の相互干渉により、Hydraulic Flip と類似な現象が発生する可能性がある。

本研究結果から、推進剤の物性の違いは別途検討する必要はあるものの、実際の LOX/H₂ ロケットの実用的な定常作動範囲においては、LOX の Kc は殆どの条件で 2 以上であることから、LOX ポスト内でキャビテーションが発生する可能性は極めて低いと考えられる。しかし、将来推進系として期待される広範囲なスロットリング機能を有するエンジンにおいては、スロットリング時の作動環境によってはオリフィス部でキャビテーションが発生、あるいはリセス内での気液相互干渉により、Hydraulic Flip やそれと類似な現象が発生し、酸化剤の微粒化の過程に影響を与える可能性を示唆することが出来る。本年度では、これらの現象の発生要因を特定するまでには至らなかったが、平成 18 年度には、リセス内の可視化をより詳細に行い、そのメカニズム解明に努める予定である。