

円管内における並列多重旋回流の可視化

Flow Visualization of Confined Multi-Parallelized Swirling Jets

○高山明正(東大工・院), 戸田諒(東海大工), 嶋田徹, 北川幸樹(ISAS/JAXA)

Abstract

In this study, to improve the regression rate and the combustion efficiency of hybrid rockets, swirling jets in the combustion chamber are multiplexed and parallelized. Swirling motion adds tangential velocity component to the flow and enhance the heat transfer to the grain. In addition to this, mixing around the central region of the chamber is expected to be enhanced by the interference of each swirling jet. Owing to these flow characteristics, the regression rate and the combustion efficiency will be improved. For the first step, the cold-flow visualizations have been done and the spatial distribution of flow directions has been obtained. From the results of the tests, it is suggested that mixing around the central region of the chamber is enhanced. However, each swirling jet disappeared and turned into a single swirl or axial flow at short distance from the exit of each swirler.

1. 緒言

ハイブリッドロケットエンジンは、その高い安全性、管理コストの安さ、環境負荷の低さから、次世代の宇宙推進機関として注目されており、近年研究開発が盛んである。その一方で、燃料後退速度が遅いために高推力が得にくい、燃焼効率が低いといった技術的課題が挙げられる。燃料後退速度が遅いといった問題に対しては、ワゴンホイール型グレン[1]を用いて燃料表面積を増加させる方法や、酸化剤流旋回噴射方式[2]や多段面酸化剤流旋回噴射方式[3]、衝突噴流方式[4]など酸化剤噴射方法の工夫により燃料後退速度そのものを向上させる研究が行われている。その他にも、低融点燃料の使用[5]や燃料の改質[6]により、燃料後退速度を向上させる研究が行われている。

酸化剤流旋回噴射方式では、ポリプロピレン(PP)燃料を使用した場合、燃料後退速度、燃焼効率両方の向上が確認されており、燃焼効率は C^* 効率にして 0.95 ほどである[7]。しかし、低融点燃料であるパラフィンワックスを用いた場合、燃料後退速度は PP を使用した場合に比べ、著しく増加するものの、 C^* 効率は 0.80~0.87 と低下する。湯浅ら[7]は燃焼室後部に二次燃焼室を設けることで、 C^* 効率が 0.97~0.99 まで向上することを示しているが、それら構造物の付加は構造重量の増加やアスペクト比の悪化につながるという課題が残る。

燃料後退速度の向上には、パラフィンワックスなどの低融点燃料を使用することが非常に有効であるが、燃焼効率はその他の燃料に比べ低いため、このような低融点燃料を効率よく燃焼させることが重要である。本研究は、燃焼室

内の酸化剤流の噴射方法の工夫により、燃料後退速度、燃焼効率を向上させることを目的としている。

2. 管内旋回流の並列多重化

燃料後退速度、燃焼効率の向上を目的とし、燃焼室内への酸化剤流を複数並列多重化させることを検討する。この場合の流れ場の概念図を図1に示す。燃焼室内の流れにおいて、燃料表面において周方向速度成分の付加および旋回による遠心力により燃料表面に形成される境界層厚さを低減し、火炎と燃料表面との距離が縮まり[2]、燃料への熱伝達が促進され、軸流噴射型に比べ、燃料後退速度が向上すると考えられる。また、旋回流を並列化することにより、燃料壁面から燃焼室中心域へと向かう流れにより燃料が輸送され、燃焼室中心域においても燃焼が生じることにより、単一旋回型噴射型に比べ、燃焼効率の向上が考えられる。本稿では、このような酸化剤噴射方式の初期検討として、円管内にて、旋回流を並列多重化した場合の流動特性に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、非反応性流れ場の可視化実験を行った。

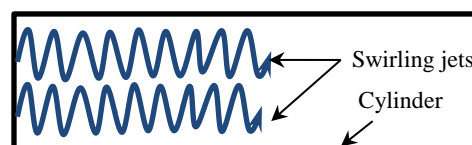


Fig.1 Image of multi-parallelized swirling jets

3. 可視化実験

種々パラメータを変化させた場合の、個々の旋回渦の発生、減衰特性や再循環領域の有無などについての調査を目的とし、可視化を行った。以下、実験の詳細について述べる。

3.1 実験装置概要

3.1.1 ガス供給系

図 2 に実験装置の外観を示す。各旋回器から均等に旋回流を発生させるため、上流に整流用チャンバを設けている。チャンバ長さは管断面において速度分布が一様になる位置を求め[8]、決定し、さらに内部に整流用のメッシュを配した。円管は外部から可視化可能とするため、アクリルパイプを用い、開口端は大気開放とした。管内径などのパラメータは推力 100 N 程度の燃焼実験を想定し、決定した。気体として窒素ガスを用いた。窒素ガス体積流量はタービン流量計を用いて計測し、ガス平均温度を用いて質量流量を算出した。

3.1.2 旋回器

(1) 形状スワール数

図 3 に本実験で用いた旋回器の詳細図を示す。旋回強度を示す指標として、旋回軸方向の運動量流束と、旋回軸回りの角運動量流束の比で与えられるスワール数と呼ばれる無次元数がある。しかし、その算出には速度分布、圧力分布の測定が必要になるため、実用的ではない。そこで代用として、旋回器出口形状から速度分布を仮定し、圧力項を無視した上で、運動量流束、角運動量流束を求めた、形状スワール数が、一般に旋回強度の指標として用いられている[9]。旋回器出口近傍においては、流れ場の諸量の測定値から算出されるスワール数と形状スワール数は良好に一致することが確認されている[9]。本実験においては、式(1)にて形状スワール数(Sg)を定義した。本実験では、 $Sg = 10.5$ の旋回器を用いた。式中のパラメータは図 3 中に記したものである。

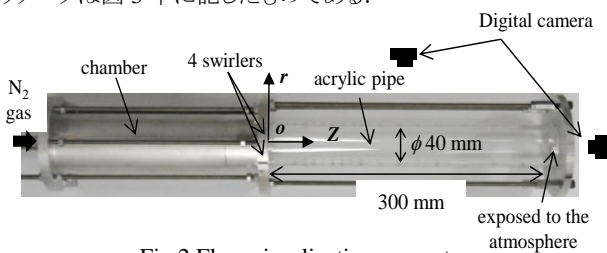


Fig.2 Flow visualization apparatus

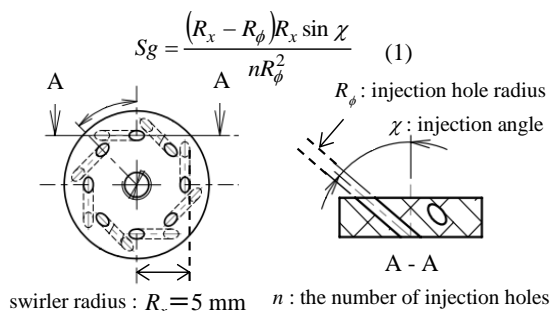


Fig.3 Detail view of individual swirler

(2) 配置・旋回方向

本実験では、円管断面において、 $Sg = 10.5$ の旋回器を4つ配置した場合について可視化を行った。また、各旋回器の旋回方向は図 4 に示す 2 種のものについて可視化を行った。全ての旋回器の旋回方向が同一である同方向旋回型、および対角配置の旋回器の組で旋回方向を逆転させる逆方向旋回型の 2 種について実験を行った。

3.2 可視化方法

3.2.1 タフト法

円管内速度方向の空間分布の取得にタフト法を用いた。管側面の孔($\phi 2 \text{ mm}$)よりタフトを取り付けたワイヤ($\phi 0.7 \text{ mm}$)を挿入し、タフトの振れる様子を側面、正面からデジタルカメラにて撮影した。タフトの振れを十分撮影できるよう露光時間は 0.2 s とした。撮影した画像を図 5 に示す。図 5 のように、二次元的にタフトの振れ角を目視により測定し、振れ角の二等分線方向を平均速度方向と定義した。測定した箇所は、 $Z = 5, 15, 35, 55, 85, 115, 155, 205 \text{ mm}$ の各断面における、 $r = 0, 6.5, 11.5, 16.5, 19 \text{ mm}$ 、 $\theta = 0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ の各点(図 4 中の点位置)である(座標系は図 2, 図 4 中を参照)。

3.2.2 壁面オイルフロー法

壁面での速度方向の取得には、壁面オイルフロー法を用いた。円管内壁($Z=0 \sim 25 \text{ mm}$)に流動パラフィン、酸化チタン、オレイン酸を 10:5:2 の質量比で混合したトレーサオイルを塗布し、約 90 秒ガスを流し、得られた模様から速度方向を取得した。

3.5 実験条件

表 1 に実験条件を今一度まとめる。本実験にて変化させるパラメータは質量流量、旋回方向の二種である。レイノルズ数は、管内径を代表長さ、旋回器出口流速を代表速度として定義した。GOX を用いた燃焼実験を想定し、レイノルズ数を燃焼実験の場合と合致させた。

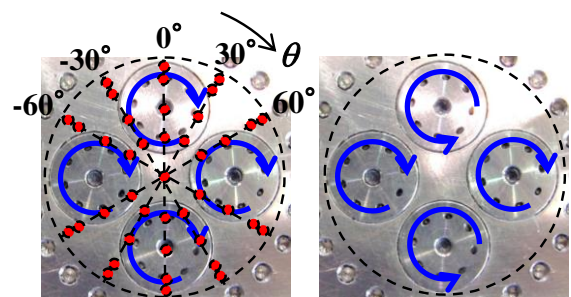


Fig.4 Arrangement and swirling direction of each swirler

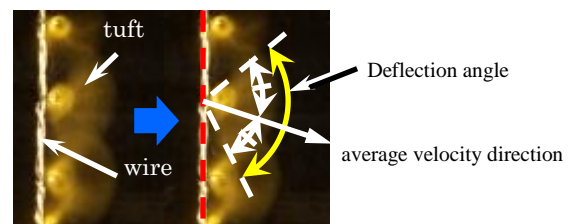


Fig.5 Definition of average velocity direction.

4. 実験結果

4.1 タフトによる可視化

4.1.1 旋回方向による流れ場の差異

全条件にて $Z = 5, 15$ mm の断面において、個々の旋回器中心 ($r = 11.5$ mm) で逆流が観察された。再循環領域が形成されており、旋回器近傍では個々の旋回渦が形成されていると考えられる。同方向旋回型、逆方向旋回型の窒素ガス質量流量 (\dot{m}) 12 g/s, $\theta = 0^\circ$ (側面から) の場合の可視化結果を図 6 に示す。同方向型の場合、円管中心付近では Z 方向の流れ、壁面付近では壁面から円管中心へと向かう速度成分を持つ流れが確認できる。一方、逆方向旋回型の場合、 $Z = 35$ mm までは様々な方向への流れが確認できるものの、 $Z = 55$ mm から徐々に円管断面で一様に Z 方向の流れへと遷移していくことが分かった。正面から可視化した場合について、同方向型、 $\dot{m} = 19$ g/s の場合の、軸方向位置 $Z = 5, 35, 155$ mm の各断面についての可視化結果を図 7 に示す。 $Z = 5$ mm の場合、円管中心域では様々な方向への流れが確認できるが、壁面付近の流れは基本的に周方向の速度成分を持つことが分かる。 $Z = 35, 155$ mm の場合、時計回りの単一の旋回を形成し、円管中心への速度成分を持つことが確認できる。

Table1 Experimental conditions

mass flow rate [g/s]	Sg	swirling direction	Re
6	10.5	same direction	5.76×10^5
12	10.5	same direction	1.15×10^6
19	10.5	same direction	1.82×10^6
6	10.5	counter direction	1.15×10^6

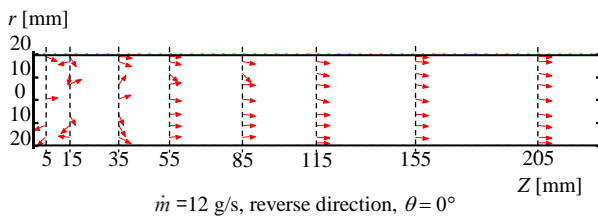
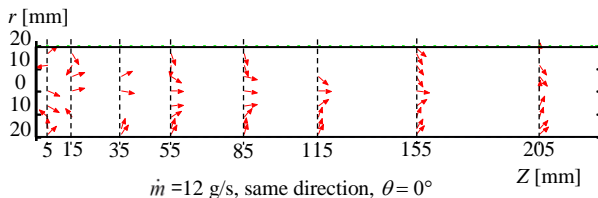


Fig.6 Visualization results from side view

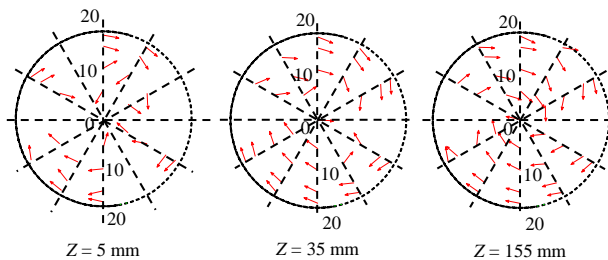


Fig.7 Visualization results from front view

4.1.2 同方向旋回型における質量流量による流れ場の違い

図 8 のように周方向と平均速度方向の偏角を定義した。偏角が正の場合円管中心方向、負の場合壁面方向への速度成分を有することを表す。これを、同方向旋回型の円管各断面について質量流量別にプロットし、図 9 を得た。 $\dot{m} = 6$ g/s の場合、 $Z = 5$ mm では、円管中心方向、壁面方向の両方の流れが同程度分布していることが分かる。一方、 $\dot{m} = 19$ g/s の場合、円管中心方向の流れが多く分布することが分かる。そして $\dot{m} = 6, 19$ g/s, 両方の場合とも、偏角の分布範囲は $Z = 35, 155$ mm の場合と比較すると大きいことが分かる。 $Z = 35, 155$ mm では、 $\dot{m} = 6$ g/s の場合も円管中心方向の流れが多く分布するようになる。 $\dot{m} = 19$ g/s の場合と比較すると、流量による分布プロファイルには、違いはあまり見られなかった。

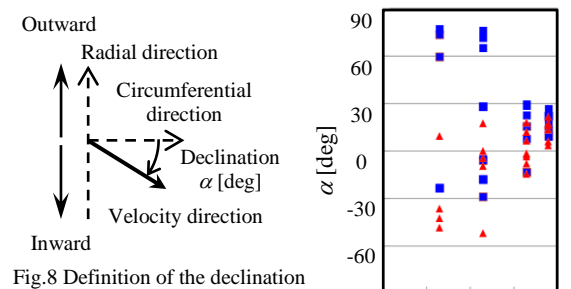


Fig.8 Definition of the declination

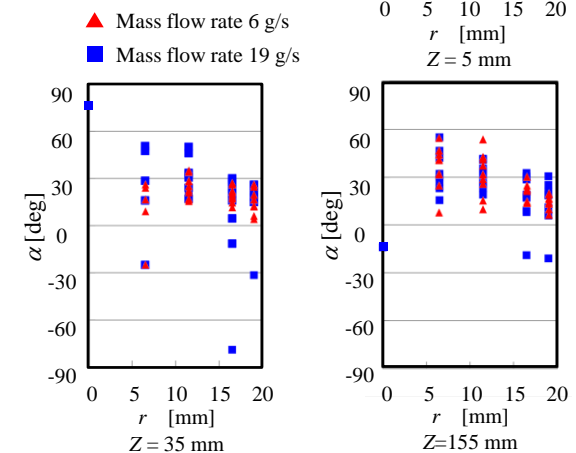


Fig.9 Velocity direction plot

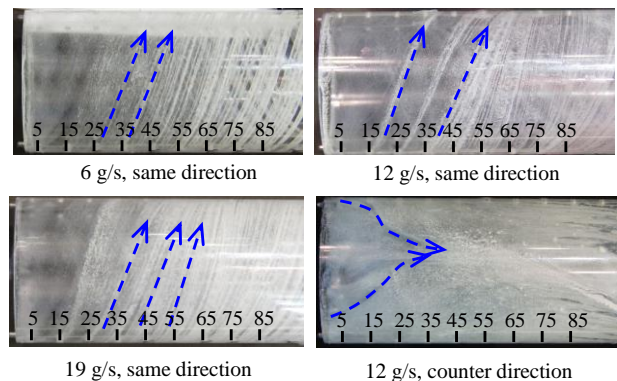


Fig.10 Visualization results with oil pattern

4.2 壁面オイルフローによる可視化

壁面オイルフローによる可視化結果を図 10 に示す。同方向型の場合いずれの流量においても $Z = 35 \text{ mm}$ から下流では、壁面の流れは、単一の旋回を形成していることが確認できる。一方、逆方向型の場合は $Z = 40 \text{ mm}$ 付近にて、それぞれ反対回りに旋回する流れが衝突し、それ以降では、 Z 軸方向の流れへと遷移していくことが分かる。

5. まとめと考察

5.1 並列旋回流の形成について

本実験では、 $Z=5 \text{ mm}$ の断面において様々な方向への流れが確認でき、逆流の存在からも個々の旋回渦が形成されていたことが示唆されるが、可視化手法および速度方向取得の空間分解能不足などの問題から明確に個々の旋回渦を可視化することはできなかった。加えて、 $Z=35 \text{ mm}$ 程から単一の大きな旋回流(同方向旋回型)あるいは軸流(逆方向旋回型)へと変化することを確認した。これらの点から、本研究の目的としている並列旋回流れ場は極めて限られた軸方向範囲にのみ形成されたか、もしくは形成されなかったと言える。

この原因については、次の二つの点が考えられる。まず一つ目は旋回器形状による点である。本実験で用いた旋回器は円周状にジェット孔を配置する形のものであり、各孔からのジェットは円周の接線方向の運動量を持つ。そのため、各々のジェットが旋回流を形成するためには、直線運動から円運動へと流れの向きを変化させ、旋回器中心向きの圧力勾配と旋回による遠心力が一定の釣り合い関係を満たす必要がある。本実験では、そのような関係が成立していなかったために、個別の旋回渦が形成されず、各ジェットは壁面へと直進した可能性が考えられる。確実に旋回流を形成させるには、個々の旋回器について、円管のようなガイドを設け、各ジェットを円管に沿わせる形で流入させることが有効であると考えられる。二つ目は、各旋回器の位置関係による点である。旋回器同士が近接しすぎていたため、各ジェットの干渉が過多となり、個々の旋回渦が成長できなかった可能性が考えられる。これは、個々の旋回直径を D 、近接する旋回器中心間距離を L として D/L の値を低減することで回避できると考えられる。本実験では、 $D/L=0.61$ であり、より小さくする必要があると考えられる。

本実験と同種の旋回器を 9 個並列化した場合の PIV 計測の結果を紹介する[10]。この実験は正方形容器内に旋回器を 9 個配置したもので、図 11 に旋回器に平行な断面($Z=3, 13, 63 \text{ mm}$)における速度ベクトルを示す。この実験では、 $D/L=0.50$ である。 $Z=3 \text{ mm}$ の位置では、各孔からのジェットにより旋回渦を形成することが確認できるが、 $Z=13 \text{ mm}$ では流れ場は大きく変化しており、本実験の場合と同様に、各ジェットは旋回運動をしなかった、もしくは維持できなかった可能性が示唆される。 $Z=63 \text{ mm}$ では最終的に壁面に沿う形で一つの大き

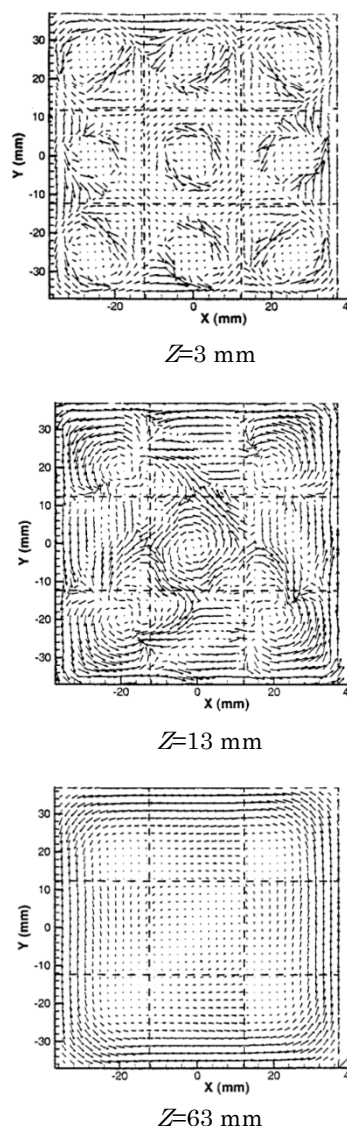


Fig.11 Mean horizontal velocity [10]

J.Cai et al. AIAA 2001-3574

な旋回流となることが分かる。ただ、本実験の結果と異なる点は、最終的に大きな旋回流となったときに、半径方向の速度成分が失われている点である。本実験の場合、図 6, 7 から分かる通り、最終的に円管中心方向の速度成分を持つ吸込み渦のような流れ場を形成している。これは旋回器配置によるものと考えられる。

5.1 同方向旋回型について

並列旋回流を形成することはできなかったものの、円管中心方向への流れが軸方向位置によらず確認できた。壁面からの物質輸送が促進されることが考えられる。図 9 において、 $Z=5 \text{ mm}$ の場合、中心域にて偏角の分布範囲が大きいのは様々な方向を向くジェットの影響と考えられる。一方、 $Z=35, 155 \text{ mm}$ の場合、分布にあまり差異は見られず、全体に円管中心向きの速度成分を有することが分かる。また、 $Z=5, 35, 155 \text{ mm}$ すべての場合において、壁面付近の分布にあまり変化は見られな

い。これは、壁面オイルフローの結果から分かる通り、壁面に沿って旋回が形成されているためと考えられる。

しかし、円管内に壁面に沿う形でジェットを流入させることにより形成される旋回流では、半径方向の速度成分は最大でも平均軸方向速度成分の1.5%ほどであり[11]、本実験の場合では、図6, 7から分かる通り、半径方向速度はそれに比べると非常に大きく、そのような旋回流とは異なる流れ場が形成されていると言える。これは、各ジェットの干渉により渦度に分布が生じるためであると考えられる。具体的には、図4の $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 135^\circ$ 位相において互いに逆向きのジェットがすれ違うことにより、せん断流れが生じ渦度の大きい領域が生じる。さらに円管中心域では4方向のジェットにより、より渦度の大きい領域が生じており、中心程渦度が大きくなるような分布となっていることが推測される。このような渦度分布を有する旋回渦にBurgers渦が挙げられる。Burgers渦では、旋回中心について、渦度は正規分布し、Burgers渦でも本実験の場合と同様に旋回中心へと向かう流れが生じる[12]。固体ロケット燃焼室内にて、各グレインスロットより中心部へと吹き出す衝突流により、中心軸に沿ってBurgers渦様の安定な渦管が形成されることが数値解析より明らかになっており[13]、本実験の場合そのような衝突流は、旋回器近傍以外では存在しないものの、Burgers渦と同種の流れ場が形成されていたと示唆される。

5.2 逆方向旋回型について

同方向旋回型の場合と同様に、上流部では各孔からのジェットにより、図6のように種々の方向への流れが確認できるものの、図10から分かる通り、壁面において時計回り、反時計回りのそれぞれの旋回器の各孔からのジェットは衝突し、周方向速度成分を失い、以後軸流を形成することが分かる。また、同方向旋回型の場合と異なり、せん断流れが形成されないため、渦度が集中する領域は生じず、図6から分かる通り、半径方向の速度を生じなかったと考えられる。

6. 今後の課題

本実験では、先述した通り、各旋回器による旋回渦を安定維持することができなかった。旋回器形状・配置の見直しが必要である。また、流入条件、旋回器配置などの条件が各旋回流の発生・安定化にどのような影響を与えるか、数値的アプローチにより探る。

参考文献

- [1] T.M.Abel et al., 33rdJPC paper, AIAA-1997-2798, 1997.
- [2] S.Yuasa et al., 35thJPC paper, AIAA 99-2322, 1999.
- [3] S.Aso et al., 47thJPC paper, AIAA 2011-5907, 2011.
- [4] H. Nagata et al., 23rd ISTS, ISTS 2002-g-19, 2002.
- [5] D.Altman, M.Karabeyoglu et al., JPC, **18**(3):610-620, 2002.
- [6] G.A.Risha, B.J.Evans et al., Fundamentals of Hybrid Rocket

Combustion and Propulsion, AIAA, pp.413-456, 2007.

- [7] S.Yuasa et al., 48th JPC paper, AIAA 2012-3904, 2012.
- [8] M.Iguchi, H.Sugiyama, JSME vol54-507, No.88-0204 B, 1988.
- [9] J.M.Beer, N.A.Chiger, Combustion Aerodynamics, Applied Science, pp.106-107, 1972.
- [10] J.Cai et al., 37th JPC paper, AIAA2001-3574, 2001.
- [11] F.Chang et al., J.Heat and Fluid Flow, Vol.15, No.5, 1994.
- [12] 福本康秀, “粘性流体中の渦管”, ながれ 25(2006)61-77, pp-61, 2006
- [13] T.Shimada et al., Journal of Propulsion and Power, Vol.25(6), pp1300-1310, AIAA, 2009.