縦渦発生ジェットに伴う渦構造の可視化*

長谷川 裕晃¹⁾, 吉川 雅史²⁾, 松内 一雄³⁾

Flow Visualization of Vortical Structure in the Wake of Vortex Generator Jets

Hiroaki HASEGAWA, Masafumi YOSHIKAWA and Kazuo MATSUUCHI

ABSTRACT

The vortex generator jets provide an adaptive control action under various flow changes because the strength of longitudinal vortices can be adjusted by varying the jet speed. Longitudinal vortices are generated by the interaction between jets and a crossflow. Jets in a crossflow provide complex interacting flow that contains many vortices (e.g. wake, horseshoe and hairpin vortices) in the near field of the jet where the three-dimensional interaction between the jet and crossflow is intense. In this study, structural features resulting from the interaction of a jet issuing transversely into a crossflow are described with the help of flow visualization technique and hot-wire anemometry. For the normal jet, the presence of a wake behind the jet in a crossflow is observed and it was confirmed that the origin and formation of the vortices in the wake were affected by crossflow Reynolds numbers and the jet-to-crossflow velocity ratios.

Keywords : Vortex, Boundary layer, Flow visualization, Wake, Jet

1. 緒 言

ジェット吹出しによる縦渦発生装置 (Vortex Generator Jets: VGJs) は、主流中にジェットを吹出し、主流とジェットの干渉で縦渦を発生させるというものである。この縦渦は、主流と境界層の強制混合を促進させ、境界層内に主流側のエネルギーを供給することではなく離制御に利用できる^{1)–3)}。こうした縦渦による制御は、現在航空機の主翼に固体の渦発生器 (Vortex Generator: VG) を設置し離着陸時の飛行性能の改善に実用化されている。ところが VG の場合、縦渦の強さを変化させるには VG 自体の変更が必要となる。さらに、VG は常に流れにさらされたままになるため制御不要時においては付加抵抗となり、かえって悪影響を及ぼす可能性がある。それに対して、VGJs は、ジェットの吹出し流速を変化させることで、発生する縦渦の強さを調整することができるため、時間的に変化する流れ場に適合した制御が可能となる。

さらに、制御が不要な流れにおいては、ジェットの吹出しを停止することで、制御装置が引起す付加抵抗を完全に取り除くことができる。ところが、VGJs にはこうした制御性の利点が多くあるにもかかわらず、現在実用化に関する報告はなされていない。

そこで、VGJs により効果的な離制御を実施するためには、VGJs により誘起される渦構造を理解することは極めて重要であると考えた。主流とジェットの干渉で発生する下流方向に軸を持つ縦渦が、大規模な渦構造を有することは知られている。そして、ジェットと主流との速度勾配に伴うジェットせん断層渦や馬蹄渦、後流渦の存在が明らかになっている^{4),5)}。そのうち特に後流渦は、壁面近傍から縦渦に向かう渦で、縦渦による主流と境界層の強制混合の際、壁面付近のエネルギーの小さい流体を主流側に運び、主流と境界層のエネルギー輸送に役割を担っていることが十分期待できる。

Fric らは、主流に対して直角に吹出したジェットの後流渦の可視化を報告している⁵⁾。しかし、測定を実施したレイノルズ数、ジェット流速の範囲では、後流渦の向きに違いが確認されていない。一方、著者らはジェットに吹出し角をつけた場合の後流渦の違いを明らかにした⁶⁾。吹出し角の違いは、制御効果に大きく影響を及ぼ

* 原稿受付 2005 年 11 月 28 日

¹⁾ 正会員 秋田大学工学資源学部 (〒 010-8502 秋田市手形学園町1-1, E-mail: hhasegaw@mech.akita-u.ac.jp)

²⁾ レンゴー (株)

³⁾ 筑波大学大学院システム情報工学研究科

す。ところが、VGJs による制御で重要なパラメータとなるジェットと主流の流速比が、後流渦構造へ及ぼす影響については不明のままである。ジェットと主流の干渉で縦渦が発生する場合、ジェットと主流の境界での速度勾配の大きさが重要となり、縦渦の強さは、この流速比に直接影響を受ける。そのため、ジェットと主流の流速比の違いで後流渦に違いが生じるかは興味深い。つまり、縦渦によって乱された流れ場において、主流と境界層のエネルギーの輸送に、後流渦が影響を及ぼしているのであれば、主流レイノルズ数、ジェット流速の違いで後流渦が影響を受けることが十分予想される。さらに、後流渦のような非定常渦構造に関する報告は非常に少なく不明なことが多い。そこで、本研究ではレイノルズ数、ジェット流速により後流渦に違いが生じるかを、VGJs に伴う渦の可視化を行うことで調べた。はく離制御の観点からは、ジェットは壁面との角度をつけて吹出すことが望ましい。しかし、本研究では吹出し角の影響がない状態で、ジェットと主流との流速比の違いが、後流渦構造に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。そのために、ジェットは壁面から垂直に吹出すことで実施した。

2. 実験装置および方法

本研究で使用した風洞の測定部は、120 mm × 250 mm (H × W) の長方形断面で、側面および上面は可視化のために透明なアクリル板になっている。ジェットは測定部下側壁面から、主流中に吹出す。座標系は、主流方向に X 、風洞高さ方向に Y 、スパン方向に Z とし、それぞれの原点はジェット吹出し口の中心とした。ジェット吹出し口のスパン方向位置は、風洞中心である。ジェットはコンプレッサで昇圧した空気を気蓄器に貯め、気蓄器上流側のバルブ操作でジェットの流速を調整する。座標系およびジェットの吹出しイメージを Fig. 1 に示す。ジェット吹出し口は円形で、直径 D_j は 7 mm である。レイノルズ数 Re_f は、代表速度を主流速 U_0 、代表寸法を吹出し口直径 D_j として定義した。ジェットは、流路底面に対して 90° (ピッチ角 $\phi = 90^\circ$) で、主流下方から垂直に

Fig. 1 Jet configuration and details of flow visualization system.

吹出す。ジェット吹出し強さは、主流速 U_0 とジェット流速 V_j との流速比 $VR (= V_j/U_0)$ で規定する。

流れ場の可視化には、スモークワイヤ法を用いて流脈線の可視化を実施した。ワイヤには直径が 0.1 mm の SUS304 の線を使用し、ワイヤが流れを乱していないことは、境界層内の速度分布から事前に確認した。トレーサには流動パラフィンを使用した。ワイヤは、スパン方向 (Z 方向) あるいは高さ方向 (Y 方向) に張ることができる。ワイヤの張り方のイメージは Fig. 1 に示す。流動パラフィンは、スパン方向のワイヤには直接塗布し、高さ方向に張ったワイヤへは、滴下法を使用した⁷⁾。その際の装置概要図および作動原理は、ながれ第 24 巻⁶⁾ に詳細に示してある。縦渦発生ジェットにより実際に流れ場に縦渦ができていることを確認するために、X 形熱線プローブを使用した渦度の測定を行った。熱線は、直径 5 μm のタングステン線で、 45° に傾斜しておりプローブ間の距離は 2 mm である。Y および Z 方向の流速 v , w は、3 軸トラバース装置を使用して、Y および Z 方向にそれぞれ 5 mm 間隔でトラバースして求めた。また、ジェット後流での渦の発生周期を調べるために、ジェット下流の壁面付近で、I 形熱線プローブにより周波数解析を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 縦渦発生ジェット後方の流れ場

ジェット後方の流れ場の下流方向からの可視化を Fig. 2 に示す。その時の渦度等値線および二次流れベクトル図を Fig. 3 に示す。渦度 ω は、

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (1)$$

で下流から見て反時計回りが正である。渦度の計算には、一辺が 5 mm の等間隔格子点上の測定値を用いている。ジェットは下側壁面から主流中に垂直に吹出している。そのため、回転方向の異なる渦からなる 1 対の渦対が確認できる。正・負の渦は、強さおよび形がほぼ等しい。そのため Fig. 3(b) で示すように、渦対間で吹上げの流れが生じている。渦対は、この上向きの二次流れの影響を受け、下流に行くにつれ下側壁面から離れるよう推移していく。一方、縦渦と壁面との間に、上下で縦渦と回

Fig. 2 Rear view of longitudinal vortices for $Re_f = 1370$, $VR = 3.5$ (Wire: $X = -30$ mm, $Y = 50$ mm).

(a) Contours of streamwise vortices (Dotted lines denote negative vorticity)

(b) Secondary flow vectors

Fig. 3 Flow in Y-Z plane at $X/D_j = 2.5$ ($Re_f = 1370$, $VR = 3.5$).

転方向の異なる渦の存在が確認できる。この渦は、存在している場所や回転方向から馬蹄渦である。

Fig. 4 は、 $Re_f = 1370$, $VR = 3.5$ でのジェット後流を可視化した結果である。ワイヤをスパン方向に張り、上部から可視化している。スモークは、ジェット吹出し口上流から吹出し口を大きく回り込んでいる。この回り込んだスモークは、吹出し口後方で下流方向へ千鳥状に乱れている。千鳥状に乱れている部分では、スモークがロール状に巻き上がっている。この部分が壁面からの離領域である。図には矢印で示す3つのはく離領域が確認できる。特に一番上流側のはく離領域では、巻き上げられた流れが引き込まれジェットと結合している様子が可視化されている。Fig. 5 は、同じ条件で側方から可視化したものである。矢印の部分がはく離領域である。上部から確認できたはく離領域のY方向の構造が、よりはっきりと確認できる。そして、このはく離領域からジェットに向かってスモークが伸びている。つまり、はく離領域からY方向に伸びた渦の存在が確認できる。ジェット後方の壁面付近で、後流渦の発生周波数を測定した。後流渦が通過している場所で得られたスペクトルでは、約 50 Hz 付近にピークが存在していた⁶⁾。この時、代表速度を主流速、代表長さを吹出し口直径、代表周波数を後流の周波数とするとストローハル数 St は $St \approx 0.11$ とな

Fig. 4 Top view of flow around jet for $Re_f = 1370$, $VR = 3.5$ (Wire: $X = -30$ mm, $Y = 1$ mm).

Fig. 5 Side view of wake vortices. Wake structure is visualized by smoke-seeding crossflow for $Re_f = 1370$, $VR = 3.5$ (Wire: $X = -30$ mm, $Y = 1$ mm).

る。これは Fric らの同様な条件での値とほぼ一致している⁵⁾。これより Fric らが報告した後流渦と同様な渦といえる。一方、渦が存在していない場所で後流渦の発生周波数の測定を実施した場合、スペクトルピークは確認できなかった。

3.2 レイノルズ数の違いによる後流渦構造

Fig. 6 に $Re_f = 457$, $VR = 3.0$ での上方および側方からの可視化を示す。Fig. 4 に示した $Re_f = 1370$ の場合と異なり、ジェットの後流での千鳥状の乱れは確認できない。つまりはく離領域は、ジェット吹出し口の下流側で、スパン方向へ対称に上下1個ずつ存在している。このはく離領域は、下流方向へ流されことなく留まっており、吹出し口後方でスモークは閉じた形をしている。これは、Fric らの報告とは異なる後流渦の構造である。そして、この傾向は、 $Re_f = 457$ で異なる VR において測定した場合でも同様であった。Fig. 7 は、 $Re_f = 457$, $Re_f = 1370$ でのジェット吹出し口中心軸上 ($Z = 0$ mm) での、速度の主流方向成分である。測定には I 形熱線プローブを使用した。 U_{av} は全測定値の平均である。縦軸は平均値に対する測定値の変動を示している。 $Re_f = 457$ では、上下対称な位置に渦が存在している。そのため、吹出し口後方で速度変動は小さい。一方、 $Re_f = 1370$ では速度が大

Fig. 6 Wake structure is visualized by smoke-seeding crossflow for $Re_f = 457$, $VR = 3.0$ (Wire: $X = -30$ mm, $Y = 1$ mm).

Fig. 7 Velocity variation in jet wake at $X/D_j = 4.5$, $Y/D_j = 0.5$, $Z/D_j = 0$ ($VR = 3.0$).

大きく変動している。これははく離領域が千鳥状に存在し、下流方向に流されているためである。この傾向は、 X の位置を変えて測定した場合でも同様な結果だった。

$Re_f = 457$ と 1370 の結果から、 $Re_f = 457 \sim 1370$ の間のレイノルズ数で、後流渦の構造が変化することになる。

Fig. 8 Top views of flow around jet for $VR = 3.0$ (Wire: $X = -30$ mm, $Y = 1$ mm).

Fig. 8 は、各レイノルズ数での後流渦の様子を示す。 $Re_f = 731$ では、スモークはジェット吹出し口を囲むように閉じた形になっている。この結果は、 $Re_f = 685 \sim 777$ では同じで、 $Re_f = 457$ の場合と同様である。しかし、 $Re_f = 914$ では、 $Re_f = 457$ の場合と異なっている。つまり、ジェット吹出し口後方でスモークが閉じず下流方向へ伸びた（放出された）形になっている。この傾向は $Re_f = 822 \sim 914$ の範囲でも確認された。これよりレイノルズ数を増加させると後流渦が千鳥状に存在する $Re_f = 1370$ の場合と同じ形になる。これらのことから、縦渦発生ジェット後流の構造は、レイノルズ数の影響を受けることになる。一方、 $Re_f = 822$ では、ジェット吹出し口位置に対して、ほぼ上下対称なスモークの乱れが確認できる。

これは、レイノルズ数の増加にともなう後流渦の変化において、ジェット吹出し口後方ではなく離領域が、留まる状態から千鳥状に放出される過程に、上下対称な放出を経ていることを示す。この現象は一般的に知られている、円柱後流がレイノルズ数の増加にともない、双子渦を経てカルマン渦列に変化する過程と類似している。しかしながら、こうした双子渦が存在するレイノルズ数の値は、円柱の場合とは異なっている。

また、**Fig. 9** に後流渦を側方から可視化した図を示す。上方からの可視化で吹出し口を回り込んだスモークが、吹出し口下流で放出された場合と閉じた場合の比較である。スモークが放出された場合に対応する $Re_f = 1370$ では、壁面近傍に下流方向にいくつかのはく離領域が存在している。それぞれのはく離領域から上方に向かってスモークが伸びジェットに引き込まれている。一方、スモークが閉じる $Re_f = 685$ の場合、はく離領域は一つしか確認できない。すべてのスモークは一つのはく離領域から上方に伸びている。これらの2つの異なるはく離領域の挙動をイメージとして、**Fig. 10** に示す。こうして、ジェット吹出し口後方の壁面のはく離領域の挙動の違いで、後流渦構造に違いが生じる。はく離領域では様々な方向の渦が存在している。そして、それらが絡み合い束になって、壁面に垂直な方向の渦が発生する⁸⁾。

Fig. 9 Side views of wake vortices. Wake structure is visualized by smoke-seeding crossflow for $VR = 3.5$ (Wire: $X = -30$ mm, $Y = 1$ mm).

この結果、はく離領域で Y 方向の渦度を有する渦糸が発生する。これがジェットに引き込まれ、引き伸ばされて後流渦を形成する。

以上の結果は、 VR を等しくしてレイノルズ数を変化させている。 VR が等しい場合、レイノルズ数の変化は、縦渦の強さ、ジェット流速および境界層厚さの違いを引起こす。このうち、縦渦の強さおよびジェット流速の増加は、ジェットに周囲の流体が引きこまれる効果を、より増やすことになる。したがって、ジェット吹出し口後方のはく離領域を留める効果として作用するといえる。そのため、レイノルズ数の増加により、はく離領域が放出していく直接の要因とは考え難い。一方、**Table 1** に境界層内の速度分布を測定し求めた、各レイノルズ数での境界層厚さを示す。測定は、ジェット吹出しのない場合での結果である。レイノルズ数の減少にともない境界層厚さは増加している。境界層厚さの増加は、ジェット吹出し口周囲の流体の下流方向への運動量が少ないことを意味する。そのため、吹出し口周囲の流体はジェットに引き込まれやすくなる。こうして、レイノルズ数が低くなるとはく離領域が留まることになる。つまり、レイノルズ数の変化によって生じる境界層厚さの違いが、縦渦発

Fig. 10 Cartoon depicting wake structures.

Table 1 Boundary layer thickness at $X/D_j = 0$.

Reynolds number	Boundary layer thickness (mm)	Shape factor
457	20	2.2
685	13	2.2
868	11	2.1
1370	10	2.1

生ジェット後流渦の構造に影響を及ぼしている。

3.3 VRの違いによる後流渦構造

3.2ではレイノルズ数の違いが後流渦に与える影響を述べたが、ここではVRの違いが及ぼす影響について調べてみた。つまり、等しいレイノルズ数でVRを変化させたことによる、周囲の流体がジェットに引き込まれる影響を調べた。Fig. 11に $Re_f = 777$ で $VR = 3.0, 2.0, 1.5$ における上方から可視化した結果を示す。3.2での結果から、 $Re_f = 777 \sim 822$ の間で後流渦の構造が変化した。このことから、VRでの影響が確認しやすいように $Re_f = 777$ とした。VR=3.0の場合、スモークはジェット吹出し口後方で閉じた形をしている。それに対してVR=2.0, 1.5の場合では、スモークは吹出し口後方で閉じて

Fig. 11 Top views of flow around jet for $Re_f = 777$ (Wire: $X = -30$ mm, $Y = 1$ mm).

なく放出された形になっている。つまり、VRの値を小さくすることにより、吹出し口後方の流れは、閉じた形から放出した形に変化する。これより、VRの違いがジェット後流渦の構造に影響しているといえる。

VRの違いによるジェット吹出し口後方の流れの順流と逆流の大きさの比較を実施した。測定にはX形熱線プローブを使用した。Fig. 12に熱線プローブでの測定の方法を示す。図のように熱線プローブを流れ場に挿入すると、順流に対しては2チャンネルの出力は、長いプロングが流れを妨げない。それに対して1チャンネルの出力は、長いプロングが流れを妨げることになる。そのため、順流に対しては2チャンネルの出力が1チャンネルの出力より大きくなる。一方、逆流に対しては長いプロングが流れを妨げることによる影響が逆になる。そのため、1チャンネルの出力が2チャンネルの出力より大きくなる。このことを利用し流れの順流と逆流の大きさの比較を実施した⁹⁾。Fig. 13にジェット吹出し口のすぐ下流位置での順流と逆流の大きさの比較を示す。no-jetは、ジェットを吹出さず主流のみの場合で、比較のために示してある。1チャンネルでの出力電圧は、VR=3.0で最も大きく、VR=2.0, 1.5とVRの値が小さくなるにつれて小さい。これよりVR=3.0, 2.0, 1.5とVRが大きい順に逆流が強くなっていることを示す。また、2チャンネルの出力は、1チャンネルとは逆にVR=1.5, 2.0, 3.0の順に大きい。順流は、VR=1.5, 2.0, 3.0の順に大きくなっている。熱線プローブでの測定位置は、ジェット吹出し口すぐ後方である。そのため順流より逆流が大きくなった場合、ジェットに周囲の流体が引き込まれていることを示す。これより、VRが大きいほど周囲の流体がジェットに引き込まれていることになる。そのためFig. 11に示したように、VRの違いによりジェット吹出し口後方の流れの様子が異なる。つまりVR=3.0の場合、周

Fig. 12 Schematic of measurements of back-flow behavior with X-array hot wire probe.

(a) Channel 1

(b) Channel 2

Fig. 13 Output signals of X-array hot wire probe at $X/D_j = 1.5$, $Y/D_j = 0.5$, $Z/D_j = 0$ ($Re_f = 777$).

囲の流体がジェットへより引き込まれ、吹出し口後方のスモークが閉じた形になっている。こうして、 VR の違いにより周囲流体のジェットに引き込まれる効果が異なり、後流渦の違いが生じる。また、Fig. 11 の $VR = 2.0$ の場合、スモークはジェット吹出し口位置 ($Z = 0$ mm) を軸として上下対称の位置でスモークが乱れている。それに対して、 $VR = 1.5$ ではスモークは千鳥状に乱れている。これは、レイノルズ数を変えた場合に、吹出し口後方の流れが変化していく過程と同様である (Fig. 8)。

一方、Fig. 14 にワイヤを垂直方向に張り、 VR の違いによるジェットの軌跡の壁面からの高さの違いを示す。ジェットは、主流とぶつかった際、全圧の影響を受け主流方向に偏向される。 VR が大きいほどジェットの軸方向速度は大きい。そのため、主流によって偏向されにくくなる。その結果、 VR が大きいほどジェットは壁面から離れた軌跡となる。また、ジェット上流側の縁でジェットせん断層渦が確認できる。ジェットと主流の境界は速度が不連続で、ケルビン-ヘルムホルツ不安定により渦が生じる。この渦は環状のジェットせん断層渦となりジェットの軸方向の運動量を保って移動する。 VR が小さいほど、スモークはより下流まで乱れが少なく可視化されている。言い換えれば、 VR が増加するにつれ、より短い下流位置でスモークの乱れが激しくなっている。つまり VR が大きい場合、主流とジェットの速度差が大きいため、この境界が波打ちだし大きく渦が巻き上がって

(a) $VR=3.0$ (b) $VR=1.5$ (c) $VR=1.0$

Fig. 14 Jet shear-layer structure ($Re_f = 1370$).

る。その結果、 VR が大きくなるにつれ、より短い下流距離で、主流とジェットの干渉が促進される。

また $VR = 3.0$ の場合、 $VR = 1.5$, 1.0 の場合と比べると、吹出し口近くではジェットせん断層渦が小さく可視化されている。 VR が大きくなるにつれ、ジェットせん断層渦は小さくなっている。Fig. 15 は、異なるレイノルズ数での $VR = 3.0$ の場合である。同じ VR での Fig. 14(a) の場合と比較すると、ジェットせん断層渦の大きさは類似している。このことから、ジェットせん断層渦の構造は、 VR の大きさにより影響を受けることになる。 VR が小さい場合、主流とジェットの速度差は小さい。速度差が小さいことから渦の巻き上がりが弱く大きな渦となっている。つまり、 $VR = 1.0$ での渦の方が大きい構造をし、よ

Fig. 15 Jet shear-layer structure ($Re_f = 457$, $VR = 3.0$).

り下流までスモークが乱れていないのは、2つの流体の混合過程で、まだ渦が成長している状態を可視化しているためである。

4. 結 言

ジェット吹出しの縦渦発生装置に伴う渦構造の可視化を行い、レイノルズ数と VR をパラメータとして渦構造に及ぼす影響を調べた結果は、以下のとおりである。

- (1) 主流中に吹出したジェットによる後流渦の源は、吹出し口後方の流れの壁面からの離領域である。はく領域で発生した渦糸が高さ方向に伸び、ジェットに結合し後流渦となる。そのため後流渦は、ジェットが主流により偏向され下流方向に曲げられるのに伴い、下流方向へ引きずられて進んでいく。
- (2) レイノルズ数の違いにより、はく離領域の挙動に違いが生じる。つまり、吹出し口を上方から見た場合、レイノルズ数の増加に伴い、はく離領域が一ヶ所に留まる状態から下流方向に千鳥状に放出されるようになる。これは、レイノルズ数の変化によって生じる境界層厚さの違いが影響する。
- (3) このはく離領域の挙動の違いは、 VR の違いによっても生じる。つまり、 VR の値を小さくするとはく離領域は一ヶ所に留まる状態から放出された状態となる。
- (4) この VR によるはく離領域の挙動の違いは、 VR の違いにより周囲流体のジェットに引き込まれる効果の

違いで生じる。

こうして、ジェット吹出しの縦渦発生装置にともなう後流渦構造がレイノルズ数や VR によって違いが生じることが確認できた。つまり、渦構造がこうした制御効果に関連するパラメータの影響を受けることから、制御と密接に関係しているといえる。しかしながら、現時点では後流渦の強さを測定できていないことから、渦構造の違いが具体的にどう影響しているかまでは不明である。そこで今後は、非定常性が強い後流渦の定量的な測定も実施し、制御効果における後流渦の役割を調べていく予定である。

参 考 文 献

- 1) Compton, D. A. and Johnston, J. P., Streamwise Vortex Production by Pitched and Skewed Jets in a Turbulent Boundary Layer, *AIAA J.*, 30-3 (1992) pp. 640-647.
- 2) Nishi, M., Shibata, Y., Nakamura, M. and Okamoto, M., Application of Vortex Generator Jets to Control the Flow from Separating in a Conical Diffuser, *ASME FED-217* (1995) pp. 27-34.
- 3) 長谷川裕晃・松内一雄, ジェット吹出しによる境界層能動制御のメカニズム, 日本機械学会論文集 (B), Vol. 64, No. 617 (1998) pp. 92-99.
- 4) Wu, J. M. and Vakili, A. D. and Yu, F. M., Investigation of the Interacting Flow of Nonsymmetric Jets in Crossflow, *AIAA J.*, 26-8 (1986) pp. 940-947.
- 5) Fric, T. F. and Roshko, A., Vortical Structure in Wake of a Transverse Jet, *J. Fluid Mech.* 279 (1994), pp. 1-47.
- 6) 長谷川裕晃・大久保克幸・松内一雄, 縦渦発生ジェット吹出し口近傍における渦構造, ながれ第24巻, 第1号 (2005) pp. 93-103.
- 7) Corke, T., Koga, D., Drubka, R. and Nagib, H., A New Technique for Introducing Controlled Sheets of Streaklines in Wind Tunnels, *IEEE Publication 77-CH1251-8 AES-13*, No. 6 (1977).
- 8) Wu, J. Z. and Wu, J. M., Interactions between a Solid Surface and a Viscous Compressible Flow Field, *J. Fluid Mech.* 254 (1993) pp. 183-211.
- 9) 長谷川裕晃・松内一雄・田中淳介, ジェット吹出しの縦渦発生装置による能動的はく離防止フィードバックシステムの開発, ターボ機械, 26-12 (1998) pp. 746-753.