Downstream development of longitudinal vortices formed by various disturbances

〇正 関谷 直樹 正 松本 彰 (日大理工)

Naoki SEKIYA, College of Science and Technology, Nihon University, 1-8, Kanda surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo

Akira MATSUMOTO, College of Science and Technology, Nihon University, 1-8, Kanda surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo

Key Words: Vortex, Boundary-Layer Transition, Turbulent Spot

1. はじめに

我々は、これまで層流境界層内に導入された弱いジェットによって生成される1つのヘアピン渦が、乱流斑点へ遷移する一連の過程を詳細に調べてきた^{(1), (2), (3)}。このジェットによってヘアピン渦を生成する手法は境界層遷移の研究において多く用いられている一般的な手法である^{(4), (5), (6)}。ジェットの形状、すなわち噴出ジェットの速度の時系列変化は各々の研究で異なり、発達の速さは違うが、十分下流で観察される斑点はどれも似た形状を示すのが特徴である。特に、ジェットによって生成されたヘアピン渦および斑点の横幅方向スケールは多くの報告でほぼ一致している。この結果から、境界層内に生成されるヘアピン渦の幅はジェットの形状に関係しないことが想像される。しかしながら、一般的に使用されているジェットの噴出孔の形状は円形または流れ方向に細長い矩形であり、これらの横幅方向のスケールはどれも1mm程度で、横幅方向に長い噴出孔を用いた例はほとんどない。噴出孔の横幅方向スケールがほぼ同じであるため、何れの研究においても同様なヘアピン渦が生成された可能性がある。従って、我々が調べている1つのヘアピン渦が乱流斑点へ遷移する一連の過程が、噴出孔の形状によらない現象であるか否かは興味がある問題である。そこで、噴出孔の形状およびジェットの形状の異なる様々な攪乱によって生成される縦渦とその発達を調べることを計画した。本報告はCFDを用いて大きさの異なる単純な矩形の孔から噴出されたジェットによって生成されるヘアピン渦の下流発達を調べた結果である。

2. 計算手法および噴出孔形状

数値シミュレーションは差分法で行った。支配方程式は無次元の非圧縮流体の連続の式およびNavier-Stokes方程式を用いた。無次元化に用いた速度スケールは主流速度 U_0 で、長さスケールはこれまで我々が境界層遷移の実験に用いてきた円形噴出孔の直径 d (=1mm)を用いた。差分計算にはSMAC法を適用し、空間微分項を2次精度中心差分で近似し、時間発展項には2次精度Adams-Bashforth法を適用した。計算格子は3次元の等間隔スタガード格子($500 \times 150 \times 300$)を採用した。境界層に攪乱を与えるジェットの噴出孔形状は、これまで境界層遷移の実験に用いてきた円形(直径 $D=d$)と横幅方向に長い矩形スリット(流れ方向長さ $L \times$ 横幅 $W = d \times 5d, d \times 6d, d \times 10d$)を用いた。噴出孔の中心はどれも流入境界より $5d$ 下流の計算領域中央に設け、ここを座標原点とした。座標軸は流れ方向を x 軸、壁面垂直方向を y 軸、横幅方向を z 軸とした。なお、時刻 T は攪乱ジェットの噴出初めを0とする。計算は実験と同様に、座標原点で排除厚さに基づくレイノルズ数が990になるようにBlasius分布を流入境界で与えて行った。

3. 攪乱ジェット

境界層に導入するジェットの空間分布は円形の噴出孔に対しては放物線型の速度分布とし、矩形の噴出孔に対しては

Fig.1(a)に示すように、長辺の両端 $0.5d$ の領域を除いて一定とした分布を用いた。噴出したジェットの噴出孔中心の速度 U_{jc} の時間変化は、Fig.1(b)に示す実験から得たパルス状の速度の時系列データを用いた。

(a) Spatial distribution (b) Time history at the center

Fig.1 Profiles of a jet ($L \times W = d \times 5d$).

4. シミュレーション結果

それぞれの噴出孔から噴出されたジェットによって生成されたヘアピン渦が、噴出孔の直後 $x/d=5$ およびさらに下流の $x/d=35$ に達したときの $Q=0.001$ の等値面を重ねてFig.2に示す。(a)はこれまで境界層遷移の実験に用いてきた円形の孔から噴出されたジェットによる結果を示しており、 $2d$ の幅を持つヘアピン渦が生成されることを示している。一方、(b)、(c)および(d)に示す横幅方向に長い矩形の孔から噴出されたジェットによって生成されたヘアピン渦は、 $x/d=5$ の初期段階ではどれも噴出孔の幅とほぼ同じ幅を持っており、さらに、程度の違いはあるがヘアピン渦の頭部中央が凹む様に湾曲していることがわかる。したがって、円形の孔から噴出されたジェットによって生成されるヘアピン渦とは異なった下流発達をすることが期待される。この生成されたヘアピン渦の違いは、ジェットの横幅方向の分布にも依存すると考えられる。本報告で用いたジェットの速度分布は、両端を除いて横幅方向に一樣な分布として与えたため、横幅方向に長い頭部を持つヘアピン渦が生成され、頭部中央が凹む変形が見られたが、ジェットの横幅方向分布を放物線型分布のように中央でピークを持つような分布とすると、頭部中央が凸になるヘアピン渦が生成されることが期待される。以上の結果より、噴出孔の幅は、生成される初期のヘアピン渦の幅に影響を与えることが明らかとなった。さらに、横幅方向に一樣な強さのジェットではヘアピン渦の頭部中央が凹型に湾曲することも明らかとなった。生成された直後では噴出孔の影響を受け、異なった形状を示していたヘアピン渦は、下流発達するにつれて形状が似てくることが、さらに下流の Q の等値面図に示されている。円形の孔によって生成されたヘアピン渦は、初期と同じ $2d$ の幅のまま引き延ばされている。一方、(b)に示す幅が $5d$ の矩形の孔によって生成されたヘアピン渦は、初期段階では頭部が湾曲し、幅も噴出孔とほぼ同じ約 $5d$ であったが、

直ぐに頭部の湾曲は無くなり、ヘアピン渦の形状に戻ることが観察された。渦の幅も脚部が互いに近づき、 $x/d=30$ 付近の頭部に近い領域では約 $3d$ となっており、円形の孔によって生成されたヘアピン渦の幅に近づいてきていることがわかる。幅が d の円形の孔によって生成されたヘアピン渦が脚部の幅を約 $2d$ の大きさに保ったまま下流発達していることから、十分下流で、この矩形の孔によって生成されたヘアピン渦も幅が $2d$ に収束していくことが推測される。(c)および(d)に示した幅が $6d$ および $10d$ の矩形の孔によって生成された渦は、頭部の凹型の湾曲がさらに発達し、横幅方向に並んだ2つのヘアピン渦に分かれることが確認された。幅が $6d$ の矩形の孔では形成された2つのヘアピン渦は互いに接する脚部が減衰し、Fig.2に示すように下流で1つのヘアピン渦の形状に戻って行く結果が得られた。この1つのヘアピン渦に戻った渦は、脚部が互いに近づき、約 $4d$ の幅となることから、幅が $5d$ の矩形の孔による渦と同様に十分下流で幅が $2d$ に収束すると推測される。一方、幅が $10d$ の矩形の孔では形成された2つのヘアピン渦は、下流に行くに従い、徐々に外側に傾き、これに伴い頭部の位置も横幅方向外側へ移動していく。したがって、我々がこれまで調べてきた1つのヘアピン渦が下流発達し、下流側に頂を持つ三角形の乱流斑点ではなく、斑点は頂を持たない形状になることが推測される。以上の結果から、噴出孔の形状が円形でなく、横幅方向に長い矩形であっても、噴出孔の幅が $6d$ 以内であれば、ジェットの噴出孔形状に依らず十分下流で同様なヘアピン渦へ発達することが明らかとなった。さらに、噴出孔の幅が $6d$ を超えると頭部が分かれ横幅方向に並んだ2つのヘアピン渦が形成されることが明らかとなった。

5. まとめ

CFDを用いて、大きさの異なる矩形スリットから噴出されたジェットによって生成されるヘアピン渦の下流発達を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ジェット噴出孔の幅は、生成されるヘアピン渦の初期の横幅方向の大きさを決める。
- (2) 横幅方向に長い矩形の噴出孔から噴出されたジェットによって生成されるヘアピン渦は、初期段階で頭部中央が凹型に変形するが、噴出孔の幅が $6d$ 以下では元のヘアピン渦の形状に戻る。さらに下流では、脚部が互いに近づき、横幅 d の噴出孔によって生成されたヘアピン渦と同様に約 $2d$ の幅に収束する。
- (3) ジェットの噴出孔の幅が $6d$ を越えると、生成されるヘアピン渦の頭部中央の凹型の湾曲が発達し、2つのヘアピン渦へと分離、下流発達する。この2つのヘアピン渦は外側に傾いており、互いに離れていくため、この噴出孔によって形成される斑点は通常の下流に頂点を持つ三角形形状ではなく台形形状となる。

6. 参考文献

- (1) 菰田・他2名, 第26回乱流シンポジウム講演論文集(1994)。
- (2) Matsumoto, A., Proc. 22nd ICAS (2000)。
- (3) Sekiya, N. and Matsumoto, A., Proc. 4th HEFAT (2006)。
- (4) Acarlar, M. R. and Smith, C. R., J. Fluid Mech., Vol.175 (1987)。
- (5) J. Amini and G. Lespinard, Phys. Fluid, Vol. 25 (1982)。
- (6) Bart A. Singer, Phys. Fluid, Vol. 8 (1996)。

(a) Orifice ($D=d$)

(b) Slit ($L \times W = d \times 5d$)

(c) Slit ($L \times W = d \times 6d$)

(d) Slit ($L \times W = d \times 10d$)

Fig.2 Downstream development of various vortices ($Q=0.001$).