周期変動噴流を用いた後方ステップ流れの能動的制御

(改変された非定常剥離流れ場の組織的構造)

Active Control of Unsteady Separated Flow behind a Back-Ward Step with Synthetic Jet (Organized Structure of Modified Unsteady Flow Field)

○正 瓜田 明 (豊田工大) 正 田中周治 (豊田工大)

Akira URITA, Toyota Technological Institute, 2-12-1 Hisakata Tempaku Nagoya.

Shuji TANAKA, Toyota Technological Institute

keywords: Separation, Reattachment, Back-Ward Step, Active Flow Control, Synthetic Jet

1. 序論

流れのはく離・再付着現象は、航空機等の翼やディフューザ・燃焼器等の流体機械の性能に大きな影響を与えるため、その流れ制御に関しては従来から数多くの研究がなされており、近年では流れの状況によって制御パラメータを変化させることも可能である能動的制御に注目が集まってきている。従来ののはく離・再付着流れの能動的制御では、制御の手段として渦発生ジェット⁽¹⁾や音響かく乱⁽²⁾、振動壁面⁽³⁾などを用いたものが多かった。一方最近では、小さなエネルギー入力で大きな効果を得られる方法として、周期的に変動し、実質的な流量が零であるような噴流 (Synthetic Jet)⁽⁴⁾を用いる試みがなされているが、翼型^{(5),(6)}や滑らかな拡がり流路⁽⁷⁾に適用した例等、若干の研究例が報告されているのみである。

そこで、従来から多くの研究がなされている後方ステップ流れ^{(8),(9)}を対象として、ステップエッジ部付近から周期変動噴流を加えることにより、再付着点位置の変化や流れの変動の周波数特性などを明らかにしてきた⁽¹⁰⁾が、本研究では、周期変動噴流によって流れ構造がどのように変化しているのかを解明するため、まず、流れの二次元構造に着目して速度および渦度場等の時間平均流れおよび組織流れ構造の詳細を明らかにし、周期変動噴流によりはく離・再付着流れの状態が改変される機構に関する知見を得ることを目的とする。

2. 実験装置および方法

実験は、出口寸法高さ 250mm × 幅 400mm の開放型押込式低速風洞に、図 1 に示すような後方ステップを取り付けを行った。ステップ高さ H は 40mm、ステップ上流には $7.5H$ 、ステップ下流には $22.5H$ の平行部が設けられており、流路拡大比は 1.16 である。座標系は、ステップエッジ部を原点とし、主流方向に x 軸、主流に垂直方向に y 軸をとった。流速はステップ上流流路平行部 $x/H = -2.5$, $y/H = 2.5$ での速度を基準流速 U_0 とし、本報告においては 20m/s で一定とした。このときのステップ高さ H を基準長さとしたレイノルズ数は約 5.3×10^4 である。また、ステップ上流には Blasius 型の層流境界層が形成されていることを確認している。ステップエッジ部には、 $x = -3\text{mm}$, および $y = -3\text{mm}$ の位置に幅 1mm のスリットが設けられてお

Fig. 1 Dimensions of the test section

り、ここから水平方向 (x 方向) または鉛直方向 (y 方向) に周期変動噴流を供給することができる。

周期変動噴流は、スピーカ ($\phi 400\text{mm}$ ウーハ 4 台) と共振管 ($\phi 350\text{mm}$, 長さ約 1~3m 可変) を組み合わせた周期変動流発生装置により供給した。この装置は、変動周波数 $f_{jet} = 20 \sim 300\text{Hz}$ の範囲で変動噴流速度のピーク値 $U_{jet} = 20\text{m/s}$ 以上の周期変動噴流を発生させることができる。今回は、噴流速度 $U_{jet} = 10\text{m/s}$ とし、最も大きな再付着点の移動が観測された⁽¹⁰⁾ 噴流周波数 $f_{jet} = 150\text{Hz}$ において実験を行った。二次元速度分布は X 型熱線プローブを用いて計測し、得られた速度分布から渦度分布を算出した。

なお、上述の実験装置において、噴流の有無にかかわらず流路スパン方向 $\pm 150\text{mm}$ 以上の範囲にわたりステップの十分下流においても良好な二次元性が保たれていることを確認している。

3. 実験結果

3.1 噴流がない場合の流れ場 再付着点位置は $x/H \approx 5.1$ であり⁽¹⁰⁾、従来の研究における値^{(8),(9)} とほぼ同様の値が得られた。また、速度変動の周波数分析結果⁽¹⁰⁾ から、はく離後 $x/H = 2$ 付近でおよそ 150Hz 付近に中心を持つなだらかなスペクトルのピークが現れ始め、流下するに従い生じる渦同士は合体 (Pairing)⁽¹¹⁾ に伴って中心周波数を徐々に下げつつ、再付着点付近では約 50Hz に変動周波数の中心を有する流れが形成されていることが確認された。

図 2(a),(b) に、流路中央断面の二次元速度分布および乱れ分布をそれぞれ示す。ただし、図 2(b) の乱れ分布図における円は、X 型熱線より得られる二つの出力変動 (rms 値) の自乗平方和の大きさを表している。図 2(a) を見ると、ステップ直後の $y < 0$ の部分ではごく小さな熱線流速計出力しか得られていないことから、この領域は流れのほとんどない死水域になっていると考えられる。また、図 2(b) から、ステップ直後では薄いはく離せん断層内にのみ乱れの

Fig. 2 Velocity vectors and turbulence

Fig. 3 Contour of vorticity

大きな領域が形成されていることがわかる。速度分布を微分して算出した渦度場を図3に示す。この図を見ると、ステップから放出されたはく離せん断層による渦度が再付着点 ($x/H \approx 5.1$)⁽¹⁰⁾ 付近まで到達している。

3.2 噴流がある場合の流れ場 周期変動噴流をステップエッジ部から付加すると、水平（主流）方向噴流、鉛直（上下）方向噴流の場合共に再付着点位置の上流側への大きな移動が見られ、今回の噴流条件では共に $x/H \approx 3.5$ 付近となった⁽¹⁰⁾。従来からの定常な渦生成噴流を用いた研究⁽¹⁾では、 U_{jet} を流入速度の10倍程度にしても再付着点位置が噴流のない場合の80%程度にしかならないという実験結果や、ステップ鉛直面に設けたスリットからの定常吸込みを用いた研究⁽¹²⁾では、本研究と同じ U_{jet}/U_0 に対して同等の再付着点位置の移動を得るためにスリット高さはステップ高さの1/5のスリット幅を要する（本研究においてスリット幅はステップ高さの1/40）ことと比較すると、周期変動噴流ははく離から再付着までの距離を短くするのに極めて有効であると言える。

次に、噴流による流れ構造の変化を調べるために、まず、時間平均二次元速度分布をベクトル表示し図4に示す。図4(a),(b)はそれぞれ水平方向噴流と上下方向噴流の場合の結果である。はく離点直後 ($x/H = 1$ 付近) から、せん断層の流れが下向きに曲がり始めていることがわかる。また、噴流がない場合には死水域であったステップ直後の $y < 0$ の領域に注目すると、噴流を付加した結果、この領域でも比較的大きな熱線流速計出力が得られている。次に、乱れ分布（周期変動成分も含む）を図5に示す。はく離直後において流れが既に大きな変動を有しており、噴流なしの際には死水域であった領域にも大きな速度変動が存在している。この速度変動による混合作用により、死水域の流体の主流への引き込みが促進されるために主流が下方へと曲げられ再付着点位置が上流側へと移動するものと考えられる。

Fig. 4 Velocity vectors

Fig. 5 Turbulence

周期変動噴流に同期させて位相平均計測した速度分布から算出した組織流れの渦度場を図6に示す。図では共に左上が噴出流速が最大になる瞬間、右下が吸込みが最大となる瞬間の渦度を示しており、反時計回りに一周分表示している。水平方向噴流の場合（図6(a)）、噴出し時にステップエッジ部からほぼ水平に放出されていた渦が、吸込み時にはエッジ部から下方に向っている様子がわかる。一方、鉛直方向噴流の場合（図6(b)）には、逆に噴出し時に渦がステップエッジ部下方に放出されており、噴流が水平方向の場合の方が鉛直方向の場合よりも孤立渦が放出され

Fig. 6 Vorticity of organized structure

るタイミングが約1/4周期早い。しかしながら、噴流方向にかかわらずせん断層から孤立渦が形成され、下流へと周期的に放出されており、その結果、大きな流れの変動が生じ、主流部と死水域の混合が促進されると考えられる。

4. 結論

周期変動噴流を流れに付加することによる、後方ステップより生じるはく離・再付着流れ場の詳細の変化を明らかにするために、流路中央断面内における二次元速度場および渦度場の計測を行った。得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 周期変動噴流を付加することによって、せん断層内の流れがステップ直後から下向きに曲げられる。
- (2) 周期変動噴流によってステップ後流に大きな速度変動が生じ、その混合作用により多くの死水域流体が主流へ引き込まれ、その結果、主流が下方へと曲げられ再付着点位置が上流側へ移動する。
- (3) 噴流の方向によってタイミング等に違いはあるが、噴流方向にかかわらずステップ部から周期的に渦が放出されており、これにより大きな速度変動がもたらされるため、主流部と死水域の流体の混合が促進される。

参考文献

- (1) 森岡・本阿弥, 機論, **67**-656, B (2001), 876-881.
- (2) Marrot, F., et al., AIAA J., **43**, (2005), 1176-1186.
- (3) 福西ほか5名, ながれ, **25**, (2006), 119-126.
- (4) Rumsey, C. L., et al., AIAA J., **44**, (2006), 194-207.
- (5) 西沢ほか2名, ながれ, **25**, (2006), 111-118.
- (6) Dipankar, D., et al., J. Aircraft, **44**, (2007), 616-626.
- (7) Greenblatt, D., et al., AIAA J., **44**, (2006), 2831-2845.
- (8) Eaton, J. K. and Johnston, J. P., AIAA J., **19** (1981), 1093-1100.
- (9) 水木・内山, ながれ, **6**, (1987), 201-221.
- (10) 石原, 日本機械学会東海学生会第39回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, (2008).
- (11) 李家ほか2名, 航空宇宙学会誌, **46**, (1998), 369-371.
- (12) 櫻庭ほか2名, 機論, **70**-690, B (2004), 466-473.