翼まわりの馬てい形渦と縦渦の干渉に関する研究*
(第2報, 受動制御された流れ場の挙動)原 浩之*¹, 志澤 高朗*², 本阿弥 眞治*²A Study of Interaction of a Pair of Longitudinal Vortices
with a Horseshoe Vortex around a Wing
(2nd Report, Behavior of the Interacting Flow Field Controlled Passively)Hiroyuki HARA, Takaaki SHIZAWA*³ and Shinji HONAMI*³ Science Univ. of Tokyo, Mechanical Engineering Dept.,
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

This paper presents the behavior of a passively controlled horseshoe vortex at the root of NACA 0024 wing which is established on a turbulent boundary layer. A pair of vortex generators of half delta wing is installed upstream of the wing. The flow field of the optimally controlled horseshoe vortex both in case of Common Flow Up (CFUC) and Common Flow Down Configuration (CFDC) is carefully investigated by an X-array hot-wire. In case of CFUC, the horseshoe vortex is not shifted from the wing, because the longitudinal vortex is restrained. The interacted vortex presents a circular profile, in a optimally controlled case. In case of CFDC, the interacted vortex that has strong vorticity by the pairing process is shifted away from the wing. Then, the high momentum fluid flow penetrates between the wing and the vortex.

Key Words: Longitudinal Vortex, Horseshoe Vortex, Flow Control, Vortex Generator, Turbulent Boundary Layer, Reynolds Stress

1. 緒 言

航空機の翼や外部構造物と胴体の接合部に存在する馬てい形渦は、航空機の空力性能を低下させ、ガスタービン翼とハブの接合部に生ずる馬てい形渦は熱応力によるタービン翼破損の一因となる。また、地上の構造物まわりに生ずる馬てい形渦は交通の障害となる。そこで、馬てい形渦の影響を最小限にとどめる必要がある。

著者らは第1報⁽¹⁾で、渦発生器下流の縦渦により、翼まわりに生ずる馬てい形渦を受動制御する方法を提案した。一對の渦発生器が巻上がり形態(CFUC)と巻下がり形態(CFDC)の場合に馬てい形渦に及ぼす制御効果を定量的に評価した。

本研究は、第1報で報告した馬てい形渦の制御効果が大きいパラメータとして渦発生器の高さ H を選び、縦渦と馬てい形渦の干渉場の挙動を明らかにすることを目的とする。

2. 記 号

q^2 : 乱流運動エネルギー $= (u^2 + v^2 + w^2)/2$
 U, V, W : 時間平均速度
 u, v, w : 変動速度
 X, Y, Z : 座標系(図1参照)
 δ : 境界層厚さ
 Ω_x : 流れ方向時間平均渦度 $= \partial W / \partial Y - \partial V / \partial Z$
添 字
 r : 基準点

3. 実験装置および実験方法

本研究は、第1報⁽¹⁾と同一の実験装置を用いる。図1に示す実験装置は、高さ130 mm、幅720 mmの矩形断面をもち、試験部長さが1500 mmの回流式風洞である。基準点流速 U_r は16.7 m/s、乱れ強さは0.15%、境界層厚さ δ は22.0 mm、運動量厚さ δ_2 は3.5 mmで、運動量厚さを代表長さとしたレイノルズ数 Re_{δ_2} は2300である。

供試翼は前縁部曲率半径が7.85 mmのNACA 0024で、翼弦長 C は250 mm、スパン長さは120 mm、最大翼厚さ T は60 mmである。

一對の渦発生器は、厚さ1 mmのアルミニウム製直

* 原稿受付 1999年2月19日。

*¹ 三菱重工業(株)原動機事業本部 (〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1)。*² 正員、東京理科大学工学部 (〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3)。

E-mail: shizawa@rs.kagu.sut.ac.jp

Fig. 1 Experimental setup (Dimensions in mm)

角三角形の翼である。この渦発生器を翼前縁からの距離 L を 60 mm, X 軸(流路座標系)に対する迎え角を 18° とし, 翼の中心軸に対して流路幅方向(Z 方向)の対称な位置に間隔 S で設置する。翼から渦発生器までの距離を $L/T=1.0$ とする。

時間平均流速およびレイノルズ応力の測定には, 直径 $\phi 5 \mu\text{m}$, 長さ 1.4 mm のタングステン線の感知部を傾斜角度 45° で取付けた定温度 X 形熱線流速計を用いた。図 1 中, 斜線で示す $X/C=0.3$ (最大翼厚部)および, $X/C=1.6$ の $Y-Z$ 平面の 2 断面において計測する。熱線流速計の出力は, 温度補償器とリニアライザを介して A-D 変換後パーソナルコンピュータに取り込む。

渦発生器の設置形態は第 1 報⁽¹⁾ で得られた結果より, CFDC と CFUC のいずれも, 馬てい形渦の受動制御効果の大きい渦発生器の高さを $H/T=0.17$, 渦発生器の間隔を $S/T=0.67$ に選ぶ。本形態は $X/C=1.6$ で, CFUC の場合は, 質量流量全圧力損失および全圧の等値線のディストーションが極小値を示す。CFDC の場合は時間平均質量流量全圧力損失が極小となる。また, 基本形態は第 1 報⁽¹⁾ と同様である。ここで, 渦発生器下流の縦渦を‘縦渦’, 縦渦と馬てい形渦の両者が干渉した結果を‘干渉渦’と呼ぶ。

4. 実験結果および考察

4.1 時間平均速度および二次流れ 図 2 に, $X/C=0.3$ および $X/C=1.6$ における時間平均速度 U と, $Y-Z$ 断面内の二次流れ速度成分から得たベクトルを示す。

図 2 (a) は翼のみの結果であり, $X/C=0.3$ の時間平均速度の等値線は Z 方向に正のこう配をもち, 翼により流れが加速している影響が見られる。二次流れベクトルは, 馬てい形渦に伴う反時計回りの渦が翼から離れた位置に存在することを示す。馬てい形渦の中

Fig. 2 U contours and secondary flow vector

心は, $X/C=0.3$ で ($Y/T=0.12, Z/T=0.92$), $X/C=1.6$ で ($Y/T=0.25, Z/T=0.65$) である。

図 2 (b) に示す CFUC における $X/C=0.3$ の時間平均速度分布は, $Z/T=0.95$ 近傍で等値線が壁面に向かって押しつけられる。この高速領域が, 図 3 (c) に示す渦度の方向から, 縦渦に相当し, 翼近傍の低速領域が馬てい形渦に相当する。CFUC では, 縦渦の回転方向は馬てい形渦と逆であるが, 縦渦による二次流れベクトルは明確でない。干渉渦の中心は ($Y/T=0.15, Z/T=0.8$), $X/C=1.6$ では ($Y/T=0.25, Z/T=0.45$) と縦渦が馬てい形渦の外側にあるため, 干

渉渦が翼に接近している。

図2(c)はCFDCの結果を示す。時間平均速度分布は、翼のみの場合と同様の傾向を示す。CFDCでは縦渦の回転方向は馬てい形渦と同じであり、二次流れ分布からは縦渦と馬てい形渦の区別がつかない。干渉渦の中心は $X/C=0.3$ で($Y/T=0.15, Z/T=0.95$), $X/C=1.6$ で($Y/T=0.3, Z/T=0.9$)と翼から離れる傾向を示す。そのため、翼の基部(翼の根本に対応する位置)と干渉渦の間の領域が拡大し、壁面へ向かう二次流れの成分も大きいため、第1報⁽¹⁾で報告したように、圧力損失が小さくなる要因となる。

4・2 渦度 図3に、 $X/C=0.3$ における流れ方向時間平均渦度 Ω_x の等値線分布を示す。渦度は基準点流速および最大翼厚で無次元化する。渦度の等値線

(a) Without vortex generator pair

(b) CFDC ($H/T=0.25, S/T=0.67$)

(c) CFDC ($H/T=0.17, S/T=0.67$)

(d) CFDC ($H/T=0.17, S/T=0.67$)

Fig. 3 Contours of $\Omega_x T / U_\infty$ ($X/C=0.3$)

は下流方向に流れ場を見て、負の渦度を実線で示す。

図3(a)は翼のみの場合を示す。CFUCの場合、制御効果が良好となる渦発生器の高さの範囲が狭い⁽¹⁾。そこで、図3(b)および図3(c)に H の相違に伴う干渉渦の挙動を明らかにするために、CFUCの基本形態と H を低くして制御効果が大きい場合とを比較して示す。図3(d)はCFDCである。ここで、干渉渦の領域を便宜上 $X/C=0.3$ では渦度が ± 0.5 以上、 $X/C=1.6$ では ± 0.1 以上の領域とする。

図3(b)はCFUCの基本形態を示すが、馬てい形渦による負の渦度(実線)を囲むように縦渦による正の渦度(破線)が見られる。しかし、干渉渦の領域は、翼のみの場合と比較して約72%に縮小している。

図3(c)に示す制御効果が大きいCFUCの場合、縦渦の影響領域が基本形態[図3(b)]と比較して小さくなり、馬てい形渦の渦度も減少する。しかし、干渉渦の領域は基本形態よりわずかに拡大し、翼のみの場合[図3(a)]の約80%である。

図3(d)に示すCFDCは、翼のみの場合と比較すると、干渉渦の領域が翼から離れ、約150%拡大する。

(a) Without vortex generator pair

(b) CFDC ($H/T=0.17, S/T=0.67$)

(c) CFDC ($H/T=0.17, S/T=0.67$)

Fig. 4 Contours of $\Omega_x T / U_\infty$ ($X/C=1.6$)

渦度は馬てい形渦と同方向の負の値をもつ。

図4(a)から図4(c)に $X/C=1.6$ における時間平均渦度分布を示す。図4(a)は翼のみの場合で、馬てい形渦は翼の対称面から離れた位置に $X/C=0.3$ の断面より拡大する。

図4(b)に示す CFUC の干渉渦の領域は、翼のみの場合に対して約55%となる。図4(b)は、制御効果が大きい渦発生器の配置である。縦渦の影響による正の渦度をもつ領域は $Z/T=0.75$ 近傍にわずかに観察されるが、馬てい形渦と同方向の負の渦度をもつ領域が支配的である。また、渦度分布は他の場合と比較して、同心円状を示す。

図4(c)に CFDC を示すが、干渉渦は翼のみの場合と比較して渦度の最大値が増加する。干渉渦の領域は約80%に減少し、渦度の極値を示す位置は翼から離れる。

CFUC の結果より、最大翼厚さの位置において縦渦と馬てい形渦は渦度の強さと方向が互いに異なるため、干渉渦は Pauley ら⁽²⁾⁽³⁾ の結果に見られるように、流路幅方向への移動が小さく、したがって翼に沿って流れる。基本形態でも、縦渦の渦度は馬てい形渦よりも弱い馬てい形渦を包む挙動を示す。渦発生器の高さ H を低くすると制御の効果が大きくなるが、縦渦と馬てい形渦が干渉する位置が変化し、さらに縦渦の影響が弱くなる。下流での干渉渦は強い渦度すなわち馬てい形渦と同方向の渦度が支配的である。第1報の全圧分布の結果と考え合せると、一对の渦発生器間の流れにより縦渦の大きさと強さが決定される。そして、縦渦は、馬てい形渦の流路幅方向への移動を抑制する働きをする。したがって、下流の測定断面でも CFUC の干渉渦は翼から離れることがなく、翼に沿って移動する。

CFDC では、縦渦と馬てい形渦は同方向で負の渦度をもつため、干渉渦は Z 方向へ引き延ばされ、渦度の極値も大きくなる。馬てい形渦と縦渦がペアリングし、一つの渦になった⁽²⁾ 結果である。しかし、Pauley ら⁽²⁾⁽³⁾ の結果と比較すると、短い距離でペアリングしている。そして、翼のみの場合より負の渦度が大きいいため、翼に対して鏡像位置の渦により干渉渦はさらに翼から離れる結果となる。

4.3 乱流運動エネルギー 図5(a)から図5(c)に $X/C=1.6$ 断面における乱流運動エネルギー分布を示す。 $X/C=0.3$ の分布は示さないが、いずれの断面においても乱流運動エネルギー分布の等値線は、壁面近傍、渦のコアに相当する領域および二次流れが主流に向かう領域で大きな値をもつ。すなわち、

(a) Without vortex generator pair

(b) CFUC ($H/T=0.17$, $S/T=0.67$)

(c) CFDC ($H/T=0.17$, $S/T=0.67$)

Fig. 5 Contours of turbulent energy ($X/C=1.6$)

全圧損失が大きい領域で高い値を示す。下流の断面では、渦の中心より二次流れが主流に向かう領域および全圧分布のひずみ⁽¹⁾が大きい位置⁽¹⁾で高い値となる。

4.4 乱流せん断応力 図6(a)から図6(d)に $X/C=0.3$ における時間平均乱流せん断応力 $-\overline{uv}$ 分布を示す。図6(a)に示す翼のみの場合、馬てい形渦の中心より壁面側で負の値をもち、図2(a)に示す時間平均速度が負のこう配をもつ領域に対応する。

図6(b)に示す CFUC の基本形態の場合、負の値をもつ領域は翼基部(翼の根本に対応)に位置し、その外側を正の領域が支配する。乱流せん断応力が大きな値を示す領域は翼の基部に見られ、干渉渦は翼に付着していることを示す。

図6(c)に示す制御効果が大きい CFUC の場合、負の領域は図6(b)に示す基本形態より顕著に拡大する。一方、正の領域は干渉渦の中心より主流側に見られるが、その値は小さい。基本形態の $H/T=0.25$ から制御効果の大きい $H/T=0.17$ と H のわずかな減少に対するせん断応力の変化は顕著である。

図6(d)に示す CFDC の場合、干渉渦は馬てい形渦と同方向の渦度をもつため、干渉渦の中心より壁面

(a) Without vortex generator pair

(b) CFUC ($H/T=0.17$, $S/T=0.67$) (c) CFDC ($H/T=0.25$, $S/T=0.67$) (d) CFDC ($H/T=0.17$, $S/T=0.67$)Fig. 6 Contours of $-\overline{uv}/U_r^2$ ($X/C=0.3$)

側で負の領域が $Z/T=0.75$ から $Z/T=1.35$ の範囲で観察できる。図 2 (c) で、時間平均速度が負のこの配を示す領域と一致し、流れが前縁部で加速し、翼の圧力面側の馬てい形渦の結果⁽⁴⁾と同様の傾向を示す。

図 7 (a) から図 7 (c) に、 $X/C=1.6$ における $-\overline{uv}$ 分布を示す。図 7 (a) に示す翼のみの場合、二次流れが主流に向かう領域で正の値を示すが、壁面近傍に負の領域が観察される。せん断応力は、 $X/C=0.3$ の断面より渦度が減衰しているにもかかわらず大きな値をもつ。

図 7 (b) に示す CFUC の場合、せん断応力は上流断面より複雑な分布となり、干渉渦の中心より壁面側で負、主流側で正の値をもつ。この断面では図 4 (b)

(a) Without vortex generator pair

(b) CFUC ($H/T=0.17$, $S/T=0.67$) (c) CFDC ($H/T=0.17$, $S/T=0.67$)Fig. 7 Contours of $-\overline{uv}/U_r^2$ ($X/C=1.6$)

に示すように、縦渦と馬てい形渦は、Pauley ら⁽⁴⁾の強さの異なる巻上がり形態の縦渦が干渉する形態で、下流で渦度の大きい縦渦に組み込まれた結果と同様である。せん断応力は $X/T=0.3$ における値よりも大きい正の値をもつ。

CFDC の場合、図 7 (c) に示すようにペアリングした結果、せん断応力は、二次流れが主流に向かう領域で大きな値を示す。せん断応力の極値は翼のみの場合と比較して翼から離れるとともに、大きな値をもつ。

図 8 (a) から図 8 (d) に $X/C=0.3$ における時間平均乱流せん断力 $-\overline{uv}$ 分布を示す。このせん断応力は流れ場の三次元性に影響される。図 8 (a) に示すように翼のみの場合、馬てい形渦の中心より壁面側で負の値を示す。また、主流側では正の領域が観察できる。壁面から主流へ向かう二次流れが大きい領域で負の値をもつ⁽³⁾。

図 8 (b) に示す CFUC で基本形態の場合、正の領域を包むように、負の領域が支配的である。すなわち、干渉渦は図 3 (b) から明らかなように、縦渦が馬てい形渦を包み込むように存在する。

Fig. 8 Contours of $-\overline{uw}/U_\infty^2$ ($X/C=0.3$)

図 8 (c) に示す制御効果が大きい CFUC の場合、渦の中心を境にして、壁面近傍で負、主流側で正のせん断応力分布となる。この等値線分布は、干渉渦が同

心円に近いことを示す。

図 8 (d) に示す CFDC の等値線分布は、壁面近傍の広い領域にわたり負の値をもち、干渉渦に伴い流れ場が三次元性を示す領域が、 $Z/T=1.5$ と広範囲に及ぶことを示す。

上記の渦度およびレイノルズせん断応力分布の結果を総合すると、CFUC の場合、縦渦が馬てい形渦より弱く、干渉渦の流路幅方向への移動のみを抑制する場合に最適な制御効果が得られる。ゆえに、第 1 報⁽¹⁾で示したように制御効果が良好となる渦発生器の高さの範囲が狭い。

5. 結 論

馬てい形渦を最適に受動制御した流れ場の挙動に関して以下の結論を得た。

(1) 干渉渦の中心位置は、巻上がり形態の場合は翼の基部に近づく。巻下がり形態の場合は翼基部から遠ざかり、圧力損失が小さくなる。

(2) 巻上がり形態の場合、干渉渦の流路幅方向への移動が抑制され、翼に沿って流れる。一方、巻下がり形態の場合、翼と鏡像位置にある渦により干渉渦は翼から離れる。

(3) 乱流運動エネルギーは、圧力損失の大きい領域で大きな値をもつ。

(4) 巻上がり形態の場合、縦渦が馬てい形渦より弱く、馬てい形渦の流路幅方向の移動を抑制する場合に最適な制御効果が得られる。そのため、制御効果が良好となる渦発生器の高さの範囲が狭い。

文 献

- (1) 原浩之・ほか 4 名, 機論, **65**-640, B(1999), 3965-3970.
- (2) Pauley, W. R. and Eaton, J. K., *AIAA J.*, **26**-7 (1988), 816-823.
- (3) Pauley, W. R. and Eaton, J. K., *Stanford Univ. Rep.* MD-51 (1988).
- (4) 山本政彦・ほか 2 名, 機論, **61**-587, B (1995), 2536-2542.