

No.18

乱流境界層中における馬蹄形渦の相互干渉
(渦構造の変形とレイノルズ応力に関する考察)

蒔田秀治, 関下信正, 青山隆一, 林豊 (豊橋技科大)

Interaction between Two Horseshoe Vortices in a Turbulent Boundary Layer

H. Makita*, N. Sekishita*, R. Aoyama* and Y. Hayashi*

* Toyohashi University of Technology

ABSTRACT

Interaction phenomena between adjacent horseshoe vortices were experimentally investigated in a fully developed turbulent boundary layer. A pair of horseshoe vortices was artificially induced by injecting small swirling jets. To observe vortex structure, coherent velocity and vorticity components were obtained by conditional hot-wire measurement. A stronger sweep was induced by inside legs of two horseshoe vortices than by single horseshoe vortex in the symmetrical vertical plane. When two horseshoe vortices were induced simultaneously, they merged with each other at $X=700\text{mm}$ and each inside leg of horseshoe vortices was separated. The separated legs might change to streaks. The merged horseshoe vortices grew to a single larger horseshoe structure in the downstream region. On the other hand, two horseshoe vortices induced with time delay of 20msec didn't connected between them. Separation of their inside legs was not observed apparently. Peak values of normal vorticity of trailing horseshoe vortex was smaller than that of leading horseshoe vortex at $X=700\text{mm}$, $Y/\delta=1.0$.

Key Words : Horseshoe vortex, Turbulent boundary layer, Interaction, Conditional sampling

1. 緒言

乱流境界層内に存在する大規模馬蹄形渦は、バルジ構造⁽¹⁾や ejection, sweep などの重要な組織運動を伴っており、乱流境界層のレイノルズ応力の発生に大きく寄与している。乱流境界層中に単独で存在する馬蹄形渦によるレイノルズ応力の生成については LES を用いた Kim⁽²⁾や、熱線計測による Makita & Sassa⁽³⁾ によって明らかにされてきた。しかし、乱流境界層中では多くの秩序渦が時空間的に不規則に分布しているため、馬蹄形渦同士の干渉が必然的に生じていると考えられ、相互干渉による構造の変化とともにレイノルズ応力の生成にも変化が生じることが考えられる。従って、それらが相互に干渉した時のレイノルズ応力分布の変化を明らかにする必要がある。

本研究の目的は、大規模馬蹄形渦の相互干渉過程を明らかにすることであり、主に 2 つの馬蹄形渦をスパン方向に並べて干渉させた場合の渦構造の変化について調べてきた⁽⁴⁾。本報では、2 つの馬蹄形渦をスパン方向に並べて干渉させた場合のレイノルズ応力分布の変化を単独の結果と比較、検討した。

2. 実験装置・方法

境界層風洞(Fig.1)の測定部($0.37 \times 0.75 \times 8 \text{ m}^3$)内に鉛直に設置した境界層平板($0.75\text{m} \times 7.7\text{m}$)の前縁(楕円形 5:1)から 2500mm の位置にトリッピングワイヤー(直径 2mm)を設置し、乱流境界層を形成した。前縁から 3600mm 下流に吹き出し孔をスパン方向に 2 組設けた(中心間距離 50mm)。吹き出し孔(直径 2mm)は 2 孔 1 組(間隔 10mm)であり、平均速度勾配によって生じる渦度と同回転のスパン方向渦度 ω_z を誘起し⁽³⁾、馬蹄形渦を自然発達させた。馬蹄形渦を単独で発生させた場合を Case1, 2 つの馬蹄形渦を同時に発達させた場合を Case2 とする。座標系は 2 組の吹き出し孔の中心を原点とし、主流方向を X、高さ方向を Y、スパン方向を Z 軸とした。主流流速は $U_\infty=5\text{m/s}$ 、 $X=0\text{mm}$ における排除厚さに基づくレイノルズ数は $Re_\delta^* \approx 1685$ 、境界層厚さは $\delta=45\text{mm}$ ($X=600\text{mm}$)である。

計測には、定温度型熱線流速計と I、X 及び Double-X プロブを用いた。瞬間流速 u, v, w は、三成分分解⁽⁶⁾により局所平均流速 U_i, V_i, W_i 、秩序運動成分 $u_{c_i}, v_{c_i}, w_{c_i}$ 、乱雑変動成分 $u_{r_i}, v_{r_i}, w_{r_i}$ に分離した。A/D 変換器(5kHz)で速度変動をコンピュータに取り込み、1024 回のアンサンブル平均によって $u_{c_i}, v_{c_i}, w_{c_i}$ を求めた。レイノルズ応力も次式に示すようにアンサンブル平均により秩序運動によって生じるレイノルズ応力秩序成分 $u_{c_i}v_{c_i}$ と秩序構造と乱雑変動との干渉により生ずる乱雑成分 $-\langle u_r v_r \rangle$ とに分離された⁽⁵⁾。

$$-\langle uv \rangle = -u_{c_i}v_{c_i} + (-\langle u_r v_r \rangle) \quad (1)$$

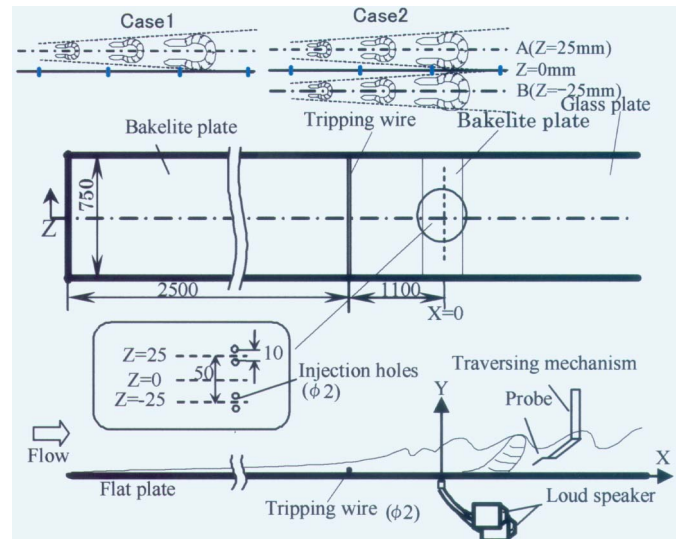


Fig. 1 Experimental apparatus(unit:mm)

3. 実験結果と考察

Fig. 2 に、 $X=700\text{mm}$ における単独馬蹄形渦の速度ベクトル図を示す。単独馬蹄形渦の中心断面付近を捉えた $Z=25\text{mm}$ の垂直断面(Fig. 2a)では、ejection と上層部に馬蹄形渦の頭部を示すバルジ構造⁽¹⁾が存在する。また、馬蹄形渦の脚部外側付近を捉えた $Z=0\text{mm}$ の垂直断面(Fig. 2b)では sweep が確認され、さらに、 $Y/\delta=0.7$ の水平断面(Fig. 2c)では馬蹄形渦の脚部を示す 2 つの回転構造が観察できる。これより、境界層下層に導入された渦度擾乱が一般的な馬蹄形渦⁽³⁾へと発達していることが分かる。Fig. 2(a),(b)の鉛直断面におけるレイノルズ応力秩序成分の分布図を Fig. 3 に示す。中心断面では ejection による強い $-u_{c_i}v_{c_i}$ が発生しており、そのピーク値は $Y/\delta \approx 0.7$ 付近に位置し、乱流境界層の時間平均値のピーク値 $(-\langle uv \rangle / U_\infty \times 10^4 \approx 14)$ ⁽⁶⁾と同程度である。乱流境界層のレイノルズ応力の生成には内層の小規模な渦構造の寄与が大きい⁽⁶⁾とされるが、本結果より大規模馬蹄形渦も生成していることがわかる。脚部外側の $Z=0\text{mm}$ では sweep に対応した分布が見られるが、その強度は中心断面に比べてかなり小さい。これは中心断面では 2 つの渦管の間で ejection は強められ、強いレイノルズ応力が発生するためであると考えられる。

馬蹄形渦を 2 つ同時に発生させた Case2 と単独で発生させた Case1 について $X=300\text{mm}$ での対称断面($Z=0\text{mm}$)における垂

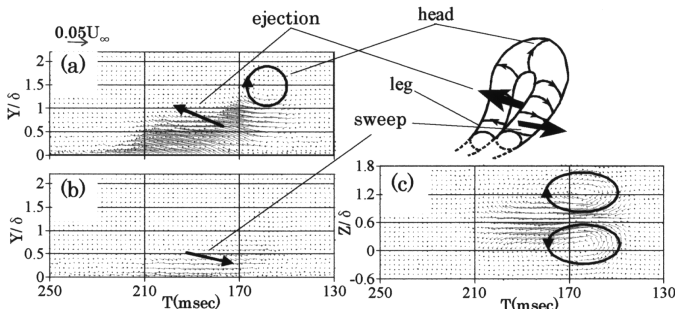


Fig. 2 Coherent velocity vector maps around a single horseshoe vortex at $X=700\text{mm}$, (a) $Z=25\text{mm}$, (b) $Z=0\text{mm}$, (c) $Y/\delta=0.7$.

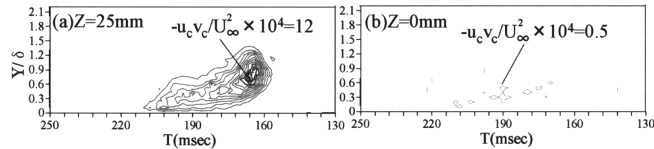


Fig. 3 Contour maps of Reynolds stress $-u_c v_c$ around a single horseshoe vortex at $X=700\text{mm}$. Isolines spacing is $u_c v_c / U_\infty^2 \times 10^4 = 1$.

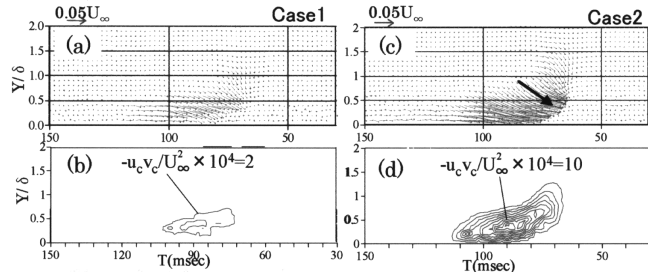


Fig. 4 Coherent velocity vector maps (a), (c) and contour maps of Reynolds stress $-u_c v_c$ (b), (d) around the horseshoe vortex at $X=300\text{mm}$, $Z=0\text{mm}$. Isolines spacing is $u_c v_c / U_\infty^2 \times 10^4 = 1$.

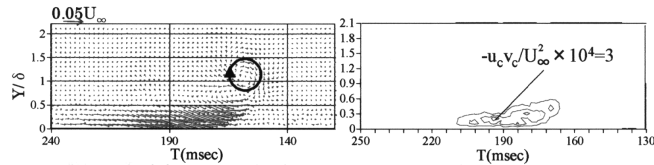


Fig. 5 Coherent velocity vector maps and contour maps of Reynolds stress $-u_c v_c$ at $X=700\text{mm}$, $Z=0\text{mm}$ for Case 2. Isolines spacing is $-u_c v_c / U_\infty^2 \times 10^4 = 1$.

直断面の速度ベクトル図と $-u_c v_c$ の分布図を Fig. 4 に示す。Case 2 では馬蹄形渦がスパン方向に並ぶために、Case 1 よりも強い sweep が発生している⁽⁴⁾。 $-u_c v_c$ の分布図においても、強められた sweep に対応して非常に強い正のレイノルズ応力が発生している。馬蹄形渦が境界層中に孤立して存在する場合には sweep によるレイノルズ応力の生成は Fig. 3(b) に示すように僅かであるが、馬蹄形渦がスパン方向に並ぶことによって sweep も ejection と同様にレイノルズ応力生成に寄与している。次に、 $X=700\text{mm}$, $Z=0\text{mm}$ における Case 2 の速度ベクトル図と $-u_c v_c$ の分布を Fig. 5 に示す。これまでの研究⁽⁴⁾でも報告したが、 $X=700\text{mm}$ では 2 つの馬蹄形渦の結合を示すバルジ構造が観察できる (Fig. 5a)。しかし、 $-u_c v_c$ の分布図ではバルジ構造に対応する分布は見られない。後で図示するように、 $-\langle u_r v_r \rangle$ の寄与の方が大きいのである。下層には sweep によるレイノルズ応力が確認できるが、そのピーク値と分布域は $X=300\text{mm}$ (Fig. 3d) に比べて減少していることから、下流に移流するにつれて馬蹄形渦が減衰したためと考えられる。ただし、干渉による影響も考えられるために、Case 2 について $X=700\text{mm}$ での $Z=0\text{mm}$ および 25mm における $-u_c v_c$ と乱雑成分 $-\langle u_r v_r \rangle$ の分布を Fig. 6 に示す。また、比較のため、Case 1 について $X=700\text{mm}$ における $-\langle u_r v_r \rangle$ の分布を Fig. 7 に示す。Case 2 における $Z=0\text{mm}$ の $-\langle u_r v_r \rangle$ の分布 (Fig. 6b,d)

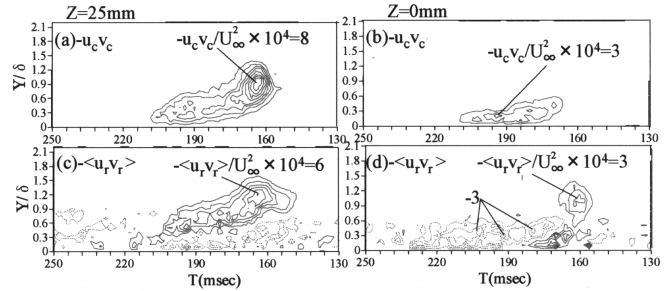


Fig. 6 contour maps of Reynolds stress around an interacted horseshoe vortex at $X=700\text{mm}$ for Case 2. Broken and solid lines represent negative and positive values, respectively. Isolines spacing is $-u_c v_c / U_\infty^2 \times 10^4 = 1$.

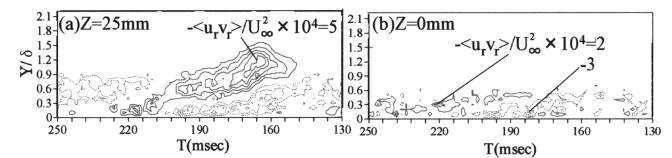


Fig. 7 Contour maps of Reynolds stress $-\langle u_r v_r \rangle$ at $X=700\text{mm}$, $Z=25\text{mm}$ for Case 1. Broken and solid lines represent negative and positive values, respectively. Isolines spacing is $-\langle u_r v_r \rangle / U_\infty^2 \times 10^4 = 1$.

では下層に位置する sweep によって $-u_c v_c$ が生成され、それを打ち消すような負の $-\langle u_r v_r \rangle$ の分布が見られる。しかし、その分布域は Case 1 (Fig. 7b) よりも拡大しているものの、ピーク値に大きな差異は見られない。Case 2 の速度ベクトル図 (Fig. 5) でバルジ構造が見られた $T=160\text{msec}$, $Y/\delta=1.0$ 付近においても乱雑成分が観察される (Fig. 6d)。脚部の結合部においてもレイノルズ応力は生成されるが、それは乱雑変動によるものである。Hussain & Zaman⁽⁸⁾ は $-\langle u_r v_r \rangle$ が大規模渦の乱雑変動による変形、減衰を促すと指摘した。Case 1 と Case 2 での $Z=25\text{mm}$ における $-u_c v_c$ の分布図 (Fig. 3a, Fig. 6a) を比較すると、レイノルズ応力乱雑成分の分布には大きな差異はないが、 $-u_c v_c$ の分布において若干 Case 2 の方がそのピーク値は小さい。これは干渉の影響が対称面近傍のみでなく、馬蹄形渦全体に及んでいる可能性を示している。同位相で干渉した馬蹄形渦では単独馬蹄形渦よりも $-\langle u_r v_r \rangle$ が対称面で増加し、 $Z=25\text{mm}$ での $-u_c v_c$ のピーク値が減少することから、単独の場合とは減衰過程が異なる可能性があり、さらに下流に追跡し、相互干渉が減衰、崩壊過程に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

4. 結言

単独で存在する馬蹄形渦の sweep によるレイノルズ応力の生成は少ないが、馬蹄形渦を 2 つ同時に誘起し、干渉させた場合、単独の場合よりも強い sweep が形成され、ejection と同様にレイノルズ応力生成に大きく寄与する。馬蹄形渦の内側脚部が結合する流れ方向位置における $Z=25\text{mm}$ ではレイノルズ応力の秩序成分のピーク値が単独馬蹄形渦に比べ減少することから、馬蹄形渦全体に干渉の影響が及んでいると考えられる。

本研究は平成 13~14 年度文部科学省科学研究費基盤研究費 (c)(2)(13650178) の援助により行われたものであることを記し、謝意を表す。

参考文献

- (1) Kovaszny et al., J.Fluid.Mech.,41(1970),283.
- (2) Kim,J., Turbulent Shear Flow5,(1987)221. Springer-Verlag.
- (3) Makita and Sassa, Turbulent Shear Flows 8,(1992),23.
- (4) 蒔田, 他 3 名, 日本機械学会東海支部第 49 期総会講演会論文集,(2000),3.
- (5) Hussain,A.K.M.F.& Reynolds,W.C.,J. Fluid Mech.,41(1970),241.
- (6) Klebanoff,P.S, NACA 1247,(1955).
- (7) Kline,S.J., Reynolds,W.C., Schraub,F.A. & Runstadler,P.W., J.Fluid Mech., 30 (1967),741.
- (8) Hussain,A.K.M.F.& Zaman,K.B.M.Q., J.Fluid Mech.,101(1980),493.