可動渦発生器下流に生じる縦渦の周期的挙動*
(回転 X 形熱線流速計を用いたレイノルズせん断応力の挙動)

遠藤 慎也^{*1}, 中嶋 摩沙洋^{*2}
志澤 高朗^{*3}, 本阿弥 眞治^{*4}

**Periodic Behavior of Longitudinal Vortices Downstream of
an Active Vortex Generators Pair
(Characteristics of Conditional Averaged Reynolds Shear Stress
by a Rotating X-array Hot-wire anemometer)**

Shinya ENDO, Masahiro NAKAJIMA,
Takaaki SHIZAWA^{*5} and Shinji HONAMI

^{*5} Department of Mechanics and Systems Design, Tokyo University of Science, Suwa,
5000-1 Toyohira, Chino-shi, Nagano, 391-0292 Japan

This paper is focused on the time depended characteristics of Reynolds shear stresses $-\overline{u'v'}$ and $-\overline{v'w'}$ of longitudinal vortices downstream of a pair of active vortex generators (AVG) with common flow up configuration. The measurements of Reynolds stresses within the longitudinal vortices are conducted by using a newly developed rotating X-array hot-wire anemometer which can measure full components of turbulent properties. Time depended characteristics of Reynolds stresses are discussed. Also, the production mechanism in the Reynolds shear stress $-\overline{u'v'}$ and $-\overline{v'w'}$ transport equation at the final-stage of up-phase is presented.

Key Words: Turbulent Flow, Boundary Layer, Vortices, Phase Averaged Velocity, Reynolds Stress, Production Mechanism, Rotating X-array Hot-Wire

1. 緒 言

境界層は分離を抑制する有効な手段の一つに渦発生器があり、流れ方向に軸をもつ縦渦の特性を利用する。そこで、効果的なせん断層の能動制御法を確立するために、乱流境界層に埋没し、経時変化を伴う縦渦のレイノルズ応力の挙動を位相平均速度とともに明らかにする必要がある。

可動渦発生器(AVG)を用いた一連の研究で、水崎ら⁽¹⁾は Common flow up 形態に設置した一対の AVG の高さ変化に対する縦渦の位相平均速度の挙動を明らかにした。Shizawa ら⁽²⁾は、水崎らと同じ実験装置を用いて AVG の上昇過程から静止過程へ移行する際の過渡特性を位相平均速度分布の考察から明らかにした。さらに、AVG の高さ変化に対する乱流運動エネルギーの過渡特性⁽³⁾を報告した。遠藤ら⁽⁴⁾は新たに

開発した回転 X 形熱線流速計を用いて主流の運動量の大きい流体が縦渦の吹下げ側から縦渦の下部、さらに吹上げ側に輸送され主流に向かう“高速度舌部”の過渡特性を明らかにした。

本研究では、平板からの高さが扇状に変化する一対の AVG を用いる。新たに開発した回転 X 形熱線流速計を用いて、縦渦の発生、成長および消滅過程における位相平均乱れ速度を計測し、レイノルズ応力 6 成分と三次のモーメント 10 成分を得る。そして、AVG の高さ変化に対するレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ および $-\overline{v'w'}$ の経時変化より、レイノルズ応力生産の過渡特性を明らかにする。

2. おもな記号

$C_{i,j} = \cos \psi_{i,j}$

H : AVG の最大高さ

h : 瞬時の AVG 高さ

Re_θ : 運動量厚さを代表長さとしたレイノルズ数

S : 一対の可動渦発生器の設置間隔

$S_{j,j} = \sin \psi_{i,j}$

t : 時間

U, V, W : 位相平均速度

$\bar{U}$: 時間平均速度

* 原稿受付 2005 年 3 月 7 日。

^{*1} 日本エナジー(株)水島工場(☎ 712-8588 倉敷市潮通 2-1)。

^{*2} (株)本田技術研究所栃木研究所(☎ 321-3393 栃木県芳賀町下高根沢 4630)。

^{*3} 正員、諏訪東京理科大学システム工学部(☎ 391-0292 茅野市豊平 5000-1)。

^{*4} 正員、フェロー、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.suwa.tus.ac.jp

u', v', w' : 乱れ速度

$u_{i,j}$: 有効冷却速度

X, Y, Z : 座標系

γ : プロブ軸と流路座標がなす角

ϕ : 速度ベクトルと熱線センサのなす角

添字

i : 回転 X 形熱線流速計の回転角度位置

j : 回転 X 形熱線流速計のセンサ番号

ref : 基準点 ($X = -750\text{mm}$)

w : 流路座標系

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置 本研究は、試験部全長が 1500 mm、幅 720 mm、高さ 130 mm の長方形断面をもつ水崎ら⁽¹⁾と同じ回流式風洞を用いる。一对の AVG を Common flow up 形態に設置し、AVG 間の中点を座標原点とした流路座標系を用いる。試験部入口に設置した $\phi = 1.5\text{mm}$ のトリッピングワイヤにより流れ場は発達した乱流境界層で、流路基準点 $X = -750\text{mm}$ における運動量厚さを代表長さとしたレイノルズ数は $Re_\theta = 2600$ である。

一对の AVG⁽¹⁾ は長さ 1 mm の頂角 130° の円弧状のアルミニウム製で、平板からの高さが扇状に変化し、先端の最大高さは境界層厚さの 84% で、平板上の $X = 0\text{mm}$ の位置に間隔 $S = 40\text{mm}$ 、 X 軸に対する迎え角を 18° で設置する。AVG の上昇過程 (Up-phase) および下降過程 (Down-phase) を図 1 に示すようにそれぞれ 50 ms に設定する。さらに、50 ms 停止する静止過程 (Steady-phase) を設け、縦渦が上昇過程から静

止過程に至る過渡特性を明らかにする。

3.2 実験方法 遠藤ら⁽⁴⁾は小形ステッピングモータ (Canon 電子製, CAM 39) を用いた回転 X 形熱線流速計を開発し、レイノルズ応力 6 成分と三次のモーメント 10 成分を計測した。熱線流速計 (DANTEC 製, StreamLine) は定温度形で、サンプリング周波数 10 kHz で PC に取り込む。

測定は $X/S = 3.375$ の $Y-Z$ 断面で、AVG を乱流値が十分収束する 2048 往復させ、位相平均処理して乱れ速度を求めた。等間隔に位相平均処理した時刻を、図 1 の AVG のタイミングチャートに○印で示す。

回転 X 形熱線流速計を用いた乱れ速度の算出は Pauley ら⁽⁵⁾の方法に従う。特に、レイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ の算出法を以下に簡潔に示す。熱線流速計の座標系において、レイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ は、X 形熱線流速計の一对の傾斜熱線が作る面を平板に対して $\pm 45^\circ$ の 2 箇所の角度位置 (添字の 3 および 4) に設置し、各角度位置における有効冷却速度 $u_{3,j}$, $u_{4,j}$ および残りのレイノルズ応力 5 成分を用いて式 (1) により与えられる。

$$\begin{aligned} \overline{v'w'} &= \frac{F_3 - F_4 - (D_1^2 - D_2^2)\overline{u'^2} - (D_2^2 - D_1^2)(\overline{v'^2} + \overline{w'^2})}{2(D_2^2 + D_1^2)} \\ &\quad - \frac{2(D_1D_2 - D_3D_4)\overline{u'v'} + 2(D_1D_2 + D_3D_4)\overline{u'w'}}{2(D_2^2 + D_1^2)} \\ &\quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} F_3 &= \{(\overline{u_{3,1}} - \overline{u_{3,1}}) - (\overline{u_{3,2}} - \overline{u_{3,2}})\}^2 \\ F_4 &= \{(\overline{u_{4,1}} - \overline{u_{4,1}}) - (\overline{u_{4,2}} - \overline{u_{4,2}})\}^2 \\ D_1 &= C_{3,1} - C_{3,2}, \quad D_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{S_{3,1}}{C_{3,1}} - \frac{S_{3,2}}{C_{3,2}} \right) \\ D_3 &= C_{4,1} - C_{4,2}, \quad D_4 = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{S_{4,1}}{C_{4,1}} - \frac{S_{4,2}}{C_{4,2}} \right) \end{aligned}$$

この方法では、時間平均速度 $\bar{V}$ および $\bar{W}$ の影響を除去するために上述のように熱線流速計プロブを $\pm 45^\circ$ の 2 箇所の角度位置に配置する。このため、レイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ は、他の項と異なる時間平均方法で得られる。さらに、式 (2) を用いて流路座標系に変換する。

$$\overline{v'w'}|_w = \overline{v'w'} \cos \gamma - \overline{u'v'} \sin \gamma \quad \dots\dots\dots (2)$$

4. 実験結果および考察

4.1 レイノルズ応力生産の関連図 図 2 にレイノルズ応力輸送方程式の生産項を構成する項の関係⁽⁶⁾を示す。矢印先の六角形内のレイノルズ応力の生産項は、矢印元の六角形内のレイノルズ応力に矢印上の小

Fig.1 Timing chart of AVG and each phase

Fig. 2 Correlation map between production terms of Reynolds stress transport equations⁽⁶⁾

さい六角形内の速度こう配を乗じた項の和で構成される。ただし、矢印付近に2または-1の数値を付したものは、その数値倍にする。

レイノルズせん断応力 $\overline{u'v'}$ は、縦渦の挙動に影響がいちばん大きいレイノルズ垂直応力 $\overline{v'^2}$ と(1):境界層の変形に伴う速度こう配④: $-\partial U/\partial Y$ との積で生産が見込まれる。一方、(2): $\overline{v'^2}$ と縦渦に伴う速度こう配②: $-\partial W/\partial Y$ との積での生産と、流れ方向の時間平均渦度輸送方程式に見られ、 $\overline{u'v'}$ と同じ $X-Z$ 平面内で“高速度舌部”の挙動に支配的な二次的なレイノルズ応力 $\overline{v'w'}$ を検討することにより、境界層に埋没した縦渦の影響を明らかにする。そこで、AVGの高さ変化に対するレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ および $-\overline{v'w'}$ の経時変化を示し、4.3節冒頭で後述するように、レイノルズ応力は上昇過程終了時から静止過程にかけて大きな値を示すため、上昇過程終了時から静止過程へ移行する際の生産項の挙動を比較する。

4.2 レイノルズせん断応力の経時変化

4.2.1 $-\overline{u'v'}$ の経時変化 図3にAVGの高さ変化に対するレイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}$ の経時変化を、(a)上昇(開始:0 ms)、(b)上死点で静止(50~100 ms)、(c)下降(開始:100 ms)および(d)下死点で静止(150~200 ms)過程に分けて示す。ここで、AVGの静止過程で縦渦の中心位置を位相平均速度 $V=W=0\text{m/s}$ となる位置で定義すると $Y/S=0.38$, $Z/S=0.31$ である。なお、縦渦の中心位置を図3中+印で示す。

図3(a)に示す上昇過程の13 msで等値線のひずみが目著となり、19 msでコア部が形成される。25 msになると縦渦下部に負の領域が現れ、縦渦上部のコア部の等値線が密になる。時間経過とともに、縦渦下部の負の領域は極値をもつコア部を形成し、高速度舌部の

の発達とともに縦渦の“吹上げ側”(縦渦の中心より $Z/S=0$ 側で高速度舌部により高速度流体が主流側に輸送される)にも極値をもつコア部が観察できる。さらに、縦渦上部の正の領域も縦渦の上部と“吹下げ側”(縦渦の中心より $Z/S>0$ 側で主流の高速度流体が壁面方向に輸送される)の2箇所極値を示す。

図3(b)に示す上死点で静止過程の $-\overline{u'v'}$ 分布は、上昇過程末期の49 msからの相違は小さく、わずかな変化が縦渦下部に見られる程度である。図3(c)に示す下降過程で $-\overline{u'v'}$ の正の領域は103 msから小さくなり、負の領域の変化は109 ms以降に現れる。下降過程のAVGの高さ変化に対する $-\overline{u'v'}$ の応答は上昇過程と比較して遅いことが49 msと103 ms前後の比較からわかる。縦渦下部の負の領域は139 msまで見られる。図3(d)に示すように、AVGが下死点で静止過程に達しても正のコア部が観察される。

4.2.2 $-\overline{v'w'}$ の経時変化 図4にAVGの高さ変化に対するレイノルズせん断応力 $-\overline{v'w'}$ 分布の経時変化を示す。図4(a)に示すようにAVGの上昇過程で $-\overline{v'w'}$ の負の極値をもつ領域が13 msで見られる。 $-\overline{v'w'}$ は縦渦の吹上げ側で正、吹下げ側で負の値を示し、時間経過とともに正と負の領域および極値のいずれも増加する。 $-\overline{v'w'}$ 分布は負の領域で増加が著しく、37 msに達すると縦渦の吹下げ側から縦渦上部へと拡大し、極値を二つもつ分布となる。縦渦の吹上げ側に“高速度舌部”に対応する負の領域が25 msで見られる。図4(b)に示すように、AVGの静止過程の吹下げ側で $-\overline{v'w'}$ の負の領域はほとんど変化せず、上昇過程末期の49 msとほぼ同様の分布となる。しかし、吹上げ側の負の領域に変化が見られ、一方、正の極値は減少する。図4(c)に示す下降過程で、AVGの高さ変化に対する $-\overline{v'w'}$ の応答は早く、103 msで縦渦の中心より壁面近傍の吹上げ側で負の等値線が増加する傾向が見られる。時間経過とともに、 $-\overline{v'w'}$ の領域とその極値は減少するが、図4(d)に示すように下死点で静止過程の151 msでもそのこん跡が見られる。

4.3 縦渦の上昇過程終了時の経時変化 図3に示すレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ 分布で、縦渦上部の正の極値はAVGが上昇過程の25 msから37 msにかけて大きな値を示し、静止過程になると減少する。AVGの高さ変化に対して乱流運動エネルギーと同様⁽³⁾、特異な過渡応答を示す。また、43 msから55 msにかけて縦渦の上部と中心部近傍で正の極値を2箇所でもつことも特筆すべき挙動である。また、吹上げ側で負の領域が高速度舌部の挙動に対応して増加する。

(a) Up-phase

(b) Steady-phase (at the top dead-end)

(c) Down-phase

(d) Steady-phase (at the bottom dead-end)

[solid lines-positive value/dashed lines-negative value/cross symbol-center of LV :
(outermost level : ± 0.00025 , step : 0.00025)]

Fig. 3 Contours of primary Reynolds shear stress $-\overline{u'v'}/\overline{U_{ref}^2}$

(a) Up-phase

(b) Steady-phase (at the top dead-end)

(c) Down-phase

(d) Steady-phase (at the bottom dead-end)

[solid lines-positive value/dashed lines-negative value/cross symbol-center of LV:
(outermost level: ± 0.00025 , step: 0.00025)]

Fig. 4 Contours of primary Reynolds shear stress $-\overline{v'w'}/\overline{U_{ref}^2}$

(a) Production term: $\overline{v^2}(\partial U/\partial Y)/(S/\bar{U}_{ref}^3)$ (b) Contours of triple-products $\overline{u'v'^2}/\bar{U}_{ref}^3$

[solid lines-positive value/dashed lines-negative value/cross symbol-center of LV:
(outermost: ± 0.00025 , step: 0.00025)]

Fig. 5 Primary team of primary shear stress $-\overline{u'v'}$ transport equation at final-stage of up-phase

一方、図4に示す $-\overline{v'w'}$ 分布で、縦渦中心近傍の正の極値はAVGの高さ変化に対して線形的に増加するが、静止過程で減少する。吹上げ側の負の極値は静止過程でも変化を示す特徴をもつ。

4・3・1 $-\overline{u'v'}$ の生産項と三次のモーメント $\overline{u'v'^2}$ の経時変化 図5(a)にレイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}$ 輸送方程式に見られる主たる位相平均した生産項: $\overline{v^2}(\partial U/\partial Y)$ のAVGの高さ変化に対する上昇過程終了時の経時変化を示す。AVGの上昇過程では縦渦上部でレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の生産が支配的である。AVGの高さ変化に対する $-\overline{u'v'}$ 生産の過渡応答は、上昇過程初期の縦渦上部でレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の正の生産が、縦渦中心部で負の生産が期待される。AVGの高さの増加に従い縦渦中心近傍で、レイノルズ応力が正から負へと変化する領域ではコア状に負の生産が認められ、壁面から離れる方向に移動する。壁面近傍の $Y/S \approx 0.15$, $Z/S \approx 0.1$ を中心として37 ms以降、縦渦の吹上げ側で高速度舌部に対応する

位置に正の生産が認められる。この正の生産が見られる位置と大きさは、AVGの高さ変化に対する影響が小さい。

図5(b)に示す位相平均した三次のモーメント $\overline{u'v'^2}$ はレイノルズ応力 $\overline{u'v'}$ とY方向の乱れ速度の相関項で、縦渦の中心近傍で正、高速度舌部の吹上げ側で負の値を示し、AVGが静止過程に達しても変化が著しい。

縦渦の中心部ではレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の負の生産と正の拡散が著しい。一方、高速度舌部⁽⁴⁾は縦渦の吹下げ側で高速流体が壁面側に、縦渦の下部では吹上げ側に輸送されるが、吹上げ側の壁面近傍で生産され、拡散により壁面から離れることが判明した。

4・3・2 $-\overline{v'w'}$ の生産項と三次のモーメント $\overline{v'^2w'}$ の経時変化 図6(a)にレイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ の主たる生産項: $\overline{v^2}(\partial W/\partial Y)$ の経時変化を示す。上昇過程初期は、縦渦下部の壁面近傍で正の生産の寄与が顕著で、上昇過程の37 ms以降に縦渦の中心近傍で

Fig. 6 Primary team of secondary shear stress $-\overline{v'w'}$ transport equation at final-stage of up-phase

$-\overline{v'w'}$ の正の生産が認められる。静止過程である 55 ms 以降も縦渦の中心部で正の生産が増加する傾向が認められる。図 4(a), (b) に示すように、レイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ 分布が縦渦の吹下げ側で大きな負の領域をもち、この領域ではレイノルズ応力の生産による寄与はない。縦渦の中心部は $-\overline{u'v'}$ と異なり正の生産が認められる。縦渦中心近傍で正の生産が見られる領域は $-\overline{v'w'}$ の場合、 $-\overline{u'v'}$ と比較して広く、この領域の相違が縦渦上部のレイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ が正となる領域に対応する。

図 6(b) に示す三次のモーメント $\overline{v'^2 w'}$ は縦渦の上部、および高速度舌部に対応する位置で負の領域が認められる。また、縦渦の中心部および縦渦対の対称面近傍で正の値を示す。AVG が静止過程に達しても、高速度舌部に対応する負の値が増加するようすが観察できる。特に、縦渦の吹上げ側の高速度舌部で $-\overline{v'w'}$ が壁面から離れる方向に負の値をもつのは、この領域での生産の寄与が認められないため三次のモ

ーメント $\overline{v'^2 w'}$ による Y 方向の拡散の寄与による。

5. 結 言

縦渦の上昇過程から静止過程にわたる挙動に着目し、可動渦発生器の高さ変化に対するレイノルズ応力の経時変化を明らかにして以下の結論を得た。

(1) $-\overline{u'v'}$ 分布は縦渦の上部と中心部近傍で正の極値を 2 箇所でもつ。また、吹上げ側で負の領域が高速度舌部の挙動に対応して増加する。

(2) 縦渦中心近傍で $-\overline{v'w'}$ の正の極値は AVG の高さ変化に対して線形的に増加するが、静止過程で減少する。吹上げ側の負の極値は静止過程でも変化を示す。

(3) 縦渦中心部はレイノルズ応力 $\overline{u'v'}$ の負の生産と正の拡散が著しい。高速度舌部は縦渦の吹上げ側の壁面近傍で生産され、拡散により壁面から離れることが判明した。

(4) $-\overline{v'w'}$ は縦渦の吹上げ側の高速度舌部が壁

面から離れて負の値をもつが, 三次のモーメント $\overline{v'^2 w'}$ による Y 方向の拡散の寄与による。

本研究をまとめるにあたり, 東京理科大学元学生平瀬誠氏, 太田健一氏, および宮本隆文氏, キヤノン電子(株)の黒澤明氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Mizusaki, Y., ほか 2 名, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Ser. B, **69**-688 (2003), 2583-2589.
- (2) Shizawa, T. and Mizusaki, Y., *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. Paper*, No. 04-0427 (2004).
- (3) Shizawa, T., ほか 2 名, *Proc. Turbulent Shear Flow Phenomena, 3rd Int. Symp.*, **III** (2003), 863-868.
- (4) Endo, S., ほか 3 名, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Ser. B, **72**-714 (2006), 231-237.
- (5) Pauley, W. R. and Eaton, J. K., *Stanford Rep.*, No. MD-51 (1988).
- (6) Shizawa, T. and Honami, S., *Proc. 5th Symp. Turbulent Shear Flows*, (1985), 21.1-21.6.