

## はく離せん断層における渦度の消失\*

宮越 勝美<sup>\*1</sup>, 羽二生 博之<sup>\*1</sup>, 金 相 一<sup>\*2</sup>  
高井 和紀<sup>\*1</sup>, Mohammad Rofiqul ISLAM<sup>\*3</sup>

## Decay of Vorticity in Separated Shear Layer

Katsumi MIYAKOSHI, Hiroyuki HANIU<sup>\*4</sup>, Sangil KIM,  
Kazunori TAKAI and Mohammad Rofiqul ISLAM<sup>\*4</sup> Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,  
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

In this study, process of vorticity decay caused by viscous interaction in a separated shear layer was investigated based on velocity measurements and flow visualization of the separated shear layer in the very vicinity of the separation point of a test body. A right isosceles triangular prism with two 200 mm long isosceles sides was used as the test body, and the experiment was carried out at the fixed Reynolds number of 19 000. As the results, following aspects were clarified about the vorticity decay.

i) A part of the vorticity decay in the separated share layer behind a body was caused by viscous interaction associated with transition of velocity distribution from boundary layer like shape to free shear layer like shape in the very vicinity of the separation point. ii) The Reynolds shear stress associated with turbulent dissipation does not take part in the vorticity decay process in the very vicinity of the separation point. iii) Since the Reynolds shear stress about an intermediate size vortex produced by coalescence of smaller vortices was considerably large, the flow field becomes turbulent and three dimensional by the coalescence of the smaller vortices.

**Key Words:** Shear Flow, Separation, Viscous Flow, Flow Measurements, Flow Visualization, Vorticity Decay, Transition

## 1. 緒 論

流れの中に置かれた物体の後方に渦が形成されて物体に変動流体力が作用するため、我々の身近で多くの弊害がもたらされている。例えば橋やビルなどに振動や騒音を引き起こしたり、高速増殖炉(1995, 日本)の事故のように物体が共振して破壊が起こるなどの事例が報告されている。

これらの弊害を引き起こす変動流体力には物体後方における渦の循環が一つの要因とされており、循環には剥離せん断層に放出される渦度の連行や消失が深く関わっている。これらの研究は Gerrard<sup>(1)</sup> や Sarpkaya-Schoaff<sup>(2)</sup> によって報告されているほか、Mair-Maull<sup>(3)</sup> は鈍い物体からのカルマン渦の放出において、一方の剥離せん断層の持つ循環のうち約15%がもう一方の剥離せん断層から連行された循環によって相殺され、渦度の消失を起こすと報告してい

る。しかし、物体後方における剥離せん断層の厚さが薄く、この付近における速度ベクトルの時間変化が激しいため、定量的に調べた報告はあまりないのが現状である。

Luo<sup>(4)</sup> および Tong<sup>(5)</sup> はレーザー流速計(LDV)を用いてレイノルズ数を変化させた時の四角柱後流の循環、渦度、ストローハル数の変化を定量的に調べた。Wang<sup>(6)</sup> は壁面近傍に設置された円柱の後流の速度分布、ストローハル数、レイノルズ応力、渦度、変動エネルギーなどを円柱と壁面の間隔を変えて調べた。また Downes<sup>(7)</sup> は流れの中にある片支持円柱の流力振動時の変位軌跡および軌跡各ポジションでの渦度を調べている。しかしいずれの研究も物体の極近傍については調べていない。羽二生<sup>(8)(9)</sup> は、LDVによって定量的に計測を行ない、物体剥離点の近傍における渦度が急激に減少する領域では、せん断変形に基づく粘性力が作用していると報告している。このことは、Mair-Maull<sup>(3)</sup> が指摘した要因の他にも渦度の消失の要因があり得ることを示唆しており、物体剥離点近傍における剥離せん断層では、境界層的な速度分布から自由せん断流的な速度分布へと遷移する過程における粘性作用が関与していると考えられる。

本研究では異符号渦度同士の混合による相殺で渦度

\* 原稿受付 2008年8月21日。

<sup>\*1</sup> 正員, 北見工業大学機械工学科(☎090-8507 北見市公園町165)。<sup>\*2</sup> 正員, アイシン精機(株)(☎448-8650 刈谷市朝日町2-1)。<sup>\*3</sup> Rajshahi University of Engineering and Technology (Rajshahi 6204, Bangladesh)。

E-mail: harry@mail.kitami-it.ac.jp

の消失が起こらないように、三角柱を水路底面に設置して、三角柱の上部頂点から剥離せん断層を形成させた。また、羽二生ら<sup>(6)</sup>の報告よりも測定領域の解像度を格段に高めて、薄い剥離せん断層の挙動を詳しく調べるために、供試物体の代表寸法を4倍の大きさにした。さらにLDVによる時間平均速度の測定領域も、物体の代表長さに対して下流約25%付近であったものから物体極近傍である下流約4%付近にて測定を行った。さらにこの測定領域において可視化実験も行い、物体剥離点の極近傍における渦度の消失が剥離せん断層の遷移過程や乱流拡散とどのように関与しているかを調べた。

## 2. 実験装置および方法

本実験では測定部寸法が幅400mm、深さ890mmの環流式開水路を用いた。供試物体には、剥離点の固

定される断面(直角二等辺三角形)を有する三角柱を使用し、図1(a)のように代表寸法 $h$ は20cmである。また三角柱のスパン方向中央部には $\phi 1$ mmの可視化用色素流出孔が設けられている。

実験の測定に当たっては、主流速度を10cm/sにし、この条件でのレイノルズ数は $1.9 \times 10^4$ である。流速測定にはLDVを使用した。測定領域は図1(c)で示すように物体の代表長さ $h$ に対して $0.075 < x/h < 0.295$ , および $0 < y/h < 0.225$ の範囲で行った。

なお、測定領域は事前の可視化観測によって特徴的な現象が生じる領域を特定し、その領域のみ測定を行うことで実験の効率化を図った。すなわち図1(c)の左上角や右下角付近では測定を行っていない。

本実験では、物体剥離点の極近傍領域内において、測定された時間平均速度分布から渦度、せん断変形速度、渦度消失割合およびレイノルズ応力を算出してそれらの等高線図を作成し、可視化画像と比較することで渦度の消失現象の考察を行った。式(1)~(3)は、それぞれの算出に用いた計算式を示している。

渦度:

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \dots \dots \dots (1)$$

せん断変形速度:

$$e = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \dots \dots \dots (2)$$

渦度生成割合:

$$\varepsilon = u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} \dots \dots \dots (3)$$

渦度方程式:

$$u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

レイノルズ応力:

$$\overline{u'v'} = \frac{rms_+^2 - rms_-^2}{4 \cos 30^\circ \sin 30^\circ} \dots \dots \dots (5)$$

渦度生成割合は渦度および速度データに基づいて微小要素を通過する循環のバランスから二次元流れの単位面積当たりの循環生成量として算出している。

式(4)は二次元層流における渦度方程式であるが、式(3)の渦度生成割合は式(4)の左辺と同じであり、右辺の粘性作用によって渦度の生成と消失が起こることを示唆している。またレイノルズ応力に関しては、主流方向の $x$ 軸に対して時計回りに $+30^\circ$ と $-30^\circ$ に傾けて流速を測定し、別々に測定した速度の $rms$ 値をそれぞれ $rms_+$ ,  $rms_-$ として算出し、式(5)を用いて求めた。また可視化実験に当たっては、前述したように供試物体の中央部に設けた直径1mmの色素流出孔から蛍光のウラン水溶液を流す色素流脈法を用いた。撮影は1/30s間隔で行い、可視化画像と速度デー

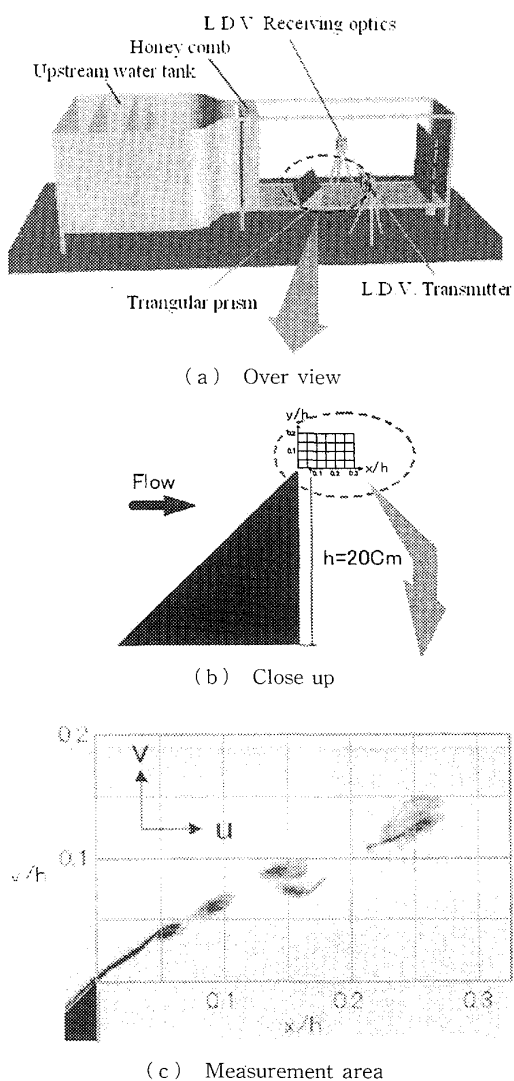


Fig.1 Experimental arrangement and definitions of symbols

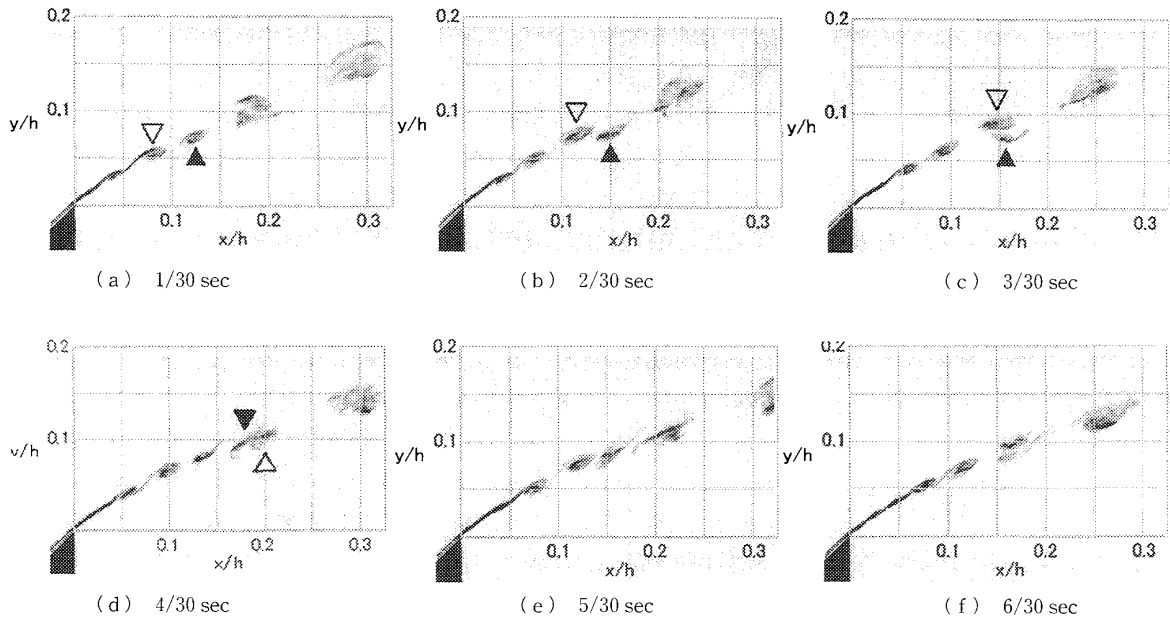
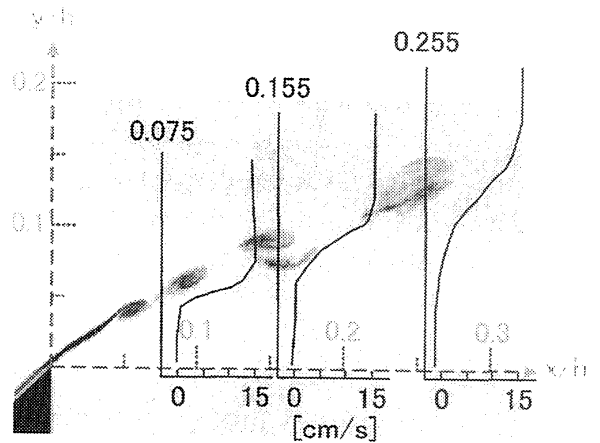


Fig. 2 Time series visualization photo

タの分布を比較することによって考察を行った。

### 3. 結果および考察

**3.1 物体後方の可視化** 図2はある時刻を基準にした1/30sごとの剥離せん断層の可視化画像を示している。図2中の薄い線で示すグリッドの格子間隔は距離 $x$ または $y$ を物体の代表寸法 $h$ で無次元化した無次元長さ0.05に対応している。またこの可視化画像には大小いくつかの色素の塊が存在するが、渦塊には周囲の流体をエントレインする性質があるため、本実験ではそれぞれの色素塊を独立した渦塊と見なし、小さな塊を便宜上小渦と呼び、合体等で大きくなった渦塊を便宜上中渦と呼ぶことにした。図2において1/30sから6/30sまで時間を追って見てゆくと、剥離せん断層においてケルビン・ヘルムホルツの不安定性に基づく小渦が次々と生成されているのが分かる。次に図2(a)の1/30sから(d)の4/30sにかけて、▽および▲で指した小渦を時間を追って見てゆくと、(a)の $x/h=0.1$ 付近において生成された小渦は、(c)の $x/h=0.15$ 付近に達すると隣接する小渦と合体を開始し、(d)の $x/h=0.2$ 付近で合体を完了していることがわかる。したがって、この物体の剥離点の極近傍における剥離せん断層においては、小渦同士の合体が生じる領域を境にその上流と下流では流れの特性が大きく異なっているものと考えることができる。一方、物体の剥離点の上流では個体壁面があるため、流れ場は境界層流れであり、そこでは粘性作用によって渦度が形成されている。これに対して剥離点よりも

Fig. 3 Visualization photo and velocity distribution at each  $x/h$  position when time is 3/30 second

十分下流の剥離せん断層では壁面が無いために自由せん断流となっている。したがって本研究での測定領域は速度分布が境界層的なものから自由せん断流的なものへと遷移する流れ場であると予想され、以下はこの遷移過程における粘性作用と渦度の挙動について述べるものである。

**3.2 速度分布** 図3は $x/h=0.15$ 付近で、小渦同士の合体がおき始めている時刻である。3/30s [図2(c)]における可視化画像(以後3/30sの画像と呼ぶ)に $x/h=0.075, 0.155, 0.255$ それぞれの位置における $u$ 方向の速度分布を重ねたものである。図3のように物体の剥離点に近い上流側の小渦が生成されている流れ場では速度ゼロ付近からの速度の立ち上がりが大きく、境界層流れに近い速度分布となっている。

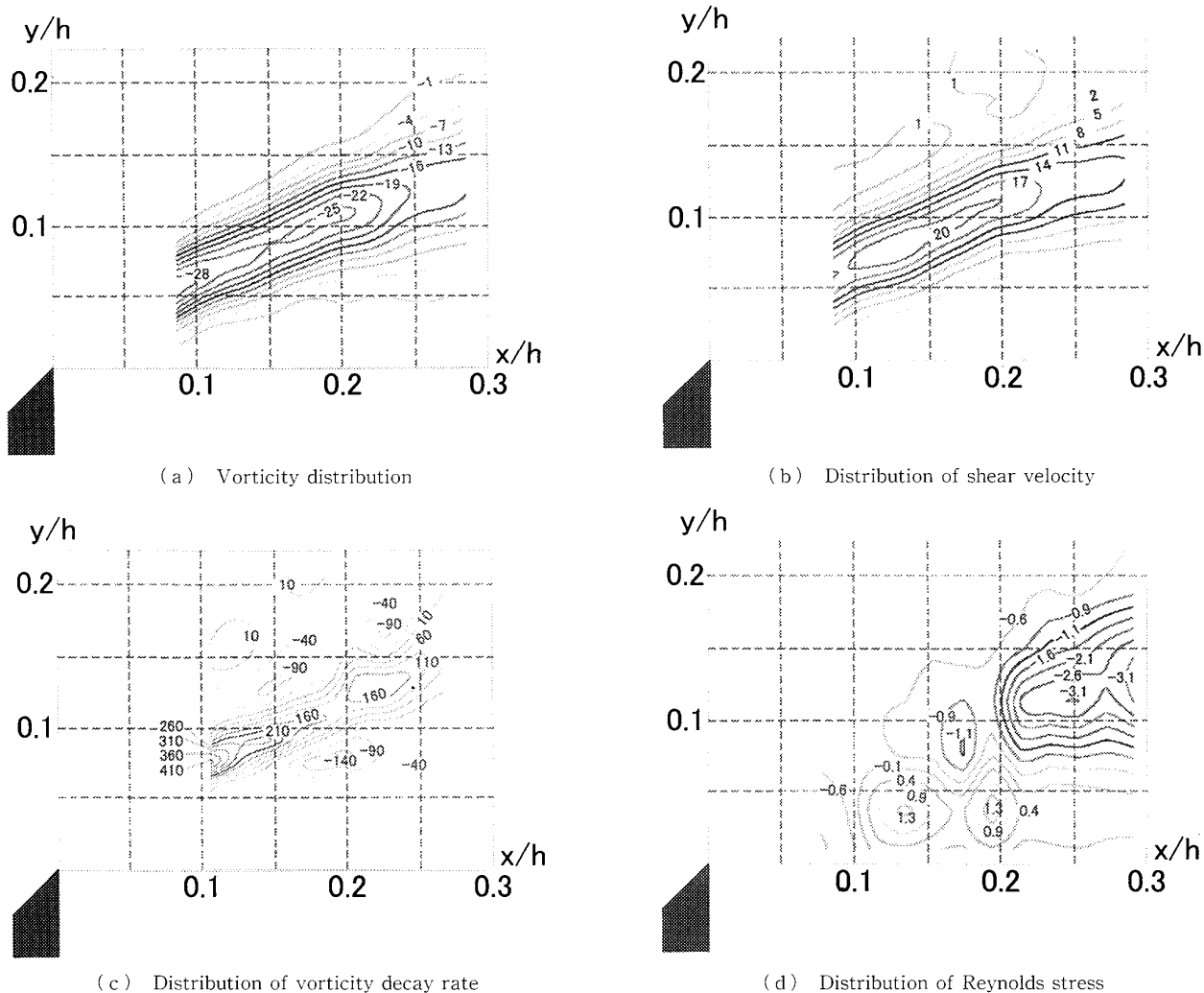


Fig. 4 Various contour lines

これに対し、それよりも下流の中渦が形成されている流れ場( $x/h=0.255$ 付近)では自由せん断流に近い速度分布になっていることが分かる。したがって本測定領域は小渦の合体に伴って剥離せん断層の速度分布が境界層的なものから自由せん断流的なものへの遷移領域であることが分かる。

**3・3 等高線図による考察** 図4は時間平均速度分布から算出された渦度, せん断変形速度, 渦度消失割合, およびレイノルズ応力の等高線図を示したものである。

**3・3・1 渦度およびせん断変形速度** 図5は図4(a)における渦度分布図に図2(c)の3/30sの可視化画像での渦塊の輪郭線を重ねたものである。また図6は図4(a)における渦度分布図に図4(b)のせん断変形速度分布図から代表的な等高線を抽出して破線で示したものである。図5から $x/h=0.1$ 付近において渦度が最大値を示し、それより下流の $x/h=0.2$ 付近までは渦度の減少は少なく、 $x/h=0.2$ 付近を越える

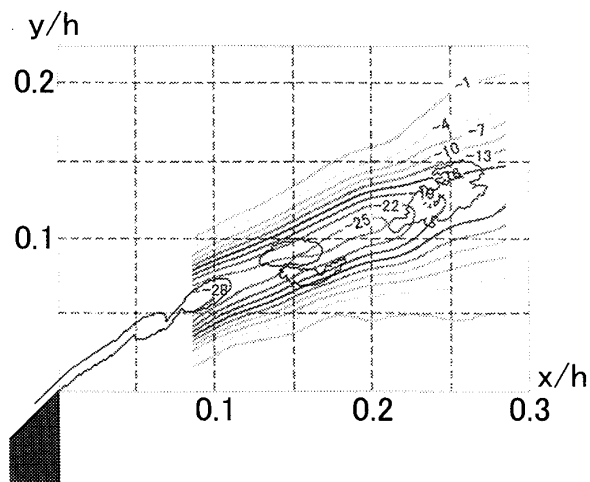


Fig. 5 Vorticity distribution with visualization picture when time is 3/30 second

と渦度は急激に減少している。また図6に破線で示したせん断変形速度分布にも同様な傾向が表れている。

このことは剥離せん断層においては、渦度の式(1)お

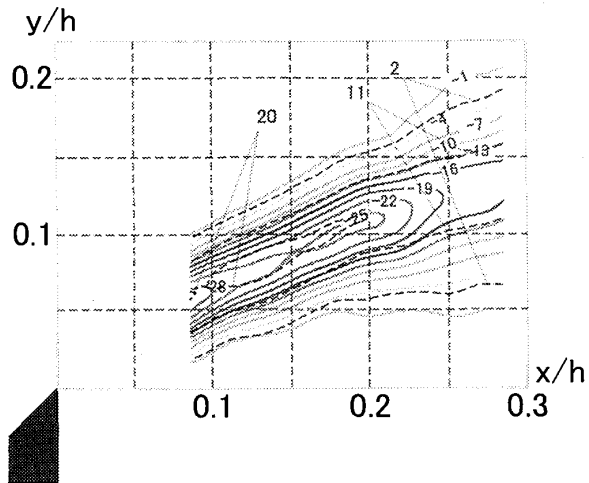


Fig. 6 Vorticity distribution with shear velocity (black dotted lines)

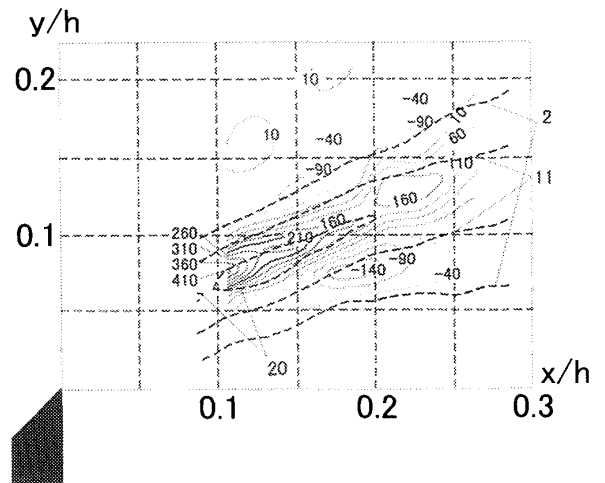


Fig. 8 Distribution of vorticity decay rate with shear velocity (black dotted lines)

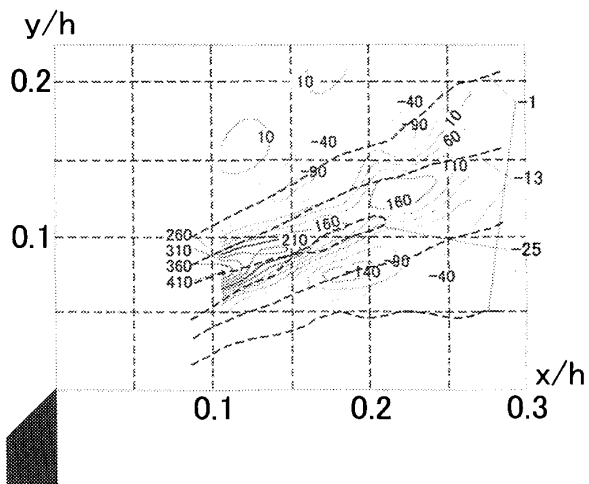


Fig. 7 Distribution of vorticity decay rate with vorticity (black dotted lines)

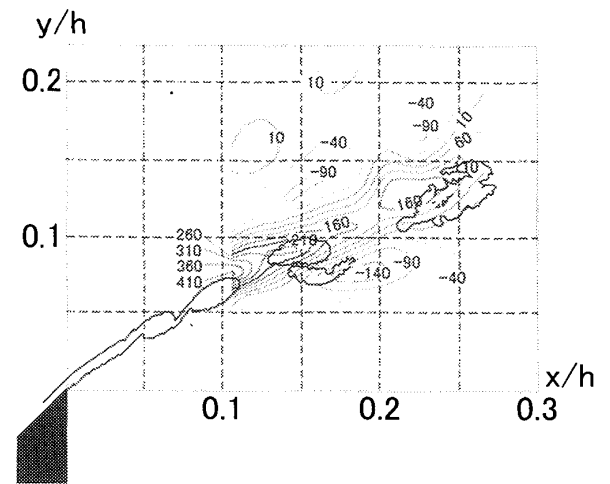


Fig. 9 Vorticity decay rate distribution (grey lines) and visualization picture when time is 3/30 second

よびせん断変形速度の式(2)の  $\partial u/\partial y$  が  $\partial v/\partial x$  よりもかなり大きいため  $y$  方向の速度勾配の減少が大きく寄与しているものと思われる。

**3・3・2 渦度消失割合** 図7と図8は渦度消失割合 [図4(c)] に渦度分布図 [図4(a)] とせん断変形速度分布図 [図4(b)] をそれぞれ重ね合わせたものである。一方、渦度生成割合は正の値の時には生成を、負の時には消失を表すが、本研究で用いた座標系の関係で剥離せん断層に放出される渦度は負の渦度(時計回り)であるため、渦度生成割合が正の時には負の渦度が減少し、生成割合が負の時には負の渦度が増加する。そのため本研究では、渦度生成割合を渦度消失割合と読み替えることにする。

図7および図8のいずれにおいても渦度の消失割合の大きい領域は、渦度とせん断変形速度が大きい領域

である。図3で示しているように速度分布が境界層的な性質を持ったものから自由せん断流的なものへ遷移する時の粘性作用がせん断変形を生じさせ、渦度の消失を生じさせているものと考えられる。特に図3の  $x/h=0.255$  では速度分布がほぼ自由せん断流のようになっており、この付近で渦度の消失もほぼ収まっている。Mair-Maullら<sup>(3)</sup>は鈍い物体からのカルマン渦の放出における大きな渦度の消失は物体のもう一方の剥離せん断層に放出された異符号の渦度との相殺によって起き、物体の十分下流における渦の循環は小さくなると述べている。しかし、本研究の結果から物体の極近傍においては速度分布の遷移過程に伴う粘性作用によっても渦度の消失が起こっていることが分かる。

一方図7と図8において  $x/h=0.2$  付近では渦度およびせん断変形速度の尾根の下側に渦度が生成されて

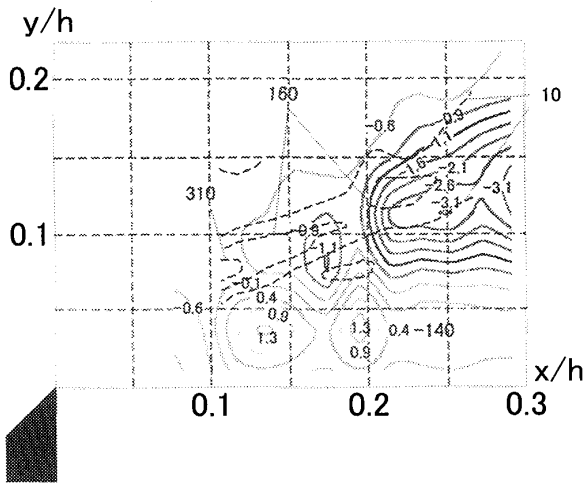


Fig. 10 Reynolds stress distribution and vorticity decay rate (black dotted lines)

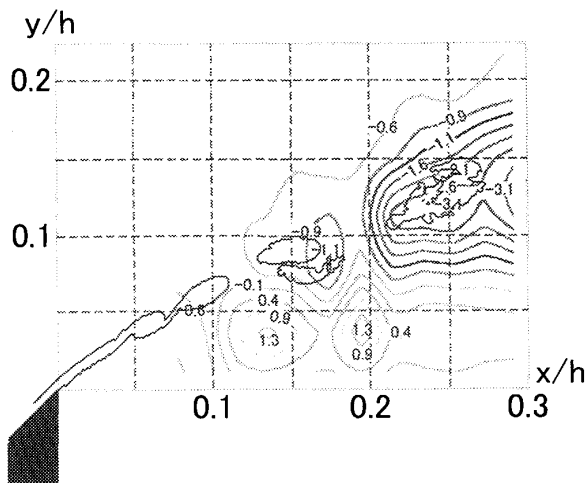


Fig. 11 Reynolds stress distribution and visualization picture when time is 3/30 second (gray lines)

いる領域が局部的に存在しているのがわかる。そこで、図9に3/30 sにおける可視化画像と渦度消失割合の分布を重ねたものを示した。図9から、渦度が局部的に生成されている付近では小渦が合体する過程にあり、下側の渦がストレッチされながら渦度が生成されている領域を通過してゆくのわかる。したがって、この渦度の局所的な生成は下側の小渦のストレッチに伴う粘性作用によるものと考えられる。

**3・3・3 レイノルズ応力** レイノルズ応力は乱流拡散の度合を知る上で重要なパラメータである。一方、二次元物体である円柱からのカルマン渦放出では、低いレイノルズ数で見られる自然渦転移<sup>(10)</sup>で代表される流れの三次元性が良く知られている。本研究での剥離せん断層における代表寸法はケルビン・ヘルムホルツの不安定性によって生じている小渦の直径程度で

あり、剥離せん断層内のレイノルズ数は小さいと考えることができ、レイノルズ応力を指標とした乱流拡散による擾乱と流れの不安定性によって三次元化が進みやすいものと考えられることができる。したがって本研究でここまで示してきた渦度の消失が乱流拡散によるものか否かを明らかにすることは重要である。そこで図10にはレイノルズ応力の分布図と渦度消失割合の分布図を重ね合わせたものを示し、図11にはレイノルズ応力の分布図と3/30 sにおける可視化画像を重ね合わせたものを示している。図10より  $x/h=0.1$  から0.2付近における渦度の消失が最も顕著に起こっている領域ではレイノルズ応力は小さく、流れの乱流化が進んでいないことが分かる。一方、図11から分かるように小渦の合体が完了する  $x/h=0.25$  付近においてはレイノルズ応力は非常に大きくなっている。したがって合体した中渦は乱れとともに三次元的な流れ構造を持っているものと考えられる。

#### 4. 結 論

以上の実験結果から剥離せん断層における渦度の消失について以下のような結論が得られた。

(1) 物体背後の剥離せん断層における渦度の消失は、異符号の渦度との相殺作用の他に、剥離点極近傍の剥離せん断層の速度分布が境界層的な分布から自由せん断流的な分布へ遷移することに伴う粘性作用によっても起こることが分かった。

(2) 小渦の合体が開始する付近においては、合体に伴うストレッチによって、局部的に渦度が生成されることが分かった。

(3) 物体の剥離点の極近傍における渦度の消失には、乱流拡散に伴うレイノルズ応力が直接関与していないことが分かった。

(4) 小渦が合体して生成された中渦付近においてはレイノルズ応力が大きいことから、合体によって流れ場の乱流化と三次元化が進むことが分かった。

本研究において、実験装置の作製などにご協力いただいた北見工業大学技術部の小畑芳弘技術員に謝意を表す。

#### 文 献

- (1) Gerrard, J.H., The Mechanics of the Formation Region of Vortices behind Bluff Bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, No. 2 (1966), pp. 401-413.
- (2) Sarpkaya, T. and Schoaff, R.L., Inviscid Model of Two-Dimensional Vortex Shedding by a Circular Cylinder, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 17, No. 11 (1979), pp. 1193-1200.

- (3) Mair, W. A. and Maull, D. J., Bluff Bodies and Vortex Shedding—A Report on Euromech 17, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, No. 2 (1971), pp. 209-224.
- (4) Luo, S. C., Tong, X. H. and Khoo, B. C., Transition Phenomena in the Wake of a Square Cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 23, Issue 2 (2007), pp. 227-248.
- (5) Tong, X. H., Luo, S. C. and Khoo, B. C., Transition Phenomena in the Wake of an Inclined Square Cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 24, Issue 7 (2008), pp. 994-1005.
- (6) Wang, X. K. and Tan, S. K., Near-Wake Flow Characteristics of a Circular Cylinder Close to a Wall, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 24, Issue 5 (2008), pp. 605-627.
- (7) Downes, K. and Rockwell, D., Oscillations of a Vertical Elastically Mounted Cylinder in a Wave: Imaging of Vortex Patterns, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, Issue 7 (2003), pp. 1017-1033.
- (8) Haniu, H., Sakamoto, M., Matsuda, M. and Obata, Y., Transitional Characteristics of Separated Shear Layer in the Vortex-Generating Region Behind a Body (Correspondence Between Image of Flow Visualization and Velocity Fields Obtained by LDV Measurement at the Same Phase), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 62, No. 594 (1996), pp. 620-627.
- (9) Haniu, H., Sakamoto, H. and Dogan, Y., Transitional Characteristics of Flow in a Vortex-Generating Region Behind a Body by Means of LDV, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 59, No. 567 (1993), pp. 3303-3307.
- (10) Williamson, C. H. K., The Natural and Forced Formation of Spot-Like 'Vortex-Dislocation' in the Transition of a Wake, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 243 (1992), pp. 393-441.