

開水路乱流における秩序運動の相互作用過程

Interaction of the coherent motion in an openchannel turbulent flow.

徳山 高専 正員 ○大成 博文
徳山 高専 正員 佐賀 孝徳
山口大学工学部 正員 斎藤 隆

1. 概 説

乱流現象内の秩序運動は、他の流体とは区別される部分領域に決定論的な内部構造と相互作用を持つ¹⁾とされるが、その詳細は依然として不明な点が少なくない²⁾。

最近、この運動に関する詳しいレビュー³⁾が明らかにされた。そのなかで従来の結果を整理し、秩序運動の形成領域に促してスケール則を検討するという注目すべき作業が行われた。壁乱流の秩序運動が、 λ (粘性底層構造のスケール)、 b (壁近くの活動的な渦のスケール)、 l (活動的な外層渦のスケール)、 L (外層での大規模のスケール) の四つに分類され、それぞれの三次元的なスケール則の解明・未解明点が示された。この四つの分類の結果は、秩序構造が壁乱流内で階層的に存在する可能性を示唆しており、同時に規模の異なる秩序運動の相互作用過程を解明する重要性を浮きぼりにさせた。この相互作用過程を詳細に究明する重要性の指摘が Kline⁴⁾ によっても行われた。彼は、スタンフォード大の一連の可視化研究の結果として明らかにされた内層 (inner layer) の bursting 現象や streak 構造など^{5), 6), 7)} が、外層 (outer layer) 内の流体運動を含めた相互作用モデルとしてより詳細に今後究明が行われる必要性を強調した。その後も、内層と外層の秩序運動に関する相互作用について議論の系統的な整理が試みられた⁸⁾。

以上を踏まえながら、本論では、壁近くの構造が乱流境界層のそれとはほぼ類似すると言われる開水路乱流において、その壁近くの秩序運動の内部構造と相互作用の二、三について若干の考察を試みた。著者らは、開水路の壁近くの流れの秩序運動に注目して可視化研究^{9)~11)}を行い、鱗形状、low speed streak 対などの特徴的な可視化の形象の存在を明らかにした。本論の目的は、この二つの形象の三次元構造と形成機構を明らかにし、それらがどのように秩序運動の内部構造と相互作用に関係するのかを検討することにある。本研究に用いた手法は、流れ場の横断面をレーザーを利用して可視化する方法であり、その結果、鱗形状および low speed streak 対の形成に縦渦の挙動が関係するという重要な観察が得られた。

2. 可視化の方法

Fig.1 に装置の概略を示す。水路および流速計測の方法については文献9)にあり、省略する。

可視化法には、レーザースリットを利用した横断面視法を用いた。この方法は、強力なレーザー光線 (最大出力二ワット、NEC製) をプリズムを通してスリット面に変換して流れの断面に挿入し、スリット面を過ぎるトレーサーが描く模様を瞬間的に可視化する方法である。その特徴は、レーザー光線の直進性を利用して厚さが断面全体で変らない、しかも薄くて明るいスリット面を形成し、それに適切なトレーサーを流して鮮明な可視化を行うことにある。適切なトレーサーの条件は、トレーサーにレーザー光線が当たると輝きながらある程度の透過性に優れることである。透過性は断面全体をむらなく輝かせるためである。本実験には比重調節を行った二種類の蛍光染料 (バスクリン、フルオレセインナトリウム) 水溶液を用いた。

横断面は上流側に45度傾斜させて可視化した Head¹²⁾の方法を採用した。その理由は、秩序運動が流れ方向に傾斜して流下することから、そのより正確な断面を輪切りにして可視化することにある。同時に、流れの中に鏡やカメラなどを入れて余分に乱すことを防ぐためである。45度傾斜スリット断面は、プリズムの角度を変えることによって容易に形成された。トレーサーは、上流で一度に200 cc程度を注入し、その影響がなくなるのを待って撮影を開始した。撮影はモータードライブカメラおよびビデオカメラの両方で行った。

実験条件をTable - 1に示す。横断面視法の概略をFig. 2に示す。

レーザー光線をスリット面に変えて断面を可視化する方法は、前述のHeadら¹²⁾のほかはFalco¹³⁾、Perry¹⁴⁾などによっても試みられた。これらはいずれも空気を流体とする乱流境界層の流れ場としたものであり、壁近くの流れの鮮明な可視化とその連続的撮影にいまひとつ成功していない。本可視化法との相違は、水流でしかも螢光染料をトレーサーとして用いたことにあり、そのことが壁近くの流れのより鮮明な可視化へと繋がった。

3. 壁面領域内の秩序構造

3.1 従来のスケール則の問題点・未解明点

Fig. 3は流れの領域区分²⁾およびy方向スケール則に関するCantwellの分類方法³⁾を図示したものである。また、Table.2にはCantwell³⁾がスケール則をまとめた結果の一欄表が示されている。(斜線は不明な部分である。)以上を参考に、従来の結果の問題点・未解明点を挙げる。

(1) λy と $b y$ の区別ができない。

(2) b の構造が不明。

(3) 横方向スケール則が不明。

(4) $\lambda \sim L$ の相互作用過程が不明。

さらに、(4)についてその課題を具体化する。

(a)内層と外層の相互作用(詳しくは文献8)参照。)

(b)内層内での λ とbの相互作用、とくに粘性底層内 streak 構造と bursting 現象の相互作用。

(c) $\lambda \sim L$ の流れ方向(x方向)の相互作用。

(d) $\lambda \sim L$ の横方向(z方向)の相互作用。

3.2 鱗形状の三次元構造

鱗形状は、粘性底層外縁付近からバッファー層にかけて形成される可視化の形象であり、その構造は三次元性を示し、壁近くの種々の秩序運動の反映結果とみなされる。三次元構造の基本的な特徴は、中央部でトレーサーが剥がれて堀れ込み、側辺・上下端部で隆起していることである。堀れ込みの部分は高速流体が粘性底層内に局部的に到達したことを示し、逆に隆起した部分は低速の領域に相当すると考えられた⁹⁾。

Fig.4に鱗形状の可視化写真の一例を示す。横に延びた二本線はレーザー光線であり、その間隔は6cmである。レーザー光線の高さは、上流側で $y^+ = 10$ 、下流側で $y^+ = 30$ に設定された。このうち鱗形状は上流側のレーザー光線と交差し、その形成領域が上述のように明確となった¹¹⁾。以下、鱗形状の特徴を簡単に要約する。

鱗形状は、壁近くで上述の三次元構造を持つほかに、安定して一定のパターンで形成される、発生・発達・減

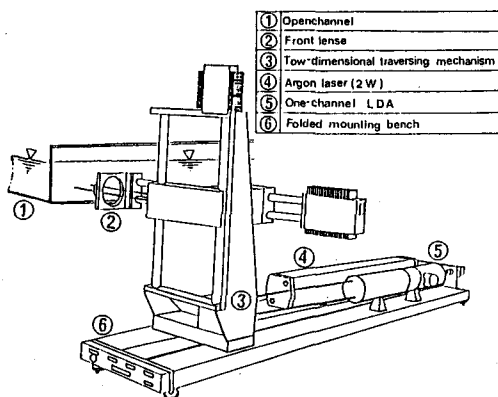


Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental condition

	U_m (cm/s)	U^* (cm/s)	H (cm)	Re	Re	tracer ρ
A-1	7.15	0.43	661	4240	359	F.D.
B-1	7.13	0.47	657	4650	467	H ₂ -bubble
C-1	5.23	0.34	680	3610	260	F.D.

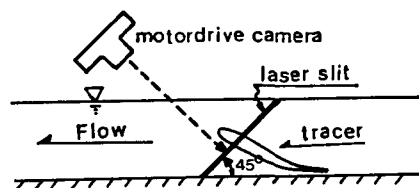


Fig. 2 Laser slit method

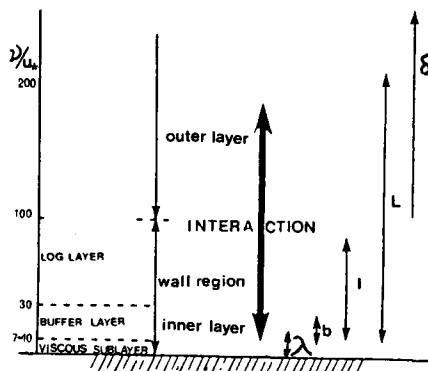


Fig. 3 Division of flow field and schematic scale of coherent structure

衰などの時間的変化過程を持つ、ひとつの鱗形状が斜め下流の鱗形状を新たに造る、集団で成立するなどの特徴を持つ⁹⁾。鱗形状の通過周期は Burst 周期とほぼ一致し⁹⁾、その通過の際の波形も ‘bursting 波形’を示す¹⁰⁾。横幅は λz (粘性底層内の low speed streak の横幅スケール) と一致し、縦長は bursting の oscillation (第二過程) の流れ方向スケール¹⁶⁾ とほぼ一致する⁹⁾。乱流境界層でも鱗形状と同様の挙動である pocket 構造が観察された¹³⁾。

ところが、同時にトレーサの比重が水よりもわずかに大きいために、鱗形状が二相流的挙動ではないのかという疑問が生じた。これに対して①レイノルズ数を低くすると小比重 (1.005 程度) にしても同じ鱗形状のパターンが形成される¹⁶⁾、②トレーサの有無で $y = 10$ 以上の平均流速分布は変わらない¹⁰⁾、③鱗形状は下流に長く伝播しない⁹⁾、④鱗形状上にも low speed streak が形成される¹¹⁾。⑤AMD 法のみならず蛍光染料法、水素気泡膜法においても鱗形状が観察される¹⁰⁾、などが明らかにされた。そこで、さらに深く

Table. 2 Scaling laws for the coherent structure

	$x (\nu/u_\tau)$	$y (\nu/u_\tau)$	$z (\nu/u_\tau)$
λ	1000	10~25	100
b	20~40	15~20	
l	200	100	
L	$\delta \sim 2\delta$	$0.5\delta \sim \delta$	$0.5\delta \sim \delta$

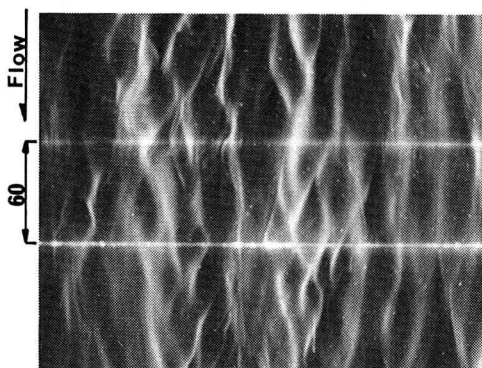


Fig.4 Scale-shaped patterns (CASE A-1)

3.3 鱗形状の形成機構

壁近くに鱗形状を形成させ、同時に45度傾斜横断面可視化を行った。その一例を Fig.5 に示す。この写真には、鱗形状とそれを形成させる縦渦の挙動が同時に可視化されている。すなわち 縦渦の断面は45度スリット面に浮かびあがり、都合がよいことにレーザーの反射で壁面近くに平面的に形成される鱗形状までが可視化された。横に白く輝いた部分が粘性底層内に溜ったトレーサに、レーザーが照射された部分である。説明を容易にするために、Fig.5 の一部をトレースして Fig.6 に示す。斜線部は壁面が露出して黒く映った部分であり、点線で示した輪隔と合わせるとその部分が鱗形状に相当する。黒く太い実線が縦渦の挙動である。縦渦は、壁から離れて大規模に発達したもの (S①、②) や壁近くの小規模 (A、B) のものなどがある。これらはいずれも鱗形状の形成に直接寄与し、縦渦の回転が壁に向う部分ではトレーサを局所的に剥がし壁面を露出させている。一方逆に壁から離れる方向に回転する部分では局所的にトレーサを巻き上げ、上昇流の形成に寄与している。この縦渦が壁近くで局所的な上昇流と下降流を発生させる運動は、縦渦が発達して大規模になるほど顕著であるが、それが流れ方向に長く続くようには見えない。これに対して比較的小スケールの壁近くの縦渦 (A、B) は、流れ方向により長いスケールを持っている。鱗形状の形成には、これら規模の異なる縦渦の挙動が同時に複合化して作用する機構が重要な役割りを果しているように思われる。著者らは、目視観察の結果をもとに鱗形状の発達と縦渦の関係を、「高速流体によって二次的に形成される対のまきこみ渦が出現し、高速流体がつくったくぼみをそれらが覆いかぶさるようにして……。」⁹⁾と説明したが、高速流体は大規模な縦渦自身かそれがもたらした挙動であり、まきこみ渦は小スケールの壁近くの縦渦の挙動を把らえたものであったと言えよう。

この写真からもうひとつの重要な結果を得た。それは、A、B という記号で示した壁近くの縦渦に関することであり、この部分をよく見ると縦渦の輪隔が二本の細い線、すなわち streak 対が、スリットの奥に明瞭に写出されていることである。この部分は、著者らが示してきた low speed streak 対^{10)、11)}が縦渦の一部を示す挙動であることを証明するひとつの有力な証拠と思われる。Fig.7 に A、B の部分を抜き出して streak 対との関係を示す。また、Fig.8 に水素気泡法¹¹⁾による low speed streak 対の可視化の結果を示す。両者の streak 対の横幅スケールが一致するほか、水素気泡によって形成された low speed streak 対が縦渦の挙

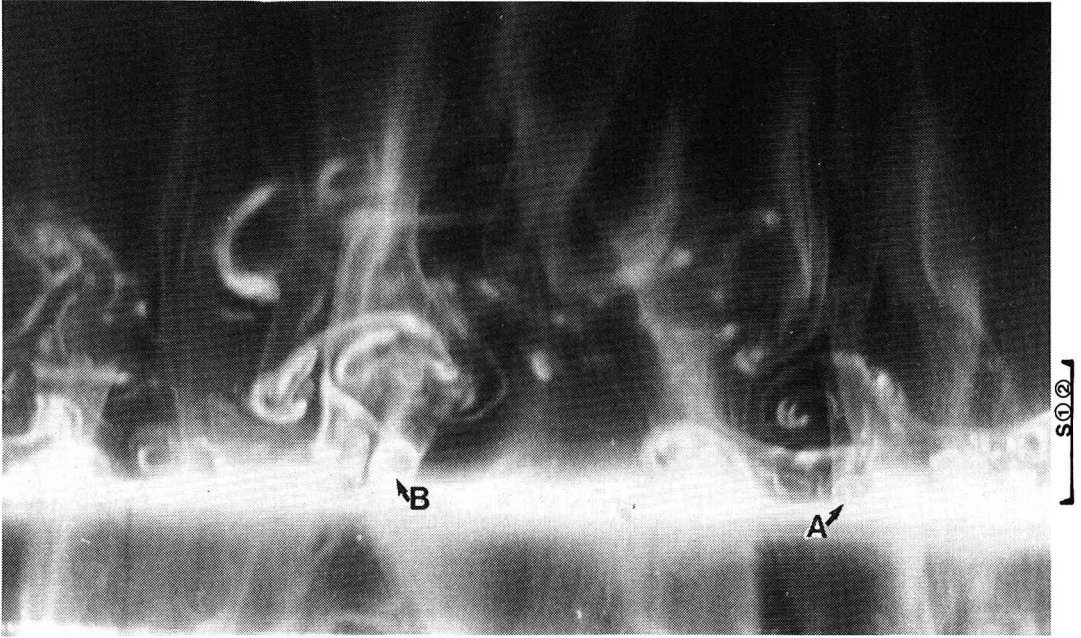


Fig.5. Scale-shaped patterns produced by streamwise vortices (CASE C-1)

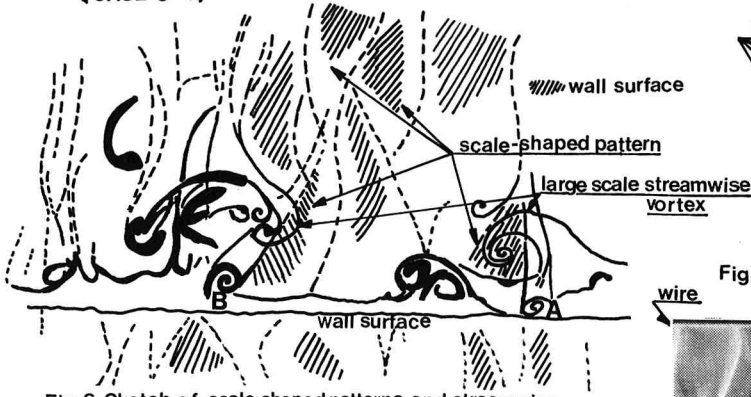


Fig.6 Sketch of scale-shaped patterns and streamwise vortices in figure 5

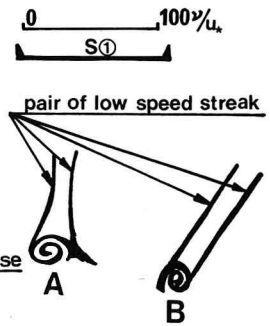


Fig.7 Relation between S.V. and LSS pair (wire height $y^+ = 15$)

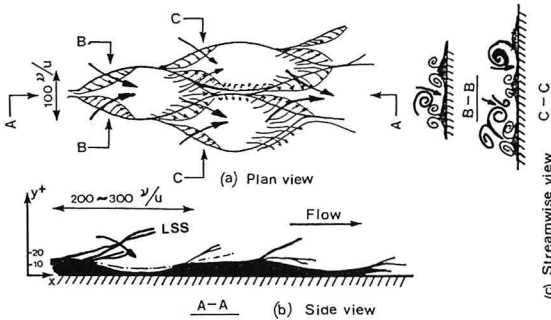


Fig.9 A model of the three dimensional structure of scale-shaped patterns

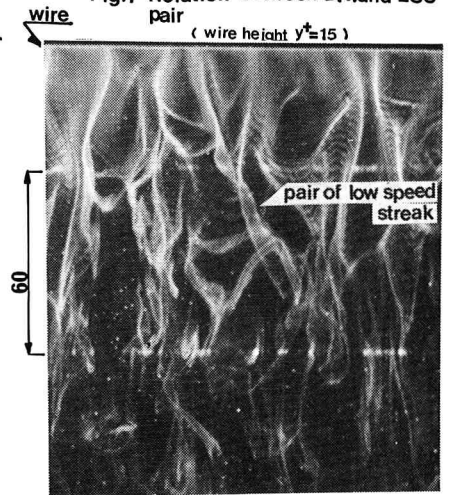


Fig.9 Pairs of LSS by H_2 -bubble method (CASE B-1)

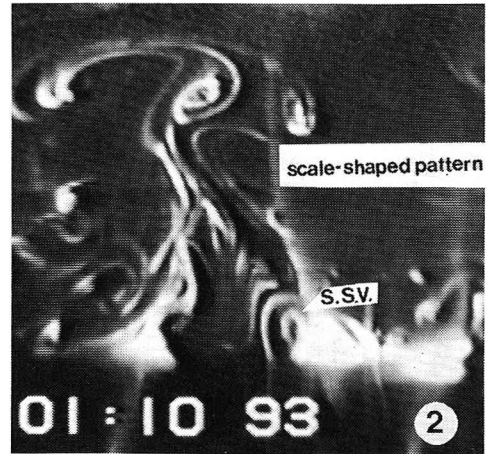
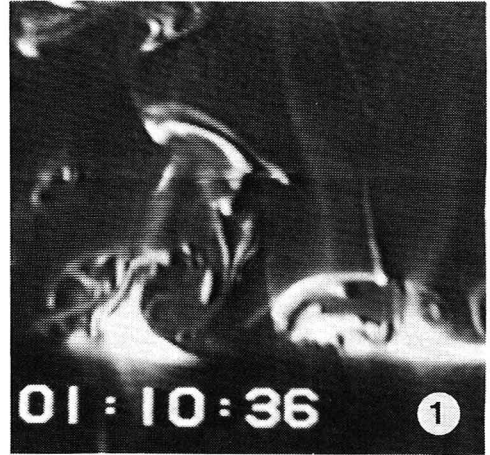
動を示すことが最近の若者らの研究¹⁷⁾によって明らかにされている。

以上の観察結果をもとに、Fig. 9 に鱗形状の三次元構造モデルを示す。平面図の太い実線の矢印は高速流体がより上部から侵入することを意味し、細い実線は壁近くの小スケールの縦渦の挙動を示す。縦渦は横断面図に示され、これが側面図では streak 対に相当する。鱗形状は、規模の異なる縦渦が複合的に壁近くの流れに作用することによって形成される。

このモデルをさらに実証するために、鱗形状と縦渦の相互関係をより詳細に連続して追跡することにした。Fig. 10 はそれを可能とする接写ビデオカメラによる画像の一例を示したものである。画面内には、百分の一秒を最小単位とするストップウォッチの時刻が同時に写し出されている。可視化法は前述の方法とすべて同一である。

5 枚の連続写真は、鱗形状がスリット面を通過する際の縦渦の挙動をとらえたものである。まず、④の右上部に発生した鱗形状 (s ①) に注目する。スリット面にはちょうど鱗の先端が通過しているが、その部分に小スケールの縦渦対が存在している。(b)では、鱗形状の規模が拡大しつつあり、先端部で指摘した縦渦対が側辺部にまで連って存在していることが示されている。上部には大規模な渦が鱗形状の中央部に降下してゆく準備がなされている。(c)では、上部の大規模な縦渦対が降下しながらより発達を遂げている。側辺部の縦渦対も連続して形成されている。(d)は、大規模な縦渦対が壁面に到達してしまった状態を示す。壁面付近のトレーサーは剥がれて壁面が露出させられている。側辺部の縦渦対は消滅しはじめている。その後、この大規模な縦渦対は左方向に傾きはじめ、左側の渦の回転成分が増加する。この左側の渦は右側のもと同様に壁面に向かって降下し、それが発達して顕著な渦を形成する。(e)はちょうど左側の渦が壁に向う過程で形成されはじめた状態である。もうひとつの注目すべき点は、右側の渦が壁面に到達した後、副次的に小スケールの縦渦が側辺上に形成されはじめていることである。

以上の④～⑥の過程は規模の異なる縦渦が鱗形状の形成に重要な役割りを果たすという上述の説明をより裏付けるものである。この場合、先に示した Cantwell の分類に従えば大規模な渦のスケールは $b \sim 1$ に相当するものであり、鱗の側辺を形成する渦スケールは b とほぼ同程度のものと思われる。また、この連続的な縦渦の挙動には、横方向および鉛直方向に重要な相互作用過程が認められる。縦渦対をなして左右に揺れる現象は、渦対の横方向相互作用の一形態と言えよう。大規模な縦渦が壁面に到達して側辺上の縦渦が移動したり、消滅したりするがそれも横方向の渦の相互作用の結果もたらされたものである。鉛直方向には



前述の過程のほかに、さらに大規模な下降流が形成されて壁近くに下降し、壁近くの渦と相互作用を行う過程が観察された。この挙動は、大規模な sweep 現象や並列せん流の下降流を形成する挙動と思われる。このような挙動にも鱗形状の形成との相互関係が認められるのかもしれない。

ひとつの鱗形状に注目して縦渦との相互関係を究明し、そのモデルの妥当性を検討してきたが、これにはいくつか重要なふれられていない問題が存在する。

第一は、鱗形状が単独で生成せず集団を形成することである。鱗形状の集団は局部的にいたるところに形成されるが、そのひとつの集団の形象は乱流斑点の前部の壁近くの形象¹⁸⁾とよく類似していて興味深い。

第二は、横渦の挙動を検討していないことである。Falco の pocket の形成要因は横渦としての Typical eddy とされるが、それが本論の縦渦の結果とどのように関係するかを解明することは非常に重要な課題である。

4. おわりに

壁近くの流れに形成される鱗形状および low speed streak 対の三次元構造およびその形成機構に縦渦の挙動が非常に重要であることが明らかにされた。鱗形状の三次元構造モデルが提案され、その妥当性が検討された。low speed streak 対は縦渦の一部が表現された形象である。鱗形状の形成には規模の異なる縦渦の挙動が重要な役割を果す。また、鉛直方向、横方向に縦渦の相互作用が存在することが明らかにされた。おそらく、これらの縦渦の挙動はトレーサの密度効果によって形成されたものではないものと思われる。今後、さらに詳細に検討するつもりである。

最後に、実験に協力していただいた山本恭子助手（徳山高専機械電気工学科）に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 高木隆司：物理学会誌，37，1，1982.
- 2) Smith 他：AFOSR/Lehigh Workshop，1978.
- 3) Cantwell:A. R. of J. F. M. , 13, 1981.
- 4) Kline:AFOSR/Lehigh Workshop，1978.
- 5) Kline 他: J. F. M. , 30, 1967.
- 6) Kim 他: J. F. M. , 50, 1971.
- 7) Offen 他: J. F. M. , 62, 1974.
- 8) Kline 他: AFOSR/MSU Workshop，1979.
- 9) 大成博文他：水理講演会論文集，26，1982.
- 10) 大成博文他：水理講演会論文集，27，1983.
- 11) 大成博文他：流れの可視化，3，10，1983.
- 12) Head 他：J. F. M. , 107，1981.
- 13) Falco：turbulence in liquids，1981.
- 14) Perry 他：J. F. M. , 104，1981.
- 15) Kline 他：AFOSR/MSU Workshop，Review of the Stanford Workshop，1979.
- 16) 大成博文他：流れの可視化，2，6，1982.
- 17) 大成博文他：土木学会論文報告集（投稿中）
- 18) 大成博文他：流れの可視化，3，10，1983.

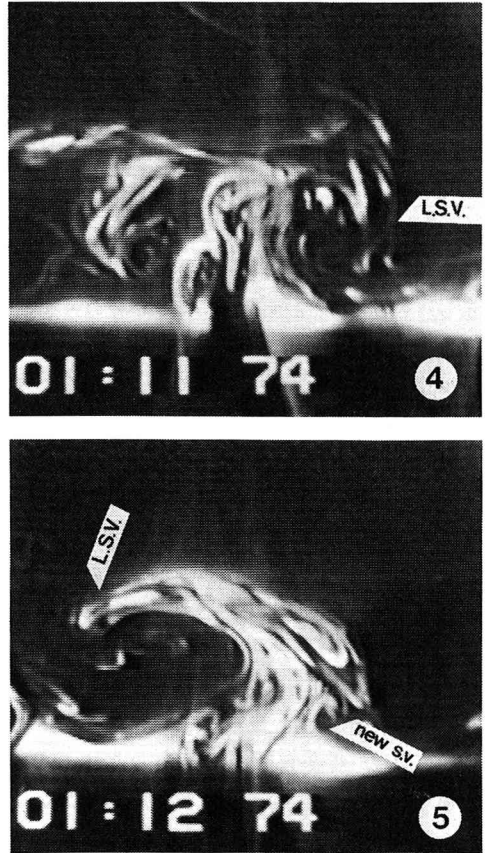


Fig.10 Streamwise vortices producing scale-shaped pattern