

平板境界層の層流-乱流遷移

松井辰彌 (Tatsuya Matsui)

名城大理工 奥出宗重 (Muneshige Okude)

1. 緒論

平板境界層の層流から乱流への遷移については、理論的にも実験的にも多数の研究が行なわれている。それらの結果をまとめると、遷移過程は次のような段階を経るものと思われる。

- (1) Tollmien-Schlichting wave の発生（第一次不安定）と、その増幅の結果、二次元的な、横方向の軸を持つ渦の発生。
- (2) 横方向の不安定による渦の波状化と八渦への生長。
- (3) 八渦の両脚の間における高剪断層の発達（速度変動 u' の波形における瞬間的な低速を示す、いわゆる、スパイクの出現）。
- (4) 高剪断層の高周波第2次不安定による小規模渦（ヘアピン渦）の発生（ u' の波形に2スパイク、3スパイク...の出現）

- (5) ヘアピン渦の数の増加と u' の波形の不規則性の増大、
- (6) 乱流境界層の形成。

従来の実験的研究は主として空気流中の熱線風速計によるものであつて、 Λ 渦あるいはヘアピン渦と u' の波形に現われるスパイクとの関係が明らかでない。また、空気流中でスモークワイヤ法で流れの可視化を行なつた研究⁽¹⁾では、 u' の波形が同時記録されてゐないし、さらに、 Λ 渦の崩壊後はスモークが拡散して、上記第4段階のヘアピン渦を可視化することができてゐない。

また、2次元ポアスユ流の実験⁽²⁾⁽³⁾では、3スパイクの段階でも相対する2平板上の流れの相互干渉の恐れがあり、さらに後期段階においては、この干渉が一層著しくなるので、平板境界層の遷移とは異なる現象となることが考えられる。従つて平板境界層遷移の最終段階での現象、例えば予想される乱流斑点の形成などについては、平板境界層それ自身で観察すべきであると思われる。

そこで、本研究では次の項目に重点を置いて実験を行なつた、すなわち、

- (1) 高剪断層の高周波第2次不安定によつて発生するヘアピン渦の可視化、

- (2) 速度変動 u' の波形に現われるスパイクと可視化された

ヘアピン渦との関係。

(3) 乱流斑点の形成過程の観察

流れの可視化法として流水中で水素気泡法を用いることにした。その理由は、水素の密度が水の密度に比べて非常に小さいので弱くて小規模の渦をも可視化することが期待されるからである。

2. 実験装置と方法

実験装置としては既報⁽⁴⁾のものを用いた。その概要は次の通りである。

流水水槽（測定部は $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 290\text{ cm}$ ）中に平板（ $60\text{ cm} \times 280\text{ cm} \times 5\text{ mm}$ ）を水平に設置（水面からの深さ約 20 cm ）し、水素気泡法によって流れ模様を観察、あるいは写真撮影するとともに、モータードライブカメラを用いて流れ模様を連続撮影（毎秒約4コマ）する際に、熱線流速計によって速度変動 u' の波形をも同時に記録して、波形の下方に露出時期をも同時記録して、速度波形と可視化された流れ模様との対応を明らかにすることを試みた。

低周波発振器の発生した信号を増幅器を通して2個のオーディオ・スピーカーに入れ、それぞれのスピーカーのコーンの中央に接着した直径 3 mm 、長さ約 20 cm の真鍮棒の先

端に長さ約 50 cm のオーディオ用クリーニング・テープを張り渡して接着し，これを振動リボンとして境界層の critical layer 附近で振動させて，T-S 波を励起した。

水素気泡発生用陰極線としては直径 $50\mu\text{m}$ あるいは $30\mu\text{m}$ の白金線が用いられた。

3. 実験結果と検討

3.1 1 スパイフ段階での速度変動 u' の波形と流れ模様との関係

一様流速約 10 cm/s のとき平板前縁からの距離 $x = 110\text{ cm}$ の位置で振動リボンを加振して，平板からの高さ $y = 10\text{ mm}$ の層に水素気泡を流したときの $x = 140\text{ cm}$ 前後の流れ模様の連続写真とともに，同じ高さで $x = 140\text{ cm}$ に設置した熱線プロローブによる速度変動 u' の波形を Fig. 1 に示す。波形の下に数字は写真撮影の露出の瞬間を表わし，その写真に同じ数字をつけて示してある。写真の白線は 5 cm 毎の析目を示す。

写真に渦の頭部を示す渦が見られ，この渦が熱線プロローブを通過後に（写真 No. 4 および No. 17） u' の波形に短時間の低速を示す下向きスパイクが現われている。この下向きスパイクは渦のまわりの速度場によつて下層の低速流体が上昇してきたことを示すものであると解釈される。

3.2 4 スパイク段階での速度変動 u' の波形と流れ模様との関係

前項より 20 cm 下流の $x = 160$ cm 前後で $y = 10$ mm の層での速度変動 u' の波形と流れ模様とを Fig. 2 に示す。 u' の波形から 1 周期に 4 個のスパイクが発生することが分る。

前項で述べたように、 Λ 渦の両脚の間に下方より低速流体が上昇してくるので、こゝに高剪断層が形成される。この高剪断層の不安定（高周波第 2 次不安定）によって渦が形成される。これらの渦は Λ 渦より一段と小規模で、一つの Λ 渦の間に複数個、今の場合は 4 個、形成されている。これらの渦をその形状からヘアピン渦と呼ぶ。基本波の周波数 0.33 Hz に対してヘアピン渦の周波数は 2.4 Hz である。

写真 No. 3, 5, 7 および 8 と u' の波形とを比較すれば、ヘアピン渦が熱線プローブを通過後に下向きスパイクが発生することがわかる。No. 16 および 18 の場合も同様である。この現象も、前項と同様に、ヘアピン渦のもつ速度場によるものとして解釈される。

従来空気流中では可視化されなかったこれら小規模のヘアピン渦の流れ模様が、水素気泡法によってこの図に示されるように可視化することができた。

3.3 スパイクについての解釈

従来熱線風速計による遷移の実験においては，スパイク，しかも「下向き」スパイクの出現のみが強調されていて，またその下向きスパイクの出現の理由については殆ど説明が与えられていないようである。

上述のように，波形のスパイクが乱渦あるいはヘアピン渦によるものであるならば，熱線プローブの渦に対する相対的位置によつては，上向きスパイクが現われることも考えられる。実際，従来の風洞実験において，熱線プローブが平板表面に近い位置にあるときは，上向きスパイクも見られ，下向きスパイクは熱線プローブが平板表面から比較的遠い位置にあるときに現われることが知られている。例えば，平面ポアズイユ流の実験⁽²⁾において，熱線の位置が比較的遠い $y/h = 0.5 \sim 0.6$ (h は 2 平板間の距離の $1/2$) のとき，下向きスパイクを示している。

そこで，2本の熱線プローブを用いて，1本は h' の波形に下向きスパイクが現われるような平板から遠い位置に固定し，他の1本を順次平板表面に近づけて，2本のプローブからの出力波形を同時記録して比較することを試みた。その結果の一部を Fig. 3 に示す。

この図を見ると，2本の熱線プローブが，ともに平板表面

から遠い位置にあるときは，出力波形は同時に下向きスパイクを示す。一本のプローブを平板表面に近づけると，このプローブ（ $x=140\text{ cm}$ のとき $y=3\text{ mm}$ ， $x=160\text{ cm}$ のとき $y=5\text{ mm}$ のプローブ）の出力波形は，平板表面から遠い位置に固定されたプローブの出力波形が下向きスパイクを示す直前に上向きスパイクを示している。

なお，これらの波形は渦あるいはヘアピン渦の中央断面が熱線プローブを通過する場合に記録したものである。

熱線プローブが，渦より上方，従って高剪断層の上部にある場合には，渦がプローブを通過した後に，下方から上昇してくる低速流体を感知して，下向きスパイクを示す。熱線プローブが渦より下方にある場合には，渦の速度場によって上方から下降する高速流体を，渦がプローブに達する前に先づ感知して上向きスパイクを示し，渦がプローブを通過後に，下方から上昇する低速流体を感知して下向きスパイクを示すものと思われる。

3.4 乱流斑点の発生について

$x=190\text{ cm}$ ， $y=10\text{ mm}$ での流れ模様と u' の波形とを Fig. 4 に示す。数個のヘアピン渦の連鎖が，間に層流部分をはさんで起こる。 u' の波形からスパイクの数の増加とともに速度変動の不規則性も増大していることがわかる。また，写

真から、横方向の周期性が残存していることが観察される。

さらに、下方の層、 $y = 5\text{ mm}$ の層での流れ模様と u' の波形とをFig. 5に示す。流れ模様には $y = 10\text{ mm}$ の層と同様な横方向の周期性が見られるが、流れの方向には層流部分は見られない。 u' の波形においても周期性も層流部分も認められないうで、速度変動は極めて不規則である。このような u' の波形の場合、西岡らの平面ポアズイユ流の実験を参考にすると、壁面から遠い部分を除いて、平均速度分布はほい対数法則で表わされるようである。

このとき、平板表面 $y = 0$ 近くでの流れ模様は、Fig. 6に示すように、乱流境界層に特徴的な流れ方向のすじ (longitudinal streaks) が顕著であるが、乱流斑点 (従来示されている集中大擾乱による乱流斑点⁽⁵⁾) らしい流れ模様は観察されない。上層の乱れた部分に対応すると思われる乱れが観察されるが、乱流斑点に特徴的な矢頭的な形状は示していない。

そこで、集中大擾乱を与えてこの下流位置 $x = 190\text{ cm}$ 前後の流れ模様を平板表面近くの層で観察すると、Fig. 7に示すように、従来と同様の乱流斑点が観察された。

以上の結果、乱れの小さい流れに、振動リボンによって二次元的なT-S波を励起させた場合、下流では局部的に乱流になつても、その乱流部分は横方向に周期的に発生・成長して、

集中大擾乱による乱流斑点と同様の乱流斑点は形成されないものと思われる。

しかし、自然流においては、擾乱は一般に2次元的ではないので、局部的に大きい擾乱が速く増幅発達して乱流斑点を形成するに至るものと思われる。

4. 結論

流水水槽中で平板境界層の遷移過程を水素気泡法によって可視化し、また、流れ模様の連続写真撮影とともに、熱線流速計を用いて速度変動 u' の波形を同時記録して、その波形と流れ模様とを比較検討の結果、次の結論に達した。

(1) 流水中で水素気泡法を用いることによって、従来可視化されなかったヘアピン渦（高剪断層の高周波第2次不安定によって形成される）の可視化を実現し写真をとることができた。

(2) 遷移過程において速度変動 u' の波形に現われるスパイクは、人渦あるいはヘアピン渦によるものである。熱線プローブが渦より上方に設置された場合は、渦が熱線を通過後に下向きスパイクが現われ、逆に、下方に設置された場合は通過前に上向きスパイクが現われる。

(3) 乱れの非常に小さい平板境界層で、振動リボンによって

T-S波を励起した場合，横方向に周期的な，数スパイク段階の速度変動を持つ流れが発達して乱流境界層となるので，この乱流部分は上流での横方向の周期性を保持していて，矢頭形の乱流斑点は現われないう。

自然流においては，局所的に大きい擾乱が早く発達して，矢頭形の乱流斑点が形成されるものと思われる。

文 献

1. Saric, W.S., "Visualization of different transition mechanics", in Gallery of fluid motion, Physics of Fluids, Vol.29, No.9, 1986, p.2970.
2. 西岡通男, 浅井雅人, 飯田周助, "二次不安定性の実験的研究", 第11回乱流シンポジウム, 1979, 東大宇宙航空研究所, 53-60.
3. Nishioka, M., Asai, M. and Iida, S., "An Experimental investigation of secondary instabilities", in Laminar-Turbulent Transition, eds. R.Eppler and H.Fasel, Springer-Verlag, 1980, 37-46.
4. 松井辰彌, 奥出宗重, "乱流斑点発生過程の可視化",

第16回乱流シンポジウム講演論文集，日本流体力学会，
1984，119 - 123.

5. 例えば，Van Dyke, M., "An Album of Fluid Motion", The Parabolic Press, 1982, 64 - 65.

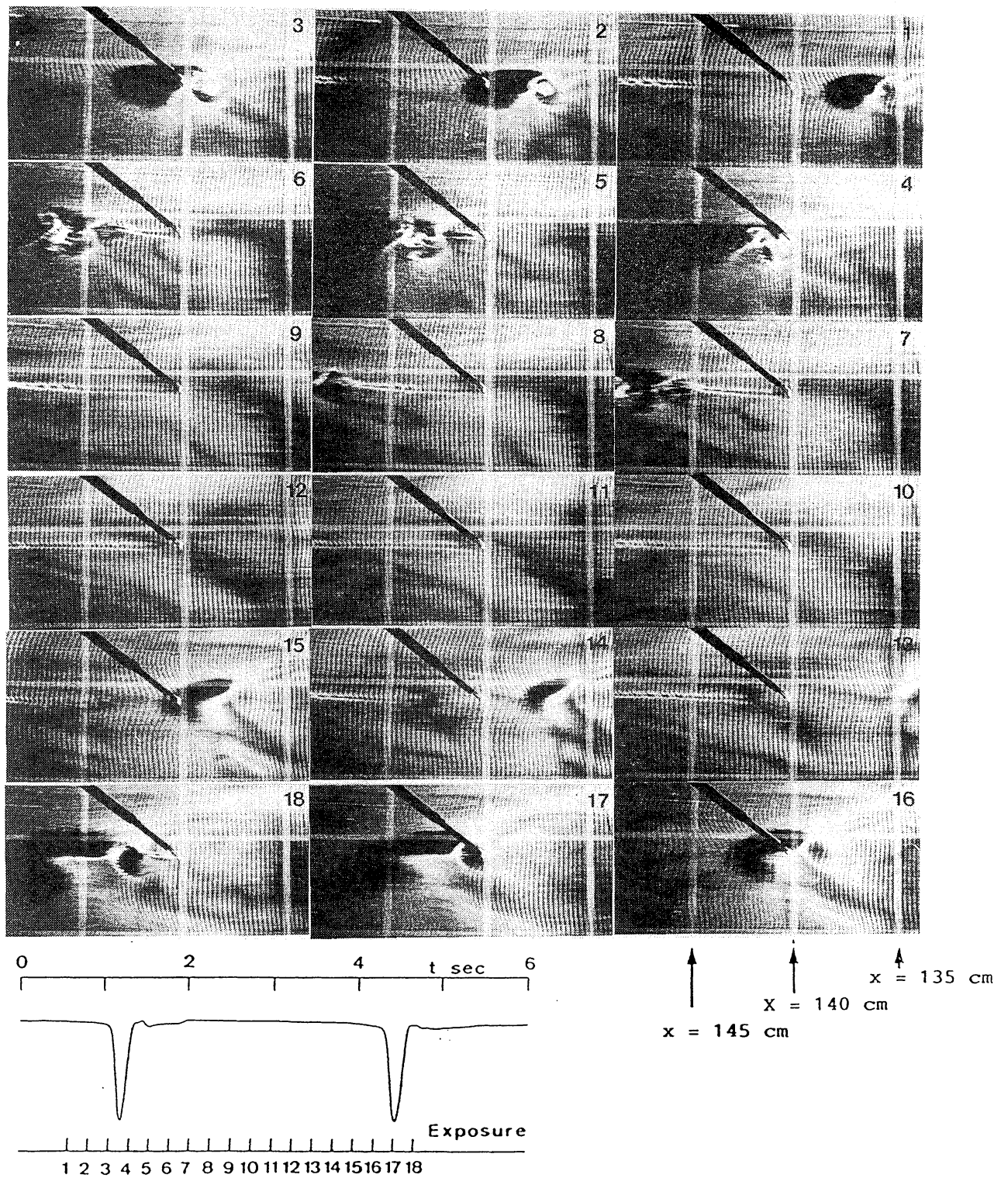


Fig. 1. Flow patterns and wave forms of $u/$ in the layer of $y=10 \text{ mm}$. $x = 135-143 \text{ cm}$. $U_{\infty} = 10 \text{ cm/s}$. 1 spike stage. $F = 207 \times 10^{-6}$.

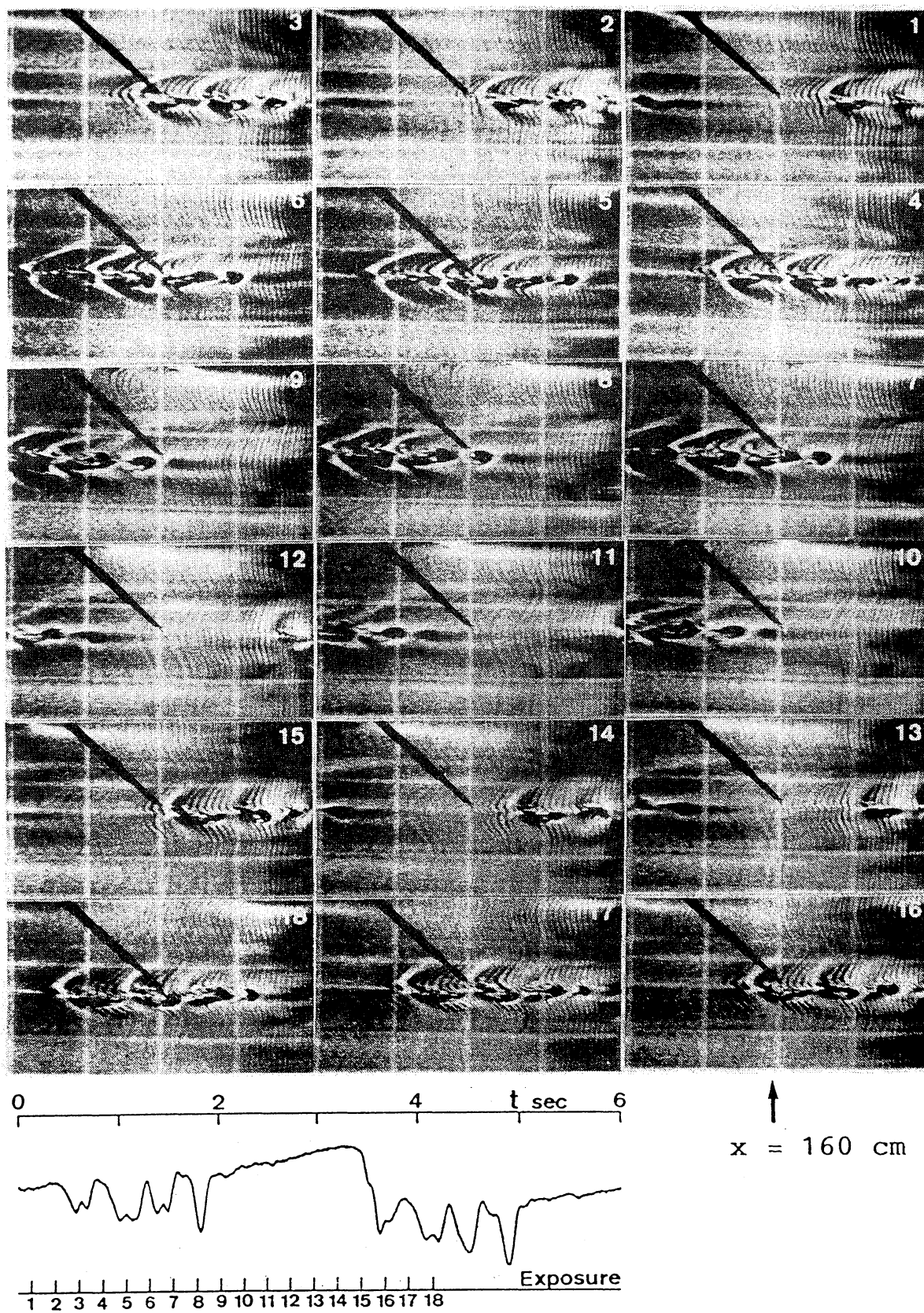


Fig. 2. Flow patterns and wave forms of u' in the layer of $y = 10$ mm. $x = 140 - 170$ cm. $U_{\infty} = 10$ cm / s. 4 spike stage.

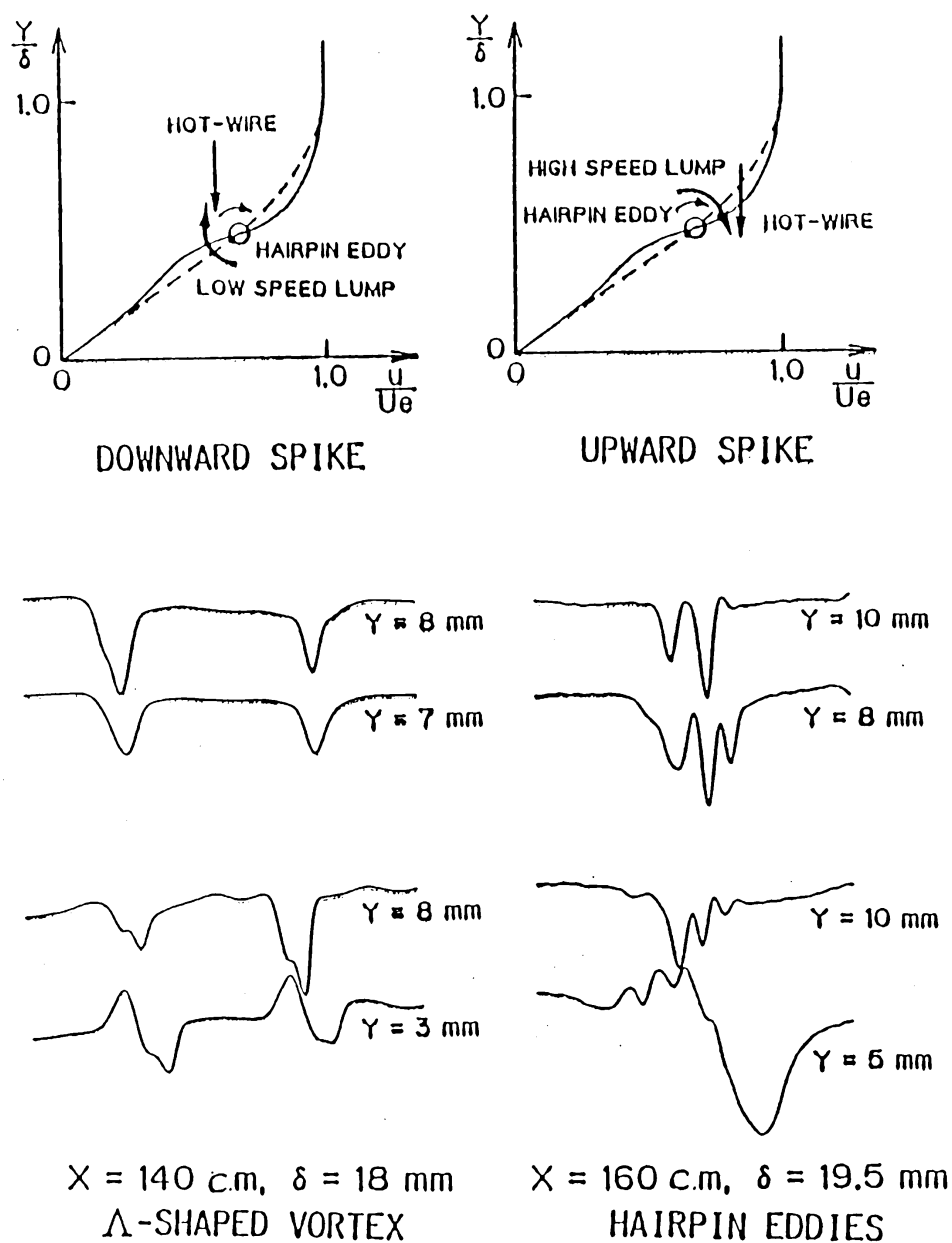


Fig.3. Relation between the position of a hot-wire probe and spikes in wave forms.

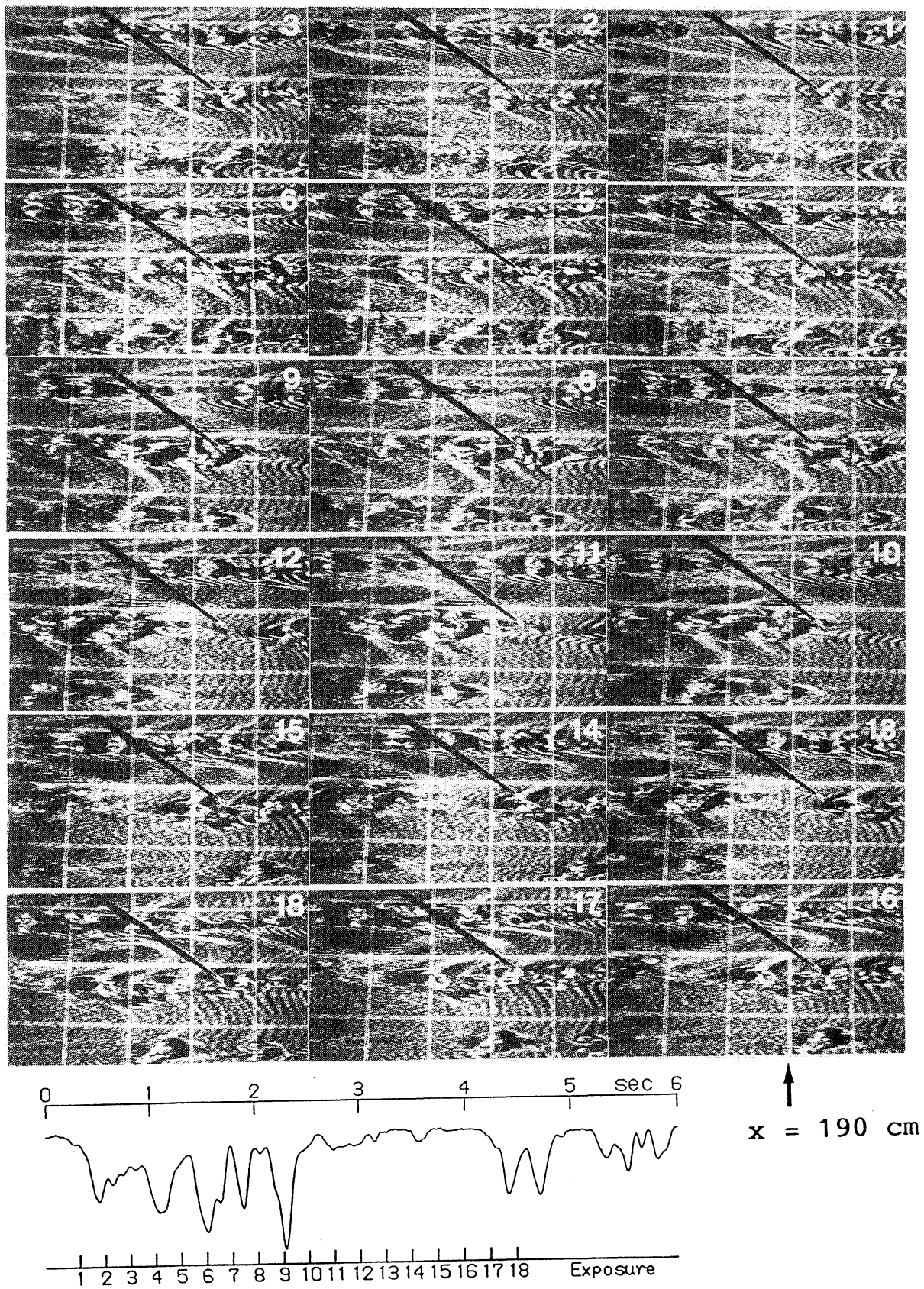


Fig. 4. Flow patterns and wave forms of u' in the layer of $y = 10 \text{ mm}$. $x = 180 - 205 \text{ cm}$. $U_\infty = 10 \text{ cm/s}$.

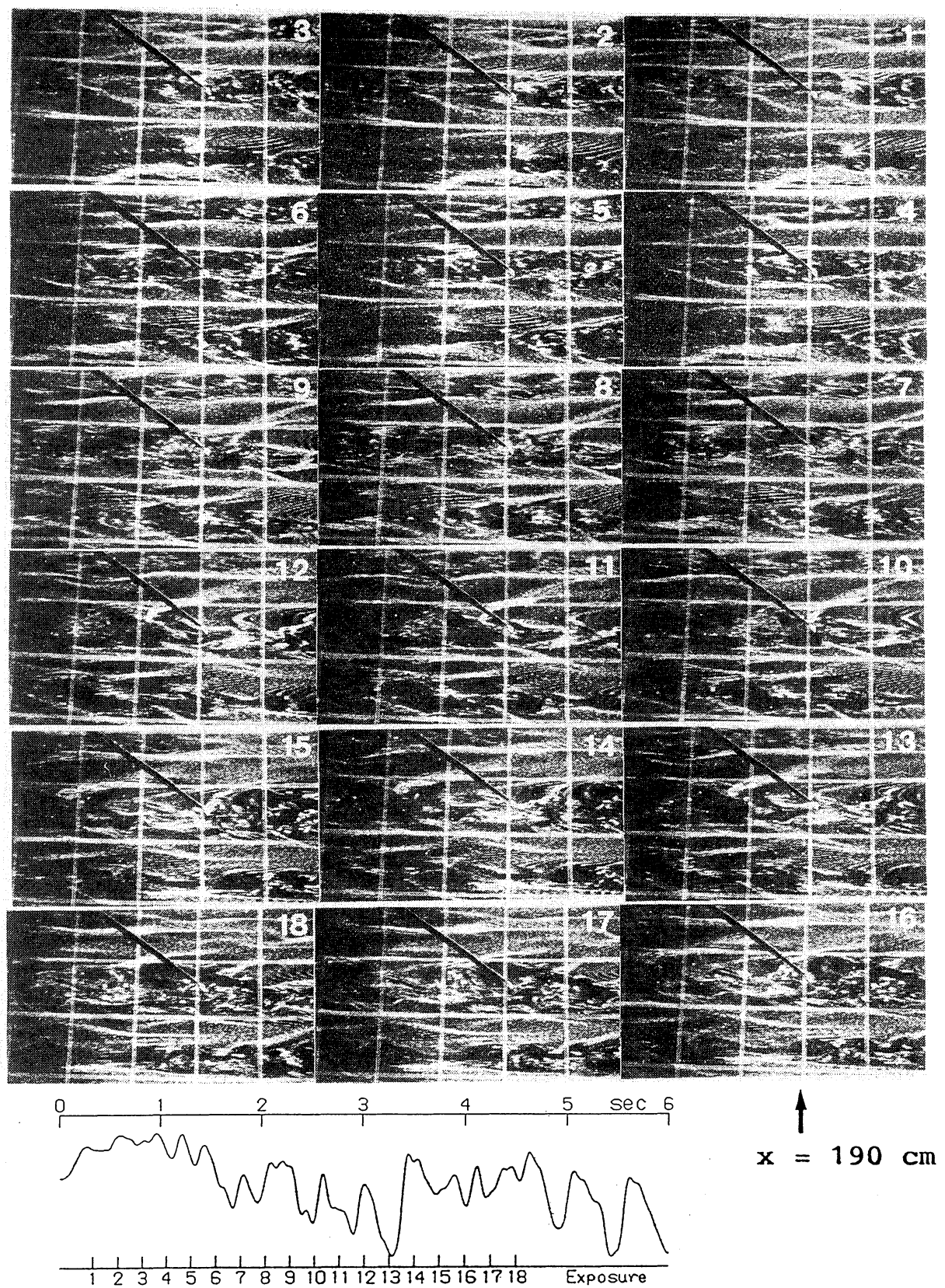
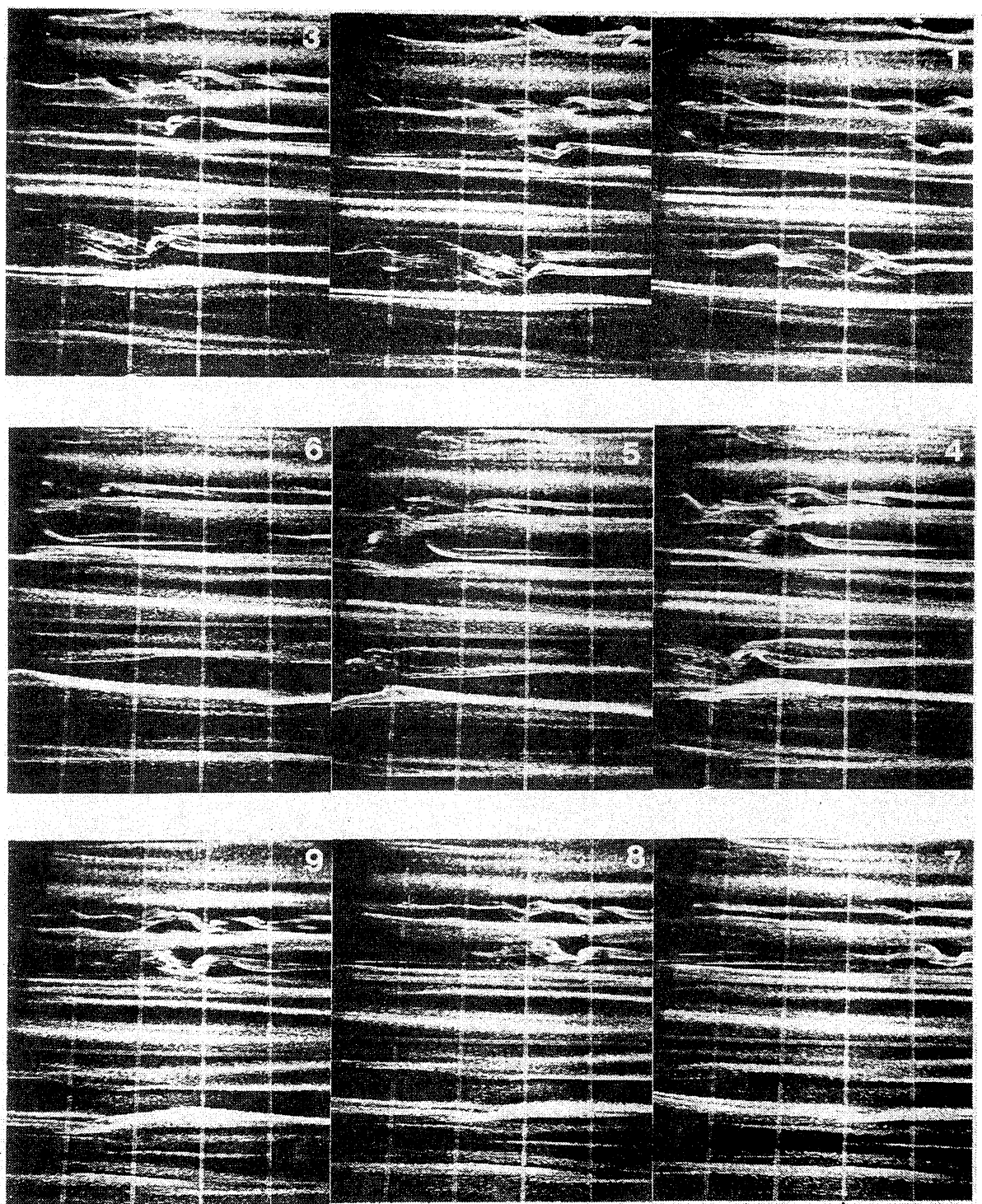


Fig. 5. Flow patterns and wave forms of u' in the layer of $y = 5$ mm. $x = 180 - 205$ cm. $U_{\infty} = 10$ cm/s.



↑
x = 190 cm

Fig. 6. Flow patterns on the plate surface, $y = 0$
mm. $x = 180 - 205$ cm. $U_{\infty} = 10$ cm/s.

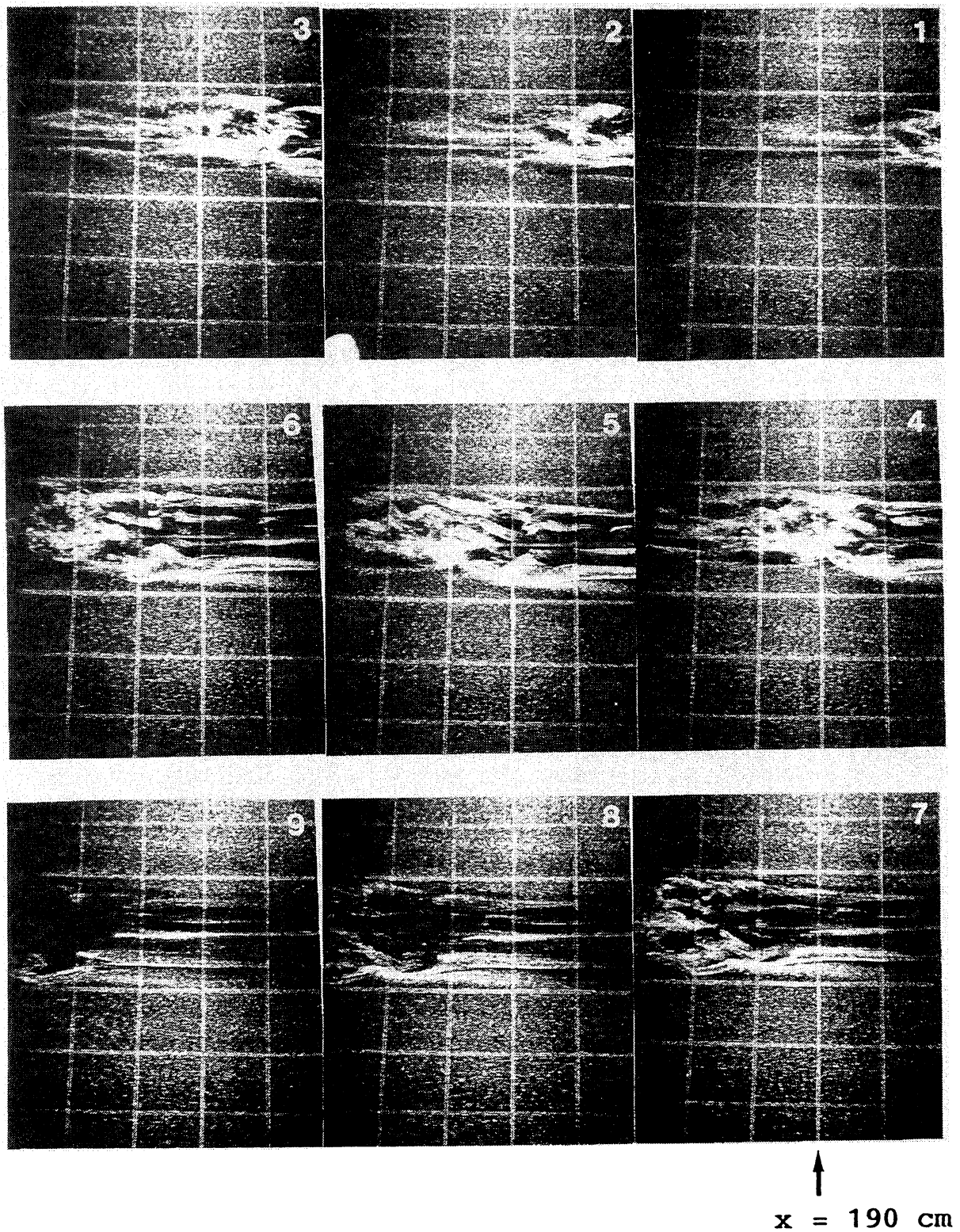


Fig. 7. Flow patterns of a turbulent spot on the plate surface, $y = 0 \text{ mm}$. $x = 180 - 205 \text{ cm}$.
 $U_\infty = 10 \text{ cm/s}$.