

琉球大学学術リポジトリ

表面波による液膜ガス吸収促進の機構解明とモデル

メタデータ	言語: 出版者: 野底武浩 公開日: 2009-06-17 キーワード (Ja): 表面波, 物質移動, ガス吸収, 流下液膜, 渦, 重力波, 馬蹄形渦, 表面張力波 キーワード (En): Mass Transfer, Surface Wave, Vorticity, Gas Absorption, Falling Liquid Film 作成者: 野底, 武浩, Nosoko, Takehiro メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/10947

流下液膜に生ずる馬蹄形表面波（渦）の成長過程

Evolution of Horseshoe-Shaped Waves on a Falling Liquid Film

伝正 *野底武浩（琉球大） 伝正 儀間悟（琉球大）
伝正 長田孝志（琉球大）

NOSOKO, Takehiro, GIMA, Satoru and NAGATA, Takashi
Mech. Eng. Dept., Univ. of the Ryukyus, Okinawa 903-0213

Surface waves separated well from each other (solitary waves) were excited on a water film falling down a vertical surface by introducing controlled temporal disturbances of constant frequencies into the film entrance, and the response of the waves to spatial disturbances generated by perturbations located just below the film entrance is analyzed. The results show that the two-dimensional waves of relatively large phase velocities are unstable to small wavelength disturbances and their wave fronts bend to form several horseshoe-shapes on each front. It is pointed out that these surface waves hold vortices occurring in a shear layer bounded by a solid surface and a free liquid-gas interface, and the horseshoe-shaped waves resemble both the Λ -vortices and horseshoe-shaped vortices observed in boundary layers on walls.

Key Words: Liquid Film, Surface Wave, Three-Dimensional Wave, Horseshoe-Shaped Vorticity

1.緒言 壁面を流下する液膜の表面に生ずる波は、液膜内の熱・物質移動を著しく促進する。最近、鉛直面を流下する液膜の二次元表面波についての、数値計算および実験による研究の著しい進展があり、表面波内は渦運動が生じており⁽¹⁾、その渦が移動促進に支配的な役割を担っていること⁽²⁾が明らかにされた。本研究では、時間的および空間的擾乱を液膜流に付与することにより、規則的な三次元波を形成させる手法を開発し、その成長過程を観察し、興味深い知見を得た。

2.実験装置および方法 液膜形成装置の断面を図1に示す。ヘッドタンク(図には示されていない)からの水道水は、シリコンチューブを経て、装置上部に流入し、ステンレス角棒とガラス板の間の0.5mmの隙間を経て、スパン方向に一様な流量の液膜をガラス面上に形成する。スピーカーのコーン部に接着した板により一定周波数 f_w でシリコンチューブを圧縮し、装置に流入する流れに脈動(時間的擾乱と呼ぶ)を付与することにより、同周波数の波を液膜に形成させた。また、ステンレス角棒のエッジの下方約5mmの所にステンレス針をその先端がガラス面に接するように、20mm間隔で設置することにより、液膜流れに空間的擾乱を与えた。

液膜にストロボ光を当て、ガラス板の背面に設置したスリガラスに写る表面波の影を撮影した。撮影したフィルムにより、波間距離 λ_x を測定し、波の速度 $u_w = \lambda_x \cdot f_w$ を算出した。装置からの水道水の流出量を測定し、レイノルズ数 $Re = (\text{液膜の単位幅当たりの流量} / \text{水の動粘度})$ を算出した。

3.実験結果および考察 3-1 表面波の構造 波間距離が十分大きな波の表面形状の模式図と波に光を当てることにより生ずる影(シャドウグラフ像)を図2に示す。波は、1~3波長の距離の流下間に発達し(図3参照)、前方に急勾配、

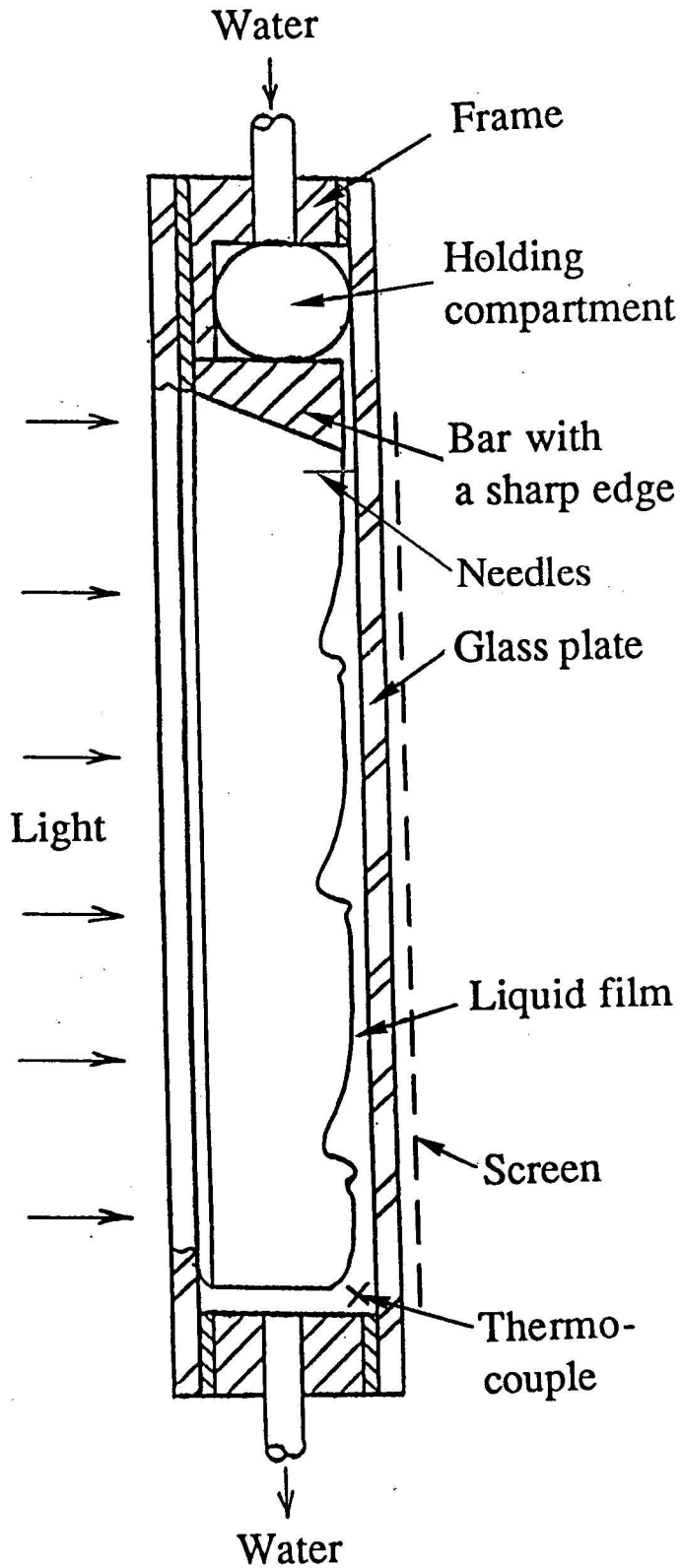


Fig. 1 Apparatus for producing a water film and needles for generating controlled spatial disturbances.

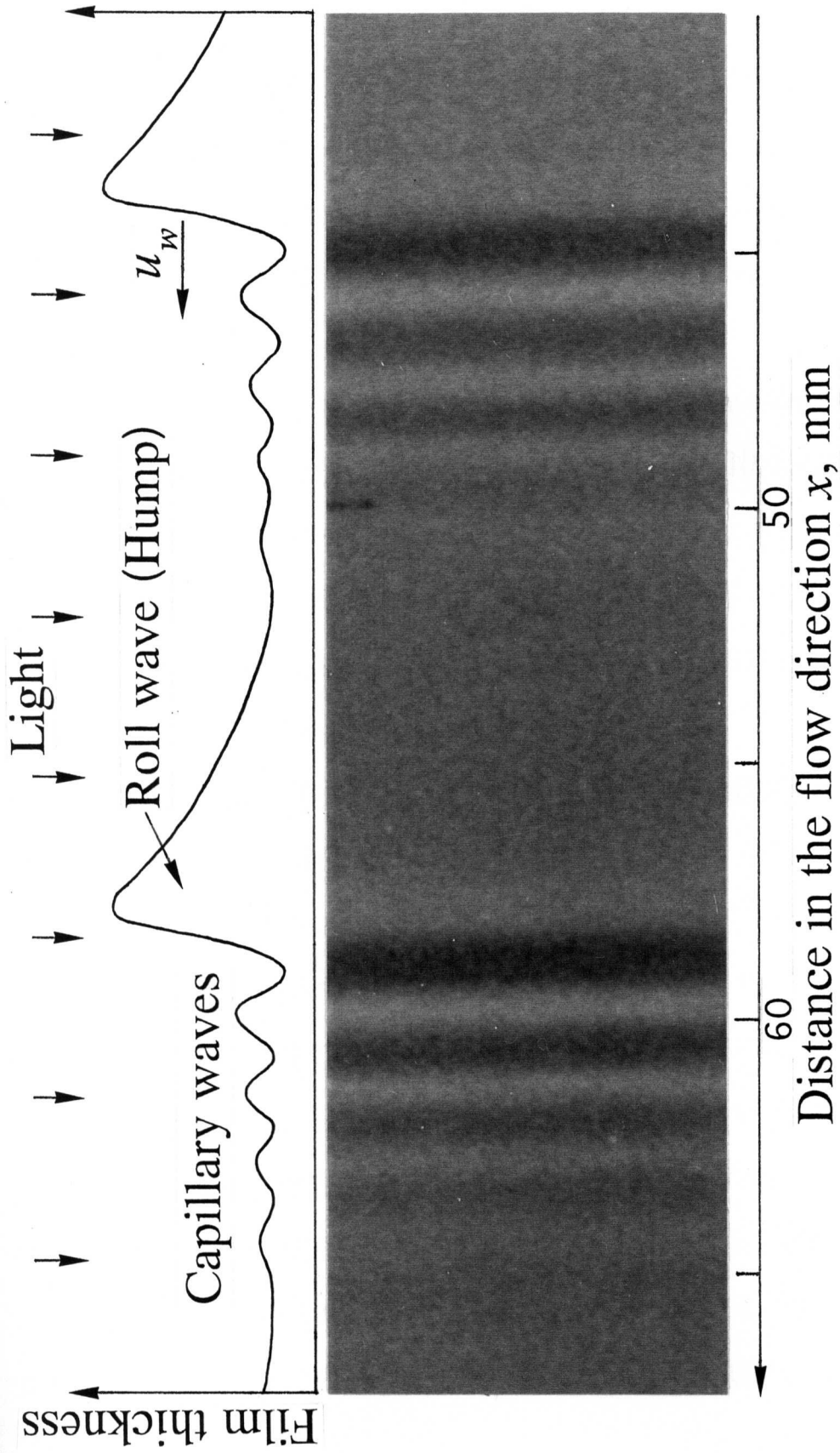


Fig. 2 Shadows of solitary waves and their profiles reconstructed from the shadows.

後方に緩やかな勾配を持つRoll Waveと呼ばれる波に成長する。その結果、Roll Waveが薄い液膜の上を流下する構造となり、Roll Waveの掃き寄せ(Sweep)により、Roll Waveの前方に表面張力波(Capillary Wave)が生じ、Roll Waveと幾つかのCapillary Waveが複合した波となる。Roll Waveの内部には渦運動が生じる⁽¹⁾。従ってRoll Waveの形状および運動は、渦のそれらに対応している。

液膜に光を当てると、Roll WaveおよびCapillary Waveの凸状の頂部は、そのレンズ作用により集光し、明るい縞を作り、一方凹状の谷部は、光を散らし、暗い縞を作る。その結果、Roll WaveとCapillary Waveの複合波は、複数の明暗の縞の群を作り、Capillary Waveの数に対応して、縞の数も増加する。縞の明るさおよび暗さの程度は、頂部および谷部の表面曲率、延ては頂部の高さおよび谷部の深さと単調増加の関係にある。

3-2 時間的擾乱および空間的擾乱を付与した場合の表面波の成長過程

時間的擾乱に加え空間的擾乱を付与した場合の、種々の波の速度における表面波のシャドウグラフ像を図3に示す。写真上部の黒点は20mm間隔で配置された針の位置を示す。Nosoko, et al. の研究⁽³⁾により、複合波の挙動は、波の速度 u_w のみの関数で表されることが知られているので、本論文では、波の速度 u_w を独立変数として観察結果を記述する。いずれの波の速度においても、針の列を通過した直後の波は、スパン方向に微少な変形(空間擾乱)を有するが、その後の成長の様子は、波の速度によって大きく異なる。波の速度 $u_w = 0.24\text{m/s}$ (図3- a)の場合、20mm間隔(すなわち、スパン方向波長 $\lambda_y = 20\text{mm}$)の擾乱の一部は成長し、一部は減衰する。その結果、より大きな波長 λ_y

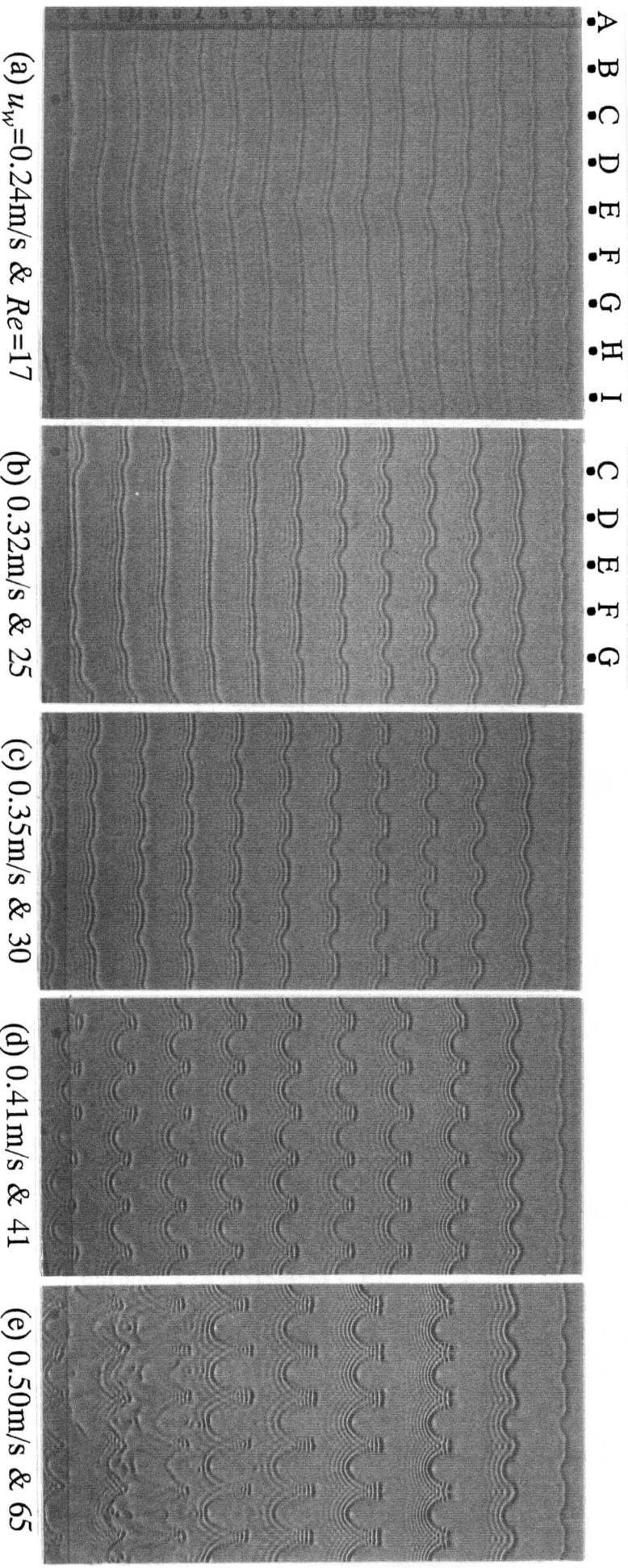


Fig. 3 Shadowgrams of solitary waves, at various phase velocities, evolving from controlled spatio-temporal disturbances of a 20 mm spanwise wavelength

≈60mmの緩やかな曲線の縞に成長し、その後はほぼ同じ形状で流下する。波の波長 $u_w=0.32\text{m/s}$ および 0.35m/s (図3-bとc)の場合、 $\lambda_y=20\text{mm}$ の擾乱は $\chi\approx 100\text{mm}$ までは成長するが、その後は減衰する。

波の速度 $u_w=0.41\text{m/s}$ (図3-d)の場合、 $\lambda_y=20\text{mm}$ の擾乱は $\chi\approx 80\text{mm}$ まで成長した後、その後は減衰することなく、ほぼ同じ変形を保って流下する。

波の速度 $u_w=0.50\text{m/s}$ (図3-e)の場合、 $\lambda_y=20\text{mm}$ の擾乱は、波の流下と共に成長し続け、ついには隣り合う波と接近し、相互干渉し、その結果、規則性を失い、複雑な形状に変形する。

以上の観察結果より、以下のことが言える。低速の波は、 $\lambda_y=20\text{mm}$ 程度の短いスパン方向波長の擾乱に対しては安定であるが、より長い波長の空間的擾乱に対しては不安定である。より大きな速度の波は、 $\lambda_y=20\text{mm}$ 程度の空間的擾乱に対して不安定であり、その擾乱の成長の速度およびその成長の結果である波のスパン方向の変形の程度は波の速度と共に単調増加する。

3-3 表面波と馬蹄形渦および \wedge 渦との類似性 本実験で観察された種々の形状の表面波を図4に示す。図4-aは発達過程の初期で観察された波で、正弦波形状のものである。その後、正弦波形状の波は、短い(すなわち小さい振幅の)馬蹄形状(図4-bおよびc)へと成長する。隣り合う馬蹄形状の後端部はほぼ水平な波で結ばれている。波の速度の増加と共に、馬蹄形状は流れ方向により引き伸ばされ、かつ馬蹄形状の幅も広くなり、その結果、馬蹄形状後端と後端の間の波の水平部は短くなる(図4-dとe)。

この様な波(Roll Wave)の内部には渦運動が生じていることが明らかにされており⁽¹⁾、従って上述の表面波の形状は、渦の形状を表しているものと言える。また、流下液膜流は一方を気-液自由界面、他方を固体面とする速度剪

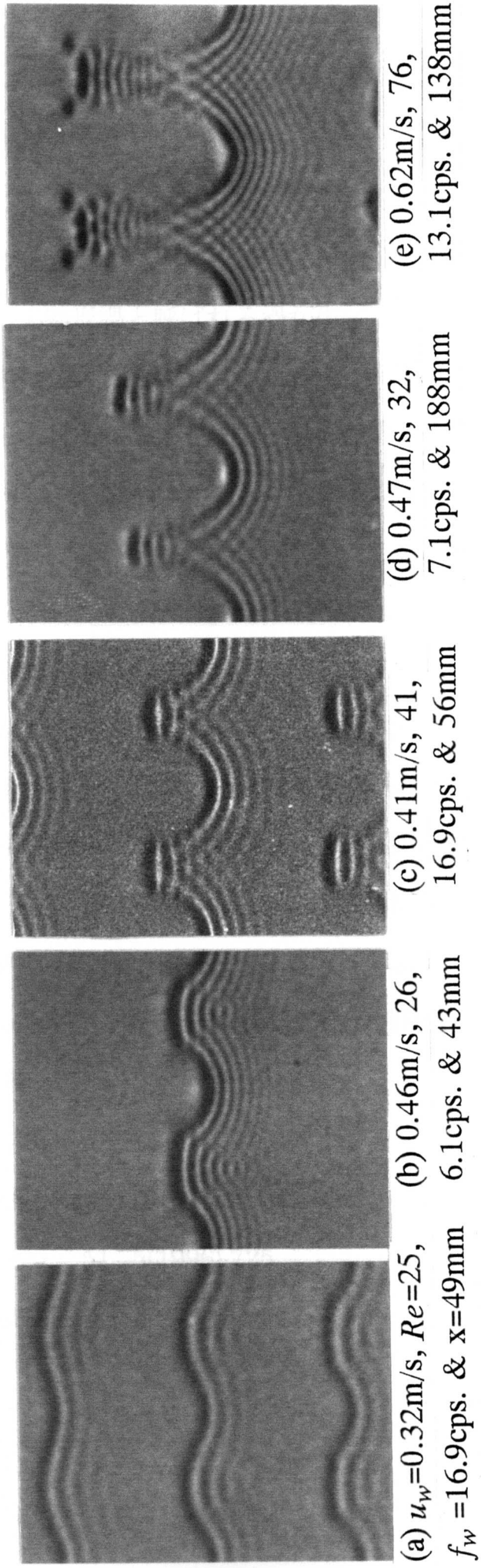


Fig.4 Various shapes of three-dimensional waves.

断層であり、表面波は、この剪断層から生じた渦と見なせる。一方、一様流中に置かれた物体(固体)の表面に発達する速度境界層の層流から乱流への遷移域において \wedge 渦と呼ばれる渦が観察されており、また、十分発達した乱流境界層内でも粘性(層流)底層から馬蹄形渦と呼ばれる渦が生ずることが確認されている⁽⁴⁾。本研究で観察された表面波(渦)も、 \wedge 渦および馬蹄形渦と同様、速度剪断層から発達するという点、および表面波(渦)も両者の渦も基本的には同様な形状を有するという二つの共通点がある。液膜流は重力により駆動されること、および表面波(渦)には表面張力の作用が働くことの相違点があるが、これらの点を考慮に入れつつ、表面波の運動特性をより詳しく調べることは、 \wedge 渦および馬蹄形渦の研究にも寄与するものと考えられる。

4. 結言 鉛直面を流下する液膜に時間的擾乱および空間的擾乱を付与することにより生じた三次元表面波を観察し、比較的大きな速度の表面波においては、空間的擾乱は成長し、表面波は馬蹄の形状を取ることを見出した。観察された馬蹄形表面波(渦)は、一様流中の物体(固体)表面の速度境界層内で生ずる \wedge 渦および馬蹄形渦と基本的な点で類似性を有することを指摘した。

謝辞 本研究は、文部省科学技術研究費(一般C No 8650270)の補助を受けて遂行された。ここに謝意を表する。

文献 (1)宮良明男, 機論(B), 63-616(1997) 3998.

(2)Yoshimura, et al., Chem. Eng. Sci., 51-8 (1996) 1231.

(3)Nosoko, et al., Chem. Eng. Sci., 51-5(1996) 725.

(4)Herbert, T., Ann. Rev. Fluid. Mech., 20 (1988) 487.