

鉛直壁面を流下する液膜の流動特性*

石松 征弘^{*1}, 野底 武浩^{*2}, 長田 孝志^{*2}

Flow Patterns and Wave Characteristics of Falling Liquid Films

Masahiro ISHIMATSU, Takehiro NOSOKO, and Takashi NAGATA

Three-dimensional profiles of falling liquid films have been visualized and measured by a laser shadowgraphy and a laser interferometry which combines a holographic interferometry and a shearing interferometry. Three wave patterns are distinguished with falling water films: single roll waves, roll waves pushing small waves and roll waves which have peaks and U-shapes between them. Vertical cross sections of these wave patterns based on interferometric measurement are schematically described. The cross section of the last wave pattern is drastically changed in the horizontal direction, due to wave amplifications near peaks by interferences.

Key Words: Falling Liquid Film, Surface Wave, Flow Visualization, Laser Shadowgraphy, Holographic Interferometry

1. 緒 言

鉛直壁面を流下する液膜の流動現象は、凝縮器、ぬれ壁式の蒸発器、吸収器、反応塔などの工業機器内で見られる現象であり、これまで数多くの研究がなされている。また、これらの報告をレビューした論文⁽¹⁾⁽²⁾もある。しかし、流下液膜の波の形状、運動に関する知見は液膜の流動および熱、物質移動現象の理論解析および計算モデル化の際に重要であるにもかかわらず数少ないのが現状である。従来、肉眼あるいは直接写真撮影による液膜の波の運動の観察結果が多く報告されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾が、得られた知見は定性的なものに限られている。近年、電気的測定法(電気抵抗法⁽⁶⁾、静電容量法⁽⁷⁾、触針法⁽⁸⁾⁽⁹⁾)や光学的測定法(光線吸収法⁽⁹⁾、光線反射法⁽¹⁰⁾)による測定点における液膜厚さの時間的変化の測定が行われ、これらのデータ解析により波の形状を見積もる試み⁽⁶⁾などもなされている。しかし、これらの手法では原理的に多くの困難を伴うため、鉛直壁面に沿って流下する波の形状を、流下面全体にわたり正確に把握するにはいたっていない。

一方、近年レーザ光を光源とする流れの可視化、測定法の開発は著しく、その応用は拡大している。本研究では光学的可視化の可能な装置を製作し、レーザシャドウグラフ法、および表面形状の測定に有効なレーザ干渉法による流下液膜の可視化を試みた。シャドウグラフ法による像を16mmカメラにより連続撮影し、波の運動を解析した。また、レーザ干渉法により波の三次元形状を正確に測定した。

記 号

- g : 重力の加速度
- Re : 膜レイノルズ数 $=\Gamma/\nu$
- x : 流下方向距離
- z : 鉛直壁に対する垂直方向の距離
- Γ : 液膜の単位幅当たりの流量
- δ : 平均液膜厚さ
- ν : 動粘性係数

2. 実験装置および方法

実験装置本体の概略を図1に示す。装置本体は内寸法275×210mmのステンレス枠の両側面に厚さ0.5mmのテフロンパッキンを介して2枚の透明ガラス板を圧した構造になっている。試料液体である水道水

* 昭和63年6月3日 第25回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和63年8月11日。

^{*1} 学生員、琉球大学大学院 (〒903-01 沖縄県西原町字千原1)。

^{*2} 正員、琉球大学工学部。

は、ガラス管より本体上部の液だめ部に流入した後、液だめ部下方のガラス板とステンレス枠の間のスリットを経て、ガラス面上に液膜を形成し流下する。液だめ部に直径1mmの多数の穴の開いた2本のテフロン円管を設置し、スパン方向に一樣な液膜流を得た。スリット部の厚さはテフロンパッキンの厚さにより決まり、本実験では0.5mmである。装置本体下部より流出する水量を測定し、流下液膜の単位幅当たりの流量 Γ を算出し、膜レイノルズ数 $Re = \Gamma/\nu$ を求めた。実験は $Re = 8 \sim 300$ の範囲で行った。スリット部の厚さがNusseltの理論式⁽¹¹⁾より得られる液膜厚さより大きいことから、この Re の範囲においてスリットから流出した液膜は加速流であることを確認した。膜レイノルズ数 Re の増加に伴う液膜流の変化を2種類の光学的手法により可視化した。

レーザシャドウグラフ法の光学系概略を図2に示す。使用した光学系はNosokoら⁽¹²⁾⁽¹³⁾のそれと同じ構成である。光源(30mW)より出たHe-Neレーザ光は、対物レンズにより広げられテスト部を通過し、ガラス面に接して取付けられたスクリーン(擦りガラス)に流下液膜の様子を写し出す。この像を35mmカメラ、および16mm高速度カメラ(最高撮影速度64f/s)により撮影した。

レーザ干渉法の光学系概略図を図3に示す。レーザ光は対物レンズにより広げられ、半透鏡により反射光、透過光の二つに分けられる。反射光は直接、透過光はミラーにより反射されて、テスト部を照らす。二つの光の角度は約 0.55° である。まず液膜のない状態での二つの光による干渉じまをホログラム乾板に焼きつける。この干渉じまと、液膜がガラス面を流下している状態での干渉じまとのモアレを生じさせ、これを35mmカメラにより撮影した。モアレじまの分布を解析し、液膜の表面形状を求めた⁽¹⁴⁾。

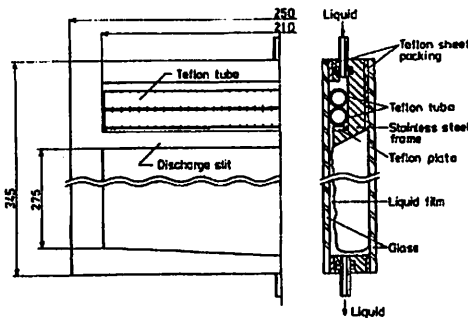


図1 実験装置本体の正面図および断面図

3. 実験結果および考察

3.1 レーザシャドウグラフ法により可視化 $Re = 11, 16, 40, 50, 100$ および 160 における液膜流動のシャドウグラフの撮影例を図4に示す。 $Re = 11$ の写真中の数字はスリット出口からの流下方向距離 x を示す。各 Re における流動様式は以下のとおりである。 $Re = 11$ においては $x = 70$ mm程度までは波立ちが存在せず滑らかな表面の液膜であるが、 $x > 70$ mmでは振幅が小さくスパン方向にほぼ一様な二次元の波が生じている。波のスパン方向のわずかなひずみは液膜流量のスパン方向の不均一に起因する。このひずみは x の増加に伴い、わずかに増大する程度で波の形状の変化は小さい。また、隣り合う二つの波の距離(波間距離)はスパン方向および流下方向に対してほぼ同一である。この波は従来'単独のroll wave'と呼ばれており⁽¹⁵⁾、後述するように前方に急なこう配、後方にゆるやかなこう配を有する。 $Re = 16$ においては、 $x = 50$ mmで単独のroll waveが発生し、 $x = 80$ mmでは発達したroll waveの前方に一つの小さな波が生じている。本報告ではこのような波を'小さな波を伴うroll wave'⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾と呼ぶことにする。 $x > 120$ mmでは小さな波を伴うroll waveのスパン方向のひずみが増大し、波間距離がスパン方向に不均一になるとともに隣り合う波との部分的合体が生じている。 $x > 160$ mmではroll waveが伴う小さな波の数が2あるいは3個に増加している。 $Re = 40$ においては、 $x < 150$ mmで波は

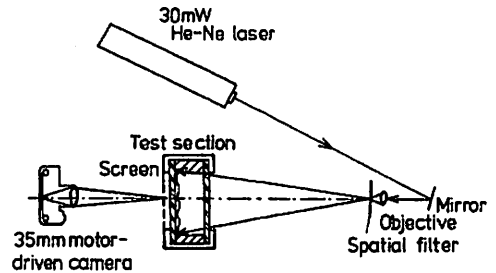


図2 レーザシャドウグラフ法光学系概略

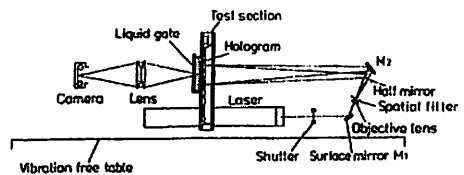


図3 レーザ干渉法光学系概略

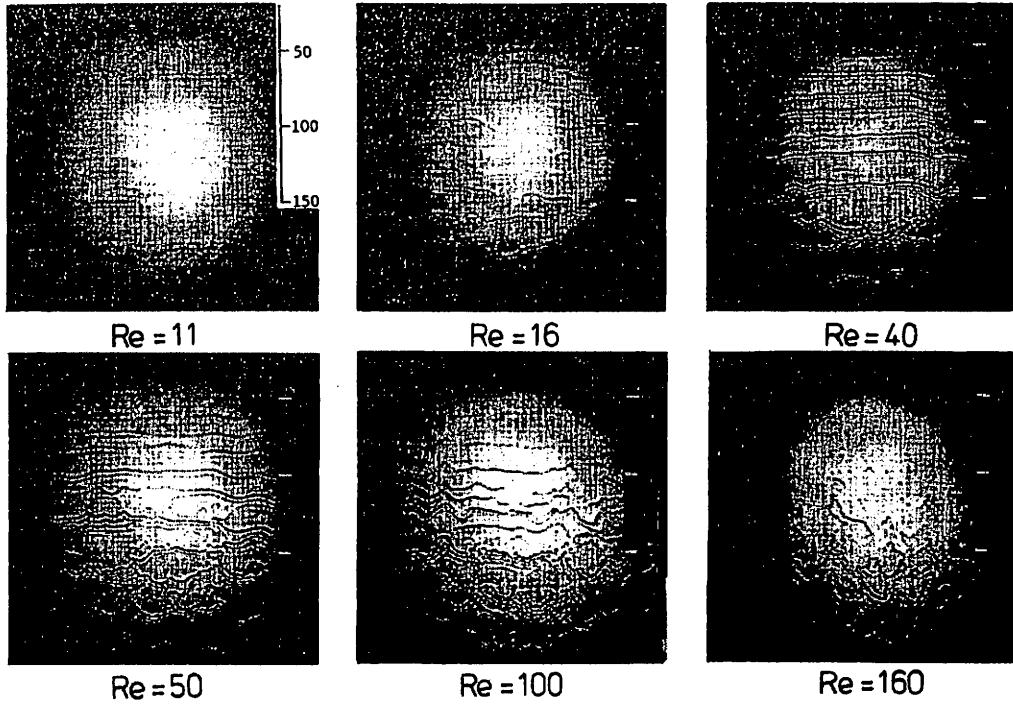


図4 レーザシャドウグラフ法による可視化写真

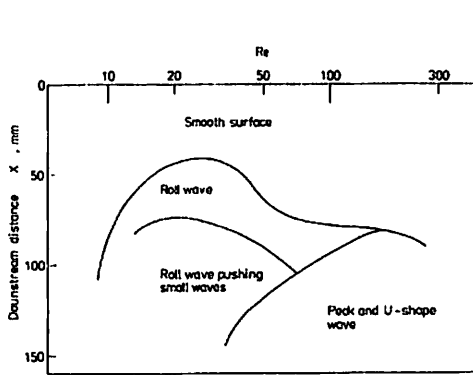


図5 流動様式領域区分図

スパン方向にほぼ直線でありまた x の増加に伴い小さな波の数が5.6個まで増加している。 $x > 150$ mmでは波のスパン方向のひずみが著しく増大し、多数の黒い点が4, 5個の群として発生する。 Re の増加に伴いこのような黒い点はより鮮明になり、またその数も増加する。roll waveは黒い点をピークとして折れ曲がりピークの間で下方に垂れ下がった半円の形状を示す。多くの黒い点はroll waveのピーク点下方の小さい波が互いに交差する点に位置している。本報告では

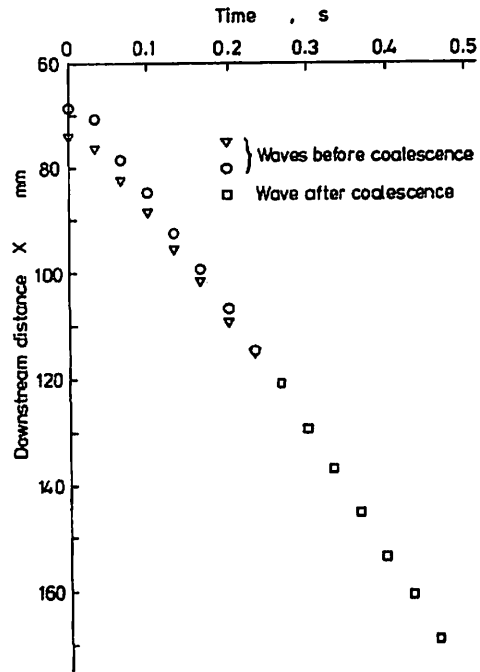


図6 波の発生および合体の過程における波の位置の時間的变化

このような波を‘ピークを有する波’と呼ぶことにする。ピークを有する発生位置は Re の増大に伴い上流方向へ移動する。 $Re=50$ では $x \approx 130$ mm でピークを有する波の発生が観察される。 x の増加に伴いピークを有する波に伴う小さな波の数は増加し、ピーク点近傍の黒い点の数も増加している。 $Re=100$ では $x \approx 80$ mm で小さな波の発生、発達より先に二つのピークを有する単独の roll wave が発生している。 x の増加に伴いピーク点の数、および小さな波の数は増加している。 $Re=160$ では $x \approx 80$ mm で三つのピーク点および、そのごく近傍にのみ波が発生しピーク間の roll wave は発生していない。 x の増加に伴いピーク点の数は増加し、ピーク間の半円状の波も発生するようになる。 $Re=40, 50, 100, 160$ のシャドウグラフの比較より、 Re の増大に伴いピーク間の半円状の波がより下方に垂れ下がる形状になることがわかる。 $Re > 160$ においては上述の傾向がより顕著になること、およびピーク点の発生、小さな波の発生、発達が流下方向に移動することを除いてほぼ $Re=160$ と同様の様相が観察された。

以上の観察より $Re=8 \sim 300, x=0 \sim 250$ mm の範囲で4種類の流動様式が識別できた。すなわち、滑らかな表面の液膜流、単独の roll wave、小さな波を伴う roll wave およびピークを有する波である。4種類の流動様式が発生する領域を Re と対応させて図5に示す。おのおのの波の発生位置（スリット出口からの距離）は時間とともに変化するが、本実験を通してその変化幅は最大40 mm程度であり、図5中の境界線はその時間平均を示している。波の発生位置は Re の増加に伴い初めは減少し、 $Re \approx 30$ で最小値を取った後再び増大する。この傾向は Pierson-Whitaker⁽⁴⁾ の報告と一致する。 Re が100をこえたあたりから単独の roll wave および小さな波を伴う roll wave は、ほとんど見られなくなり、 Re が高くなるにつれピークを有する波が支配的になる。なお正確には滑らかな表面の領域と単独 roll wave のその境界近傍には sin 曲線状の断面を有する波 (sin wave⁽¹¹⁾) が非常に狭い限られた領域に存在することが後述のレーザ干渉法の結果より明らかにされるがここでは示さなかった。

$Re \approx 10$ では波の合体はほとんど起こらず、 $Re=16$

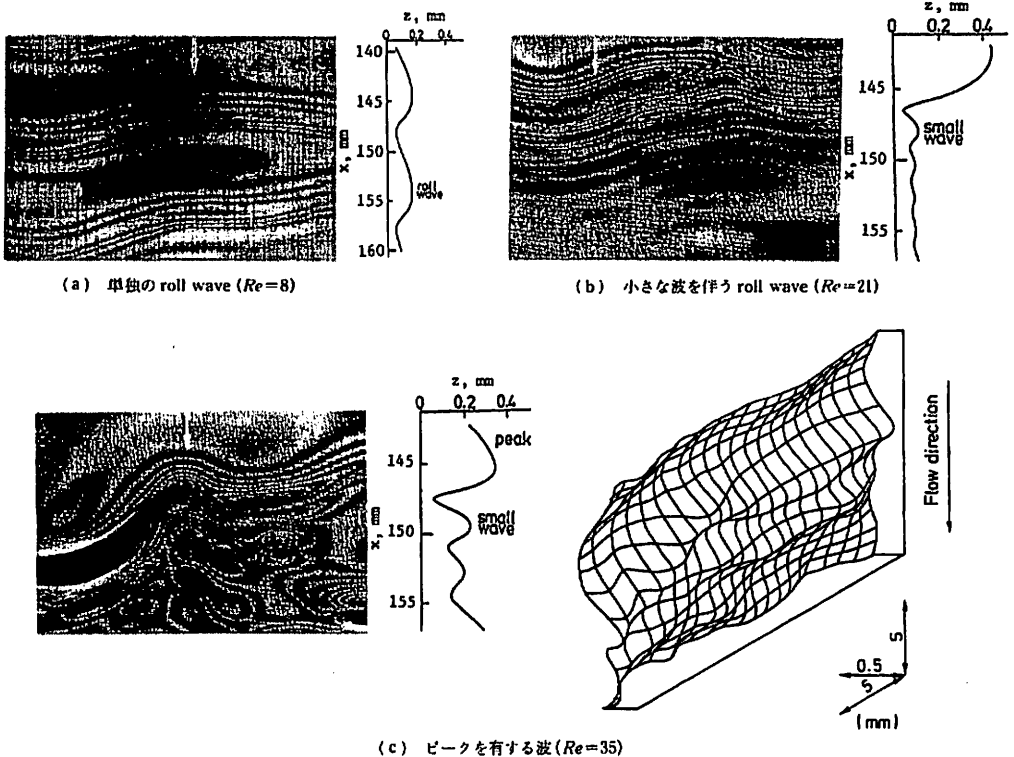


図7 レーザ干渉法による可視化写真、矢印部における液膜断面図および液膜表面の三次元形状

付近では小さな波を伴う roll wave の領域で部分的な合体が生じる。波の合体の様子は多様であり、より高いレイノルズ数においてはさらに複雑になる。ここでは比較的単純な合体の測定結果について述べる。Re=16 におけるシャドウグラフの像を 16 mm カメラにより 64 f/s で連続撮影し小さな波を伴う roll wave の合体の様子を解析した。隣り合う二つの波の発生から部分的合体を経て $x=170$ mm にいたるまでの波の位置の時間的変化を図 6 に示す。後続の波の発生時を横軸の原点に取った。両者は発生直後加速した後、すぐ一定速度に達する。先行する波の速度は 190 mm/s、後続の波の速度は 225 mm/s でこれらの一定速度は $x=115$ mm における両者の合体まで保たれる。合体により速度は 245 mm/s に増加し、その後一定に保たれる。波の加速は波の成長と密接に関係しており、波の発生直後および合体時に波は急速に成長していると推定される。

3.2 レーザ干渉法による可視化 ホログラム干渉法による撮影例およびそれらより得られた液膜表面の断面、三次元形状を図 7 に示す。図 7 (a), (b), (c) は、それぞれ単独の roll wave, 小さな波を伴う roll wave, ピークを有し小さな波を伴う roll wave を示す。単独の roll wave, および小さな波を伴う roll wave においてはほぼ水平で平行に分布しており、液膜断面積のスペン方向の変化が小さいことを示している。一方、ピークを有し小さな波を伴う roll wave においては roll wave の前方に多数の同心円のしまが生じており、液膜表面の凹凸が激しいことを示している。なお、本レーザ干渉法では液膜表面の形状の測定は可能であるが液膜の厚さの絶対値を測定することはできない。図 7 (a)~(c) 中の矢印の位置における液膜断面形状および、(c) に対応する三次元形状の図は波動を考慮した層流液膜の解析により求めた Kapitza の式 $\delta=0.843(\nu^2/gRe)^{1/3}$ を用いて液膜の平均厚さ δ がこれに一致するように z の原点を取って示したものである。roll wave は前方に急なこう配、後方に緩やかなこう配を有し、従来の報告⁽¹³⁾と一致している。小さな波を伴う roll wave は前方に大きなこう配を有し、小さな波との間に深い谷を形成している。また、roll wave から離れるに伴い小さな波の振幅は減少している。小さな波を伴う roll wave 前方のこう配は小さな波を伴わないそれと比較して著しく大きい。従来、小さな波の発生は roll wave 前方の大きなこう配に伴う表面張力の作用に起因すると推定されていたが⁽¹¹⁾上述の結果はこの推定を裏付けている。ピークを有する波においては roll wave の前方に激しい凹凸が生じ、

小さな波の頂部の交差する点で高峰が、また谷部の交差する点で窪地が観察される。これらの高峰と窪地はピーク点での波のスペン方向の折れにより、小さな波が互いに干渉した結果生じたものと推定される。ピークを通る断面図においてはピークの前方に非常に険しく深い谷が形成され、また、小さな波の振幅も大きい。この傾向は小さな波を伴う roll wave に比較してより著しく、ピークを有する波においては波の干渉が生じていることを裏付けている。なお、波の干渉により生じた窪地が図 4 のシャドウグラフでは明確な黒い点として観察される。図 8 に種々の条件下での液膜断面形状を示す。図 8 (a-1), (a-3), (b-1), (c-1) は単独の roll wave, 図 8 (a-2), (b-2), (b-3), (c-2) は小さな波を伴う roll wave, 図 8 (a-4), (b-4), (c-3) はピークを有する波のピーク点を通る断面での形状である。Re の増加に伴い波の様相は単独の roll wave → 小さな波を伴う roll wave → ピークを有する波へと変化し、それとともに波の振幅は増加している。特に、単独

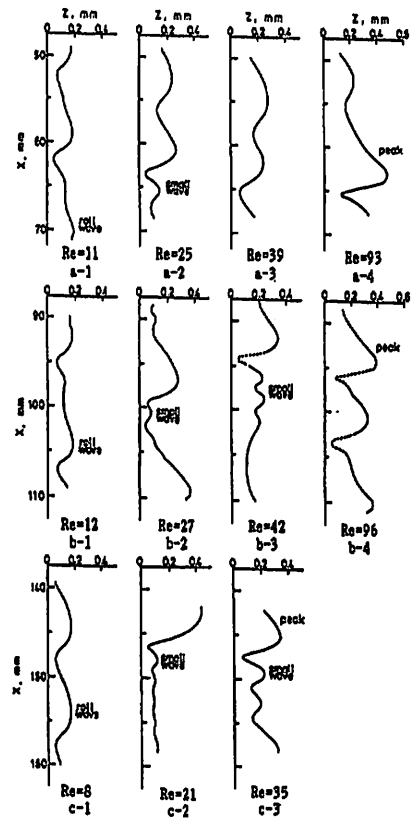


図 8 液膜断面図

の roll wave → 小さな波を伴う roll wave へと変化する $Re=10\sim 25$ においてその増加は著しい。発生直後の波は sin 曲線状の断面を有し振幅は小さいが、そのわずかに約 10 mm 下流の波は前方に急こう配、後方に緩やかなこう配を有し (roll wave)、その振幅は大きくなっている。[図 8 (a-2), (a-3), (a-4)]。しかし、さらに下流においては x に伴う波の振幅の増加の傾向は明確ではない。これらの結果は図 6 より得られた波の運動の知見と一致する。 $Re=10$ では単独の roll wave が生じている [図 8 (a-1), (b-1), (c-1)] が、 Re のわずかな増加に伴い、roll wave の背にあん部が生じる [図 8 (a-1), (b-1)]。さらに高い Re においてはこのようなあん部が小さな波に成長する。単独の roll wave、および小さな波を伴う roll wave の断面形状の測定結果は長崎⁽¹⁷⁾ および宮内・川野⁽¹⁸⁾ による波の二次元性を仮定した計算結果と定性的に一致している。

4. 結 言

鉛直壁面を流下する液膜を膜レイノルズ数 $Re=8\sim 300$ および流下方向距離 $x=0\sim 250$ mm の範囲でレーザシャドウグラフ法により可視化するとともに液膜の表面形状をレーザ干渉法により測定し、以下の知見を得た。

(1) 3 種類の波が識別された。すなわち、単独の roll wave、小さな波を伴う roll wave、ピークを有する波である。そしておのおのの波の発生する領域区分図を示した (図 5)。

(2) 単独の roll wave および小さな波を伴う roll wave はスパン方向のひずみが比較的小さい。両者の roll wave の断面は前方に急こう配、後方に緩やかなこう配を有するが、後者において前方の急こう配はより著しい。また、そのこう配は小さな波の発生と密接に関係している。

(3) ピークを有する波のスパン方向のひずみは著しく、波は屈曲してスパン方向にいくつかのピークを形成し、そのピーク間で下方に垂れ下がった半円の形状を取る。ピークの前では小さな波が互いに干渉

し、いくつかの高峰と窪地を形成する。

(4) $Re=16$ 付近では小さな波を伴う roll wave の部分的合体が生じスパン方向のひずみが増大する。また、合体により波の速度は増加する。より高い Re では波の合体は複雑になる。

本研究に遂行するにあたり、守田耕一、林田仁宏両君に実験の実施、フィルム解析および図の作成において多大の助力を得た。また、本研究費の一部は文部省科学研究費補助金 (奨励研究 62750186) および日立オートモティブエンジニアリング (株) の援助によるものである。記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Fulford, G. D., *Advances in Chemical Engineering*, 5, (1946), 151, Academic Press.
- (2) Brauer, H., *VDI-Forschungsheft*, 457 (1956).
- (3) Tailby, S. R. and Portalski, S., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 40 (1962), 114.
- (4) Pierson, A. W. and Whitaker, S., *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 16 (1977), 401.
- (5) 石谷・ほか 3 名, 機論, 37-301, 第 2 部 (昭 46), 1708.
- (6) Telles, A. S. and Dukler, A. E., *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 9 (1970), 412.
- (7) 藤田・ほか 2 名, 機論, 50-459, B (昭 59), 2553.
- (8) 高浜・ほか 2 名, 機論, 44-386, 第 2 部, (昭 53), 3514.
- (9) Stainthorp, F. P. and Allen, J. M., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 43 (1965), 85.
- (10) Jones, L. O. and Whitaker, S., *AIChE J.*, 12 (1966), 525.
- (11) Nusselt, W., *Z. VDI*, 60-27 (1916), 541. 60-28 (1916), 569.
- (12) Nosoko, T., Ohyama, T. and Mori, Y. H., *J. Fluid Mech.*, 161 (1985), 329.
- (13) Nosoko, T., Endo, S. and Mori, Y. H., *Flow Visualization*, IV (1986), 67, Hemisphere.
- (14) Xu, Y. and Zhang, N., *Fluid Control and Measurement*, 2 (1985), 667, Pergamon Press.
- (15) Dressler, R. F., *Commun. Pure Appl. Math.*, 2 (1949) 149.
- (16) Mayer, P. G., *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civil. Eng.*, 85 (HY 7), (1959), 99.
- (17) 長崎, (1987-11), 熱工学における数値計算の最前線, 日本機械学会特別講演会資料集 (昭 62), 33.
- (18) 宮内・川野, 第 25 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2 (昭 63), 76.
- (19) 植田, 気液二相流, (昭 56), 養賢堂.