

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560208

研究課題名（和文） 表面波を伴う液膜流の乱流遷移とエントロピー解析

研究課題名（英文） Transition to turbulent flow and entropy generation of wavy liquid film falling down an incline

研究代表者

野底 武浩（NOSOKO TAKEHIRO）

国立大学法人 琉球大学・工学部・教授

研究者番号：80183903

研究成果の概要：

流下液膜は、ガス吸収器など広い工学的応用があり重要である。本研究では、ガス吸収促進等に強く影響する液膜流の波（Roll wave）について流動特性を解明し次の知見を得た。波の速度が波のピーク高さや波前縁の向きなどの関数として表され、表面張力が波の運動に強い影響を持つ。乱流への遷移は波の前縁での渦生成により始まり、乱流渦は波の内部に局在化する。波の発達に伴いエントロピーの摩擦生成量は局大値に向かう。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,700,000	0	1,700,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	540,000	4,040,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：流下液膜、表面波、乱流遷移、剪断層、エントロピー

## 1. 研究開始当初の背景

傾斜または鉛直面を流下する液膜はガス吸収器や蒸発器など機械工学や化学工学の重要な機器に応用されており、その性能を左右する現象である。その液膜表面に Roll wave と呼ばれる波が発生し、これがガス吸収や蒸発性能に大きく影響することが知られている。

これまでこの Roll wave の運動の解明は、層流域の中でも流量の小さい範囲に限られており、層流の高流量域や乱流域については十分な知見が得られていない。

近年、層流の低流量範囲における実験研究および数値シミュレーションにより、Roll wave は液膜表面の大きな変形と内包する渦の働きにより、液膜内に剪断層（速度が大きく変化する所）が形成されることが明らかにされつつある。しかし、層流域でも流量がより大きくなった場合や、乱流域および層流から乱流への遷移域では Roll wave の形状や運動特性、それとガス吸収や蒸発性能との関係について、統一的な解析は残されたままであった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、傾斜面または鉛直面を流下する液膜について、解明が十分でない層流域と遷移域、乱流域における Roll wave の運動を解析し、それによる熱・物質移動促進の解析に必要な知見を提供することである。異なる流量において Roll wave の形状と寸法、速度を測定し、特徴的な寸法と速度との関係を見出し、物理的解析を試みる。乱流遷移域においては Roll wave の形状や速度の変化を測定するとともに摩擦係数 (Roll wave が傾斜面から受ける摩擦力の指標) を求め、層流から乱流への遷移に伴う内部の流動構造やその発達について考察する。

さらに Roll wave を伴う液膜流の流動摩擦によるエントロピー生成量を算出する方法を考案し、エントロピー生成の視点から液膜流の解析を試みる。

## 3. 研究の方法

研究は、実験において Roll wave の形状や寸法、運動を測定することを主とし、それに数値解析を併用して進めた。

(1) シャドウグラフ (影絵) 法により Roll wave を観察し、また Roll wave が作るスクリーン上の影から波前縁の形状と寸法を測定する。スクリーンに写し出された影絵像をパソコンに取り込み、Roll wave の前縁を抽出して、前縁の垂線と波の進行方向が成す角度、および前縁の曲率を解析する。

(2) 光吸収法による Roll wave の断面形状測定  
染料を混ぜた液膜にレーザービームを透過させ、その光量の減衰から液膜厚さの時間変化を測定する。そして、そのデータを、Roll wave の速度から断面形状に変換する。

(3) Roll wave 内の流速分布の数値計算  
測定により得られた Roll wave の断面形状内において、二次元流れを仮定して数値シミュレーションを行い、内部の流動を解析する。

## 4. 研究成果

研究は現在なお進行中であるが、これまでの研究成果は以下のように要約できる。

(1) 層流域における Roll wave の形状と運動特性

図 1 と 2 に層流域における Roll wave の断面形状とシャドウグラフ像を示す。波と波が十分離れている場合、いずれの流量でも、Roll wave は前方に急な傾斜

表面の前縁と緩やかな傾斜の背を有する。そのような形状を保ったまま、Roll wave は薄い基底液膜上を滑るように流下する。Roll wave は、その速い速度での進行により、前縁から前方の基底液膜上に幾つもの正弦形状の小さな振幅の波を作る。この波は表面張力波と呼ばれる。

図 2 のシャドウグラフ像に示すように、Roll wave の前縁は弧を描き、前縁の垂線は弧の最前部を除いて、進行方向に対し角度  $\beta$  を有する。すなわち、Roll wave は、その前縁の向きが進行方向とずれたまま流下する。

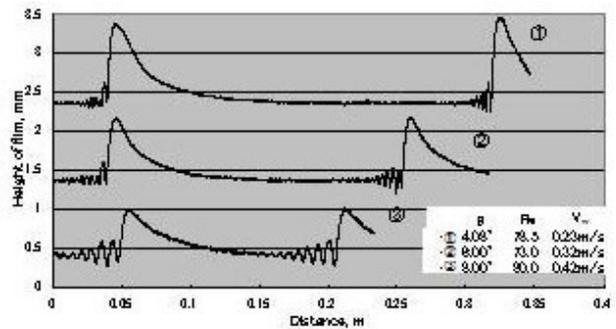


図 1 Roll wave の断面形状

縦軸は、液膜表面の高さ (mm)

横軸は、流下方向距離 (m)

Roll wave は右から左へ進行している。



図 2 傾斜面を流下する Roll wave のシャドウグラフ像

Roll wave は左から右へ進行している。

広い範囲の実験条件 ( $Re=20\sim 120$ 、 $\beta=0\sim 42^\circ$ 、 $\theta=3^\circ\sim 12^\circ$ ) の測定データ (図 3) より、以下の相関式が得られた。

$$V_w \cos \beta = 0.165 h_p (\sin \theta)^{1/2} \quad \dots (1)$$

$$h_s \propto (V_w / \sin \theta)^{1/2} \quad \dots (2)$$

ここで、

$V_w$  : Roll wave の速度  
 $h_p$  : Roll wave のピーク高さ  
 $h_s$  : 基底液膜の厚さ  
 $\beta$  : 前縁の垂線と進行方向の成す角  
 $\theta$  : 傾面と水平面の成す角

である。

式(1)が  $\theta$  および  $\beta$  の広い範囲で成り立つことは、Roll wave の形状と運動が重力と表面張力および粘性作用の比較的単純な関係で記述し得ることを示唆している。

また、式(1)の左辺  $V_w \cos \beta$  は表面張力波の進行速度であり、Roll wave の運動が表面張力に強く支配されていることを示している。

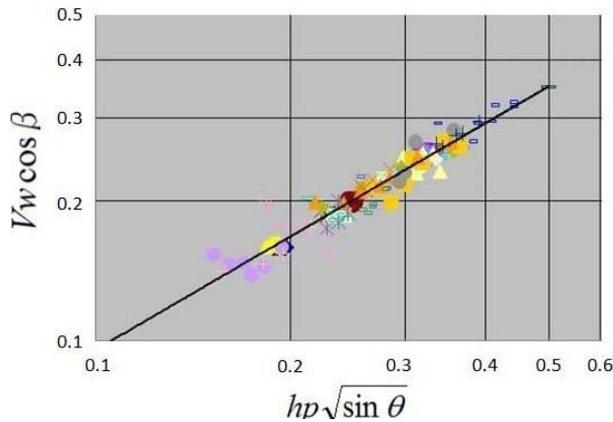


図3 波の速度  $V_w$  と Roll wave のピーク高さ  $h_p$  の関係  
 $\theta$  : 傾斜面の水平面からの角度  
 $\beta$  : Roll wave の前縁の垂直と進行方向の成す角

### (2) 内部流動およびエントロピー生成

測定した表面形状の内部に格子を設けて、各格子における速度を求める数値計算のコンピュータープログラムを作成した。湾曲した Roll wave 内の渦および前縁部近傍に流下方向とは逆の流れおよび強い剪断層の存在を示す結果が得られつつある。

開いた系である液膜流に対し熱力学の第一法則を適用すれば、次式のようになる。

$$(E_p + E_s + E_k)_{\text{smooth}} - (E_p + E_s + E_k)_{\text{wavy}} = TS \quad \dots (3)$$

ここで、

$E_p$  : ポテンシャルエネルギー  
 $E_s$  : 表面エネルギー  
 $E_k$  : 運動エネルギー

$T$  : 絶対温度  
 $S$  : 流動摩擦によるエントロピー生成量

添字

Smooth : 上流の平滑な液膜  
 Wavy : 下流の Roll wave を伴う液膜

である。

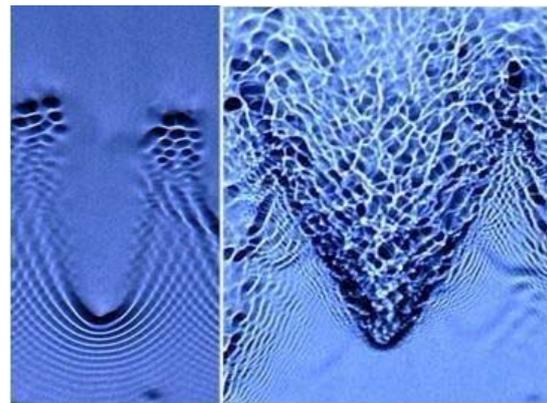
式(3)より、液膜流ではポテンシャルエネルギーが表面エネルギーと運動エネルギーおよび熱エネルギー(流動摩擦によるエントロピー生成)に変換されることが示される。初め平滑な液膜表面に間隔が短くて振幅の小さい波が発生し、振幅の大きな Roll wave へ成長する。流下とともに Roll wave は合体を繰り返しさらに大きな寸法へと成長していき、同時に波の前縁を湾曲して三次元の表面形状になる。

この過程を流動摩擦によるエントロピー生成の視座から見ると、Roll wave の合体により表面エネルギーへの変換が減少し、エントロピー生成はある極大値に向かって増大していくことになる。このことがこれまでのエントロピー解析から示唆されている。

Roll wave の三次元化によるエントロピー生成量の変化は今後の課題である。

### (3) 流下液膜の乱流への遷移と乱流構造

鉛直面流下液膜における層流の Roll wave と乱流の Roll wave のシャドウグラフ像を図4に示す。層流の Roll wave では、背の部分は滑らかである。一方、乱流の Roll wave ではその背には多数の凹凸が見られ、背の内部の全域を不規則な乱流渦が占めている。



(a) (b)

図4 Roll wave のシャドウグラフ像  
 (a) 層流の Roll wave  
 (b) 乱流渦を内包する Roll wave

これは、Roll wave 前縁で発生した渦が後流に放出され成長した後、厚さが薄くなっていく背部では、発生成長した乱流渦が固体面と液膜表面の狭い空間において粘性作用により減衰し消滅することを示している。Roll wave の背の後端と次の Roll wave の前縁との間は薄い基底液膜であり、その非常に狭い空間には乱流渦は存在し得ない。このように流下液膜の乱流構造は、乱流が Roll wave 内に局在化することを特徴とする局所乱流である。

今後は、上述の数値シミュレーションを併用して、この局所乱流について乱流渦の生成と粘性作用による消滅の構造を解明する予定である。

Roll wave の摩擦係数  $C_f$  (Roll wave が傾斜面から受ける摩擦力の指標) を求め、それとレイノルズ数  $Re$  (流量の指標) との関係を調べたところ、摩擦係数は、レイノルズ数  $Re$  が約 200 の値から  $C_f \propto Re^{-1}$  の層流の式から上方にずれて行き  $C_f \propto Re^{-1/4}$  の乱流の式に推移することが分かった。

これはシャドウグラフ法による観察結果と一致する。観察によれば、レイノルズ数  $Re$  が約 200 で Roll wave 内で乱流渦の生成が開始し、レイノルズ数  $Re$  の増加に伴い乱流渦の生成が活発化し、同時に消滅に至るまでの渦の寿命が長くなることが観察された。乱流渦の生成が活発化すると Roll wave の摩擦抵抗が増大するため、摩擦係数  $C_f$  が層流の式から上方にずれて行き乱流の式に推移するのである。

現在、以上の結論により詳細な証拠を提供するため、測定や数値解析の精度を向上させるための実験とコンピュータプログラムの改良を行うとともに、測定流量の範囲の拡大を進めている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

①Islam MA, Miyara A, Nosoko T, et al., Numerical investigation of kinetic energy and surface energy of wavy film, *J. Thermal Science* 16, 237-242, 2007、査読あり

[学会発表] (計 1 件)

①野底武浩、稲嶺琢磨、儀間悟、水口尚、光吸収法による傾斜面流下液膜の表面波の形状測定、第 45 回伝熱シンポジウム講演論文集, pp.289-290, 2008, つくば市国際会議場

## 6. 研究組織

研究組織は、以下の研究代表者と研究分担者 2 名の計 3 名から成る。

### (1) 研究代表者

野底 武浩 (MOSOKO TAKEHIRO)  
琉球大学・工学部・教授  
研究者番号：80183903

### (2) 研究分担者

儀間 悟 (GIMA SATORU)  
琉球大学・工学部・准教授  
研究者番号：60274883

水口 尚 (MINAKUTI HISASHI)  
琉球大学・工学部・助教  
研究者番号：70432200

### (3) 連携研究者