

琉球大学学術リポジトリ

流下液膜に生ずる馬蹄形表面波（渦）の運動特性

メタデータ	言語: 出版者: 野底武浩 公開日: 2009-06-15 キーワード (Ja): 馬蹄形渦, 液膜, 流下液膜, 乱流遷移, 表面波, 表面皮 キーワード (En): Falling film, Horseshoe-shaped vortices, Liquid film, Transition to turbulent flow, Surface wave 作成者: 野底, 武浩, 儀間, 悟, Nosoko, Takehiro, Gima, Satoru メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/10927

鉛直円管内を流下する液膜表面波の運動とガス吸収特性

The characteristics of surface waves on a liquid film falling inside a vertical tube and the associated gas absorption

大川 正輝(琉大院) 伝学 *島田 崇史(琉大院) 伝正 野底 武浩(琉球大)
伝正 宮良 明男(佐賀大) 伝正 長田 孝志(琉球大)

OHKAWA Seiki¹, SHIMADA Takashi¹, NOSOKO Takehiro¹, MIYARA Akio² and NAGATA Takashi¹

¹Dept. Mech. Systems Eng., Univ. Ryukyus, Nishihara, Okinawa 903-0213

²Dept. Mach. Eng., Saga Univ., Honjo-cho 1, Saga 840-8502

Surface waves with continuous wavefronts appear on a falling film when Reynolds number $Re < 40$, but the wavefronts split up in $Re > 40$. For the associated gas absorption, Sherwood number Sh increases in proportion to Re in $Re < 40$, and varies as Re to the power of about 0.5 in $40 < Re < 400$. The transition to the turbulent flow occurs in $400 < Re < 900$.

Key Words : Liquid Film, Mass Transfer, Surface Wave, Gas Absorption, Sherwood Number

1 緒言 空気冷却が可能な鉛直円管式の吸収器では、円管の内壁を液膜が流下する。Nosoko ら⁽¹⁾およびYoshimura ら⁽²⁾は、比較的低いレイノルズ数 Re の範囲において、液膜上流に周期擾乱を与えることにより二次元表面波を形成させ、その運動特性とガス吸収促進の関係を明らかにした。本研究では、乱流域に至るより広い Re の範囲における、ガス吸収特性と表面波の運動の関係を明らかにする。

2 実験装置および方法 水道水をヘッドタンクへ流入させ、シリコンチューブを経て、鉛直のガラス管(内径 $d=9.6\text{mm}$)へ流入させる(図 1)。スピーカでシリコンチューブに振動を与えて、チューブ内の流れに脈動を与え、それと同期した表面波を円管内に形成する。水道水は、円管内壁に沿って並べられた多数の毛細管を経て、円管内に液膜を形成し流下する。円管底部からの水道水の溶存酸素濃度 C_{out} と流量 Q が測定される。酸素 O_2 は、水中でバブリングした後、常圧で円管の下部から流入、流出する。また、流下液膜にストロボ光を当て、円管直後のスクリーン上の表面波の影を撮影した。物質伝達率 k_L は、以下の式によって求めた。

$$k_L = Q[\pi L_f(d-2\delta)]^{-1} \ln[(C_s - C_{in})(C_s - C_{out})^{-1}] \quad (1)$$

ここで、 L_f : 液膜高さ、 C_s : 飽和溶存酸素濃度、 C_{in} : 入口濃度である。液膜厚さ δ は、Nusselt の式($Re < 400$)および Brauer⁽³⁾の式($Re > 400$)より求めた。 C_s は吸収係数より算出した。レイノルズ数 Re 、シャーウッド数 Sh 、シュミット数 Sc は、次式で定義した。

$$Re = Q(\pi d \nu)^{-1}, \quad Sh = k_L \delta D^{-1}, \quad Sc = \nu D^{-1} \quad (2)$$

ここで、 ν : 動粘性係数 (m^2/s)、 D : 拡散係数 (m^2/s) である。異なる三つの L_f は約 0.37, 0.69, 1.11m で実験を行った。

3 実験結果および考察 図 2 に、表面波の写真を示す。 $Re=31$ で周期擾乱を与えない場合(以下 $f_{pd}=0$ と記す)は、液膜頂部からの平滑な表面の後(平滑表面領域の長さ $L_{sm}=60\sim 70\text{mm}$)、表面波が発生する(図 2-a)、流下とともに、波は傾き、曲がり、さらに、波間距離は不均一になる。像のコントラストの強弱より、水平な波は波高が高く、傾き曲がった波は低いことが分かる。周期擾乱(周期 $f_{pd}=9.1\text{Hz}$)を与えると、水平な前縁線の波(二次元波)が液膜の頂部から発生する(図 2-b)。

$Re=64$ で $f_{pd}=21.0\text{Hz}$ の場合は、波の前縁線が折れ、波の分裂が始まり、多数の不連続な凹凸に発達する(図 2-c)。波の分裂は $Re > 40$ から生じるようになる。 $Re=184$ 、 $f_{pd}=22.1\text{Hz}$ で

は、波の分裂が著しく、分裂後の凹凸の表面の占める領域が急激に広がる(図 2-d)。 $Re=520$ で $f_{pd}=0$ の場合は、液膜頂部からほぼ平滑な表面が生じ、下流方向距離 $x=0.16\text{m}$ で局所的に凹凸が発生し、流下とともにその数が増加し、全表面を凹凸が覆うようになる(図 2-e)。これは層流から乱流への遷移域の様子を示す。 $Re=926$ で $f_{pd}=0$ 場合は、 $x=0$ から多数の凹凸が発生し、全表面を凹凸が覆って流下する(図 2-f)。これは、完全に発達した乱流の様子を示す。

図 3 に、液膜高さ L_f 約 0.37m において、周期擾乱を与えた場合と与えない場合のシャーウッド数 Sh と Re の関係を示す。周期擾乱を与えた場合の本実験値は、 Re の全範囲で $f_{pd}=0$ かつ L_f が十分長い(すなわち、 L_{sm} の影響が無視できる)場合に適用可能な Bakopoulos⁽⁴⁾の実験式と同じ傾向を示す。しかし、 Sh の値は本実験値のほうが、約 20~30% 大きい。 $f_{pd}=0$ における本実験値は、 $10 < Re < 400$ の範囲で、 $f_{pd}=0$ かつ短い L_f の場合に適用可能な疋田ら⁽⁵⁾の式とほぼ一致する。 Re が 400 を超えると $ShSc^{0.5}$ の値が急激に上昇し、周期擾乱を与えた場合の $ShSc^{0.5}$ の値に近づき $Re > 900$ では一致する。すなわち、 $Re=400\sim 900$ は層流から乱流への遷移域であり、表面波の観察結果(図 2-e)と一致する。

図 4 に、周期擾乱を与えない場合(添字: 0)と与えた場合(添字: pd)のシャーウッド数の比 $(ShSc^{0.5})_0 / (ShSc^{0.5})_{pd}$ と表面波が生ずる領域の割合 $(L_f - L_{sm}) / L_f$ の関係を示す。表面波の生ずる領域 $(L_f - L_{sm})$ が増加すると、 Sh の比は大きな傾きでほぼ直線的に増加する。これは、表面波による吸収速度が著しく大きくなり、一方、平滑な表面の領域では、ガス吸収速度が小さいことを示す。従って、周期擾乱を与えることによる Sh の促進は、主として、平滑な表面の領域を消滅させ、 $x=0$ から表面波を発生させることによるものである。

図 5 に、周期擾乱を与えた場合の $ShSc^{0.5}$ と Re の関係について、 L_f の異なる三つの本実験式を示す。本実験式は、 Re の全範囲で、 L_f が大きくなると Sh は小さくなる。表面波の観察より、この Sh の減少は、表面波が流下とともに傾き、曲がり、波高が低くなること、さらに、波の合体により波数が減少することによるものと考えられる。特に、 $10 < Re < 40$ では $x > 0.7\text{m}$ で合体により波数が著しく少なくなるため、 $L_f=1.11\text{m}$ の場合と他の二つの L_f の場合との差が大きくなる。

4 結言 ①周期擾乱を与えた場合、 $\log Sh$ vs $\log Re$ の関係は三つの直線で表せる。 $Re \approx 40$ の直線の屈折は、波の分裂の発

生と関係し、 $Re \approx 400$ での屈折は、乱流遷移によるものである。②表面波が流下とともに傾き、曲がり、かつ合体により波数を減少させることにより、液膜高さ L_f が大きくなるとともに、 Sh は小さくなる。③周期擾乱を与えない場合、 $400 < Re < 900$ において乱流遷移が生じ、 Re の増加とともに Sh の値が急激に上昇する。④擾乱を与え $x=0$ から表面波を形成させることにより、 $Re \approx 400$ で Sh の最大の促進が得られる。
 謝辞：本研究は、文部省科学研究費(基盤研究C)および(財)東電記念科学技術研究所から研究助成を受けた。
 文献：(1)Nosoko, T. et al., *Chem. Eng. Sci.*, 51(1996), 725. (2)Yoshimura, P. N., et al., *Chem. Eng. Sci.*, 51(1996), 1231. (3)Brauer, H., *VDI-Forschungshett* 457(1956). (4)Bakopoulos, *Ger. Chem. Eng.* 3(1980), 241. (5)疋田, 化学工学論文集, 23(1959), 23.

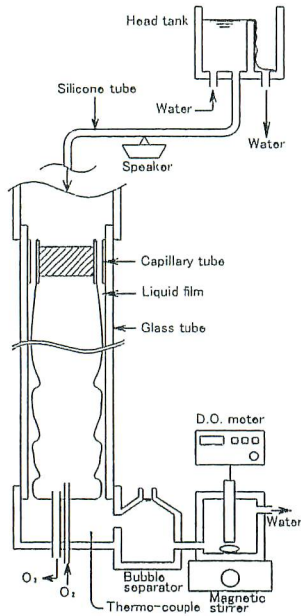


Fig. 1 Experimental apparatus

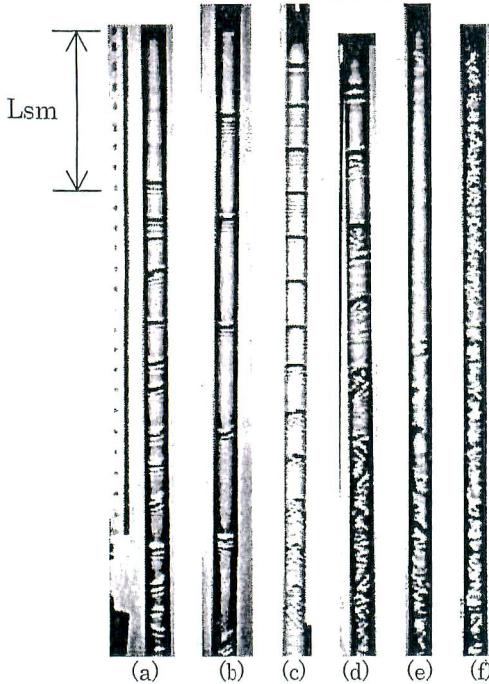


Fig. 2 Surface waves on falling films,

a: $Re=31.1$, $f_{pd}=0$, b: 31.0, 9.1Hz, c: 63.8, 21.0Hz, d: 184, 22.1Hz, e: 520, $f_{pd}=0$, f: 926, $f_{pd}=0$.

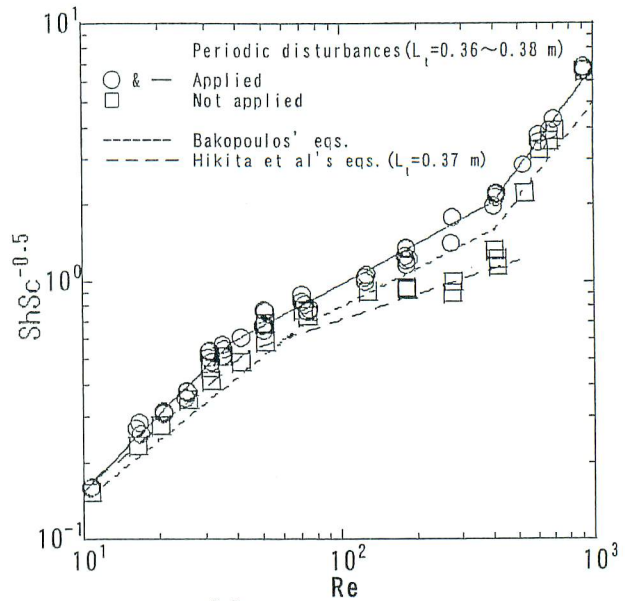


Fig. 3 $ShSc^{-0.5}$ vs. Re ($L_t=0.36 \sim 0.38$ m)

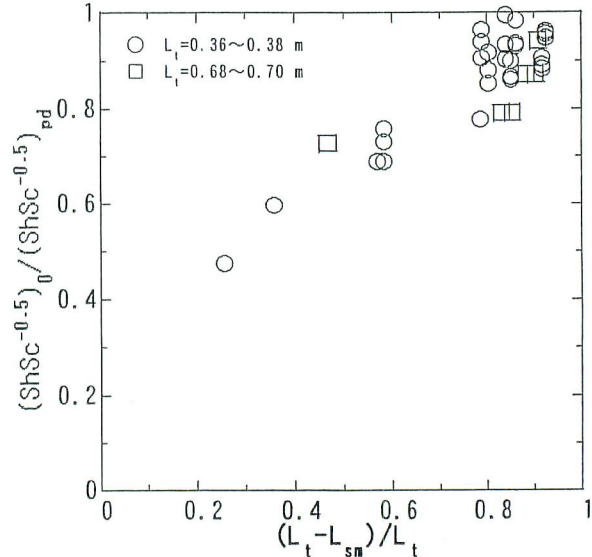


Fig. 4 Increase in Sh with decreasing L_{sm}

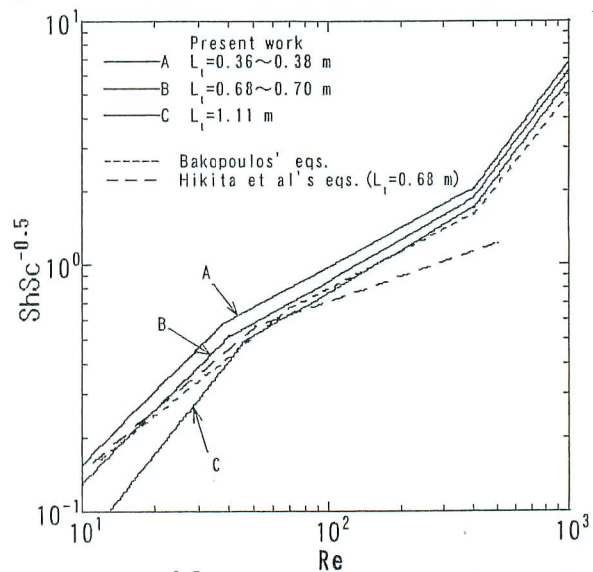


Fig. 5 $ShSc^{-0.5}$ vs. Re at various film heights