

## 論 文 要 旨

## Abstract

## 論 文 題 目

Title **Wave Dynamics on a Film Flow and Associated Mass Transfer**

Surface waves appearing on falling films cause severalfold increase in mass transfer from the surface into film. On log-log scale of the Sherwood number  $Sh$  and the Reynolds number  $Re$ , the  $Sh$  increases with  $Re$  rapidly at  $Re < 40$ ~75, gently at  $40$ ~75 <  $Re$  < 400, and rapidly again at  $Re > 400$ , showing two breaks at  $Re = 40$ ~75 and 400 on the  $Sh$ - $Re$  curve. Although the first break at  $Re = 40$ ~75 in the wavy laminar flow region observed by several researchers in the past, the mechanisms causing the break at  $Re = 40$ ~75 have not been understood. The latter break is known to be caused by the transition from wavy laminar to turbulent film flow, but the structures of the transition and of the turbulent film flow have not been observed. In this work, to find out these breaks and the structures of the turbulent film flow the wave dynamics and the associated gas absorption rates of naturally evolving and periodically triggered surface waves have experimentally been investigated with uniformly distributed water film falling inside circular tubes and on flat plates in the range of  $Re = 10$ ~1000.

In about 1 m or taller films, two empirical correlations between the  $Sh$  and  $Re$  at the ranges of  $Re < 40$  and  $Re = 40$ ~400 were constructed based on the measurement of mass transfer into falling film. The slopes on the  $Sh$ - $Re$  curve are approximately 1.1, 0.5 and 1.25 at  $Re < 40$ ,  $Re = 40$ ~400, and  $Re > 400$ , respectively. Waves covering a whole film of 0.4~1.0 m height increase in  $Sh$  up to 2.2~2.7 times the theoretical prediction for a smooth film at the laminar flow range. The amount of increase is larger in a taller film. The decrease in  $Sh$  due to the tube inclination from the vertical is more serious for a taller film with laminar flow. The periodic perturbations imposed on the inlet flow are most effective when these are applied to short films at  $Re=150$ ~600 where the smooth entry pass and the laminar developing entry region have large fractions of their lengths to the film height.

The evolution of two-dimensional solitary waves (hump-like large waves) into three-dimensional horseshoe-shaped waves is observed at  $Re > 40$ , where two-dimensional waves are unstable to perturbations of 2 cm spanwise wavelengths and rapidly increase transverse modulations of continuous wavefronts to develop into horseshoe-shaped waves and to partially disintegrate into clusters of dimples between the horseshoes. However, the wavefronts are continuous and the modulations are limited to low levels at  $Re < 40$ , indicating that the secondary instability causing the three-dimensional waves saturates at low degree. Horseshoes

of larger velocities have larger curvature heads, and extend longer oblique legs upward. The horseshoes hold vortices inside, and they have similarities in shape and size to hairpin vortices observed in laminar-turbulent transition regions of boundary layers on walls. The vortices in the humps renew the gas-absorbing film surface to significantly reduce the concentration boundary-layer thickness on the surface and to enhance gas absorption. The wave disintegrations into the horseshoes and dimples partially destroy or weaken the vortices in the humps and on long legs, resulting in the sharp decrease in slope of the  $Sh-Re$  curve. The wave disintegration is caused by a capillary instability similar to the one for breakup of a cylindrical liquid stream. Since the deepest valleys in front of the humps deepen to have large surface curvatures, the associated negative liquid-side pressure around such valleys results in new instability for dimples on horizontal wavefronts.

The transition from laminar to turbulent flow occurs in the films with decelerating inlet flow at the range of  $Re=400\sim 700$  where  $Sh$  sharply rises, suggesting that the laminar developing entry region rapidly shortens to nearly disappear, though the region had been observed only in film flow measurements. Periodic perturbations imposed on the inlet flow trigger tall humps close to the inlet, causing the laminar developing region to vanish and the critical  $Re$  to shift from 400 to about 300. In the turbulent film flow of  $Re>400\sim 700$ , turbulences are localized under large waves traveling on a thin substrate in which the flow is laminar otherwise.

**Keywords:** Falling film; Surface wave, Mass transfer, Flow transition, Turbulent flow





Name Park Chang-Dae

(様式第5-2)

2004年 8月 18日

琉球大学大学院  
理工学研究科長 殿

論文審査委員

主査 氏 名	野底武浩	
副査 氏 名	津嘉山正光	
副査 氏 名	親川兼勇	
副査 氏 名	屋我実	

### 学位（博士）論文審査及び最終試験の終了報告書

学位（博士）の申請に対し、学位論文の審査及び最終試験を終了したので、下記のとおり報告します。

記

申請者	専攻名 生産エネルギー工学 氏名 ChangDae Park 学籍番号 018604A		
指導教官名	野底武浩		
成績評価	学位論文 (合格) 不合格	最終試験 (合格) 不合格	
論文題目	Wave Dynamics on Film Flow and Associated Mass Transfer		
審査要旨 (2000字以内)	<p>鉛直あるいは傾斜面を流下する液膜は、ガス吸収器、気液反応器、蒸発・凝縮器など多くの工学機器で利用されている。液膜流れは、気液自由界面を有すること、および重力により駆動される点で、従来よく研究されている、ダクト内や物体外表面の壁面境界層流れと異なる特性を有する。液膜流れでは、表面波が支配的役割を果たすことが知られているが、その運動は著しく不規則であるため、液膜流れの特性及び表面波による物質伝達促進の特性はこれまで十分解明されていない。</p>		

(次頁へ続く)

本論文は、液膜流れと物質伝達の特徴を、層流から乱流域にかけての広い流量、すなわちレイノルズ数 $Re$ の範囲において、効果的に設計された実験手法を用いて明らかにしたものである。実験では液膜の入口部に一定周波数の擾乱を与えて、それに対応した規則的な波を発生させ、その波速と波長を測定するとともに、波の前縁線の形状を観察した。さらに、液膜によるガス吸収速度を測定し、物質伝達率とレイノルズ数 $Re$ の関係を求めた。得られた知見は、以下のようにまとめられる。

物質伝達率の測定によれば、層流から乱流への遷移は $Re=400$ 付近で生ずることが示された。また、層流域の $Re=40$ 付近で新たな遷移が観察された。液膜流は、Humpと呼ばれる液塊が薄い基底液膜上を流下する構造であり、Hump（液塊）すなわち表面波である。Humpの前縁では、狭くて深い溝が形成される。 $Re<40$ ではHump形状は二次元的であり、その前縁は水平な直線から大きくは変形しない。二次元のHumpは、効果的に物質伝達を促進し、伝達率の無次元数であるシャーウッド数 $Sh$ は、 $Re$ の1.1乗に比例して増加する。

$Re=40\sim 400$ では、Humpの前縁線は、大きく変形して馬蹄形状となり、幾つにも分裂する。馬蹄形状前縁のHumpの物質伝達促進効果は小さく、 $Sh$ は $Re$ の0.5乗に比例する。 $Re>400$ の乱流域では、Humpはより大きな液塊となり、鋸形状の前縁を有する。同時に前縁の深い溝部から多数の渦がHump中に放出され、Hump全体を乱流にし、Hump後尾の薄い基底液膜中で粘性作用のため小渦は消滅する。その結果、液膜中の乱流は、Hump内に局在化されたものとなり、壁面境界層の乱流と異なる特性を有する。Hump前縁の小渦の発生から消滅までの距離は、 $Re$ の増加とともに長くなり、液膜全体に占める乱流領域の割合は増加する。これらの小渦は物質伝達率を著しく促進し、 $Sh$ は $Re$ の1.25乗に比例して増加する。

さらに、乱流発生の機構についても明らかにした。Hump前縁の深い溝部では、溝の底部の大きな表面曲率と表面張力のため局所的に大きな負圧が生じ、流れの剥離が生じる。剥離の後流では、変曲点を有する不安定な速度分布の高剪断層が形成され、ケルビン-ヘルムホルツ不安定の結果、高剪断層が巻き上がり、小渦へと分裂する。それらの小渦は、Hump内で発達し、Humpと壁面との剪断応力を増大させる。

本研究の成果は、液膜流れの物理的解明において大きく寄与するものである。同時に、液膜を利用した多くの工学機器の設計の高性能化においても重要な知見となるものである。

最終試験では、論文提出者による博士論文内容についての発表が行われた後、質疑応答がなされた。各質問に対する応答は適切であったと判断される。

以上により、学位論文審査委員一同は、本論文は博士（工学）の学位論文として十分価値あるものと認める。また、本論文提出者 Chang Dae Park 君は最終試験に合格と認める。