レーザーフォーカス変位計による環状流液膜界面構造の計測*

(第1報, 測定精度と液膜発達特性)

波津久 達也^{*1}, 賞 雅 寛 而^{*1}, 松本 洋一郎^{*2}Measurement of Interfacial Structure on Liquid Film in Annular Flow
Using Laser Focus Displacement Meter

(1st Report, Measurement Accuracy and Axial Development of Liquid Film)

Tatsuya HAZUKU^{*3}, Tomoji TAKAMASA and Yoichiro MATSUMOTO^{*3} Faculty of Marine Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology,
Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

Accurate measurements of interfacial wave structure of upward annular two-phase flow in a vertical pipe were performed using a laser focus displacement meter (LFD). The purpose of this study was to clarify the effectiveness of the LFD for obtaining detailed information concerning the interfacial structure of a liquid film in annular two-phase flow and to investigate the effect of axial length on the phenomena. We made simultaneous measurements of the liquid film interface in an acrylic rectangular pipe with 3 mm width using LFD and high-speed video camera to check the measuring accuracy of the LFD. These showed that the LFD could measure the interface of liquid film with high spatial and temporal resolution in various flow conditions. Adiabatic upward annular air-water flow experiments were conducted using a 3 m-long, 11 mm-ID pipe. Measurements of interfacial wave were conducted at 21 axial locations. The axial distances from the inlet (L) normalized by the pipe diameter (D) varied $L/D=50-250$. The results revealed that the maximum film thickness decreased gradually with some oscillations as flow developed. The flow development, i.e. decreasing of film thickness, existed till the pipe exit which means that the flow might never reach a fully developed condition.

Key Words: Flow Measurement, Laser-aided Diagnostics, Laser Focus Displacement Meter, Interface, Film Thickness, Axial Development, Annular Two-phase Flow

1. はじめに

気液二相流の環状流, 環状噴霧流は多くの熱交換機器類に見られる流動であり, 沸騰伝熱系における基本的な流れの構成を特徴づけている。環状流液膜の流動特性, 特に気液界面の波動現象は, 熱・物質伝達率の増大に寄与する反面, その波動特性や熱的特性によっては液膜の破断が生じて, 装置の安全運転や効率などに重要な影響を与えるという二面性を有していることから, その時空間変動特性を精度良く予測することが, 機器の設計上極めて重要である。

環状流液膜の界面は, 流路条件や軸方向の流れの発達によって大きく変化するが, 現在の二相流解析コードに適用されているモデルは, 定常完全発達流れに対する準静的な界面構造予測手法が採用されているため, 時空間スケールを考慮した界面構造の変動特性を模擬できない。このような状況を打開する手段として, 近

年, 界面積濃度輸送方程式^①を既存モデルと併用し, モデルの拡張・高精度化を図ろうとする試みがなされており, そのためには, 精度の高い局所流れ場の界面構造データを, 特に流れの発達方向に整理していく必要がある。また数値解析手法の高度化によって, 二相流特性のかなりの部分を数値計算によって予測することが可能となったが, それとともに, 二相流現象の局所特性や時間依存特性の実験データが求められるようになった。すなわち, 優れた時空間分解能を有し, かつ, 非接触による信頼性の高い計測を保証する計測手法の開発が望まれている。

液膜の流動特性を評価するため, 多くの研究者が X線撮影^{②, ③}及びレーザー誘起蛍光法^④をはじめとした高速度可視化技術を用いてきた。これらの方法は, 液膜流動の時空間領域でのマクロな情報の計測に対しては有効であるが, 瞬時の局所流動特性を定量的に計測することはできない。これは, 壁面及び気液界面における反射と屈折が実際の界面変位計測の空間精度を低下させるためである。また液膜の界面構造を計測する手法として, これまでに触針法, 電気抵抗法, 静電容量

* 原稿受付 2004 年 8 月 9 日。

^{*1} 正員, 東京海洋大学海洋工学部(〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)。^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。

E-mail: hazuku@e.kaiyodai.ac.jp

法, さらに近年では三角測量方式のレーザー変位計⁹⁾や, 超音波計測法¹⁰⁾などが用いられているが, これらの手法にはそれぞれに電極を流動部に挿入するため流れを乱す, 液膜の厚さを電極間の空間平均量としてとらえるために実界面の諸情報を正確に計測することができない, 界面が平滑でないと計測誤差を生じるなど, 空間分解能と適用性の面でそれぞれに原理的短所を有している. 特に液膜の破断機構と密接に関わるマイクロオーダーの極薄い液膜の局所変動や, 細かい波の挙動は正確に入手できず, さらに多くの場合, センサーをテスト部に固定しなければならないため, 液膜の界面構造を軸方向の限られた空間でかつモデル化等に要求されるスケールに対して巨視的に整理せざるを得ない状況にある.

一方, 元来 IC などの表面の細かな傷などを検出するために開発されたレーザーフォーカス変位計 (Laser Focus Displacement Meter, 以下 LFD) は, その原理上薄い液膜上の大きな曲率を持った微細な波を, 非接触で計測できる. 著者らは LFD を応用した液膜計測手法を提案し, 鉛直平板および円管内壁面を流下する液膜⁷⁾と, マイクロチャンネル内に形成する液膜¹⁰⁾の界面変位の計測に適用してその有効性を明らかにした.

本研究では, LFD を用いて垂直円管内上昇環状流の液膜厚さの計測を試みた. 本研究の目的は, LFD の環状流液膜界面構造の高時空間分解能計測手法としての有効性を確認すること, また垂直管上昇環状流の局所液膜厚さを管軸方向の複数点で計測し, これまで厳密に評価されてなかった環状流液膜の発達特性を実験的に明らかにすることである.

Fig. 1 Principle of laser focus displacement meter

おもな記号

D	: 管内径	m
j	: 見かけ流速	m/s
L	: 助走距離	m
L_e	: 準平衡距離	m
Re	: レイノルズ数 $= \rho D j / \mu$	—
We	: ウェーバー数 $= (\Delta \rho / \rho_0)^{1/3} \rho_0 j^2 D / \sigma$	—
δ	: 液膜厚さ	m
$\bar{\delta}$	: 平均液膜厚さ	m
ν	: 動粘性係数	m ² /s
ρ	: 密度	kg/m ³
σ	: 表面張力	N/m
τ	: せん断力	N/m ²

添え字

f, g	: 液相, 気相
i, w	: 界面, 壁面
m	: 計測値

2 環状流液膜厚さの計測精度

図1に LFD (キーエンス社製 LT8100) の計測原理の概念を示す⁷⁾. LFD では, 音叉により往復運動する対物レンズを通過する円錐状のレーザー光が, 対象物上で焦点を結ぶ時の対物レンズの位置を検知することにより, 対象物の変位を計測する. LFD の空間分解能は 0.2 μm であり, 時間分解能は約 1 kHz である. 円管内壁面上に形成する液膜の界面変位は, 透明壁外側よりこの LFD により計測される. 円錐状に入射する LFD のレーザー光は, 透明壁を通過し液膜界面上で焦点を結び, その散乱反射光が LFD 内の受光素子に入光する. ここで, 管円周方向から入射するレーザー光と管軸方向より入射するレーザー光は, 管の曲率の影響により同一点で焦点を結ぶことができない. この焦点の拡散によって, 受光素子に入光する散乱反射光が検知レベルよりも小さくなり, 通常の円管の形状では管路内の液膜界面位置を計測することができなくなるが, 管外壁面を平滑にすることにより, 界面上の焦点からの散乱反射光が LFD の検知レベルを超え, 液膜界面位置の計測が可能になることが, 著者らのこれまでの研究により明らかにされている⁹⁾. また LFD は, 管壁と作動流体が透明であれば, それぞれの性状を問わず, 各媒体を通過するレーザー光の光路を理論的に予測することで, 液膜厚さを正確に計測できるが, 例えば管外壁面が平滑であるアクリル管内の水液膜を対象とした場合, 液膜厚さの屈折による誤差の補正式は式(1)となる⁹⁾.

$$\delta = \left(1.33 + 0.356 \frac{\delta_m}{D} \right) \delta_m \quad (1)$$

δ は液膜厚さ、 δ_m はLFDの計測値、 D は管内径である。この式は $D = 10 - 30 \text{ mm}$ 、 $\delta = 2.4 \text{ mm}$ 以内の計測において、液膜厚さを1%以内の誤差で算出できる。なお、ガラス管や油などを用いた場合にそれぞれの物性値を理論式⁹⁾に代入することにより(1)式と同様に補正式を導出できる。

最初に、界面傾斜に対する計測限界を評価する。LFDは原理上、対象物表面の形状や傾きによらず、焦点位置を検出できるが、対象物の傾きが増加すると受光量が減衰するため、ある傾きを越えた時点で焦点位置を検出できなくなる。表面の傾きに対する計測限界は対象物の反射率によって変化すると考えられるが、ここでは実際の液膜を想定し、透明ガラス製円柱(直径5 mm)の外形を対象とした。透明円柱の上部にLFDを設置し、円柱の頂点から径方向に75 μm の間隔でLFDを移動して、各傾斜位置における円柱外表面の高さ位置を計測した。その結果、傾斜角の増加に従い受光量は徐々に減衰するが、傾斜角30°までは精度良く円柱の外表面位置を検出できた。傾斜角が33°を超えると受光量が検知レベルを下回り、検出不可能となったことから、透明体を対象にした場合のLFDの傾斜に対する計測限界は約30°と評価される。

次に、幅3 mmのアクリル製狭隙矩形管内を流下する液膜の二次元界面波を対象に、画像解析により得ら

Fig. 2 Comparison between the data of film thickness measured by LFD and image-processing method ($j_g = 8.3 \text{ m/s}$, $Re_f = 600$)

Fig. 3 Comparison between the data of film thickness measured by LFD and image-processing method ($j_g = 22 \text{ m/s}$, $Re_f = 600$)

れる界面波動の情報と、LFDによる計測値を比較する。図2, 3に、高速度ビデオカメラにより撮影された液膜流動状況の画像とLFDにより計測された液膜厚さの時間変動波形を示す。図中の○印は、画像処理により得られた液膜厚さの値である。

図2に示されるように、液膜の界面には振幅0.3 mm以下となるリップル波が形成していることがわかる。これらの波の通過頻度は約90 [1/s]、波速度は1.0 - 1.3 m/s、波間距離は7 - 15 mmであるが、このような微小な波動を有する液膜に対してもLFDは液膜厚さを良く検知できている。例えば従来の電極式計測法では、液膜界面の変動が電極間(約5 mm)の感度領域内で平均化されてしまうため、このような微小な波動は捉えきれない。気相流量をさらに増加させると液膜界面の変動は激しくなり、波高が0.5 - 1 mmに達する孤立波を形成するようになる(図3)。これらの孤立波の前端部は、界面傾斜が大きくロールウェーブに近い形状となっており、それぞれの波の前後に厚さが0.1 mm以下となる極薄い液膜を形成している。このように液膜厚さが時空間的に急変する流動条件においてもLFDは実際の流動を良く捉えることができている。従来の計測手法では正確に計測できなかった波の最小部の厚さを精度良く計測できている。

図4はLFDで計測された液膜厚さと画像処理により得られた液膜厚さの計測差を示している。両者の差は最大で0.15 mmであるが、画像処理における誤差(分解能が低いことおよびメニスカスの影響や二次元

Fig. 4 Error estimation of film thickness measured by LFD and image-processing method

波がくずれることにより生じる誤差)を踏まえると、両者は良好な一致を示しているといえる。以上のように、時空間的に急変を伴う実際の液膜に対しても、LFD では従来の計測手法では計測できなかった界面の微小な波動や 0.1 mm 以下となる極薄い液膜の厚さを精度良く計測できることが確認された。

3. 垂直管上昇環状流液膜の発達特性

3.1 実験装置 図 5 は本研究で使用した空気-水系垂直管環状流ループの概略図である。計測部は長さ 3 m、内径 11 mm のアクリル管でできており、管路形状による乱れの影響を無くすため管の継ぎ目が無い構造となっている。空気は圧縮機で加圧され、水分、

Fig. 5 Annular two-phase flow loop

油分等を除去後、液膜発生器下部より供給される。タンク内の水は純水器により電気伝導度 $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下、また水温 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に調整される。タンクより液膜発生器に流入した水は、管内面に一様な液膜となり、空気と共に管内を上昇する。液膜と界面から離脱する液滴は計測管を通過後、液膜回収器、液滴回収器でそれぞれ回収され再びタンクに戻る。

実験は気相レイノルズ数 $Re_g = 31,800 - 98,300$ 、液相レイノルズ数 $Re_l = 1,050 - 9,430$ の範囲で行い、LFD による液膜厚さの計測は液膜発生器からの距離 $L = 550 - 2,750 \text{ mm}$ の範囲において 110 mm の間隔 (計 21 箇所) で実施した。また、液膜の波形は 2,000 コマ毎秒の高速ビデオカメラによって同時に観察された。

3.2 実験結果および考察 図 6 に、高速ビデオで撮影した垂直管上昇環状流の画像と LFD で計測した液膜厚さの時間変動波形を示す。植田らや深野らが示している流動モデルと同様に、リップル波が存在する基底液膜とその上を擾乱波が通過する波動層が形成している^(11,12)。ビデオ画像において擾乱波の界面は明確に写っていないが、擾乱波通過時と LFD の波形は対応していることがわかる。また画像からは擾乱波通過後の液膜内に気泡が混入しているのが観察された。こうした基底液膜内の気泡からドライアウトや DNB (Departure from Nucleate Boiling, 核沸騰限界) が発達していく場合があることが知られており、気泡の位置関係を示す情報も重要となる。触針法や電極法ではこのような基底液膜内気泡の挙動は捉えられないが、LFD では壁面と気泡間の距離として与えることになる。

図 7 は気液混合器からの距離 $L = 550, 1,650, 2,750 \text{ mm}$ における液膜厚さの時間変動波形の一例を示して

Fig. 6 Video images of interfacial waves and film thickness trace measured by LFD

いる。なお、同時計測ではないので、各図の時間軸は対応していない。図から助走距離の増加に伴って液膜厚さが次第に減少していく様子がわかる。これは、管軸方向の圧力降下によって気相の相対速度が上昇し、気液界面のせん断力が増加するためであると考えられる。また、特に気相流量の少ない条件 ($Re_g = 46,400$) では、振幅の大きい擾乱波と考えられる波の通過頻度が、助走距離の増加に伴って減少している傾向があるが、これは軸方向の発達過程で波の合体もしくは消滅が生じていることを示している。

次に液膜厚さの軸方向発達特性について検討した。一般に環状噴霧流領域では、気相からの強いせん断力を受け液膜界面から液滴を発生し、軸方向に沿って液滴量を増加させながら上昇する。気相に同伴された液滴は気相乱流中の拡散によって、一部は液膜に伝達されることになり、やがて液滴発生量と平衡して一定の液滴流量となる、すなわち完全発達域に達するとされている。環状流の伝熱特性、液膜流動に関する従前の研究報告のほとんどは、この完全発達域という概念の基に整理されている。断熱系においても平衡距離については多くの研究報告がなされており、その代表例として Katooka-Ishii の式がある。彼らは準平衡状態に到達する距離 L_e を、Weber 数 We と液相レイノルズ数 Re_l により次式で与えている⁽³⁾。

$$L_e \cong 440 \cdot D \cdot We^{0.25} / Re_l^{0.5} \quad (2)$$

$$We \equiv \frac{\rho_g j_b^2 D}{\sigma} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_g} \right)^{1/3}, \quad Re_l \equiv \frac{j_l D}{\nu_l}$$

ここで、 ρ_g 、 j_b 、 j_l 、 σ 、 $\Delta \rho$ はそれぞれ気相密度、気相の見かけ速度、液相の見かけ速度、表面張力、気液の密

度差を示している。本実験において $L = 2,750 \text{ mm}$ における気液両相の状態量を(2)式に代入し、得られる平衡距離は、全ての流量条件で $L = 550 - 2,750 \text{ mm}$ の範囲内となる。

図 8 は本実験における界面せん断力 τ_i の助走距離に対する変化を示した図である。ここで界面せん断力 τ_i は、流れが定常でかつ気相中に液滴が無いものと仮定すると、力の平衡から次式で与えられる。

$$\tau_i = \frac{D_i}{4} \left(\frac{dp_g}{dz} \right)_F, \quad D_i = D - 2\bar{\delta} \quad (3)$$

$(dp/dz)_F$ は気相の摩擦損失であり、圧力の実測値と平均液膜厚さ $\bar{\delta}$ から求められる。図からわかるように、界面せん断力は助走距離の増加に伴って一様に増加している。これは、軸方向の圧力損失勾配のために下流では気相密度 ρ_g が小さくなり、従って気液の相対速度が大きくなるためである。液膜の流動すなわち液膜厚さと液滴の発生は界面せん断力と密接な関係があるため、これらの結果から、管軸方向の密度変化を無視できない低圧領域の環状流では定常状態を定義することは難しいということが言える。

次に LFD により得られた液膜厚さの時間変動波形から最大、平均、最小液膜厚さの軸方向変化を整理する。図 9, 10 は助走距離に対する最大、平均、最小液膜厚さの変化を流量条件ごとに示したものであり、LFD により得られる液膜厚さの存在確率が 99 % となる値を最大液膜厚さ(Max)、50 % を平均液膜厚さ(Ave)、1 % を最小液膜厚さ(Min)としてそれぞれ与えている。最大液膜厚さに着目すると、液相流量毎に異なった特性の増減を繰り返しながら、助走距離の増加に伴

Fig. 7 Typical film thickness traces in annular flow

Fig. 8 Interfacial shear stress

って次第に減少していく様子がわかる。(2)式で与えられる平衡状態距離 ($L = 400 - 800$ mm) を超えても液膜の変化は止らない。この増減を伴いながら厚さが減少するという現象は、気相に対する液相流量比が大きいほど顕著に現れている。一方、最小液膜厚さは助走距離と気相流量の増加に対し減少傾向にあるがその変化は微小であり、平均液膜厚さの変化は最大液膜厚さの変化に依存している。

ここで、全ての計測点および気液流量条件における界面せん断力を図 11 に示す。図には次式で与えられる単相流の層流速度分布と Kármán の一般速度分布から算出した平均液膜厚さを同時に記した。

$$\text{【層流】 } Re_f = -\frac{3}{4}(\bar{\delta}^*)^3 + 2\tau_i^*(\bar{\delta}^*)^2 \quad (4)$$

$$\bar{\delta}^* = \bar{\delta} \left(\frac{g}{\nu_f^2} \right)^{1/3}, \quad \tau_i^* = -\frac{\tau_i}{\rho_f g} \left(\frac{g}{\nu_f^2} \right)^{1/3}$$

【一般速度分布】

$$\begin{aligned} Re_f &= 2(\bar{\delta}^*)^2 & : \bar{\delta}^* \leq 5 \\ Re_f &= 50 - 32.2\bar{\delta}^* + 20\bar{\delta}^* \ln \bar{\delta}^* & : \bar{\delta}^* \leq 30 \\ Re_f &= -256 + 12\bar{\delta}^* + 10\bar{\delta}^* \ln \bar{\delta}^* & : \bar{\delta}^* > 30 \end{aligned} \quad (5)$$

$$(\bar{\delta}^*)^2 = \tau_i^*(\bar{\delta}^*)^2 - (\bar{\delta}^*)^3$$

図から、平均液膜厚さは界面せん断力の増加に伴って減少していることがわかる。実験値は一般速度分布と層流の解の中間にあるが、界面せん断力に対する平均液膜厚さの勾配は、液流量が多い条件では一般速度分布の解と良く一致している。液流量の低い条件では、界面せん断力の低いところで層流の解に近づくが、界面せん断力の増加に対する厚さの勾配は、液相流量の減少に伴い次第に緩やかになり、乱流条件の場合とは

Fig. 9 Axial change of film thickness in annular flow ($Re_g = 31,800$)

Fig. 10 Axial change of film thickness in annular flow ($Re_g = 73,700$)

Fig. 11 Average film thickness in annular flow

異なる特性を示す。このように環状流液膜の流動には助走距離の増加に対して定常となることはなく、管軸方向の界面せん断力の増加に従って液膜厚さが一様に減少することがわかる。

4. 結 論

本研究では、LFD を用いて垂直円管上昇環状流の液膜厚さの計測を試みた。本研究の目的は、LFD の環状流液膜界面構造の高時間分解能計測法としての有効性を確認すること、また垂直管上昇環状流の局所液膜厚さを管軸方向の複数点で計測し、これまで厳密に評価されてなかった環状流液膜の発達特性を実験的に明らかにすることである。得られた結果は以下のようまとめられる。

(1) 液膜界面の時空間変動特性に対するLFDの計測精度

を確認するため、狭隘矩形管内に形成する二次元液膜波を高速度ビデオカメラとLFDにより同時計測した結果、時空間的に急変を伴う実際の液膜に対しても、LFDでは従来の計測手法では計測できなかった界面の微小な波動や0.1 mm以下となる極薄い液膜厚さを精度良く計測できることが確認された。

- (2) 垂直円管上昇環状流の液膜厚さは助走距離の増加に伴い減少する。これは、軸方向圧力損失勾配のために下流では気相密度が小さくなり、従って気液の相対速度が大きくなるためである。液膜の流動すなわち液膜厚さと液滴の発生は界面せん断力と密接な関係があるため、これらの結果から、管軸方向の密度変化を無視できない低圧領域の環状流では定常状態を定義することは難しいということが言える。また、最大液膜厚さは、流量条件ごとに異なった特性の増減を繰り返しながら、助走距離の増加に従って次第に減少していく。

終わりに、本研究を遂行するにあたり、多くのご助言を頂いた東京大学大学院工学系研究科の高木周助教授に感謝の意を表す。また本研究の費用の一部は平成16年度日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究(B) 研究課題番号 16760653）によるものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 (1995), 481-493.
- (2) Ohba, K., Nakamura, K., and Naimi, F., *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow '95-Kyoto (ICMF'95)*, IP1 (1995) 27-33.
- (3) Clark, W. W., Hills, J. H., and Azzopardi, B. J., *Proc. of Two-Phase Flow Modeling and Experimentation 1999*, (1999) 1440-1453.
- (4) Hewitt, G. F. et al, *PCH Physico-Chem. Hydrodynamics*, 6-1/2 (1985) 69-86.
- (5) Serizawa, A., et al, *Proc. of the 4th Int. Topical Meeting on Nucl. Thermal-Hydraulics, Operations and Safety*, 42-C-1-42-C-5 (1994).
- (6) Serizawa, A., et al, *Proc. of 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow*, 6 (1995) 27-34.
- (7) 賞雅寛而・波津久達也, 機論, 64-617, B (1998), 128-135.
- (8) 賞雅寛而・波津久達也, 機論, 64-619, B (1998), 775-780.
- (9) 賞雅寛而・小林健次, 機論, 64-628, B (1998), 4023-4030.
- (10) 波津久達也・他3名, 機論, 70-694, B (2004), 1481-1488.
- (11) 植田辰洋・能勢士郎, 機論, 39-325 (1973), 2853-2862.
- (12) 深野徹・他3名, 機論, 48-436B (1982), 2589-2598.
- (13) Kataoka, I. and Ishii, M., *Argonne National Laboratory Report, NUREG/CR-2885* (1982), ANL-82-44.