

レーザーフォーカス変位計による  
液膜界面構造発達特性の測定

平成14年12月

波津久 達也

# 目次

第1章 序論	1
1. 1 研究の意義と方向性	1
1. 1. 1 研究の背景	1
1. 1. 2 本論文の目的	5
1. 2 論文の概要	9
1. 2. 1 論文の構成	9
1. 2. 2 実験の概要	9
1. 3 記号	13
第2章 レーザーフォーカス変位計(LFD)による 液膜流動特性の計測	16
2. 1 緒言	16
2. 2 LFD の測定原理、特徴および利点	17
2. 2. 1 LFD の測定原理	17
2. 2. 2 LFD の特徴および利点	17
2. 3 LFD の時空間分解能	21
2. 4 LFD による液膜厚さの測定方法と精度の検証	29
2. 4. 1 LFD による液膜厚さの測定方法	29
2. 4. 2 平板上に形成する液膜の測定	32
2. 4. 3 円管内に形成する液膜の測定	43
2. 4. 4 画像処理法との比較による測定精度の検証	51
2. 5 結言	59
第3章 実験 I 流下液膜の発達特性	61
3. 1 緒言 I	61
3. 2 平板流下液膜の発達特性	62
3. 2. 1 平板流下液膜実験装置・実験条件	62
3. 2. 2 平板流下液膜実験結果・考察	68

3. 3	円管内流下液膜の発達特性	98
3. 3. 1	円管内流下液膜実験装置・実験条件	98
3. 3. 2	円管内流下液膜実験結果・考察	101
3. 4	結言 I	112
<b>第4章 実験 II 垂直管上昇環状流液膜の発達特性</b>		<b>114</b>
4. 1	緒言 II	114
4. 2	環状流実験装置・実験条件	115
4. 3	環状流実験結果・考察	122
4. 3. 1	環状流液膜の発達特性	122
4. 3. 2	最小液膜厚さの特性	128
4. 4	結言 II	153
<b>第5章 結論</b>		<b>154</b>
5. 1	LFD による液膜流動特性の計測	154
5. 2	実験 I 流下液膜の発達特性	155
5. 3	実験 II 垂直管上昇環状流液膜の発達特性	156
謝辞		158
参考文献		159
APPENDIX A 従来の液膜流計測方法		164
APPENDIX B 環状流液膜の界面面積濃度発達特性		173

# 第1章 序論

## 1.1 研究の意義と方向性

### 1.1.1 研究の背景

原子炉、ボイラーをはじめとした各種エネルギープラントにおける最も重要な技術課題は、安全性の向上や高効率化といった性能面の向上と、それに対してプラント建設コストや運転コストの低減により経済性の向上を図るという相対する要求を同時に満足していくことである。例えば原子力分野では、原子炉想定事故やシビアアクシデント時の炉心熱流動特性を評価する安全解析精度の向上、熱的限界出力の増大、高性能燃料集合体の開発などが課題として挙げられる。また火力発電用ボイラーなどの化石燃料機関においては、環境負荷低減や発電単価の低減に対する要求を背景として、熱効率・運転効率の向上、設計裕度の縮小による建設コストの低減が求められているが、特にボイラーの心臓部となる火炉は、プラントに占めるコスト比率が高いこと、その性能が燃焼効率や環境値に直接関係すること、また熱的に非常に過酷な環境に曝されるためプラント寿命が材料選定と構造計画に大きく影響することから、その設計をいかにシンプルかつ高精度なものにするかが課題となっている。このような課題を克服しプラントの極限設計を達成させるためには、特に本体熱流動部の設計評価基準とそれを正しく与えるための数値モデルの高精度化が必要となる。そのために、これらプラントの熱交換媒体として扱われる気液二相流について、その流動メカニズムを詳細に見積もろうとする解析的、実験的研究が従来から盛んに行われている。

気液二相流の研究は、例えば原子炉における炉心燃料集合体サブチャンネル解析、軽水炉 LOCA 解析や高速炉の炉心損傷事故を想定したときの安全解析等を対象にした熱水力安全解析コードの開発とともに発展してきた。研究の初期には気液等速を仮定した均質流モデルによる準定常計算が用いられてきたが、相間の速度差を考慮したスリップモデルやドリフトフラックスモデルによる大規模な過渡解析に進展した。その後、気体と液体の質量、運動量およびエネルギーの保存を個別に考慮する二流体モデルの基礎理論が確立され、特に 1980 年以降は TRAC コードおよび RELAP5 コードに代表される二流体モデルによる気液二相流解析技術が発達した。現在も二流体モデルは、最も一般的な気液二相流解析モデルと見なされている。二流体モデルの開発は比較的マクロな時空間スケ

ールに基づく 1 次元モデルから始まったが、コンピュータの演算処理量や記憶容量の急激な増大に伴い、熱流動現象モデルの更なる高度化を目指して、現在では多次元化や多流体化へのアプローチがなされている。二流体モデルの最大の利点は、系の規模を問わず複雑な熱と流動の現象を少数の未知変数で評価できる点にあるが、ここで気液間の熱力学的相互作用に関するモデルは理論と実験に基づく構成方程式により与えられなければならない。特にこのような多次元モデルでは気液界面の幾何学的構造をより詳細に捉えて相互作用モデルを構築する必要があり、その難解な構成方程式をいかに体系化していくかが今後の二相流研究において重要な課題となっている。また現在の解析コードは、主に定常完全発達流れに対する流動様式線図と各流動様式に応じた界面面積濃度の構成式に依存する静的な界面構造予測手法が採用されている。しかしながら、二相流の界面構造は流路条件(例えば入口・出口流路形状、気液混合条件)および軸方向の発達によって鋭敏に変化する。この軸方向の成達は、主として気液間の運動量、質量およびエネルギー交換を司る界面構造が平衡にならないことに起因しているが、特に垂直管においては管摩擦による圧力降下と静圧差があることから、管軸方向に気相の密度変化が生じ流動状態が常に変化するため、定常発達流れを仮定した界面構造の取扱いには限界がある。つまり、既存の二流体モデルに適用されている界面構造予測手法では、過渡的な流れ、未発達流れが適切に表現できない。そこで、このような状況を打開する手段として界面面積濃度の輸送方程式を二流体モデルと併用する手法が提案されている [Kocamustafaogulli & Ishii, 1995]。界面面積濃度は軸方向の発達に対する気液界面の幾何学的構造を縮約する変数となり、気液間の相互作用量は界面面積濃度に比例する。したがって、信頼性の高い界面面積輸送方程式を構築することができれば、時間および空間スケールを考慮した動的な界面面積濃度予測を可能にし、境界条件の影響や流れの発達過程を効率的にモデル化できる。そのため、界面輸送方程式の導入は、従来の熱水力安全解析コードの予測能力を飛躍的に高める技術として注目され、さらに高精度で適用性の高い界面面積濃度輸送方程式を確立すべく、実験的、解析的研究が勢力的に行われている。界面面積濃度輸送方程式の開発には、各種流動条件、流路体系下における界面構造変化を物理メカニズムに基づいて機構論的にモデル化する必要があるが、それには軸方向全域に渡る気液界面構造を高精度に捉えてデータベースを整備することが必要となる。しかし、これまで提案されているモデルはボイド率が低い領域である気泡流およびスラグ流を対象としており、界面輸送問題を完結するためにはさらに広範な流動条

件、流路環境下における精度の高い局所流れ場のデータベースの構築と、現象の理解に基づくモデル化が必要になる。特に沸騰伝熱様式で大半を占める環状流から噴霧流領域は、他の流動様式と比較して熱伝達率が高く、またドライアウトやバーンアウトといった伝熱管損傷をもたらす流動条件への遷移過程にあるため、その時空間変化特性を整理し界面構造の発達特性をモデル化することは、冒頭にも述べたプラント本体設計における技術課題(安全解析精度の向上、限界設計による高性能化・低コスト化)を解決していく上で極めて重要である。しかしながらそのモデル開発は現状では進展を見せていない。

環状流、環状噴霧流領域は高気液流束のために摩擦損失が大きく、先に述べたような理由から平衡状態となることはない。従って定常流動を基にして作られている既存モデルの拡張・高精度化のためには、環状流液膜の流動発達特性、すなわち軸方向全域に渡る液膜厚さおよび界面波の時空間変動特性を詳細かつ高精度に捉えることが不可欠となる。特に液膜破断条件と密接に関係する局所液膜厚さや、波の合体・分裂、液滴飛散にともなう気液界面性状の変化については、より厳密に評価する必要があるが、どこまでこれらの諸物理値を微視的に扱えるかという問題については、液膜厚さおよび界面波の計測機器性能に依存するところが大きい。液膜の界面には常に表面張力やせん断応力、気液成分内の圧力および乱流速度成分等に起因する振動や複雑な波動を生じる。また前述のように、これら液膜流動の支配因子が流れの発達によって常に変化するため、運動量変化を伴わない等温系、あるいは界面にせん断応力が働かない流下液膜においてもかなり複雑な流動形態になり、その物理値の全てを知ることは難しい。こうした液膜特性に関する研究はその流路における液膜厚さや熱伝達率、圧力損失を知ることを目的に、時空間平均値としてマクロに整理することから始まっている。特に平均液膜厚さと液膜流量の関係については数多くの解析結果が示されており、実験値との比較も行われている[Hewitt & Hall, 1970; 植田・能勢, 1973]。これらの測定はほとんどが締め切り法(実験区間への液体の出入りを同時に停止し実験区間残留した量を測定する)[Friedman & Miller, 1941]か、写真撮影法(液膜の輪郭写真によって厚さを求める)[Brauer, 1956]によって整理されており、各研究者のデータは良く一致している。しかしこれらのマクロな実験モデルから得られる情報には限界がきており一つの研究ステップとして終了したといえよう。そこで液膜の厚さの時空間的変動や分布をより詳しく知るため、触針法[石谷・他3名, 1971; Sekoguchi et al., 1985]、静電容量法[Dukler & Bergelin, 1952; 関根・熊田, 1990]、定電流法[深野, 1971; Fukano, 1998]をはじめとした電気回路による手法が一般的に用いられるようになった。ま

た最近ではエレクトロニクスの急速な発展に伴って、三角測量方式のレーザー変位計 [Serizawa et al., 1994]、超音波エコー法 [Banerjee & Lahey, 1980; Kamei & Serizawa, 1998] による方法が試みられている。これらの測定技術の開発により、液膜界面波の形状や速度などの特性がある程度予測することが可能になったが、時空間分解能や適用性等の点でそれぞれに次に示すような短所を有している (Table 1.1、詳細は APPENDIX A 参照)。触針法は電極を流動部に直接挿入するため流れを乱し、また触針先端に接する液膜が表面張力の影響で盛り上がることから 0.3 mm 前後の厚さの識別が困難となり、細かい波の波高や極薄い液膜の厚さを正確に測定することができないという欠点がある。静電容量法や定電流法は、時間分解能は高いが液膜界面の変動が電極間の感度領域内で平均化されてしまうため空間分解能が低くなる。例えば定電流法において、電極の直径を 2 mm、電極間の距離を 5 mm とすると、感度領域は最低でも短軸 2 mm × 長軸 7 mm の楕円領域となるが、換言すればその程度の空間分解能を持つことになり、局所の液膜厚さすなわち波の最大値・最小値や細かい波の構造を入手することができない。さらに、水質や温度の影響を受けやすく、また出力信号と液膜厚さが非線形であり、非常に複雑な校正が必要となる。三角測量方式のレーザー変位計や超音波エコー法は、電気回路を用いた方法と比較して空間分解能は著しく高いが、界面が平滑でないで反射信号を受信できないため曲率の大きい波 (すなわち細かい波) などが測定できないなどの欠点がある。またこれら従来測定手法の多くの場合は、センサーをテスト部に固定しなければならず、測定点が限られるなどの理由から、軸方向の多数点のデータを得ることが難しい。

液膜界面の発達・輸送機構をモデル化するためには、波の合体・分裂、液滴飛散等による液膜界面性状と液膜厚さの軸方向変化、また液膜破断条件と密接に関係するサブミクロン厚さの局所変動やミクロン単位の細かい波の挙動、数ミリオーダーの大きい波への成長過程を、詳細かつ高精度に整理していく必要があることを先に述べたが、上述のように従来計測手法では液膜界面構造を、軸方向の限られた空間でかつモデル化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り、信頼ある実験データの不足がこの領域の二相流研究の進展を妨げている。

以上のような二相流研究の背景から、特に環状流、環状噴霧流、流下液膜などの液膜を伴う流れを対象にした研究の課題を整理すると次のようになる。

#### (1) 高精度液膜流動特性計測技法の開発

液膜の流動は軸方向に沿って複雑な波動を伴いながら常に発達する。また条件によ

っては 0.1 mm 以下となる極薄い液膜を形成する。そのため、液膜厚さ、界面形状などの局所流動特性を複数点に渡り、非接触でかつ高時空間分解能で入手できる測定技術の開発が必要である。

### (2) 液膜流動現象の確認とデータベースの構築

広範な流動条件下、軸方向全域における液膜厚さおよび界面波の時空間変動特性を詳細かつ高精度に捉えて現象を把握するとともに、液膜の流動・発達特性をモデル化するためのデータベースを構築する必要がある。

### (3) 液膜の発達・輸送の機構論的モデリングと解析コードへの導入

液膜流動現象の物理メカニズムを機構論的に捉え、それを正しく示す構成方程式または構成方程式に応用される実験相関式を確立して解析コードへ導入する必要がある。

本論文は上記課題の内、主として(1)と(2)を対象とするものである。すなわち、従来の計測技術では不可能であった軸方向全域に渡る液膜流動特性の高時空間分解能測定を可能にし、液膜の発達・輸送のモデル化に資する新たな知見と、精度の高いデータを提供するという位置付けにある(Fig. 1.1)。

## 1. 1. 2 本論文の目的

本論文では壁面に沿って流れる液膜の流動特性を高精度に測定する技術を開発するとともに、これまで詳細に検討されてこなかった流下液膜および環状流液膜の軸方向発達特性を実験的に明らかにする。本論文の目的は以下の2つである(Fig. 1.1)。

第一の目的は、液膜厚さと界面波変動特性を非接触かつ高時空間分解能で入手できる計測技術の開発である。液膜の流動に関する研究は、流下液膜と環状気液二相流を中心として数多く報告されているが、前項で述べたように計測技術の限界のために、流れ方向の発達について微視的な計測はほとんど行われていない。本論文ではレーザーフォーカス変位計(Laser Focus Displacement meter: LFD)による液膜厚さの高精度測定手法を新しく提案し、各種の測定体系において計測の特性と精度を検証することで、液膜流研究における本手法の有用性を示す。

第二の目的は、LFD を用いて平板上および円管内壁に沿って流下する液膜および上昇環状流液膜の軸方向発達に関する高精度なデータを採取し、現象の諸特性を整理することである。流下液膜は冷凍機用凝縮機や吸収塔などの工業機器に広く応用されてお



り、一つの独立した研究対象としてかなりの数の研究を集めている。また、環状流や対向流などの二相流研究においても、界面にせん断力が働かない条件、すなわち重力・表面張力・壁面せん断力のみ作用する体系での液膜厚さと波動の基礎的特性を知る目的で、種々の研究がなされている。しかしながらこれらの研究の多くは特定の位置における測定データについての議論に限られており、時空間的に界面の微視的特性を調査したものはほとんど無い。本論文では流下方向の複数点において液膜厚さと界面変動を測定し、液膜の流下方向発達特性に関する新しい知見を得る。一方、垂直管内を上昇する環状流は、原子炉燃料棒周りやボイラー火炉水冷壁管など数多くの機器類の伝熱部に形成する流動で、下降流や水平流に比べはるかに工業的応用性が高い。垂直管上昇環状流液膜の軸方向発達特性は摩擦損失の大きさから定常状態を過程することは特に難しいことを先に述べたが、これまで得られている実験的データからは、流下液膜と同様に軸方向の発達についての知見はほとんど得られていない。特に、液膜破断条件を予測する上で重要となる局所液膜厚さの挙動と界面波の変動特性を助走距離に対して整理した事例は少ないため、本論文ではこれらの項目を軸方向の複数点に渡って測定し、環状流液膜の流動メカニズムの解明とモデル化を検討するための高精度なデータを整理するとともに、液膜の発達特性に関する新たな知見を得ることに着眼点を置く。

Table 1.1 Comparison of measuring techniques

	測定スポット径	空間分解能	時間分解能	線形性・誤差	設置の容易さ	計測対象
触針法	—	x	○	x	x	△ ・細かい波の情報は入手できない ・薄膜の測定不可
	—	0.2 - 0.5 mm ・表面張力の影響	数 kHz	・流れに擾乱付加 ・表面張力の影響	・テスト部に固定	
静電容量法	x	x	○	x	x	△ ・細かい波の情報は入手できない ・局所厚さ測定不可 ・薄膜の測定不可 ・管内流の測定不可
	4 - 10 mm	0.1 mm以上 ・電極間の空間平均値	数 kHz	・静電容量変化と液膜厚さが非線形 ・電極どうしの干渉	・テスト部に固定	
電気抵抗法 ・定電流法 ・壁面プローブ法 ・ワイヤー法	x	x	○	x	x	△ ・細かい波の情報は入手できない ・局所厚さ測定不可 ・薄膜の測定不可
	4 - 10 mm	0.1 mm以上 ・電極間の空間平均値	数 kHz	・流れに擾乱付加 ・出力信号と液膜厚が非線形 ・温度と水質による抵抗変化	・テスト部に固定	
レーザー変位計 (三角測量方式)	○	○	○	x	○	x ・薄膜の測定不可 ・曲率の大きい波の測定不可 ・管内流の測定不可
	10 - 20 μm	0.01 - 0.5 μm	数 kHz	・レーザー光の液膜への回り込み ・界面傾斜に依存 ・壁面での乱反射	・非接触測定	
レーザーフォークス 変位計	○	○	○	○	○	△ ・局所厚さ測定可能 ・薄膜の測定可能 ・管内流の測定可能 ・多次元性入手不可 ・非加熱系に限定
	約2 μm	約1 μm (検証結果)	約1 kHz (検証結果)	・界面傾斜約30°まで測定可能 (検証結果) ・温度、水質の影響なし	・非接触測定	

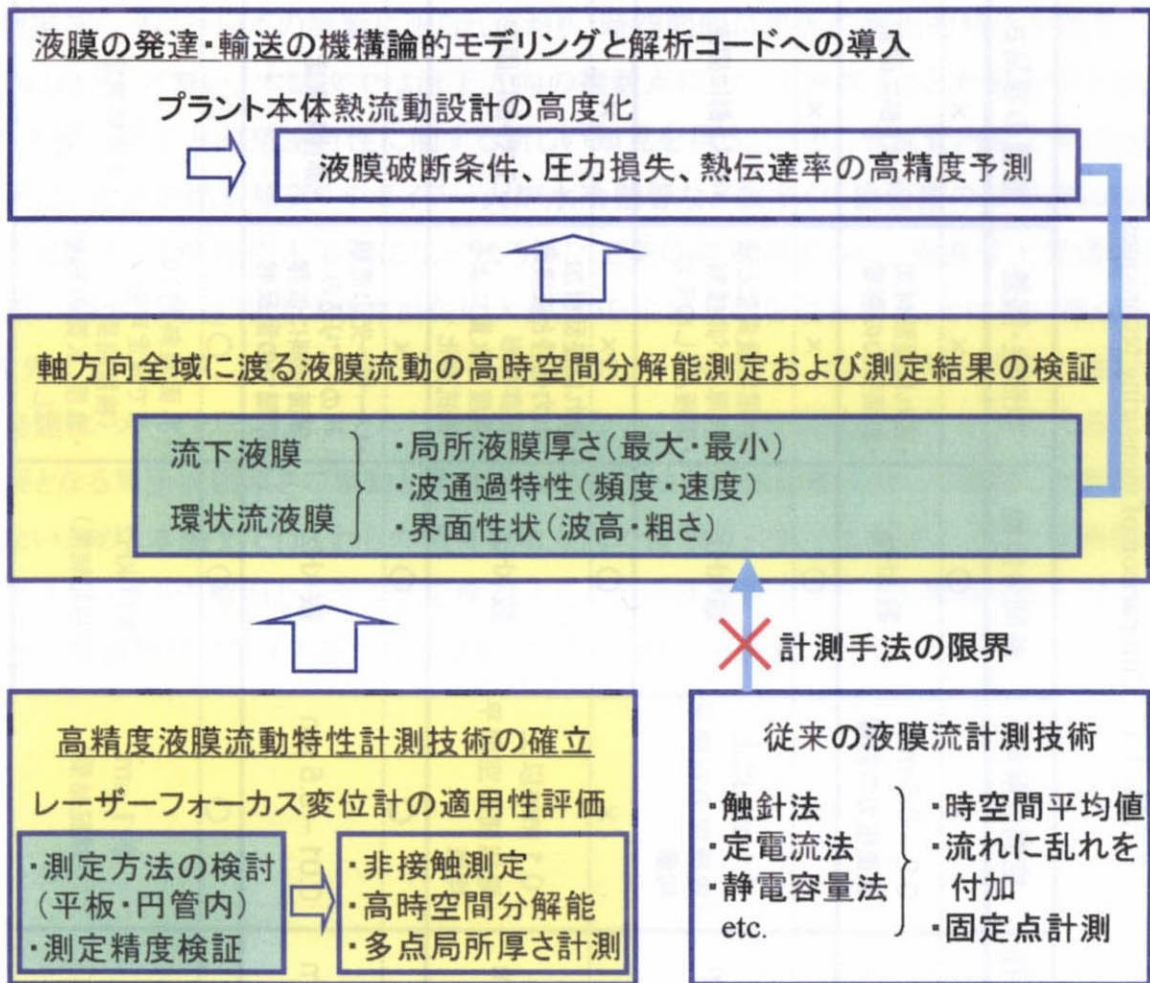


Fig. 1.1 The position of the present work

## 1.2 論文の概要

### 1.2.1 論文の構成

第2～4章は本論文の中心となる実験と考察の部分である。第2章は LFD を用いた高精度液膜流動計測手法の開発について述べられている。はじめに測定原理と特徴について説明し、次に実際の平板上および円管内に形成する液膜の計測に適用する方法を説明している。各種の測定体系での予備実験により、液膜厚さ、界面変動波形の計測特性と精度を検証することで、液膜流研究における本手法の有用性を示した。第3、4章には流下液膜および垂直管上昇環状流液膜の流動特性、特にこれまで詳細に検討されていない液膜の発達に着目した実験および考察が述べられている。LFD を用いて各実験体系、流動条件における液膜厚さ、界面波形状を軸方向の複数点に渡り測定し、液膜界面構造発達特性に関する精度の高いデータを提供した。また得られたデータを各種実験相関式、理論式と比較し現象の諸特性について考察するとともに、液膜の発達特性に関する新しい知見を得た。第5章では、第2章から第4章までで述べた結果を総括し、LFD の液膜界面波形の高時空間分解能測定手法としての有効性と、実験により明らかにされた流下液膜および環状流液膜の流動発達特性について結論を述べる。

APPENDIX A にはこれまで提案されている液膜流の代表的な測定法を概説した。液膜の流動機構を示す基本物理量には液膜流量、液膜厚さ、界面波形状、界面波速度、壁面せん断応力、液膜内速度分布等があり、これらを手に入る計測技法が古くから数多く提案されている。ここでは本論文において対象とする液膜厚さと界面波形状を手に入る測定技術を中心に取り上げ、測定の原理的特徴からそれぞれの利点と問題点を整理した。APPENDIX B には環状流液膜を対象にした LFD による計測結果の参考例として、界面面積濃度の管軸方向変化について記述した。また LFD による計測値と既存モデルとの整合性を確認するため、ドリフトフラックスモデルから予測される界面面積濃度と比較した結果が述べられている。

### 1.2.2 実験(2～4章)の概要

#### 第2章(レーザーフォーカス変位計による液膜流動特性の計測)の概要

第2章の目的は、LFD の液膜流動特性(液膜厚さ、界面変動波形、界面波速度)の高時空間分解能測定方法としての可能性を検討しその有効性を確認することである。平板上

および円管内壁面に形成する液膜を対象に LFD の測定方法を検討するとともに、それぞれの測定体系における計測特性と精度を検証する予備実験を行った。その結果以下の結論を得た。

(1) LFD の測定精度を検討するため、測定分解能、直線性、時間分解能(応答時間)の検証、および表面傾斜に対する測定限界を定量的に評価する実験を行い、以下の結果を得た。

- LFD の測定分解能と直線性の検証結果より、透明体表面の変位に対する LFD の最大誤差は、焦点基準位置より  $100\ \mu\text{m}$  以下の変位に対して  $0.85\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$  より大きい変位に対して  $1.45\ \mu\text{m}$  であった。
- LFD の応答時間は最大で  $1.1\ \text{ms}$  であった。
- 透明体の表面傾斜に対する測定限界は約  $30^\circ$  であった。

以上の結果より、LFD は液膜界面波の測定に対して十分な測定精度と検知能力を有していると言える。

(2) 透明平板上に形成する液膜の厚さを平板裏面側から測定する場合の屈折による誤差を理論式により評価し、その補正を行う式を得た。予備実験から透明壁を通過する際に生じる屈折の影響はこの補正式によって評価でき、透明平板裏面側からでも正しい液膜厚さが測定できることが確認された。また厚さ約  $0.6\ \text{mm}$  以下の薄い液膜の波形を測定する場合は、液膜界面側から測定するよりも透明壁裏面側からのほうが精度良く測定できる。

(3) 透明円管内の液膜厚さは管外壁面を平滑にすることにより LFD によって測定できる。透明円管内壁に形成する液膜の厚さを測定する場合の屈折による誤差を評価し補正式を得た。この補正式は管径  $D = 10 - 30\ \text{mm}$ 、液膜厚さ  $\delta \leq 2.4\ \text{mm}$  の測定の場合、円管における液膜厚さを 1 % 以内の誤差で算出できる。

(4) 矩形狭隘流路に形成する二次元液膜波を高速度ビデオカメラにより撮影し、画像処理法により得られる液膜界面形状の情報と、LFD により検出される液膜厚さの時間変動データを比較した。時空間的に急変を伴う実際の液膜に対しても、LFD では従来の測定手法では測定できなかった界面の微小な波動や  $0.1\ \text{mm}$  以下となる極薄い液膜厚さを精度良く測定できることが確認された。



### 第3章(実験 I 流下液膜の発達特性)の概要

実験 I の目的は、鉛直壁面および円管内壁面に沿って流下する液膜の厚さを LFD により測定し、液膜の流動発達特性を実験的に明らかにすることである。LFD により得られた波形データを助走距離、液膜レイノルズ数ごとに整理しその波動特性を評価した。特にこれまで測定手法の限界から厳密に評価することができなかった、局所液膜厚さの軸方向発達過程を高精度にとらえ、液膜の流下方向発達特性に関する新しい知見を得た。また平均液膜厚さ、最大、最小液膜厚さ、平均波高および界面波速度を理論式、実験相関式と比較することで、助走区間における液膜の発達特性について考察した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 液膜流量すなわち液膜レイノルズ数  $Re_f$  が小さいほど波の空間的成長は早く、逆に  $Re_f$  が大きいほど最終的な波立ちは大きくなる。これは、液膜生成部から十分な距離をおいた発達域と異なり、液膜生成部に近く助走距離が短い条件では、液膜が生成されてから測定部に達する時間も短く、波の成長に十分な時間が与えられないためである。液膜流量すなわち流下速度が大きければ測定部までの到達時間も短くなり、波の振幅は小さくなる。一方液膜流量が小さくなれば到達時間は長くなり、よって波は互いに合体し孤立波を形成できる。
- (2) 平均液膜厚さと平均波速度は、 $Re_f = 50$  付近の低液膜流量条件を除いてはヌッセルトの理論式と比較的よく一致した。 $Re_f = 200 - 400$  の乱流遷移点を越えた比較的高い  $Re_f$  条件下においてもこのようにヌッセルトの理論式と良く合うことは、助走区間 150 - 400mm においては波がまだ発達せず層流性を保っていることを示している。
- (3) 最大液膜厚さ、標準偏差及び平均液膜厚さの測定結果から  $Re_f$  が 200 - 250 の乱流遷移点以下の領域では助走距離の影響はほとんど見られないことがわかった。 $Re_f$  が乱流遷移点を越えると  $Re_f$  の増加につれて助走距離の影響は大きくなる。特に  $Re_f > 150$  の液膜流量が大きいかつ  $L \leq 400$  mm の助走距離が小さい範囲では標準偏差は非常に小さく、波立ちのない鏡面状態になっている。助走距離が大きくなると大きな波立ちに発達していくが、 $L = 2,400 - 2,700$  mm と助走距離が非常に大きくなっても、波の成長は止まらない。従って、流下液膜解析において  $Re_f > 150$  の液流量の範囲では定常流を仮定することは適当でない。
- (4) 最小液膜厚さは、 $L \geq 1,200$  mm では  $Re_f$  によらずほぼ一定の値(0.1 mm)になった。触針法によって計測された最小液膜厚さは、LFD による計測結果と同様に助走距離

が大きい領域では  $Re_f$  によらずほぼ一定の値となるが、その値は 0.2 mm と LFD による値と比較して大きい。これは触針法では最大液膜厚さの測定は正確にできるが、最小液膜厚さの測定は電極を液膜内部に挿入しなければならず流れを乱すので、どうしても誤差が大きくなるためと考えられる。

#### 第4章(実験Ⅱ 垂直管上昇環状流液膜の発達特性)の概要

垂直管上昇環状流液膜の軸方向発達特性は摩擦損失の大きさから定常状態を過程することは特に難しいが、これまで得られている実験的データからは、流下液膜と同様に軸方向の発達についての知見はほとんど得られていない。実験Ⅱでは垂直管上昇環状流を対象として管軸方向全域に渡る液膜厚さおよび界面波の時空間的変動特性を LFD により測定し、環状流液膜の流動発達特性に関する新しい知見を得るとともに、解析の基盤となる高精度なデータを提供することを目的とした。特に、液膜界面輸送機構と液膜破断メカニズムの解明に資する局所液膜厚さの挙動および擾乱波の通過特性を助走距離に対し精査した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) LFD を用いて広範囲の流量条件における環状流液膜の特性を軸方向の複数点渡り高精度に測定し、液膜の軸方向発達過程と局所液膜挙動に関する詳細なデータベースを構築するとともに現象の新しい知見を得た。
- (2) 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  $\rho_g$  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、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。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事がわかった。固有の圧力の変化が軸方向各部に存在して液膜厚さの変動が生じている可能性があることを圧力伝播特性の解析結果から示した。
- (4) 擾乱波の通過頻度は最大液膜厚さの結果と同様に、増減を繰り返しながら助走距離の増加に従って減少し、軸方向の一箇所の情報で得られた実験相関式とは異なる特性を示す結果となった。擾乱波通過頻度の予測には前流側における波の形成条件と波の生成・消滅メカニズムを考慮する必要がある。
- (5) 最小液膜厚さはほぼ乱流遷移層の厚さに相当した。乱流遷移層内を通過する界面波最下点頻度は、乱流遷移層厚さの変化に応じて一定の値を示す傾向にあり、助走距

離と気相流量の影響は少なく液相流量の影響が支配的である。

(6) 最小液膜厚さを予測する実験相関式を得た。この式は本実験条件範囲において±5%以内の精度で最小液膜厚さを予測できる。

### 1. 3 記号

#### Nomenclature

$A$	wave amplitude	(m)
$a$	dimensionless wave velocity $[C_w/U_0]$	(-)
$a_i$	interfacial area concentration	(m <sup>-1</sup> )
$C_w$	pipe velocity	(m/s)
$D$	tube diameter	(m)
$d$	distance between laser head and window	
$E$	fraction of liquid flux flowing as droplet	(-)
$E_d$	area fraction of liquid entrained in the gas core based on liquid area	(-)
$Eö$	Eötvös number $[gD^2\Delta\rho/\sigma]$	(-)
$Fr$	Froude number $[j/(gD)^{1/2}]$	(-)
$f_D$	frequency of disturbance wave	(1/s)
$f_{\delta_{\min}}$	frequency of bottom point of interfacial wave in buffer layer	(1/s)
$f_w$	wave frequency	(1/s)
$g$	acceleration of gravity	(m/s <sup>2</sup> )
$h$	wave height	(m)
$\bar{h}$	average wave height	(m)
$j$	mixture volumetric flux	(m/s)
$j_f$	superficial gas velocity	(m/s)
$j_g$	superficial liquid velocity	(m/s)
$K$	kurutosis	(-)
$K_F$	physical properties group $[\rho^3 v^4 g/\sigma^3]$	(-)
$L$	entry length	(m)
$Le$	distance necessary to reach an equilibrium condition	(m)



$N$	refractive index	(-)
$N_{Cw}$	dimensionless wave velocity $[C_w/(v g^2)^{1/3}]$	(-)
$N_L$	dimensionless entry length $[L/(g/v^2)^{1/3}]$	(-)
$N_{\delta_{max}}$	dimensionless maximum film thickness $[\delta_{max}(g/v^2)^{1/3}]$	(-)
$N_{fw}$	dimensionless wave frequency $[f_w(v/g^2)^{1/3}]$	(-)
$N_\lambda$	dimensionless wave separation $[\lambda(g/v^2)^{1/3}]$	(-)
$p$	pressure	(Pa/m <sup>2</sup> )
$R$	pipe radius	(m)
$r$	radial coordinate	(m)
$Re$	Reynolds number	(-)
$Sr$	Strouhal number $[f_D D/j_g]$	(-)
$t$	time	(s)
$U_0$	average liquid velocity $[\Gamma/\bar{\delta}]$	(m/s)
$u^*$	friction velocity	(m/s)
$\bar{V}_{gi}$	mean transport drift velocity	(m/s)
$We$	Weber number	(-)
$y$	distance from wall, focal point	(m)
$y^+$	dimensionless distance from wall $[y(\tau_w/\rho_f)^{1/2}/\nu_f]$	(-)
$Z$	distance between the beam spots	(m)

### Greek Symbols

$\alpha$	gas void fraction	(-)
$\alpha_{core}$	fraction of area occupied by annular core	(-)
$\alpha_d$	droplet fraction in the gas core alone	(-)
$\Gamma$	volumetric flow rate per unit wetted perimeter	(-)
$\delta$	film thickness	(m)
$\bar{\delta}$	average film thickness	(m)
$\bar{\delta}^+$	dimensionless film thickness $[\bar{\delta} u^*/\nu]$	(-)
$\bar{\delta}^*$	dimensionless film thickness $[\bar{\delta}(g/v^2)^{1/3}]$	(-)

$\kappa$	angle of the incident laser beam to the optical axis	(deg.)
$\lambda$	wave separation	(m)
$\nu$	kinematic viscosity of liquid	(m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	density	(kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	surface tension	(N/m)
$\tau_i$	interfacial shear stress	(N/m <sup>2</sup> )
$\tau_i^*$	dimensionless interfacial shear stress $[\tau_i(g/\nu_f^2)^{1/3}/\rho_f g]$	(-)
$\tau_w$	wall shear stress	(N/m <sup>2</sup> )
$\Psi$	standard deviation	(mm)
$\omega$	phase angle	(deg.)

### Subscripts

A, F, W	air, fluid, wall
f, g	liquid phase or film, gas phase
max, min	maximum, minimum
r, m	real, measured
X, Y, Z	tangential direction, diametric direction, tube axis direction

### Mathematical symbol

$\langle \rangle$	cross-sectional area averaging quantity
-------------------	---