

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

2.1 緒言

既存の解析モデルの拡張・高精度化のためには、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。また近年、数値解析手法の高度化やコンピュータの高性能化によって、従来の実験技術では測定が困難であった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。特に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。これまでの液膜厚さの時空間的変動や分布の測定には、触針法、静電容量法、定電流法などの電気的手法による測定技術が一般的に用いられてきたが、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値として捉えるために実界面の諸情報を正確に測定することができないなどの原理的短所を有している。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取得することが難しい。そのため液膜界面構造を、軸方向の限られた空間でかつモデル化や数値解析結果の検証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。従って、優れた時間・空間分解能を有し、かつ、非接触による詳細で精緻な測定を保證する計測手法の開発が、液膜流を対象にした研究分野の重要な課題となっている。この章では、以上のような二相流測定技術の現状を背景とし、レーザーフォーカス変位計による高精度膜厚測定方法を提案する。この章の目的は、LFDの液膜流動特性(液膜厚さ、界面変動波形)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。

2. 2 LFDの測定原理、特徴および利点

この節では、これまでに例がない全く新しい液膜の測定手法である、レーザーフォーカス変位計(LFD)による液膜厚さの測定方法を提案し、その原理、方法、測定精度について検討する。

2. 2. 1 LFDの測定原理

Fig. 2.1にLFDの測定原理概念図を、Photo. 2.1にLFD全景を示す。図のように光源から照射されたレーザー光は、ハーフミラー、対物レンズを通り対象物上で小さなスポットを形成する。対象物より散乱反射した光は再びハーフミラーまで戻り、直角に反射してピンホールの位置で一点に集光されるため、ピンホールを通過し受光素子に到達する。対象物の距離が変動すると、反射した光はピンホールの位置で集光されずぼやけ、ほとんどの光はピンホールを通過できず受光素子にはわずかな光しか到達しないので受光信号として感知できなくなる。これを共焦点原理と呼ぶが、LFDはこの原理を応用し、対物レンズを音叉によって機械的に高速動させることにより、レンズがどの位置にある時に、光がピンホールを通過するかを検出することで対象物までの距離を測定する。

LFDの原理は、対物レンズをモーター駆動して焦点距離を検出するカメラのピント合わせの動作と同じであるが、このように音叉とレーザーの使用により時空間的分解能は著しく高くなっている。カメラのピント合わせが対象物の表面形状によらず焦点検出ができるのと同様に、LFDはこれまで測定が難しかった大きな曲率を持った波、すなわち細かい波でもロールウェーブのような多価関数にならなければその界面位置や波の周期を正確に測定することができる。

2. 2. 2 LFDの特徴および利点

LFDの他の液膜計測方法に対する長所を以下に整理する(Table 1.1 参照)。

- (1) 光量や反射角度ではなく、対象物と焦点の合うレンズ位置を検出しているため、従来の三角測量方式では避けられなかった界面の波立ちによる測定誤差、液膜へのもぐり込み光の影響(APPENDIX A 参照)がない。
- (2) スポット径が $2\mu\text{m}$ と非常に小さいため、これまでの計測計ではとらえられなかった小さい波の高さ、形状を正確に測定することができる。

- (3) 対象物に非接触なため、流れを乱すことなく正確に測定できる。
- (4) 作動距離の自由度が 28 mm ± 1 mm と大きいため、広範囲の流動条件に対応でき、また取り付け、設定、計測を容易に行うことができる。
- (5) 薄膜の界面で反射する光と、壁面で反射する光をセンサに取り込み、自動的に膜厚を演算することができる。そのため、三角測量方式のセンサ 2 台による煩雑な挟み込み測定が解消され、センサ 1 台で 1 方向から液膜の厚さ、界面形状測定が可能である。LFDの主要仕様をTable 2.1に示す。

以上のように、LFDは液膜界面の瞬時局所特性を非接触かつ高時空間分解能で入手できる可能性を有しており、従前の電気的手法に変わる二相流計測技術として極めて有望であると言える。唯一の欠点は、点計測であるため、液膜厚さの時空間領域での多次元性を入手できないこと、また管内流を対象にした場合、非加熱系での計測に限られるという点である。

Table 2.1 LFD specifications

Measuring range	± 1mm
Operating distance	28 mm
Light source	Semi-conductor laser (670 nm), max 20 μW, class 1
Sampling frequency	1.4 KHz (minimum)
Temp. characteristics	± 0.25 % of F.S. (20 - 30 °C)

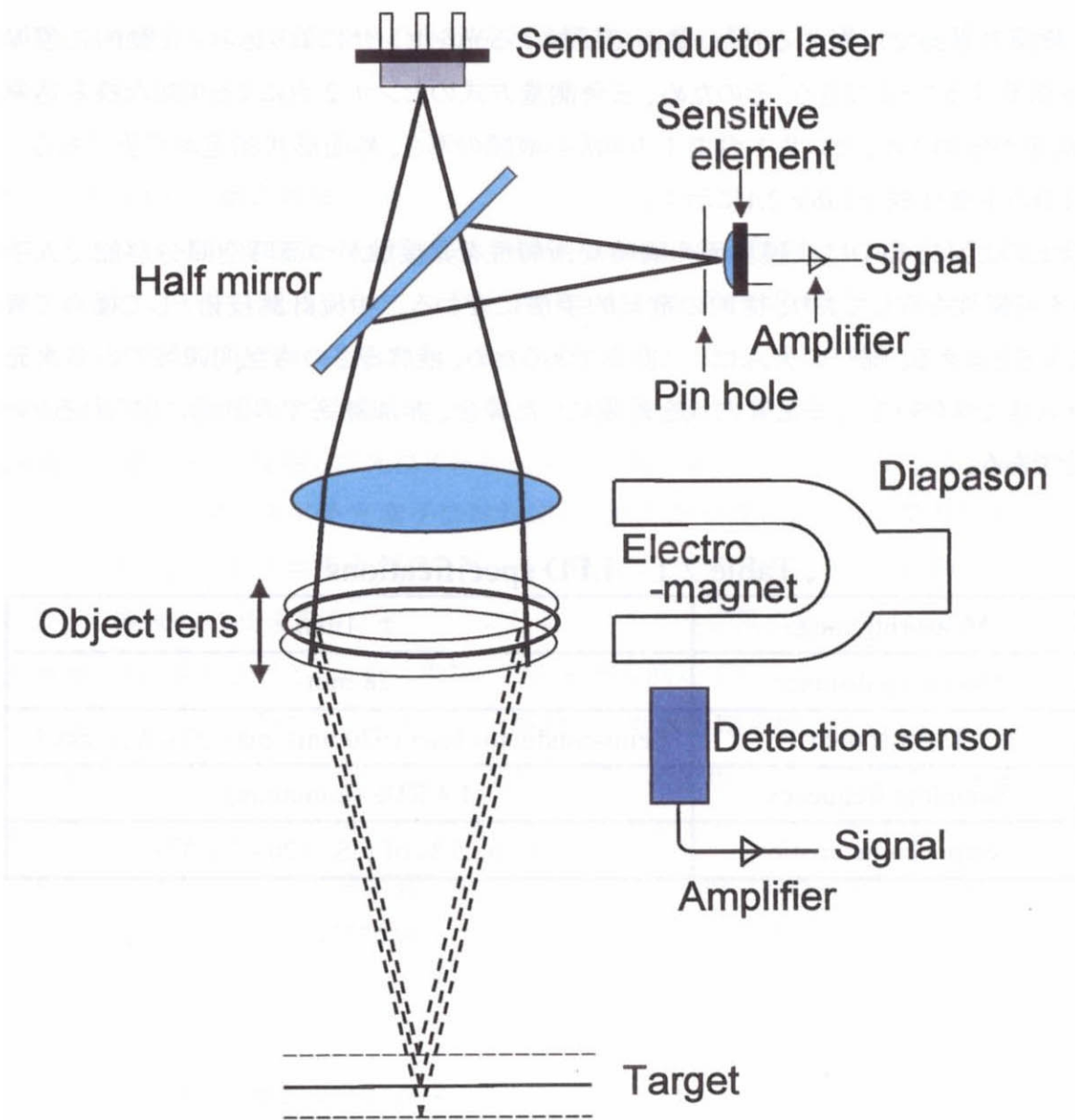


Fig. 2.1 Principle of Laser Focus Displacement meter (LFD)

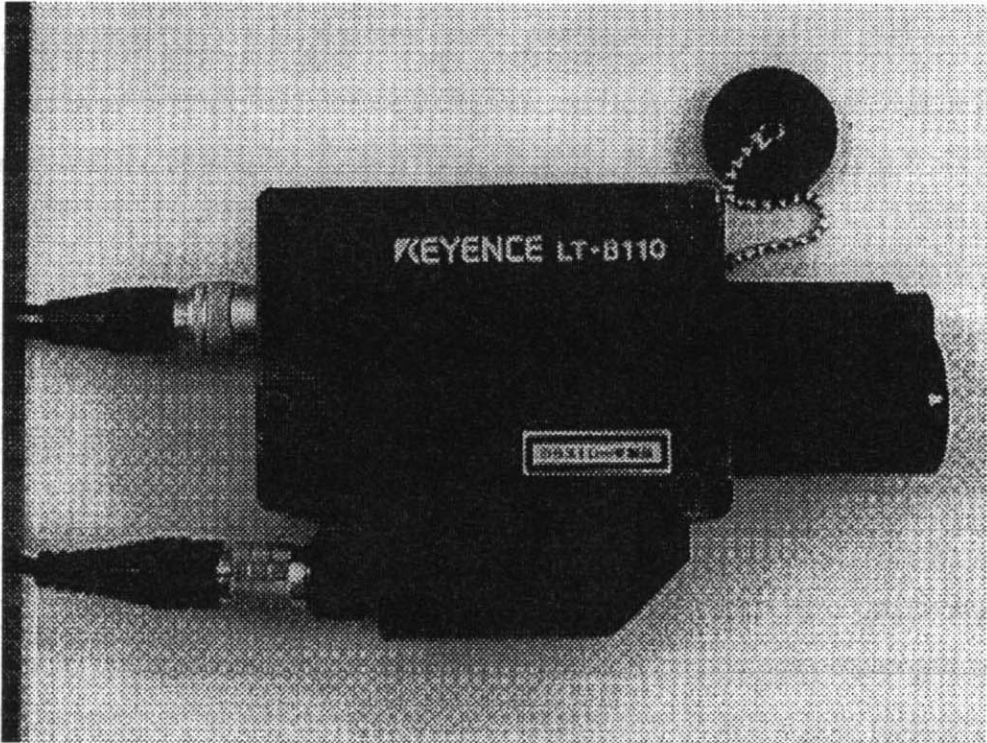
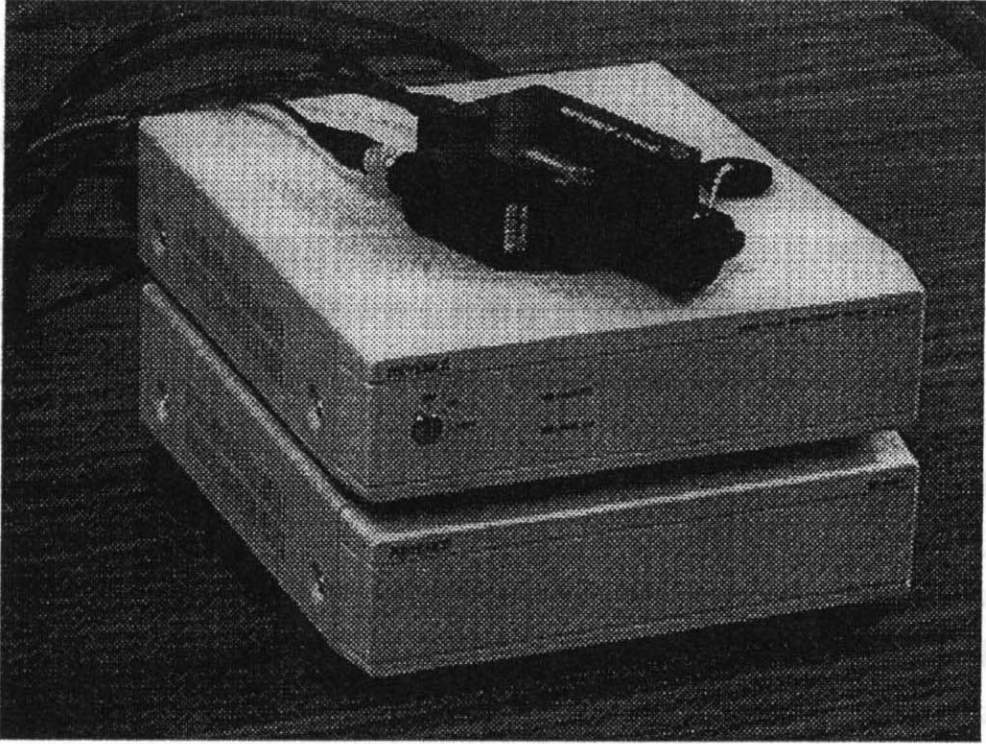


Photo. 2.1 Photographs of LFD

2.3 LFDの時空間分解能

次に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評価する実験を行った。

(1) 測定分解能と直線性

測定対象物が静止している場合においても、LFDからの測定出力値自身とデータ収録器のノイズにより測定値にゆらぎが発生する。このゆらぎの幅がLFDで認識できる変位量の限界すなわち測定分解能となる。また、LFDからの測定出力値は距離に対して比例関係にありほぼ直線的であるが、理想直線に対して僅かなずれがあり、この理想直線に対するずれ(直線性)がLFDの測定精度を示す一つの指標となる。ここではLFDによる測定の最大誤差を、これら計測分解能と直線性を足し合わせたものとして評価する。

LFDの測定分解能は、対象物が完全に固定された状態での測定値変動幅の最大値として評価する。測定分解能は測定対象物の反射率すなわち色や表面粗さによって変化するが、検証実験では実際の液膜を想定し、透明ガラス平板の表面位置を対象とした。LFDにより透明ガラス平板の表面位置を測定し、検出される表面位置電圧信号の時系データをデータ収録器(16ビットAD変換、サンプリング周波数:8.2 kHz)に取り込んだ後、電圧値を変位量に換算して評価した。Fig. 2.2に測定結果の代表例を示す。2秒間のデータのサンプリングを計10回行った結果、測定値の変動幅は最大0.35 μm であった。

LFDの直線性は、Fig. 2.3に示されるように、透明ガラス平板表面とLFDの距離を変化させ、その移動距離とLFDの検出値を比較することで評価される。LFDのプロブ本体は、最小1 μm で調節可能なトラバース装置(精度: $\pm 0.1 \mu\text{m}$)に取り付けられており、コンピュータによる遠隔操作でLFDと平板の距離は任意に設定される。LFDの焦点基準(28 mm)を中心として、平板-LFD間の距離をLFDの最大測定レンジである $\pm 1 \text{ mm}$ の範囲で移動し、設定距離とLFDの測定値を比較した。Fig. 2.4、Fig. 2.5に測定結果を示す。LFDの焦点基準位置を中心に距離が離れるに従い誤差は増加する傾向にあり、最大で1.1 μm の誤差となるが(Fig. 2.4)、100 μm 以下の極微小な変位に対しては精度が高く、0.5 μm 以内の誤差範囲となった(Fig. 2.5)。

以上の測定分解能と直線性の検証実験結果より、LFDの最大誤差は、焦点基準位置より100 μm 以下の変位に対して0.85 μm 、100 μm より大きい変位に対しては1.45 μm と評価される。

(2) 透明体の厚み測定精度

LFDは一台のセンサで透明薄膜の界面で反射する光と、裏面で反射する光を同時に取り込み、膜厚を演算することができる。しかしながら、Fig. 2.6に示すように、膜厚が薄くなると、界面からの受光波形と裏面からの受光波形が重なるため、光量ピークの位置検出が不安定となり、測定精度が悪くなったり、誤測定する場合が生じる。そこで薄膜の厚みに対する精度を評価する必要がある。Fig. 2.7は厚み、屈折率が既知の透明ガラス平板の厚みをLFDにより測定し、透明ガラス平板の公称厚みとLFDによる膜厚測定値を比較した結果である(データ提供:キーエンス社)。比較結果にはガラス平板の公称厚さに対する誤差や屈折率補正などによる誤差も含まれており、LFD自身の測定精度を厳密に評価することは困難であるが、20 - 80 μm の厚さ測定に対して全ての誤差要因を含めた最大の誤差は3 μm であった。

(3) 応答時間

対象物がある点からある点へ瞬間的に動いた時、LFDの検出値が安定するまでの時間をLFDの応答時間として評価する。Fig. 2.8に示すように、同じ厚さの二枚の透明ガラス平板(公称厚さ1.3 mm)を重ね合わせ、その上面の高さ位置をLFDで測定する。上段の平板を水平に高速移動させた際のLFDが検出する高さ位置信号の時系データを入手し、高さに変化してデータが安定するまでの時間を評価した。Fig. 2.9に測定結果の代表例を示す。計10回の測定により評価された応答時間は、最大で1.1 msであった。

(4) 表面傾斜に対する測定限界

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。よって、ここでは対象物の表面傾斜に対する測定限界を評価する。表面傾斜に対する測定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。Fig. 2.10は表面傾斜の測定限界を評価するための装置概念図である。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測定した。Fig. 2.11に測定結果を示す。傾斜角の増加に従い受光量は徐々に減衰するが、傾斜角 33° 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。よって透明体を対象にした場合のLFDの傾斜に対する測定限界は約 30° と評価することができる。

以上に示した測定分解能、直線性、応答時間の検証および表面傾斜に対する測定限界の評価結果から、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。

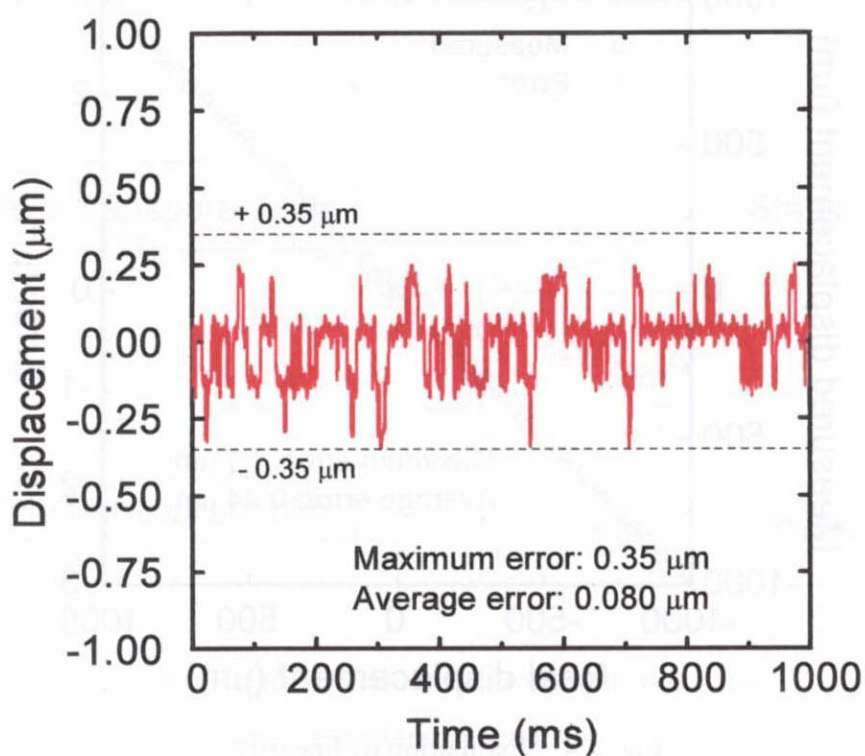


Fig. 2.2 Estimation of spatial resolution

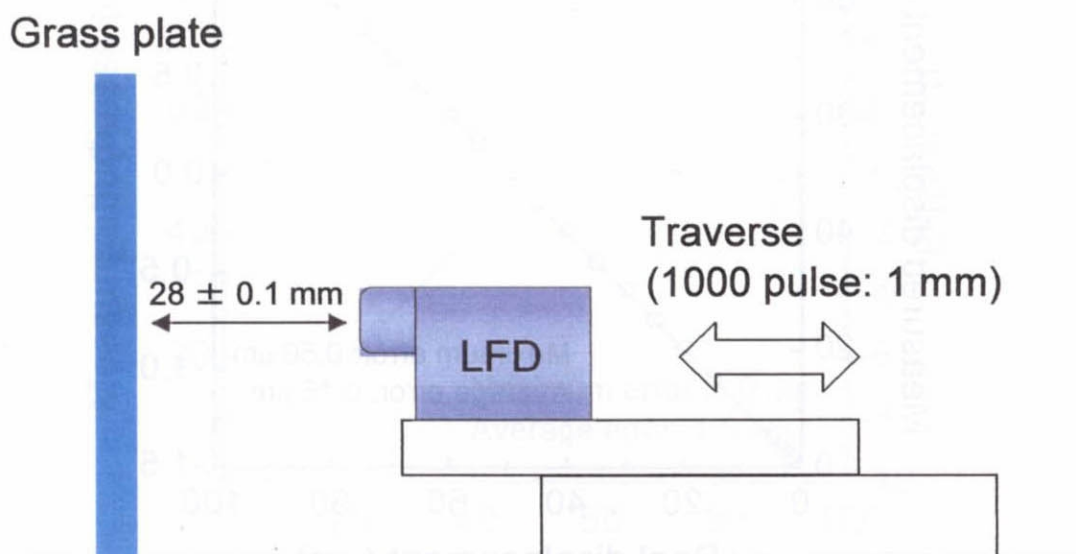


Fig. 2.3 Apparatus for the estimation of linearity

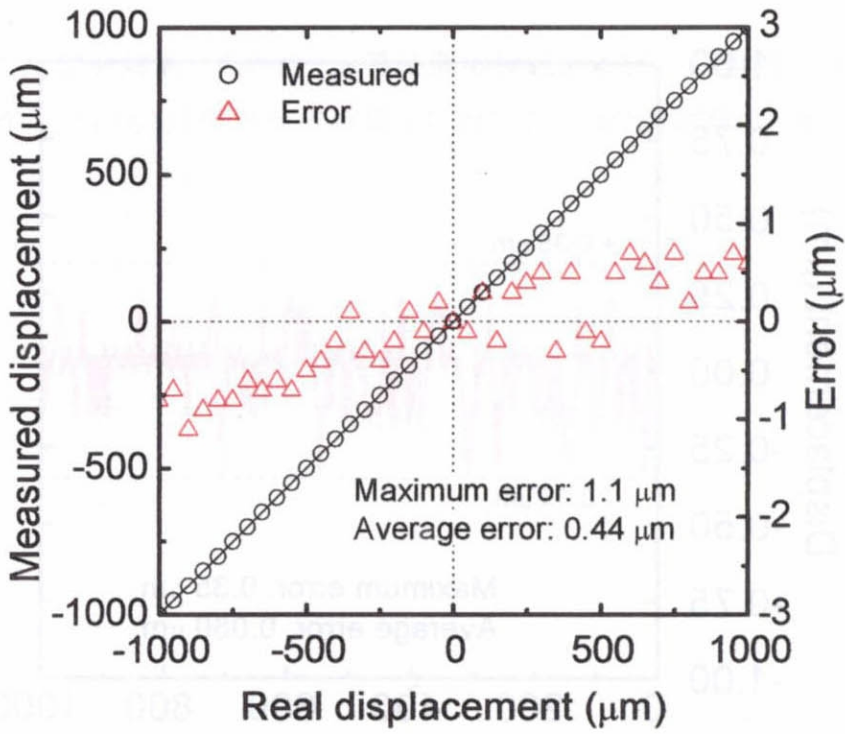


Fig. 2.4 Estimation of linearity

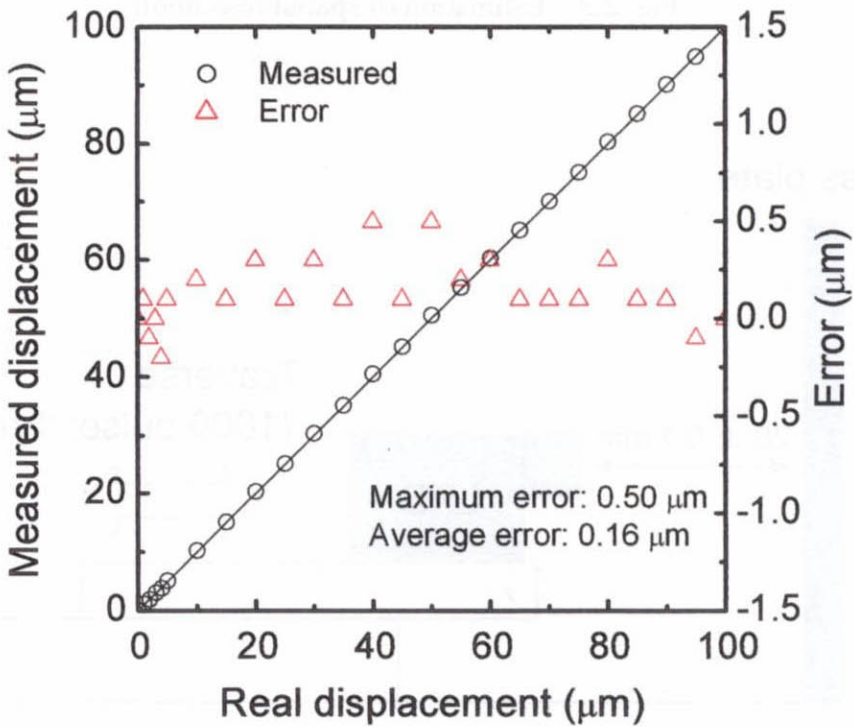


Fig. 2.5 Estimation of linearity in displacement under $100 \mu\text{m}$

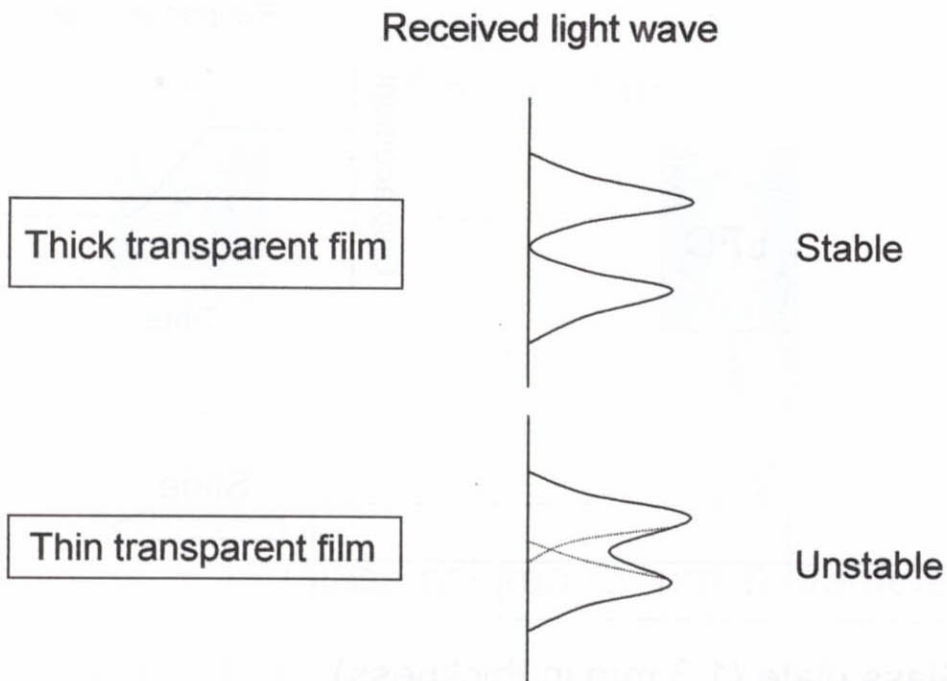


Fig. 2.6 Relation between received light wave and thickness of transparent film

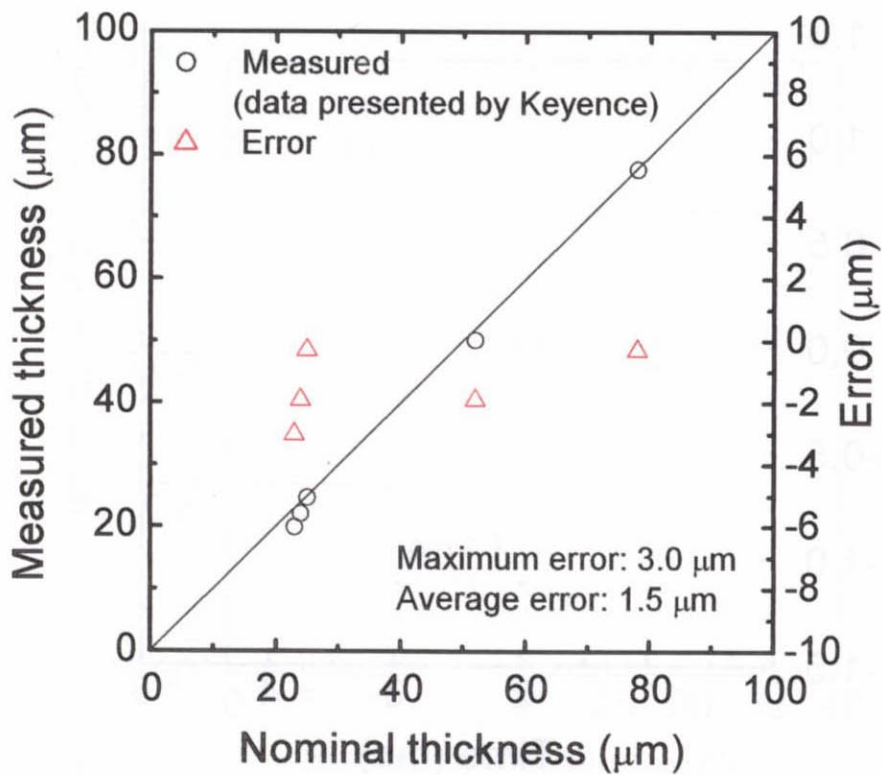


Fig. 2.7 Estimation of measurement for thin film thickness

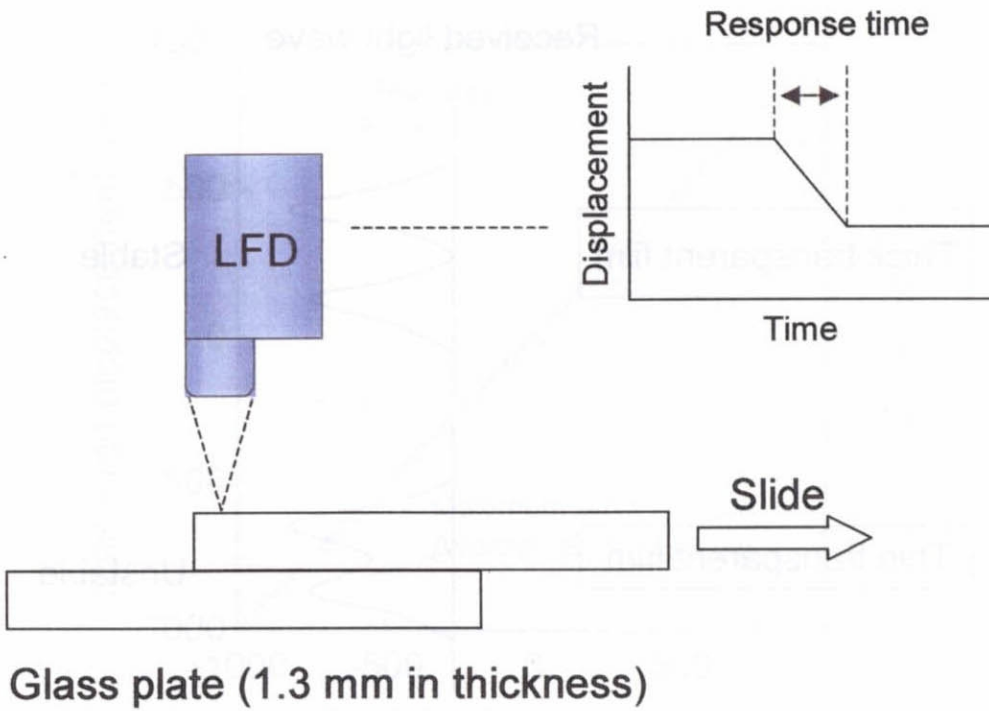


Fig. 2.8 Apparatus for the estimation of response time

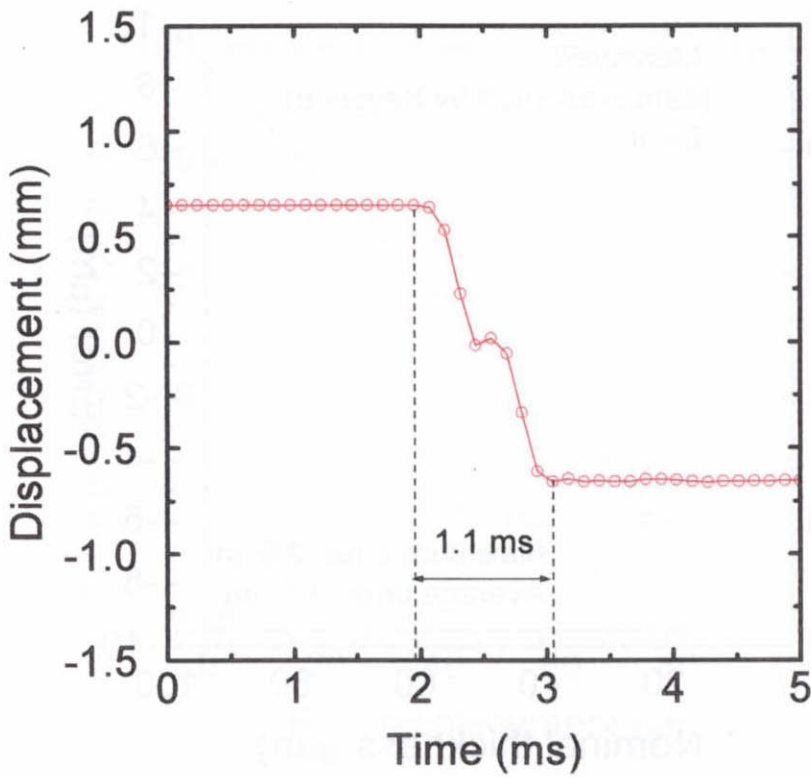


Fig. 2.9 Estimation of response time

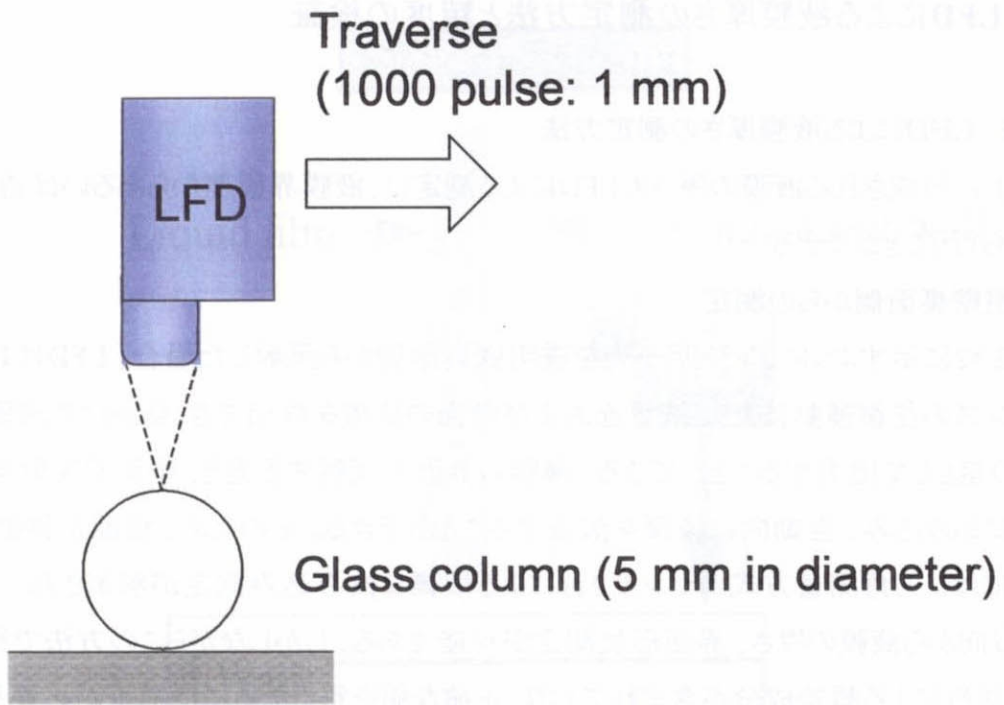


Fig. 2.10 Apparatus for the estimation of detection limits to surface inclination

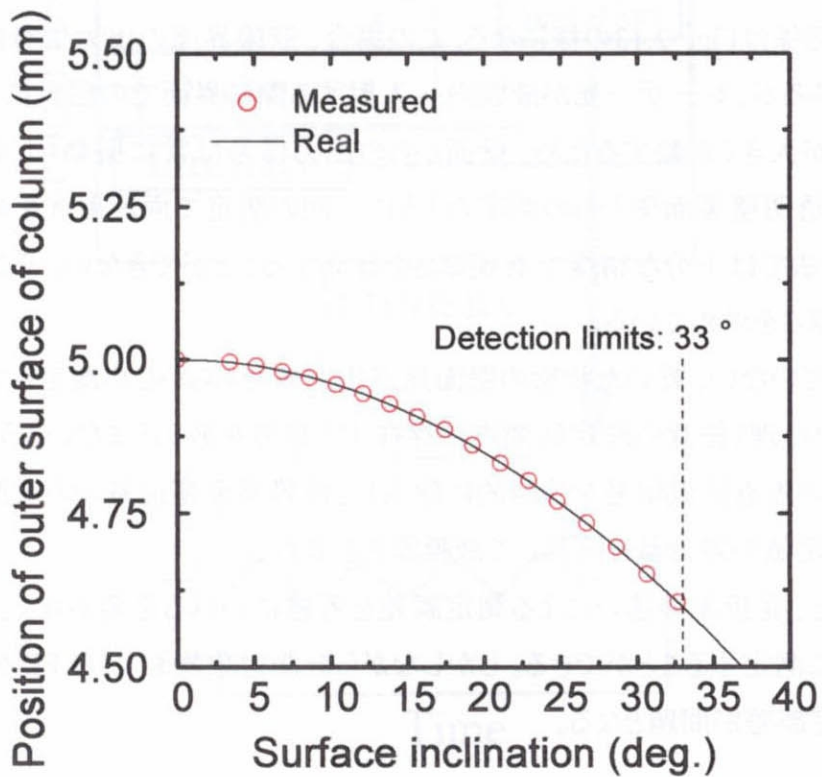


Fig. 2.11 Estimation of detection limits to surface inclination

2.4 LFDによる液膜厚さの測定方法と精度の検証

2.4.1 LFDによる液膜厚さの測定方法

壁面上に形成される液膜の厚さのLFDによる測定は、液膜界面側からあるいは透明壁裏面側から行うことができる。

(1) 透明壁裏面側からの測定

Fig. 2.12に示すように、レーザー光を透明壁裏面側から照射した場合、LFDは1周期の対物レンズの往復運動により、液界面および壁面の位置を検出でき、見かけの液膜厚さをこれらの差として出力することができる。薄膜の界面で反射する光と、壁面で反射する光をセンサに取り込み、自動的に膜厚を演算することができる。そのため、壁面が移動する場合などには、三角測量方式のセンサ2台による煩雑な挟み込み測定が解消され、センサ1台で1方向から液膜の厚さ、界面形状測定が可能である。しかしながらこの方法で得られる値には屈折による誤差成分が含まれており、正確な値を得るためには補正が必要となる。

(2) 液膜界面側からの測定

液膜の界面側から測定する場合、LFDに取り込まれる液膜界面および透明壁表面の焦点信号の位置関係はFig. 2.13の様になる。この場合、液膜界面の出力信号は問題なく検出することができるが、レーザー光が液膜内へ入射する際に界面での屈折によってその光路(焦点位置)が大きく変動するため、壁面からの出力信号は常に振動もしくは減衰が生じることになり、透明壁裏面側からの測定のように一回の測定で両反射光を取り込み液膜厚さを求める方法では十分な精度で液膜厚さを計測することができない。そこで以下に示す手順で液膜厚さを求めている。

1. 液膜が流れていない、乾いた状態の壁面焦点出力値をあらかじめ測定しておく。
2. つぎにマスク処理(任意の設定区間内に存在する信号を取り込まないようにする機能)で壁面周辺の焦点位置信号を強制的に除去し、液膜界面変位量のみを測定する。
3. 最後に両測定値の差分量を演算して液膜厚さを求める。

この方法だと、屈折率の違いによる測定誤差を考慮にいれる必要がなく、理論上液膜厚さを正確に測定することができる。しかしながら計測対象物およびLFD本体自身の振動による測定誤差が問題となる。

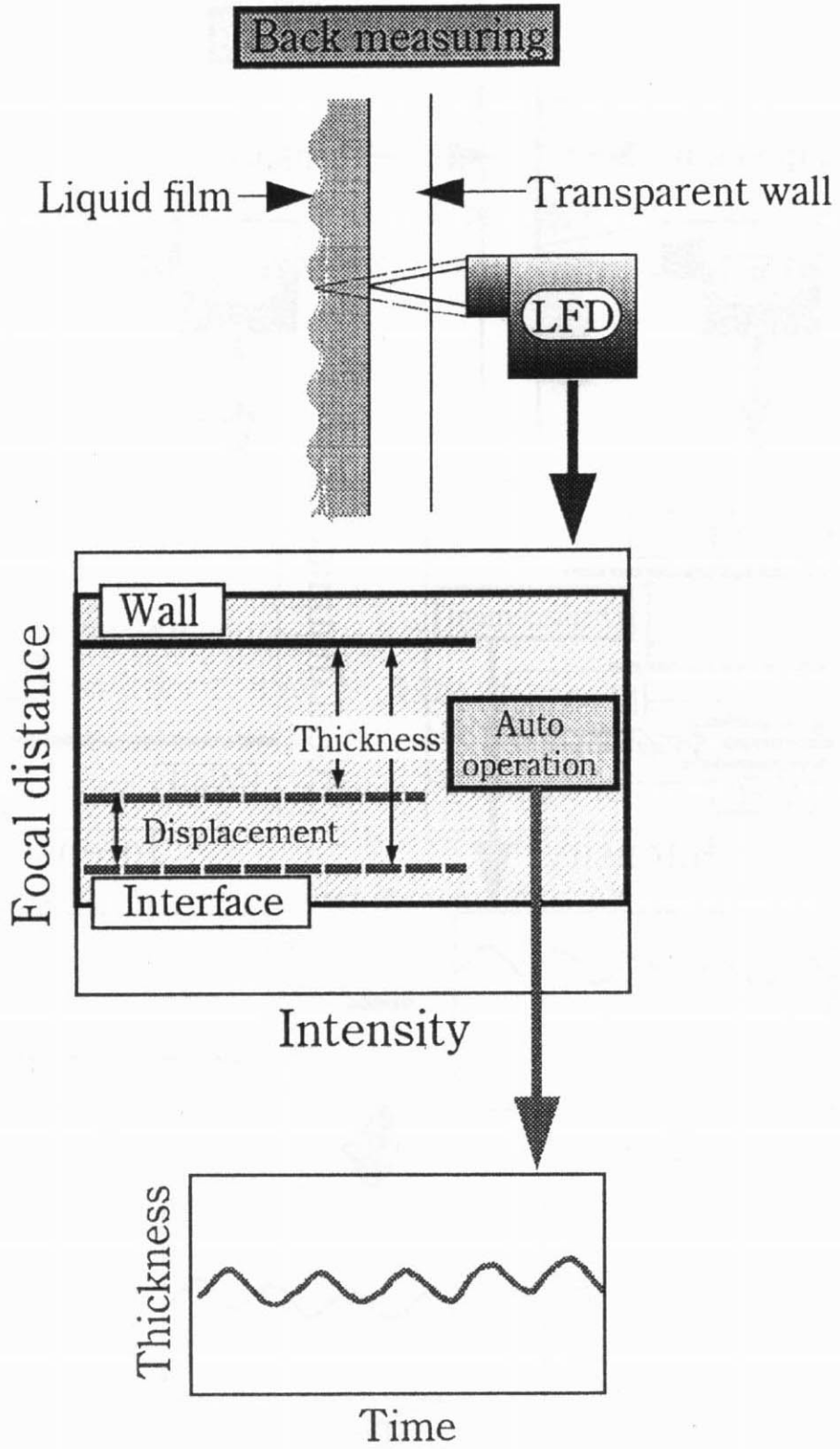


Fig. 2.12 Back measuring

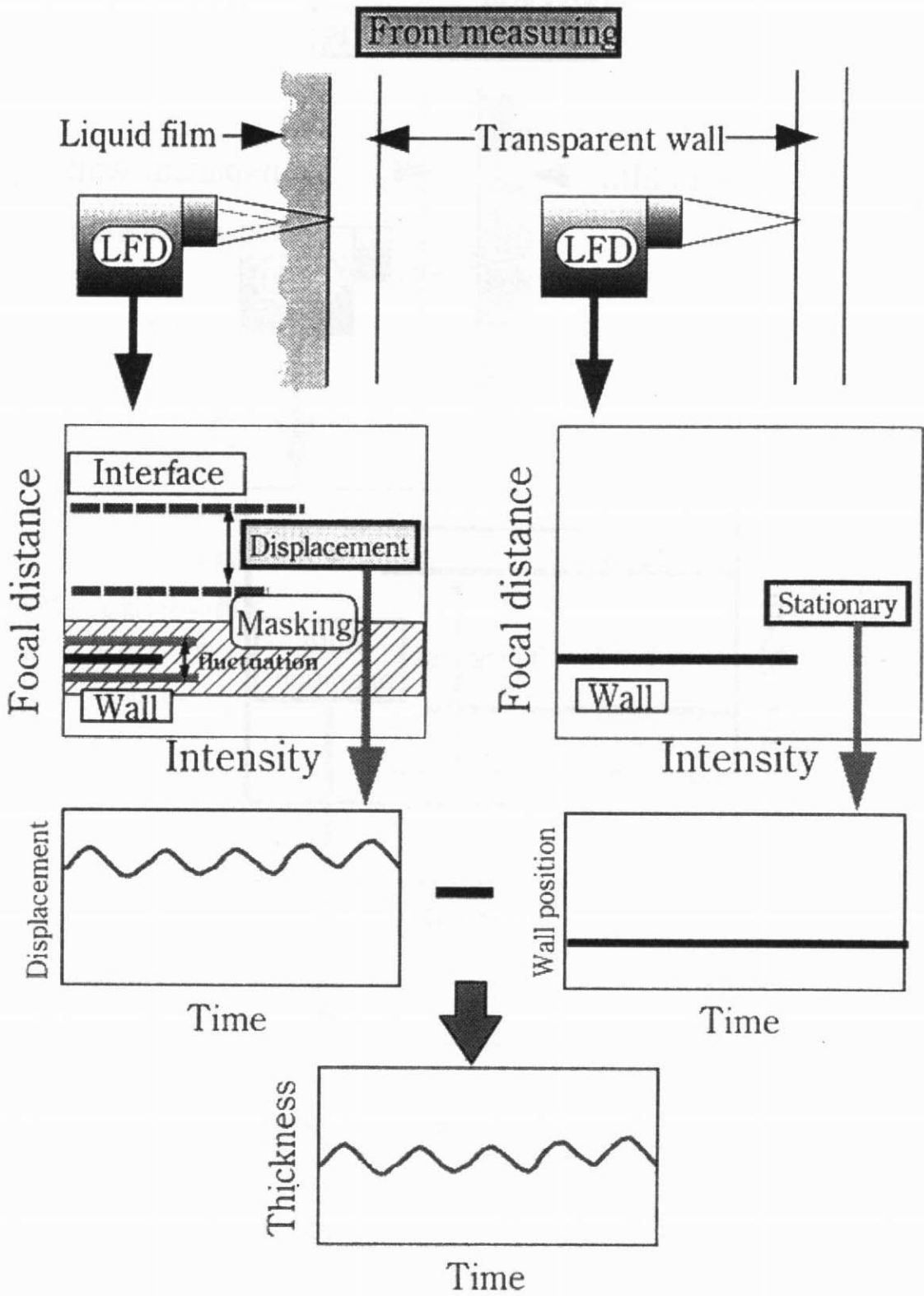


Fig. 2.13 Front measuring

2.4.2 平板上に形成する液膜の測定

(1) 透明平板の屈折補正

2.4.1項で述べたように、液膜厚さをLFDで測定する場合、透明壁裏面側からと液膜界面側からの2種類の測定方法があるが、前者の場合はレーザー光が透明壁および液膜に入射する際の屈折による影響について評価する必要がある。そこで、各媒体中を通過するレーザー光の光路をスネルの法則により予測し、実際の焦点距離との差異から理論上の屈折誤差と屈折補正係数を算出する。

光路は均質、等方性の媒体の中では直進する。ここでは、空気、透明壁、液体のそれぞれの媒体は均質、等方性であるとし、光路は空気-透明壁、透明壁-液体の界面のみで屈折し、各媒体中では直進するものとする。

いまFig. 2.14に示すような空気-透明壁-液体を通過するLFDのレーザー光路を考える。空気中のレーザー光路は透明壁と空気の屈折率の違いにより進路を曲げられ、透明壁内を直進する。同様に液体中のレーザー光路は透明壁と液体の屈折率の違いにより進路を曲げられ液体中を直進する。すなわち、各媒体中でのレーザー光路はそれぞれの層の屈折率 N 、入射角度 κ_A 、交点の位置からスネルの法則により決定される。LFDのレーザー光はプローブの先端から空気中へ円錐状に一定の角度で入射する。そして対物レンズによって焦点距離(プローブ先端でのレーザースポット径)を一定範囲一定周期で変化させ、対象物より反射されるレーザー光が最も強くなる位置(対象物上での焦点位置)をセンサで測定することにより、対象物までの距離を測定する。よってLFDのレーザーを透明壁裏面側から照射したとき、液界面および透明壁表面でのそれぞれの焦点位置と各媒体中におけるレーザー光路は図の実線のように表すことができる。

図よりLFDで測定された液界面での焦点位置出力値を x_1 、透明壁裏面の出力値を x_2 、またレーザー光の透明壁への入射角および液体への入射角をそれぞれ κ_A 、 κ_F とすると実際の液膜厚さ δ は

$$\delta = (x_1 - x_2) \frac{\tan \kappa_A}{\tan \kappa_F} \quad (2.1)$$

で与えることができる。

さらに空気の屈折率、透明壁の屈折率、液体の屈折率および透明壁界面における屈折角をそれぞれ N_A 、 N_W 、 N_F 、 κ_W とすると、スネルの法則より基本式は

$$N_A \sin \kappa_A = N_W \sin \kappa_W = N_F \sin \kappa_F \quad (2.2)$$

で表すことができ、整理して、

$$\kappa_F = \sin^{-1} \left[\frac{N_A}{N_F} (\sin \kappa_A) \right] \quad (2.3)$$

となる。

ここで常温大気圧下の空気の屈折率 $N_A = 1$ 、液体(水)の屈折率 $N_F = 1.32$ 、またLFDのレーザー角 $\kappa_A = 11.5^\circ$ を(2.1), (2.3)式にそれぞれ代入し、両者を連立させて解くと、実際の液膜厚さ δ は

$$\delta = 1.332(x_1 - x_2) \quad (2.4)$$

で表すことができる。

この簡単な式は液膜が液界面および壁面の位置の差から計算されるとき、屈折の補正係数は透明壁の厚さ、屈折率およびLFD—透明壁間の距離等にはよらず空気と液体の屈折率のみに依存し、1.332となることを示している。この値をLFDで測定された液膜厚さの値に乗ずることによって真の液膜厚さを測定できることになる。

(2) 平板液膜における測定精度の評価

次に上述の補正係数が実際の測定に適用できるかどうかを、二つの予備実験によって評価した。Fig. 2.15, Photo. 2.2はシリンダと底面に観測窓をもった水槽からなる1番目の予備実験装置である。シリンダはコンピュータからの信号により、1 μm の精度で上下にトラバースすることができる。液膜厚さに相当するシリンダ底面と観測窓上面との距離 δ は、窓の下に置かれたLFDにより測定される。また測定値 δ_m へのLFDから窓下面までの距離 d の影響を確認するために、LFDはマイクロメータによって上下に移動できる。

Fig. 2.16は δ と δ_m の関係を示している。LFDと窓表面の異なる距離を示す図中のマークは完全に重なっており、このことからこの距離が測定値 δ_m にほとんど影響を与えていないことがわかる。黒丸は式(2.4)から計算される補正された測定値である。図からわかるように補正值は、直線で示されている真値と1.5 %以内の精度で合っている。

もう一つの予備実験として、鉛直壁面を流下する液膜を液膜界面側からと透明壁裏面からの2台のLFDを用いて同時に測定した。

Fig. 2.18 - 2.21は鉛直透明壁面を流下する実際の液膜をLFDを2台使用して液膜界面側からと透明壁裏面側から同時に測定し(Fig. 2.17)、界面側から測定される実際の液膜波形データ(実線)と透明壁裏面側から測定される屈折の測定誤差値を含むデータ(破線)および屈折補正係数を与えた波形データ(一点鎖線)を液膜の流量条件を変えて、それぞれ比較した結果である。2台の計測位置を同一点にすると、それぞれから照射されるレーザー光同士が干渉して測定誤差を生じるので、照射スポットは流下方向に2.5 mm離して設置されている。

この図から分かるように、式(2.4)によって補正された裏面側からの測定波形は、界面側から測定された波形によく合っていることがわかった。この二つの予備実験の結果により、透明壁を通過する際に生じる屈折の影響は式(2.4)によって評価でき、観測窓外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。

また液膜測定予備実験において、液膜界面側から測定する場合、薄い液膜ではところどころ波形データが欠落し、正しい波形が得られなかった。Fig. 2.22は、低液流量すなわち薄い厚さの液膜波形を界面側と透明壁裏面側から測定した波形例である。ここで裏面側の波形は式(2.4)によって補正されている。Fig. 2.22からわかるように、液膜界面側から測定した波形は液膜の薄くなる所でデータが欠落している部分(図中○印)がある。前述のように、透明壁裏面側からの測定による液膜厚さは、見かけの液膜厚さを液界面および壁面の位置信号の差から求め、式(2.4)によって補正して得ることができるが、液膜界面側からの測定では、液膜界面位置信号と液膜が流れていない状態での壁面出力値との差から液膜厚さを求めている。これは、界面側からの測定では、液膜表面におけるレンズ効果により壁面位置に誤差を生じるために、壁面位置の測定を液膜界面位置の測定と同時に進行することができないためである。このような処理により、ある程度厚い液膜の測定は問題なくできるが、薄い液膜では液膜界面の位置信号とレンズ効果のために見かけ上移動してしまう壁面信号の識別がつかなくなり、波形データに欠落が生じるのである。このような現象は、レンズ効果とその焦点距離に依存するので液膜界面の曲率にもよるが、本予備実験では厚さ約0.6 mm以下の液膜を測定する際に生じた。従って、このような薄い液膜の波形を測定する場合は、透明壁裏面側からの方が精度良く測定できるということになる。

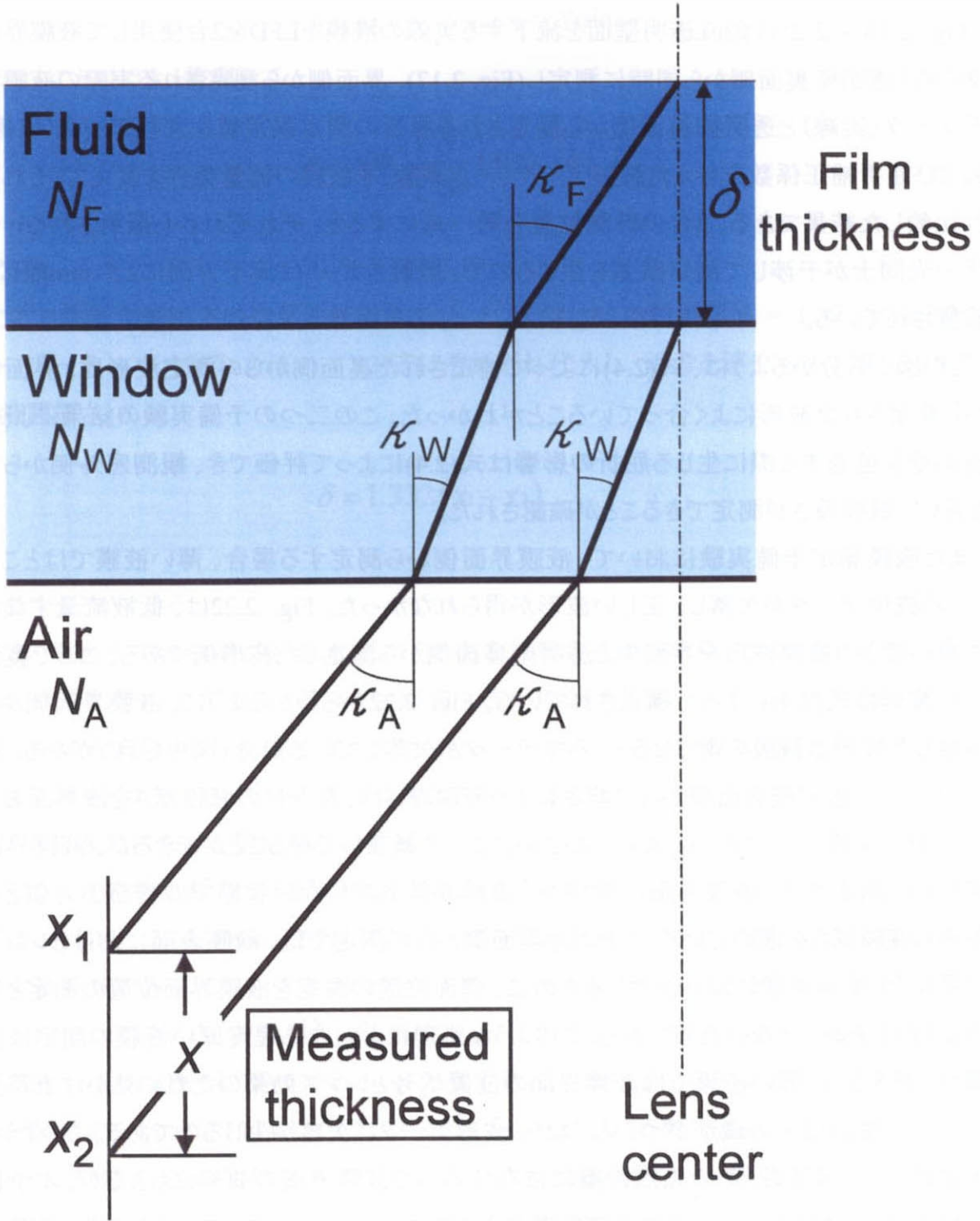


Fig. 2.14 Laser beam paths (plate wall)

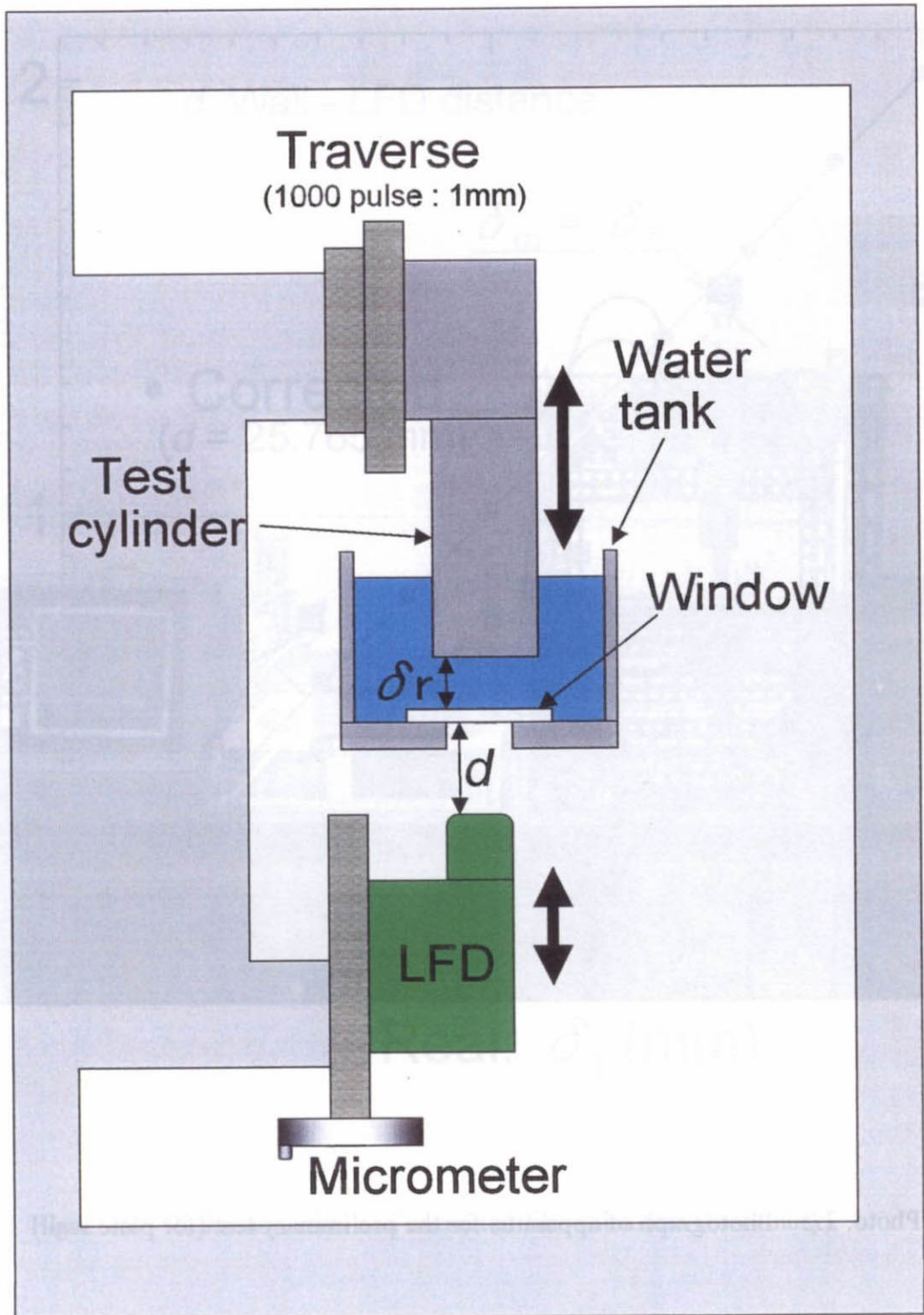


Fig. 2.15 Apparatus for the preliminary test (for plate wall)

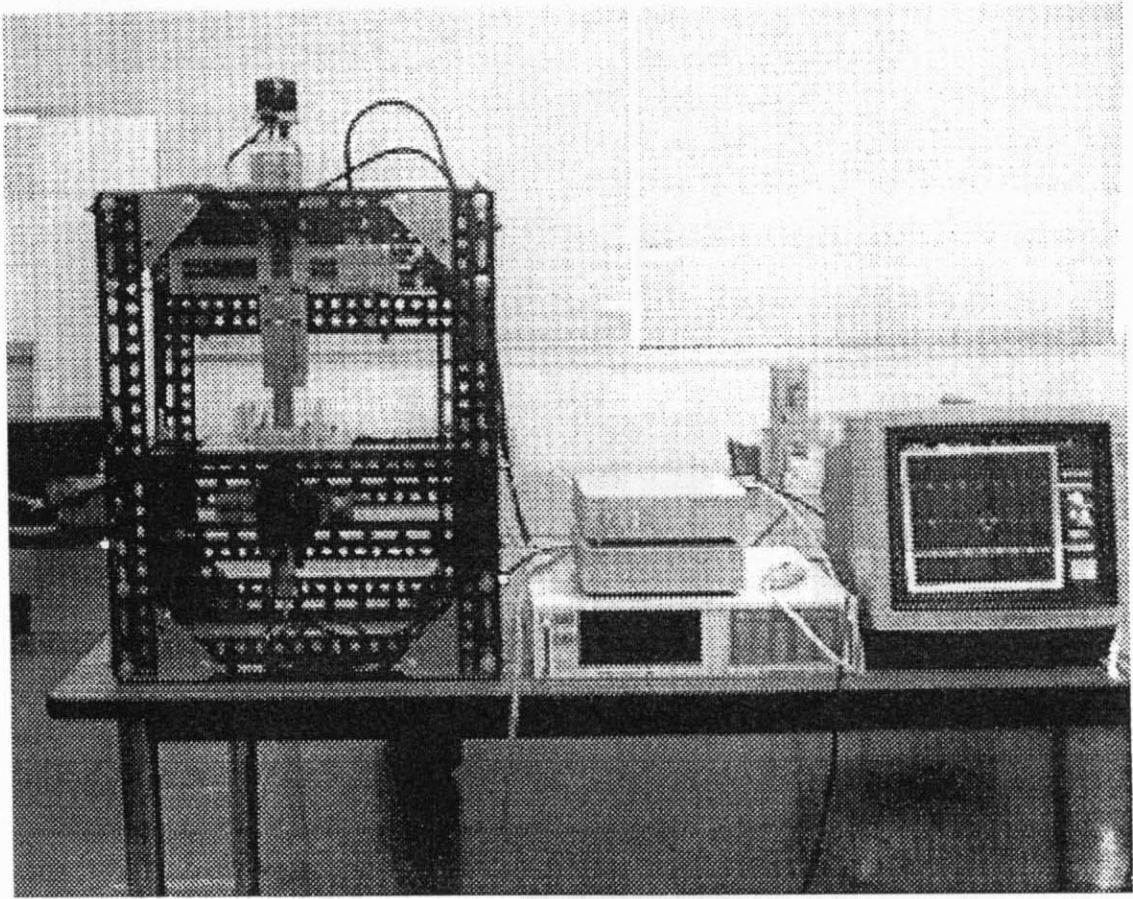


Photo. 2.2 Photograph of apparatus for the preliminary test (for plate wall)

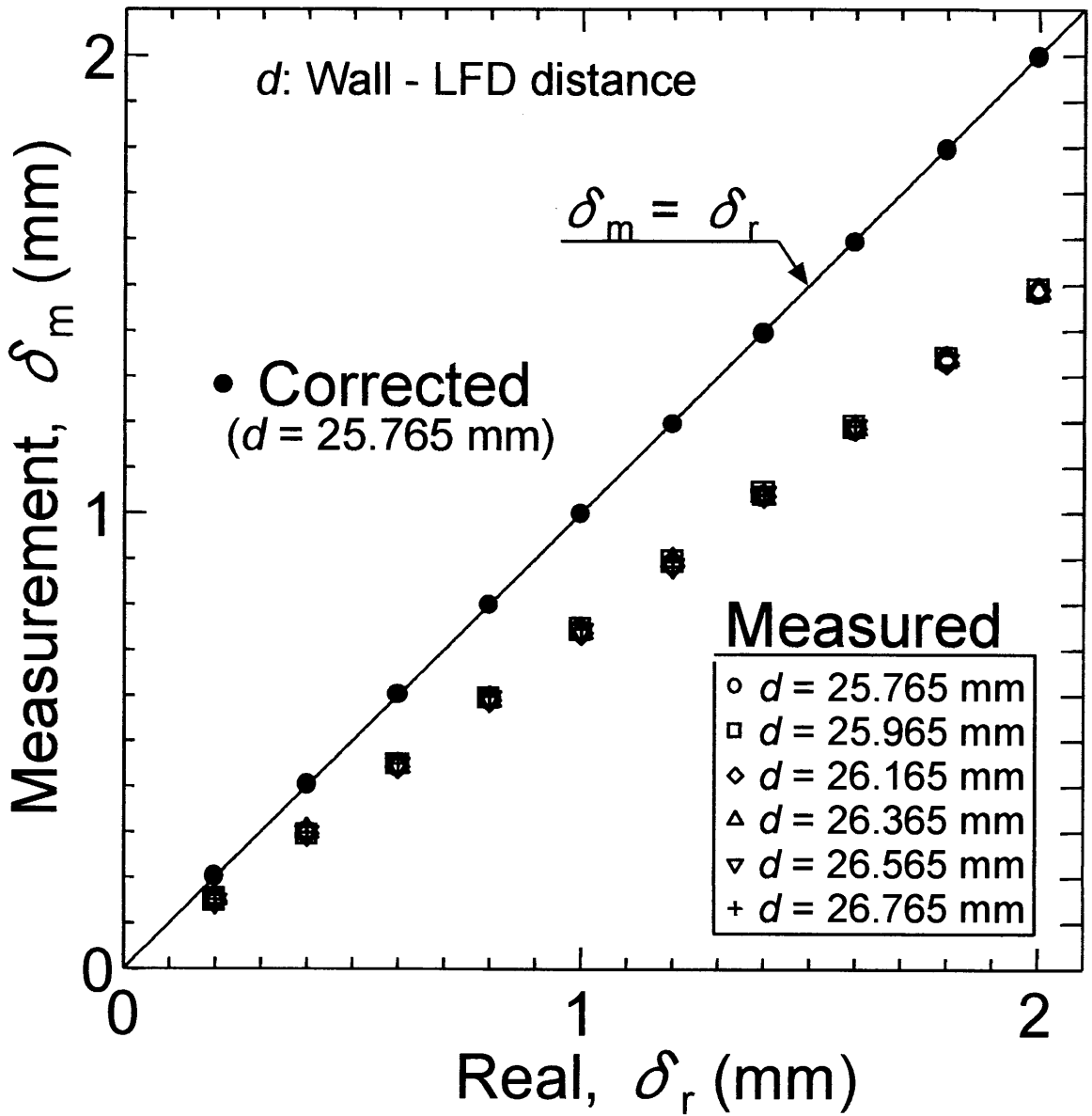


Fig. 2.16 Refraction error and corrected film thickness (Stationary)

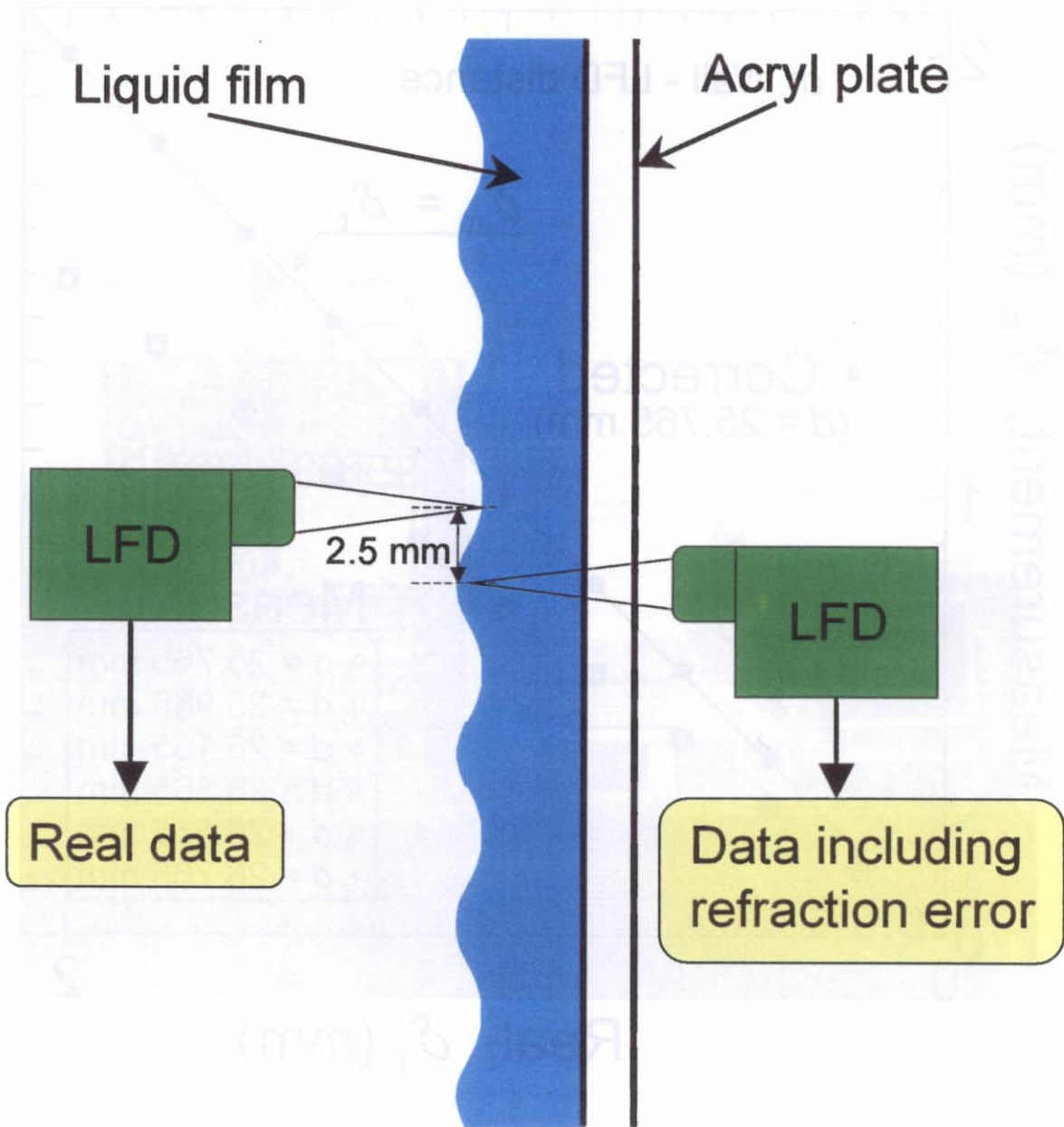


Fig. 2.17 Front and back measuring

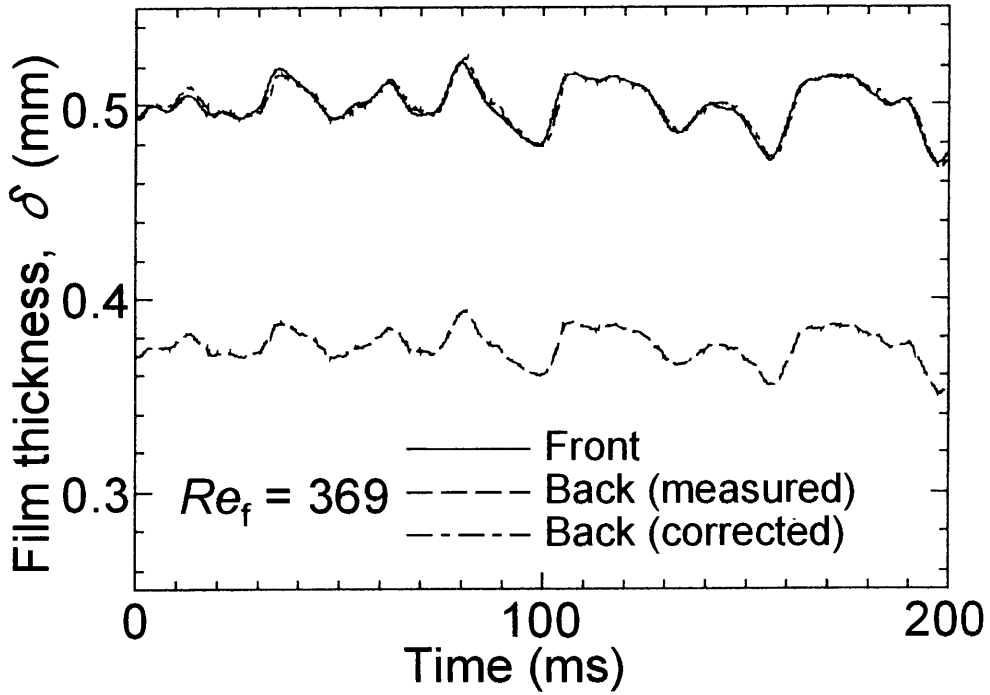


Fig. 2.18 Measured and corrected interfacial wave data
(Falling liquid film $Re_f = 369$)

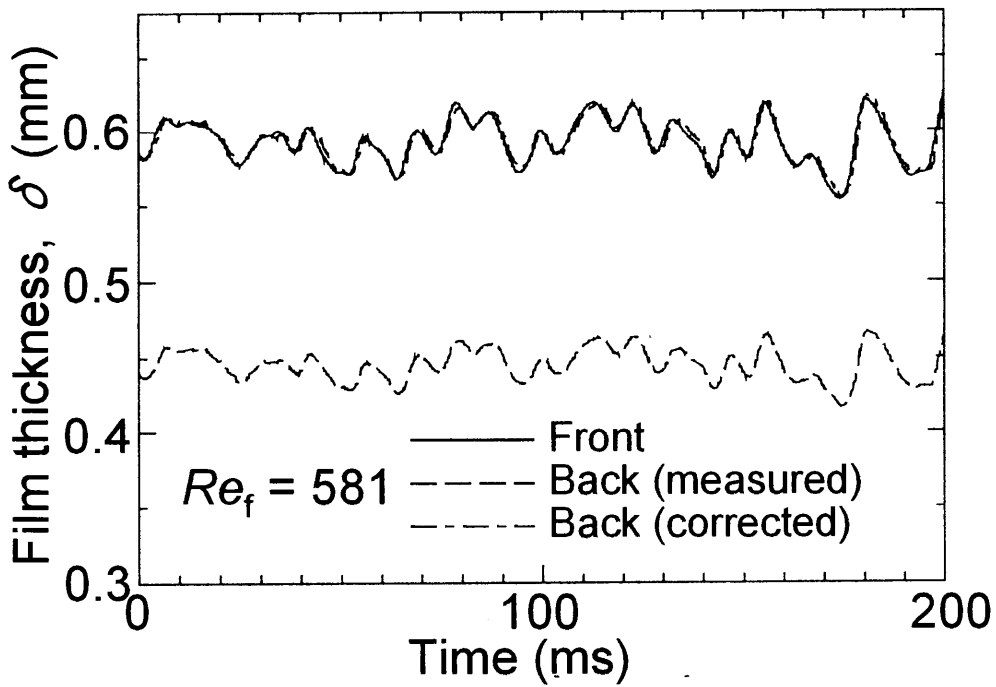


Fig. 2.19 Measured and corrected interfacial wave data
(Falling liquid film $Re_f = 581$)

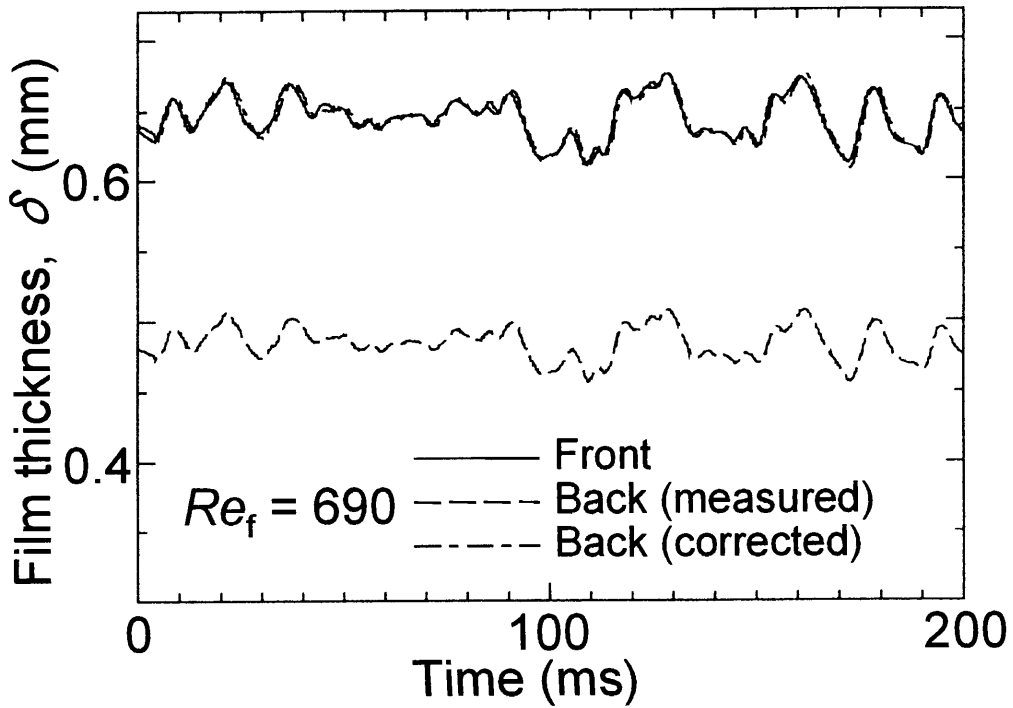


Fig. 2.20 Measured and corrected interfacial wave data
(Falling liquid film $Re_f = 690$)

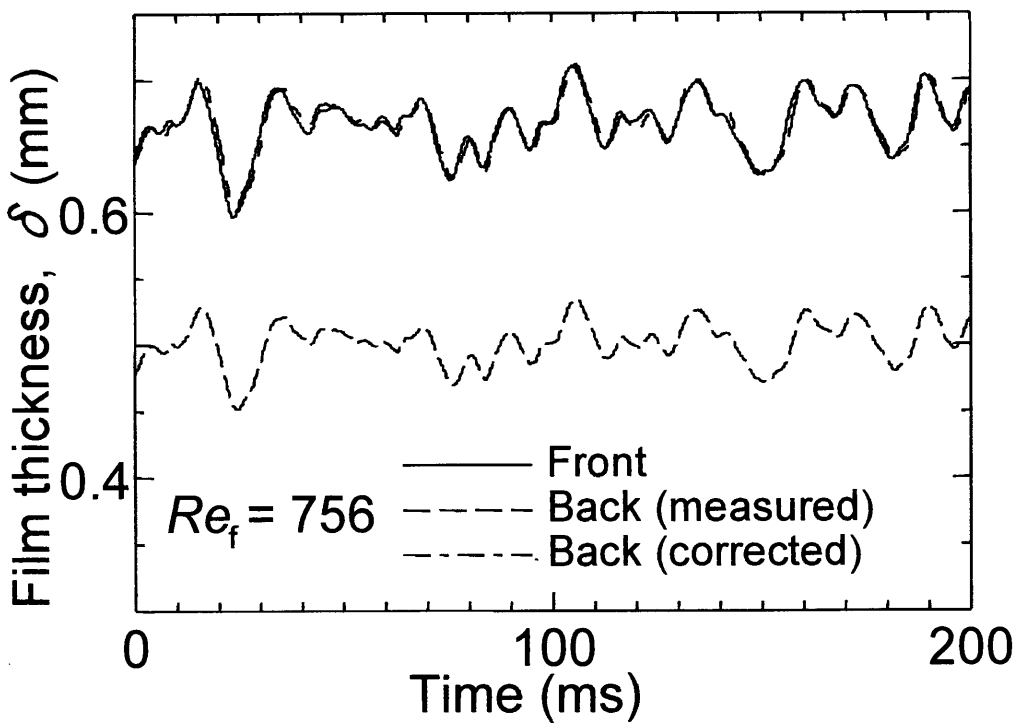


Fig. 2.21 Measured and corrected interfacial wave data
(Falling liquid film $Re_f = 756$)

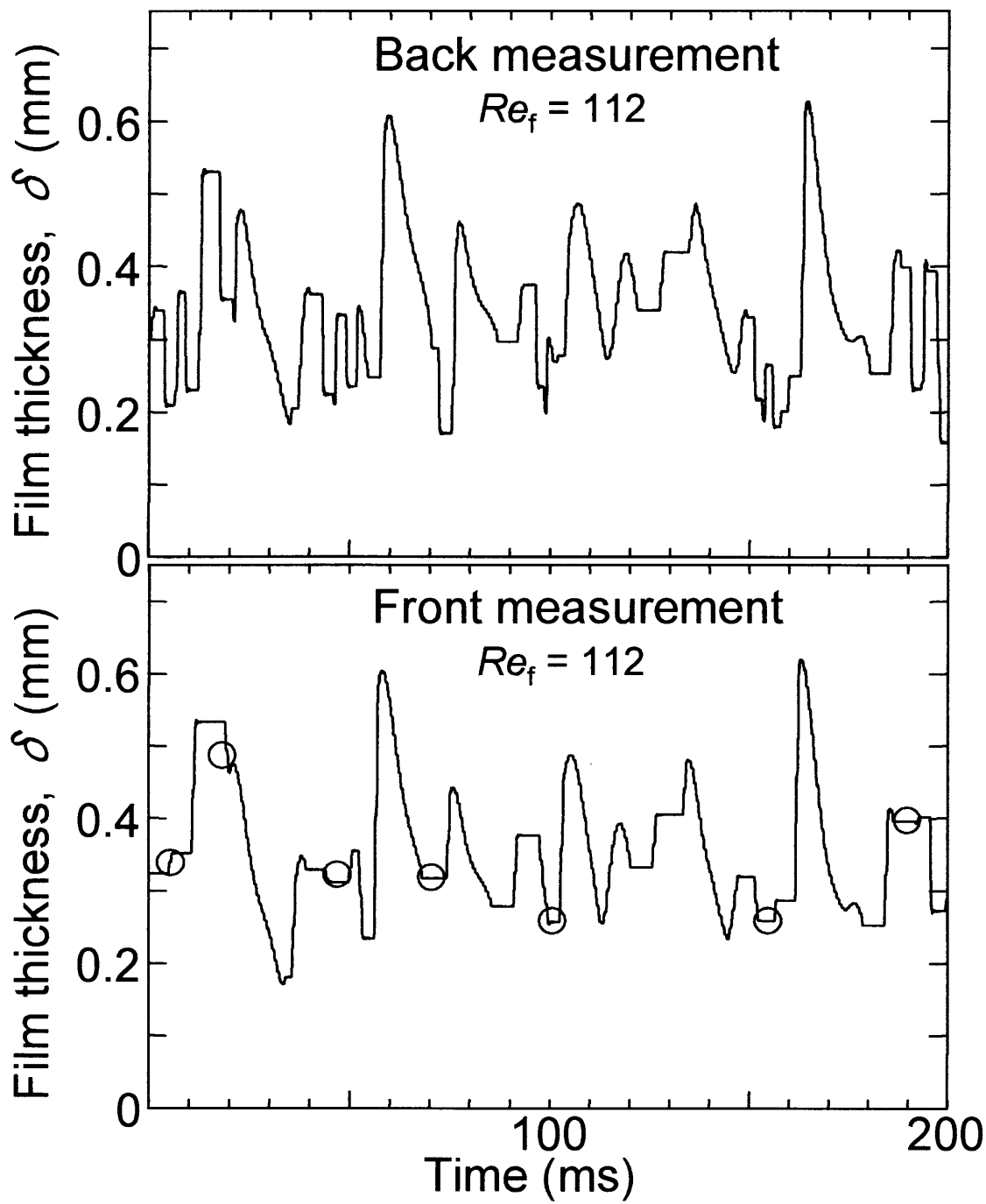


Fig. 2.22 Wave phenomena on thin-liquid film

2.4.3 円管内に形成する液膜の測定

(1) 円管内液膜の膜厚測定方法

円管路内壁面上に形成される液膜界面波は、透明壁外側から LFD によって測定される。この場合、管路壁面両表面での屈折による誤差を評価し、その補正を行う必要がある。平板透明壁裏面側より測定する際のレーザー光の屈折補正式は式(2.4)で表されるが、円管壁面の場合にはもう一つの問題が生じる。円錐状に照射された LFD のレーザー光は液膜界面上で焦点を結び、共焦点原理によってその散乱反射光が LFD 内の受光素子に入光する。ここで、円管壁面外部から管円周方向より入射し透明壁を通過するレーザー光と管軸方向より入射するレーザー光は、この円錐状レーザー光が平板壁面を垂直に通過する場合と異なり、同一点(レーザースポット)で焦点を結ぶことができない(Fig. 2.23)。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測定することができなくなるのである。この問題を解決するためにいくつかの予備実験が行われた。その結果、通常の円管では管の内外径および材質を変えても LFD による外側からの円管路内液膜界面位置の測定はできないこと、しかしながら Fig. 2.24 のように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、液膜界面位置の測定が可能になることが明らかになった。

(2) 透明円管の屈折補正

外壁側が平面である透明円管内壁面の液膜界面位置を LFD を用いて測定する際の屈折補正式を以下のように求める。まず、屈折の法則より理論的にこれを求める。LFD は 1 周期の対物レンズの往復運動により液界面および壁面の位置を検出でき、見かけの液膜界面位置をこれらの差として出力することができる。Fig. 2.25 のように LFD の光軸と円管内面との交点 O を原点とした X (内壁面接線方向)、 Y (管直径、円錐照射レーザーの光軸) および Z (管軸方向) 座標を置く。管軸方向から入射するレーザー光の焦点位置 y_z は、水を作動流体とした場合の平板における屈折の補正式を用いて算出される。

$$y_z = 1.332 \delta_m \quad (2.5)$$

次に円周方向から入射する円錐照射レーザー光の焦点位置 y_x を求める。透明壁面中の光路は以下のように表される。

$$y = -\frac{1}{\tan \kappa_w} x + \frac{\tan \kappa_A}{\tan \kappa_w} \delta_m \quad (2.6)$$

内径 D の管内壁面位置は、

$$y = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - x^2} \quad (2.7)$$

式(2.6), (2.7)を連立させ、管円周方向の入射光の屈折点 $P(x_p, y_p)$ を求めると、 P 点を通る接線が X 軸とのなす角 α は、

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{2x_p}{D - 2y_p} \right) \quad (2.8)$$

で求められる。スネルの法則から

$$\kappa_F = \sin^{-1} \left[\frac{N_w}{N_F} \sin(\kappa_w - \alpha) \right] \quad (2.9)$$

よって管円周方向の入射光の焦点位置 y_x は、

$$y_x = \frac{1}{\tan(\kappa_F + \alpha)} x_p + y_p \quad (2.10)$$

で表せられる。真の界面位置が散乱したレーザースポットの中心にあるとすると、液膜厚さ δ は、

$$\delta = (y_x + y_z) / 2 \quad (2.11)$$

ここで透明アクリルの屈折率 $N_w = 1.49$ 、水の屈折率 $N_F = 1.32$ 、またレーザー入射角 $\kappa_A = 11.5^\circ$ を式にそれぞれ代入して解くと、式(2.5) - (2.11)より以下の近似式が得られる。

$$\begin{aligned} \delta &= \delta(N_w, N_F, \kappa_A, D, \delta_m) \\ &= \left[1.332 + 0.2469 \frac{\delta_m}{D} \right] \delta_m \end{aligned} \quad (2.12)$$

上式は、円管内の液膜が管の外側に置かれた LFD により測定される場合、液界面およ

び壁面信号の差から計算される液膜厚さは式(2.12)に示される変数のみの関数になり、透明壁の厚さおよび LFD-透明壁間の距離にはよらないことを示している。

(3) 円管内液膜における測定精度の評価

次に、管軸方向に半分に割った水平透明アクリル管中の水深を測定する予備実験を行い、円管壁における屈折の補正式(2.12)を評価した。Fig. 2.26に示されるように、アクリル管の底部は水平面に加工されている。液膜厚さに相当する水の深さすなわち界面位置は、液膜界面側からと透明壁裏面側からの2台のLFDを用いて測定される。内径26 mmの場合の液膜界面側から測定された界面位置 δ_m と透明壁裏面側から測定された界面位置 δ_B の関係をFig. 2.27に示す。図において、□のマークは曲面を考慮していない屈折補正式(2.5)によって、●のマークは曲面を考慮した屈折補正式(2.12)によって、それぞれ◇のマークで示される測定値 δ_B を補正した値を示している。これらの屈折補正された値は、図中の直線で表される液膜界面側から測定された界面位置 δ_m と、前者は5 %、後者は1.5 %以内の誤差で合っていることがわかる。ここで、この誤差をさらに小さくするために、また管内径の大きさの影響を調べるために、さらに管内径10, 15 および30 mmのアクリル管を用いて、同様の予備実験を行った。その結果、管径によらず測定される界面位置はレーザースポットの中心よりわずかに外よりの位置であることが示され(Fig. 2.28)、最小二乗法で整理された補正式は、

$$\delta = \left[1.332 + 0.356 \frac{\delta_m}{D} \right] \delta_m \quad (2.13)$$

となった。この式は水を作動流体、アクリルを壁面として用いた場合の円管における液膜厚さを1 %以内の誤差で算出でき、管径 $D = 10 - 30$ mm、液膜厚さ $\delta \leq 2.4$ mm の測定に有効である。

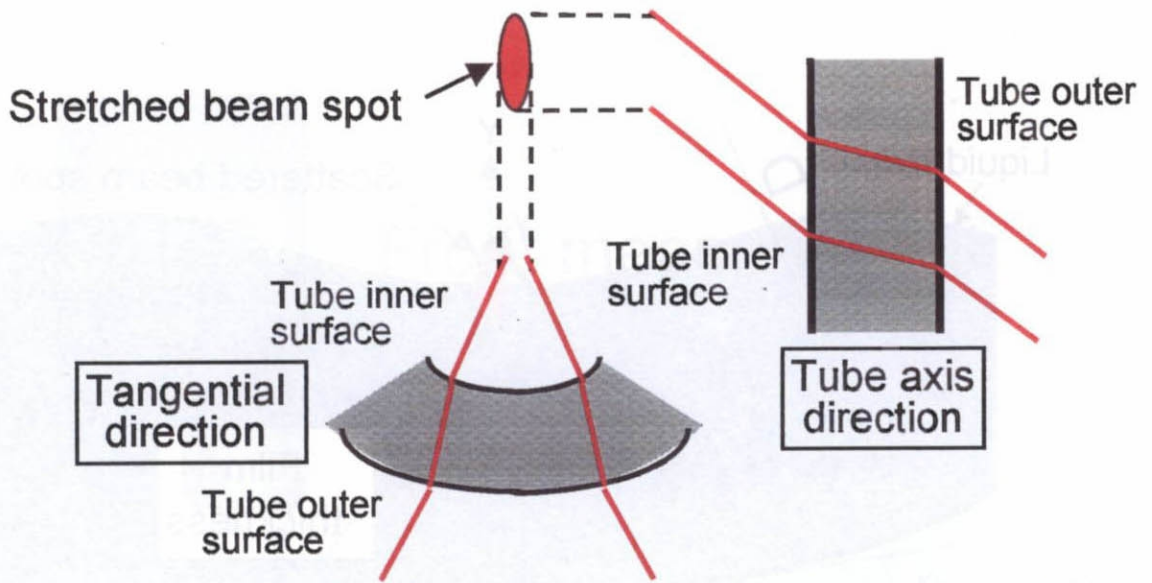


Fig. 2.23 Stretched beam spot

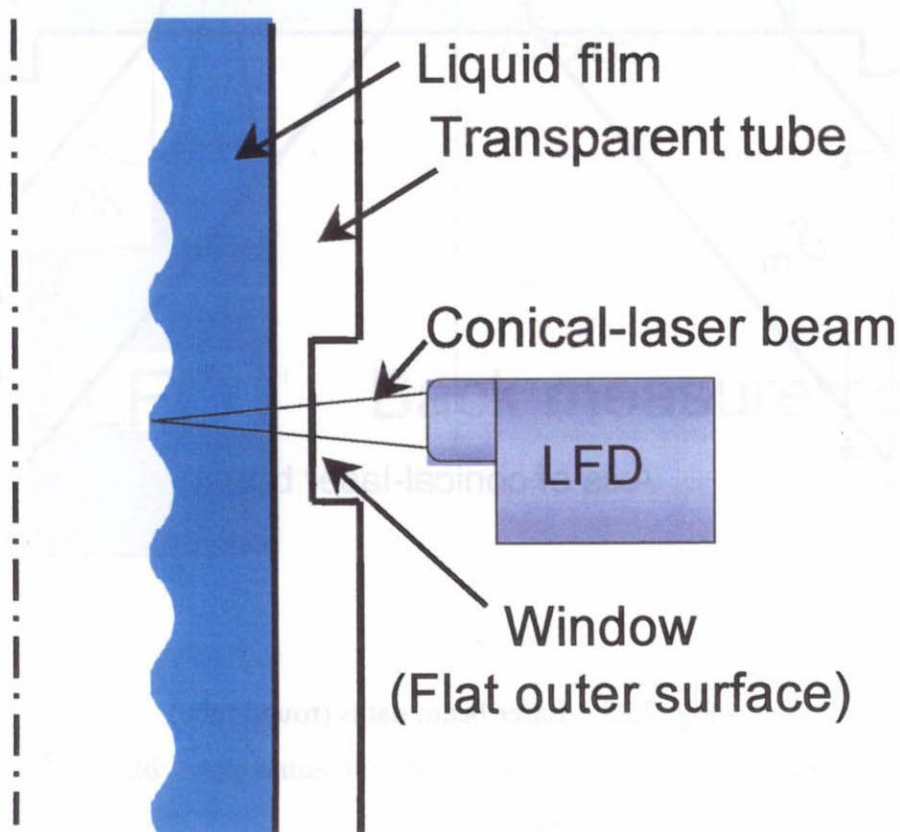


Fig. 2.24 Measuring for film on tube inner wall using LFD

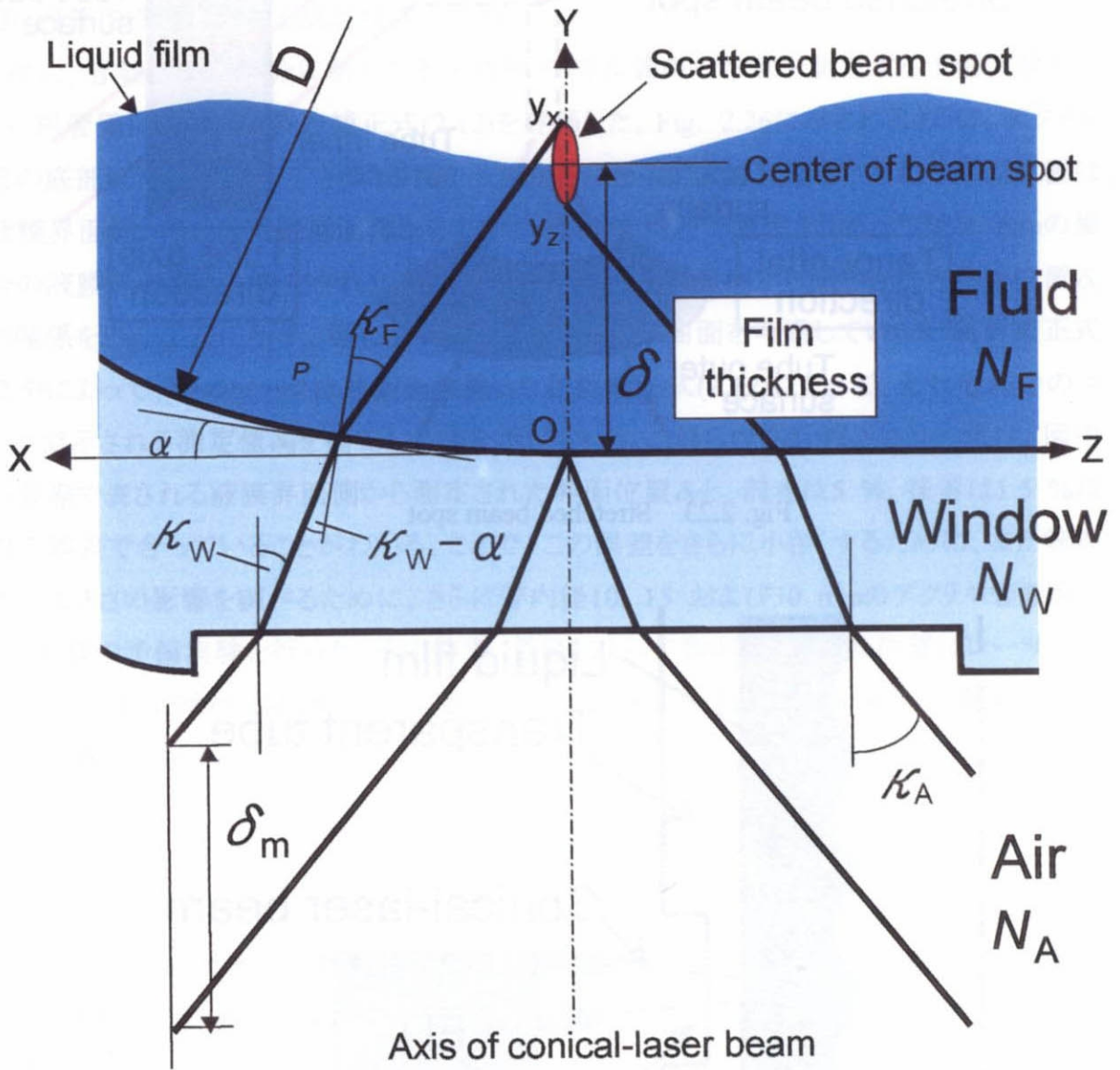


Fig. 2.25 Laser beam paths (round tube)

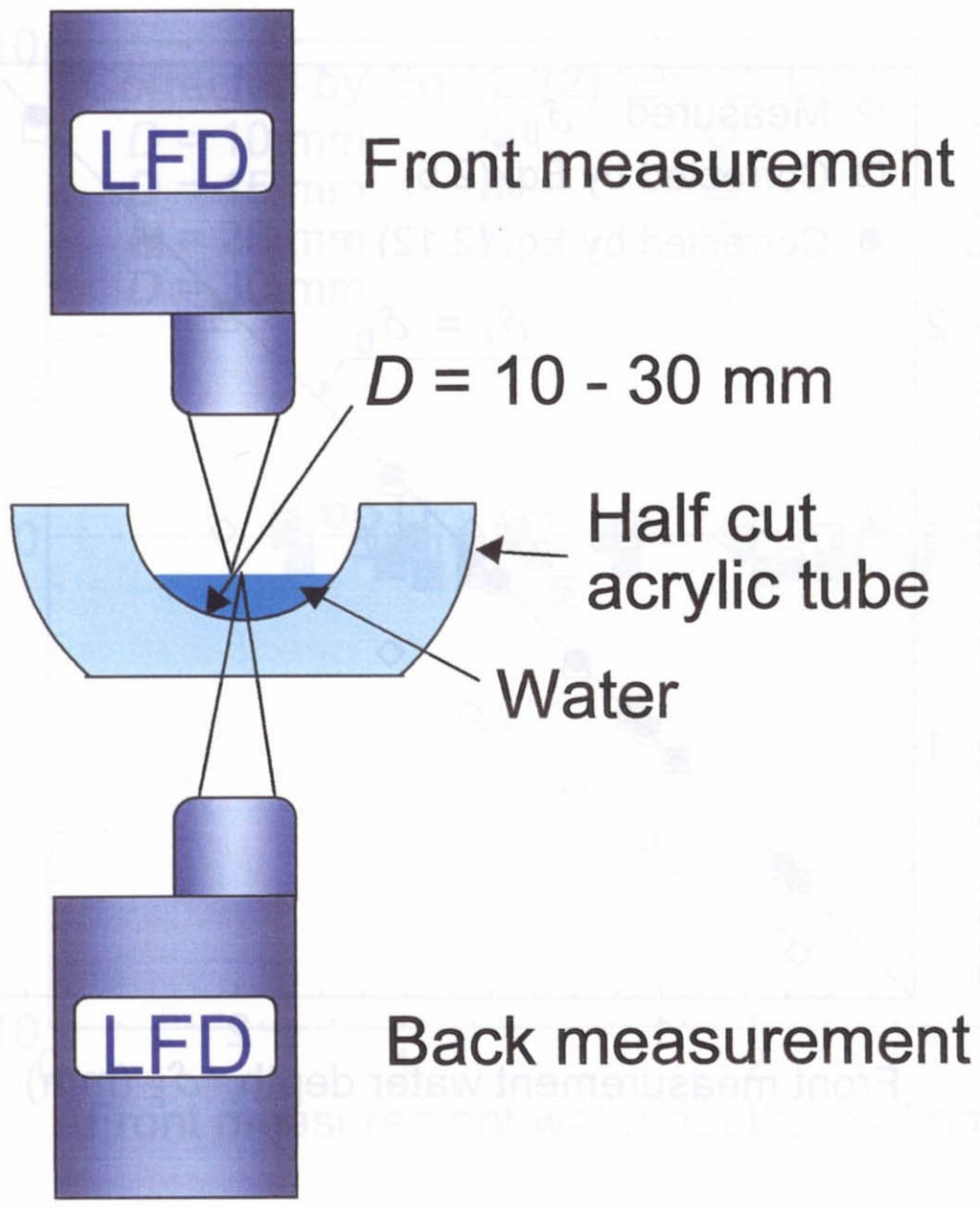


Fig. 2.26 Apparatus for the preliminary test (for round tube)

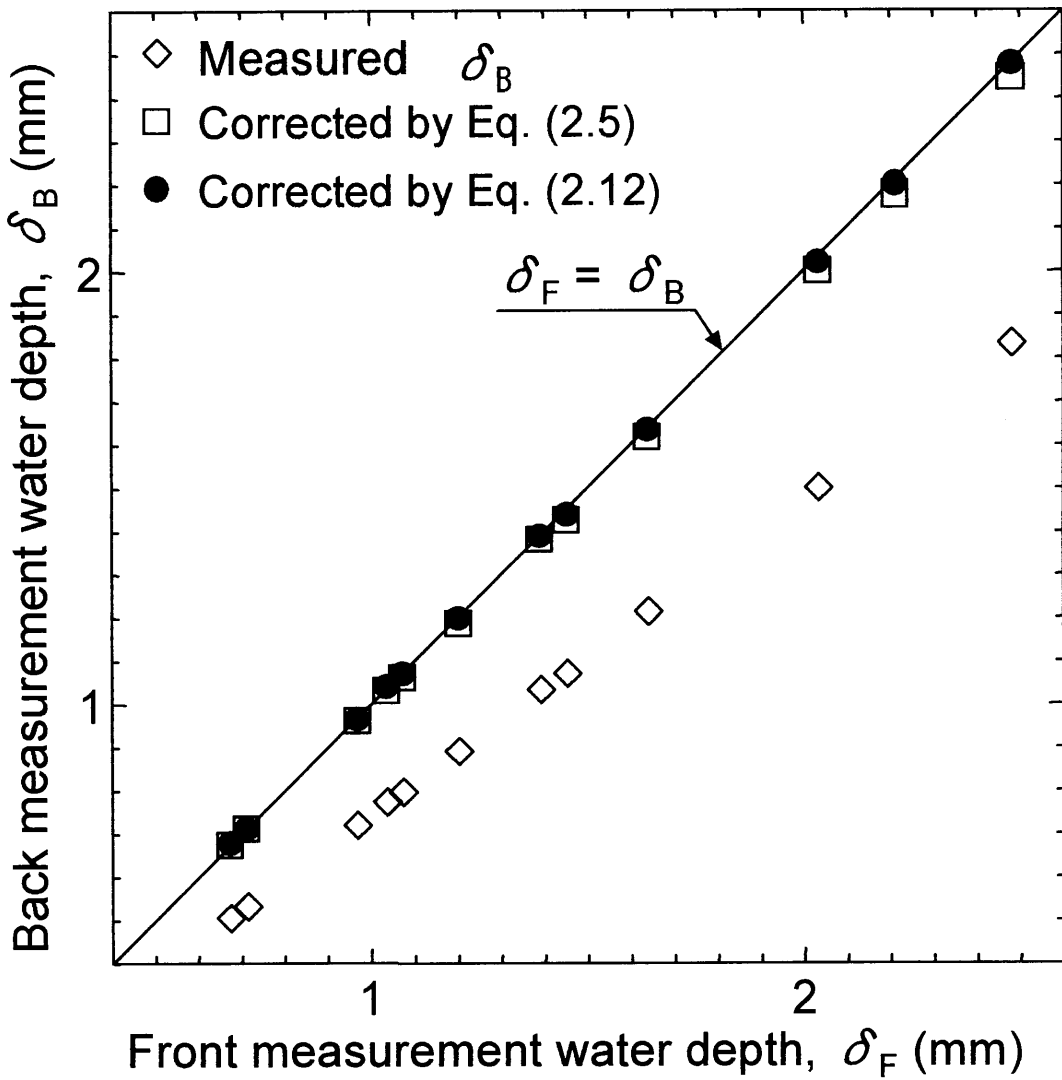


Fig. 2.27 Refraction error and corrected film thickness ($D = 26$ mm)

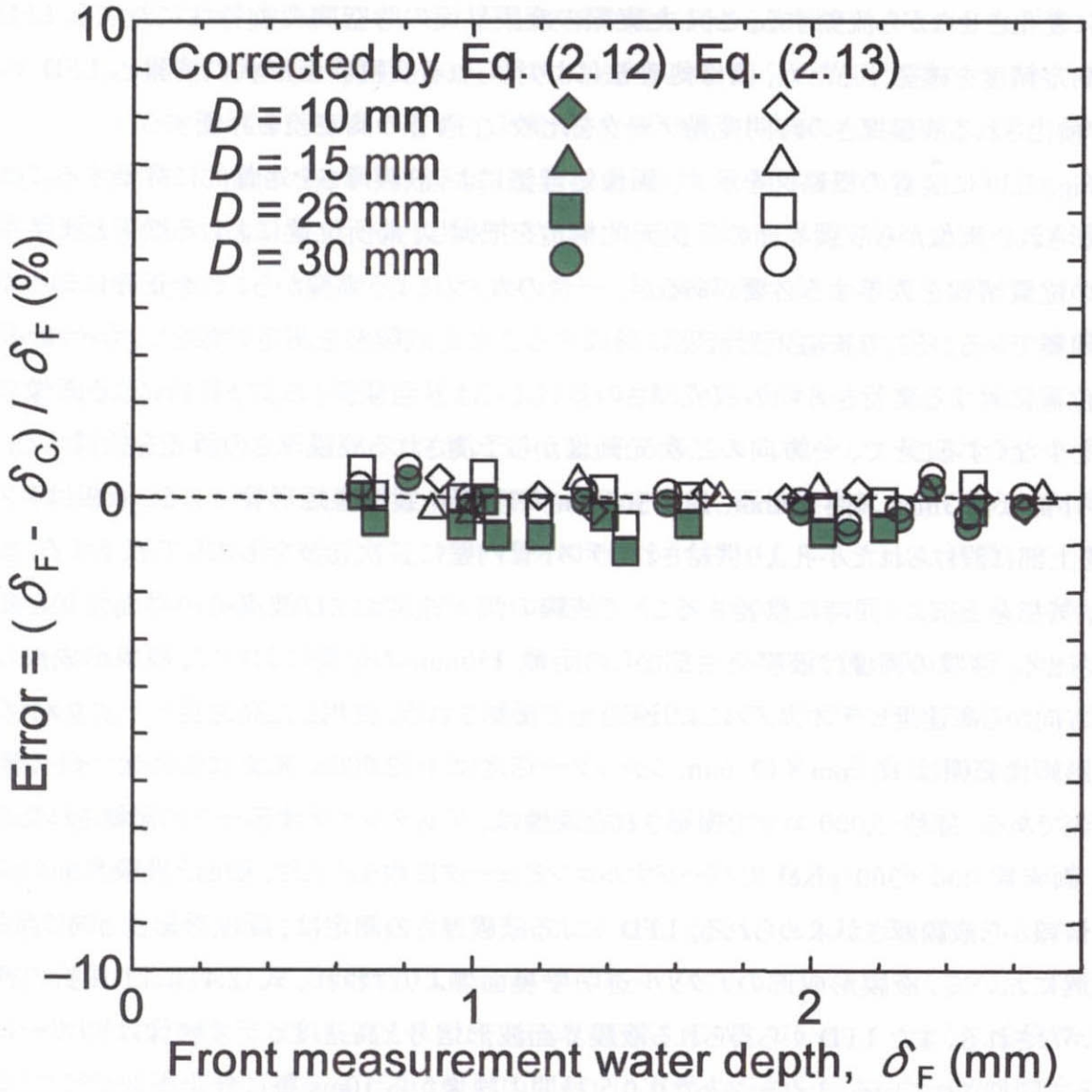


Fig. 2.28 Error estimation of film thickness corrected by Eq.(2.12) and Eq.(2.13)

2. 4. 4 画像処理法との比較による測定精度の検証

流下液膜や環状流に見られる液膜は、流動条件に応じて波高、界面傾斜、移動速度を常に変化させながら流動する。こうした実際の液膜界面の時空間変動特性に対する LFD の測定精度を確認するため、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、両者の測定差を評価する。

Fig. 2.29 に装置の概略図を示す。画像処理法により液膜厚さを定量的に評価するには、撮影された画像から液膜界面の三次元的構造を把握し、局所位置における壁面と液膜界面の位置情報を入手する必要があるが、一台のカメラによる画像からこれを正確に知るのは困難である。そこで狭隘矩形流路に形成する二次元液膜波を測定対象とし、カメラの設置位置に対する奥行き方向の液膜厚さの差(もしくは界面傾斜)および屈折による画像の歪を少なくすることで、一方向の二次元画像から予測される液膜厚さの誤差を低減する。テスト部は幅 3mm、高さ 10mm、長さ 300mm のアクリル製鉛直矩形管である。液相はテスト管上部に設けられた小孔より供給され、テスト管内壁に二次元波を形成して流下する。また、気相を上部より同時に供給することで液膜の流下速度および波高等の界面性状を変化させる。液膜の画像は液膜発生部からの距離 150mm の位置において、液膜形成部の横方向から高速度ビデオカメラにより透過光で撮影される。使用した高速度ビデオカメラの撮影画像範囲は 16 mm×12 mm、シャッター速度は 1/12,000s、光源は面発光ライトの連続光である。毎秒 1,000 コマで撮影された画像は、デジタルビデオテープに記録されたあと、画素数 400×300 pixel でパーソナルコンピュータに取り込まれ、壁面と液膜界面の位置情報から液膜厚さが求められる。LFD による液膜厚さの測定は、画像撮影部と同じ高さ位置において、液膜形成部のアクリル透明壁裏面側より行われ、式(2.4)により屈折の補正がなされる。また LFD から得られる液膜界面波形信号と高速度ビデオ映像はトリガーによって同期されている。1 ケースあたり 0.5 秒間の映像から 10ms 毎に静止画像(サンプル数 50)を抜き出し、画像処理して得られた液膜厚さと LFD の測定値を比較した。気液の流量範囲は、液膜界面に二次元波を形成できる条件として、液膜レイノルズ数 $Re_f = 300 - 600$ 、気相の見かけ速度 $j_g = 0 - 22 \text{ m/s}$ とした。気液流量がこの範囲を超える条件では、液膜界面の乱れと液滴の発生により矩形流路の両側壁面あるいは対向壁面にも液膜が形成する状態となり、画像処理による液膜厚さの測定に限界が生じたため検証を行っていない。

Fig. 2.30 - 2.33 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

より測定された液膜厚さの時間変動波形を示す。図中の○のマークは、画像処理により得られた液膜厚さの値である。液膜はメニスカスの影響を受けて流路両側壁面で盛り上がり、中央部において厚さが薄くなる。そのため液膜の横方向から撮影されたこれらの画像には、側壁面近傍の液膜が厚い部分と断面中央の液膜が薄い部分の界面が重なって映し出されているが、画像処理においては LFD の計測位置(断面中央部)と対応すると考えられる壁面に最も近い(液膜の薄い)界面の位置情報を用いて液膜厚さを求めている。Fig. 2.30 は気相を流入させない条件で液膜を流下させた状態を測定した例である。そのまま液膜を流下させた状態では、液膜の界面には波がほとんど形成せず鏡面状態となり、画像処理で得られる液膜厚さが一定となるため、ここでは液の流入量を周期的に変化させて液膜界面に規則的な二次元波を形成させている。この条件では、液膜厚さが波の前端部において約 0.1 mm から約 0.5 mm まで急激に変化し、その後徐々に減少して後部に長いすそ野を持つ波形状となるが、LFD による液膜厚さの測定値は、画像処理によって得られた液膜厚さの値と良く対応している。Fig. 2.31 は気相の見かけ速度 $j_g = 8.3 \text{ m/s}$ 、液膜レイノルズ数 $Re_f = 600$ の条件において測定された結果である。気相の混入によって、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。なお、従来の電極式測定法では、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 0.05 - 1 mm に達する孤立波を形成するようになる(Fig. 2.32, Fig. 2.33)。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おり、従来の測定手法では正確に測定できなかった波の頂部と最小部の厚さを精度良く測定できている。Fig. 2.34 は LFD で測定された液膜厚さと画像処理により得られた液膜厚さの測定差を示している。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 mm 以下となる極薄い液膜の厚さを精度良く測定できることが確認された。

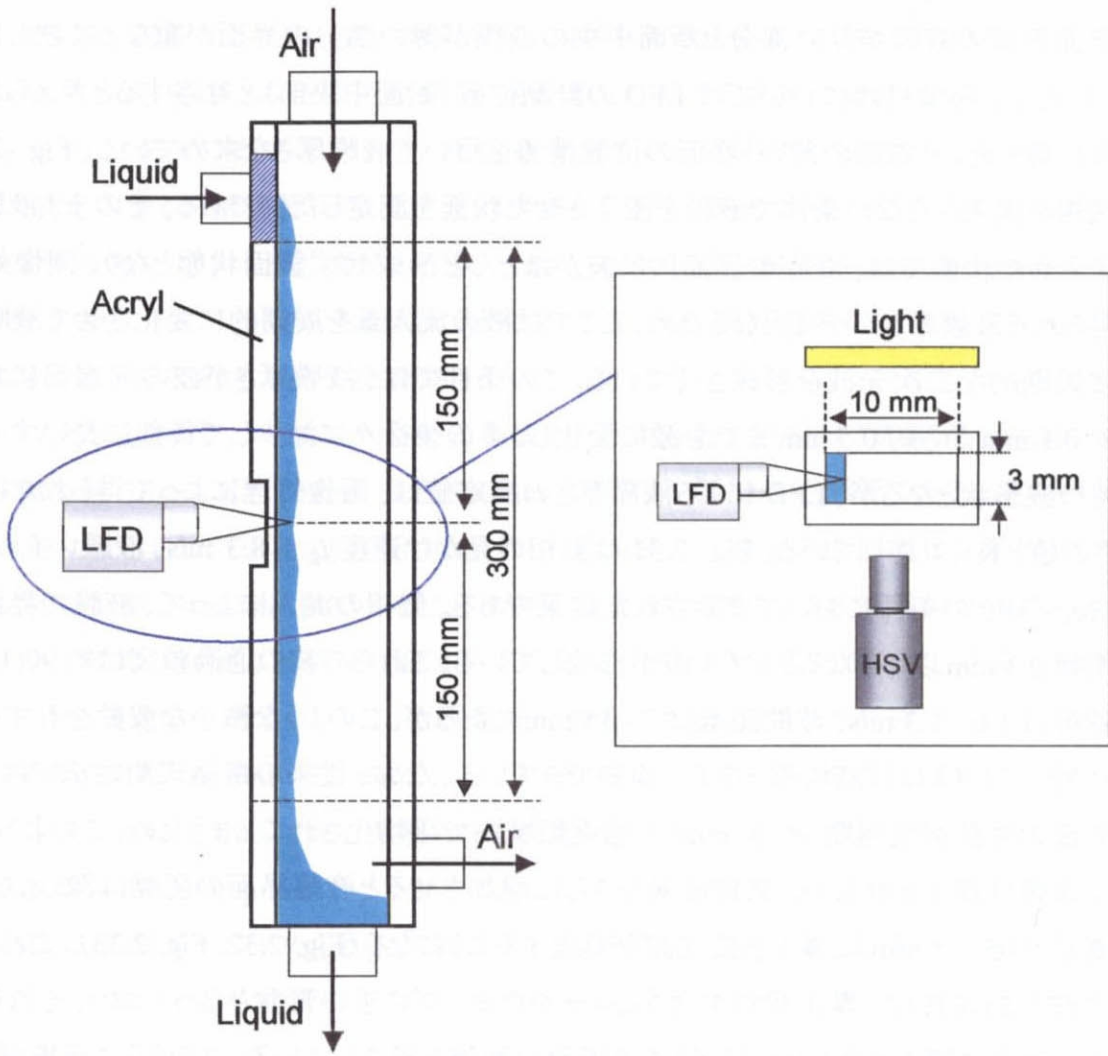


Fig. 2.29 Apparatus for the error estimation of liquid film thickness measured by LFD and image-processing method

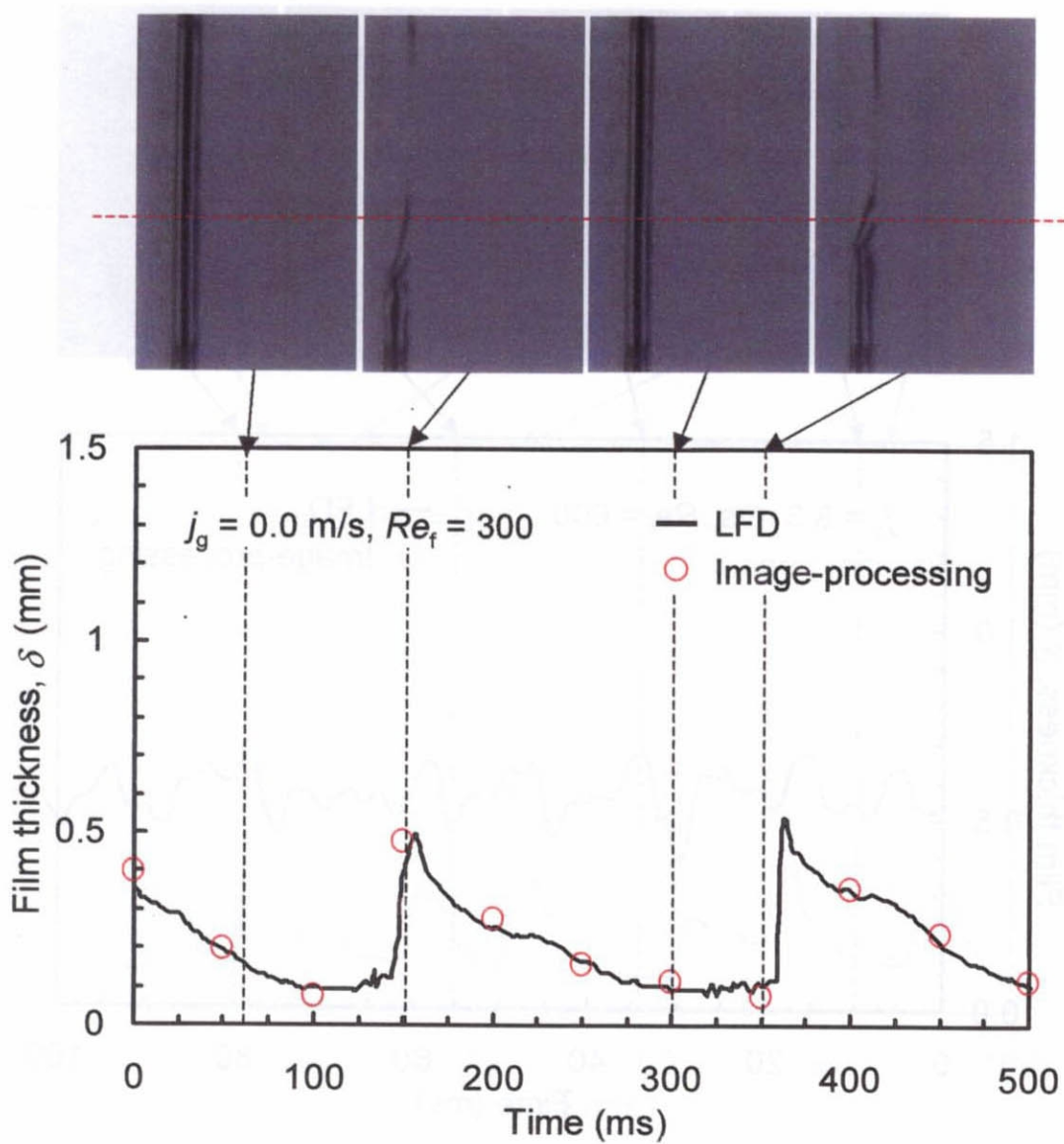


Fig. 2.30 Comparison between the data of film thickness measured by LFD and image-processing method ($j_g = 0.0$ m/s, $Re_f = 300$)

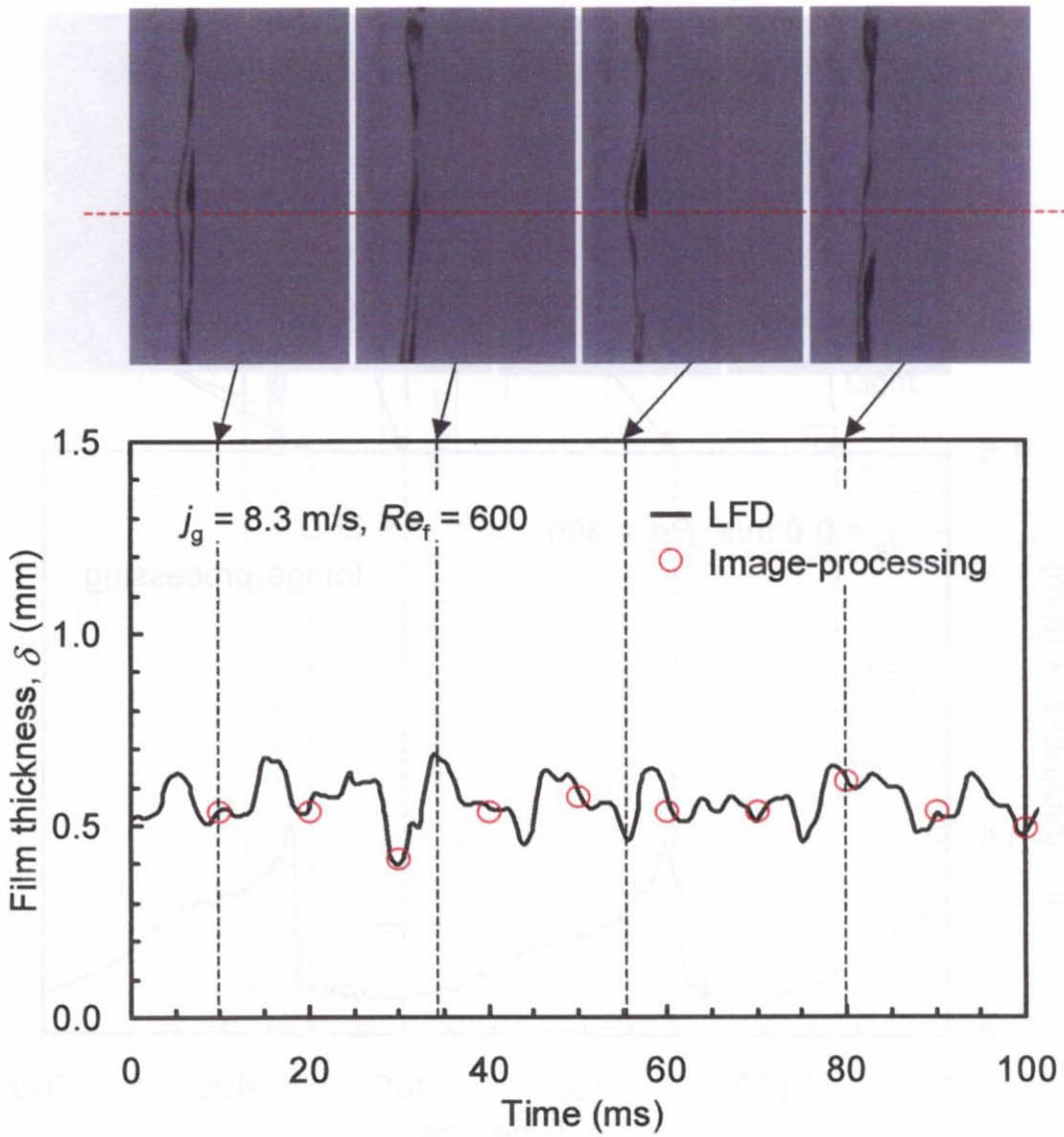


Fig. 2.31 Comparison between the data of film thickness measured by LFD and image-processing method ($j_g = 8.3$ m/s, $Re_f = 600$)

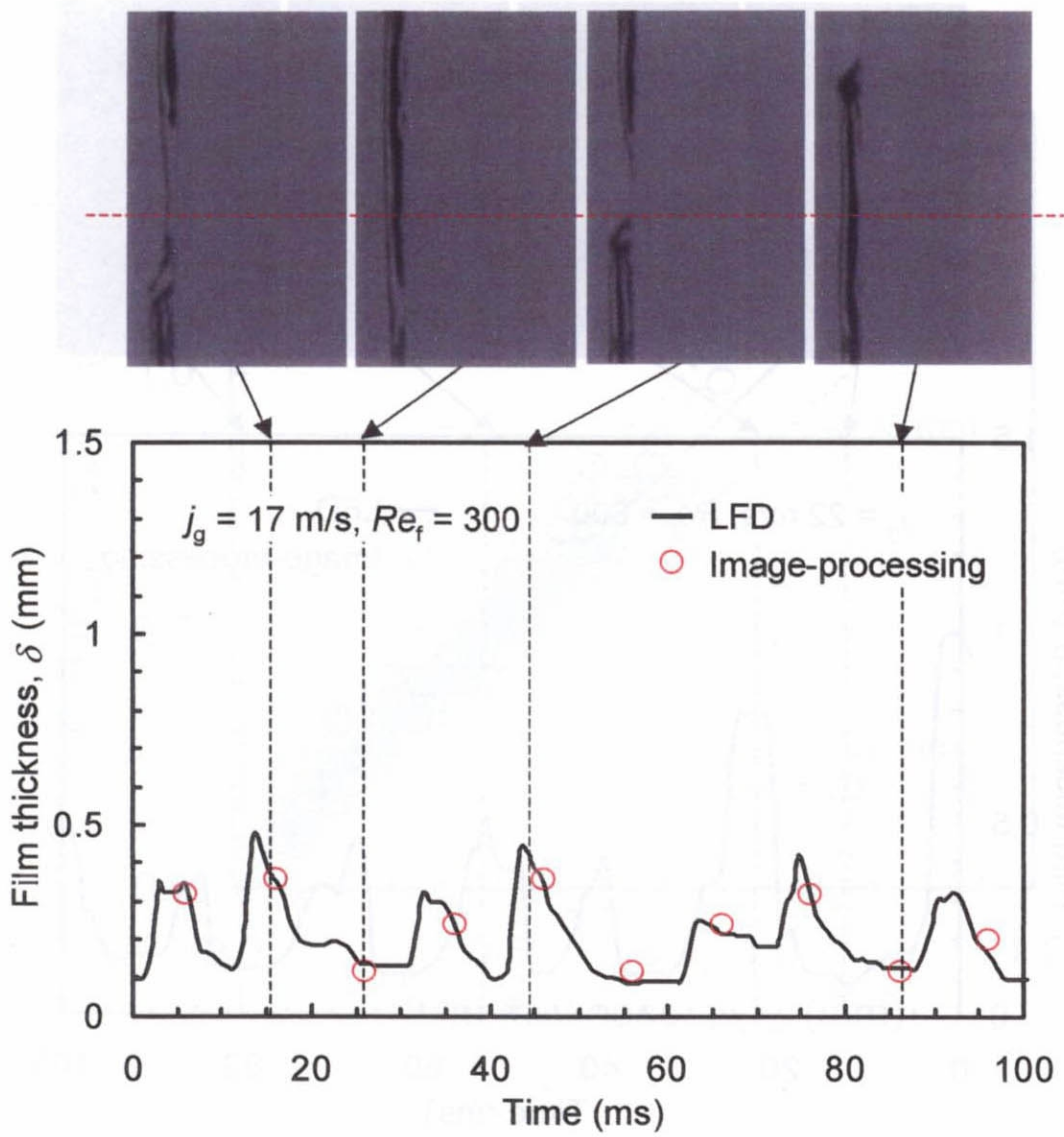


Fig. 2.32 Comparison between the data of film thickness measured by LFD and image-processing method ($j_g = 17$ m/s, $Re_f = 300$)

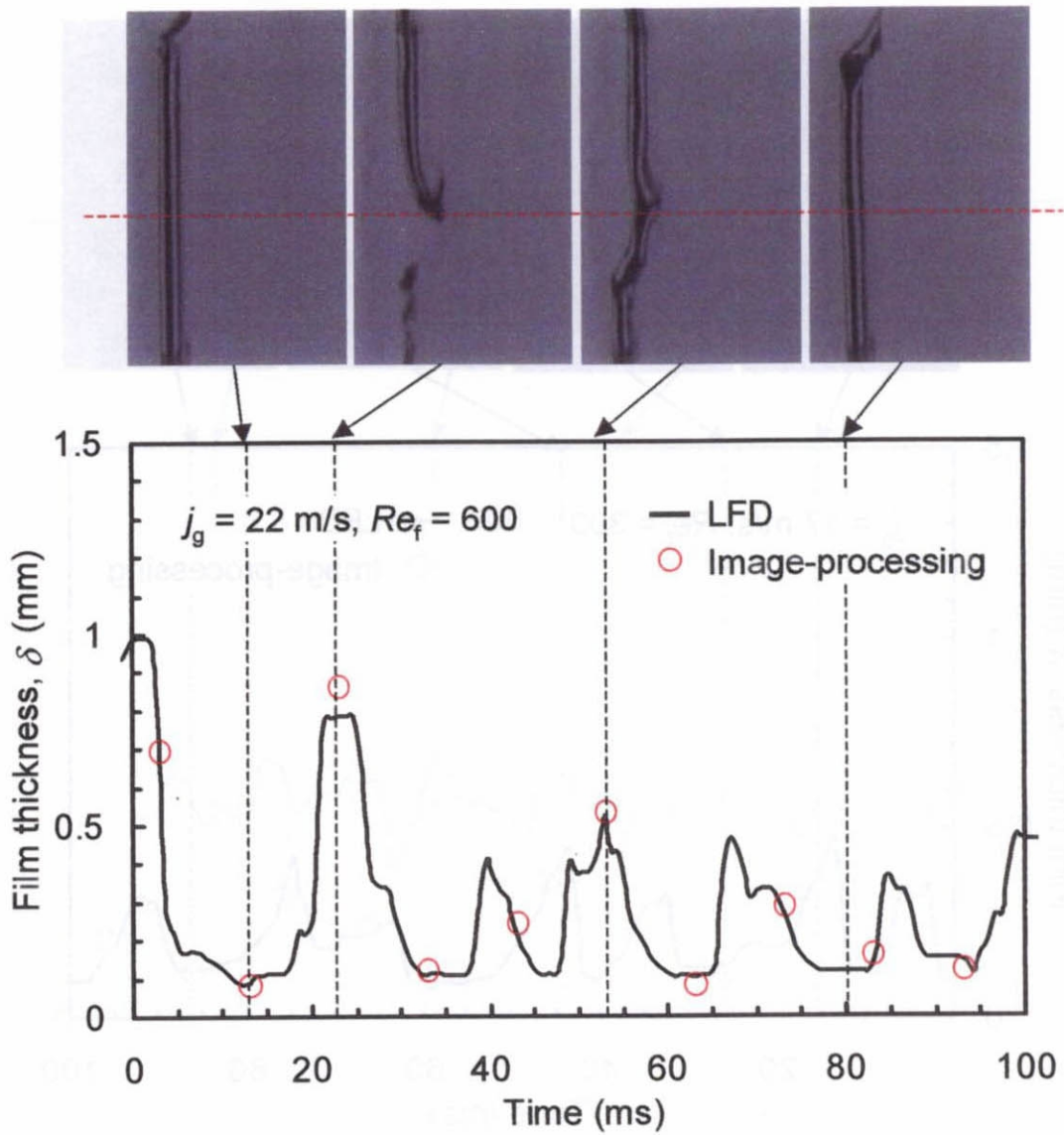


Fig. 2.33 Comparison between the data of film thickness measured by LFD and image-processing method ($j_g = 22$ m/s, $Re_f = 600$)

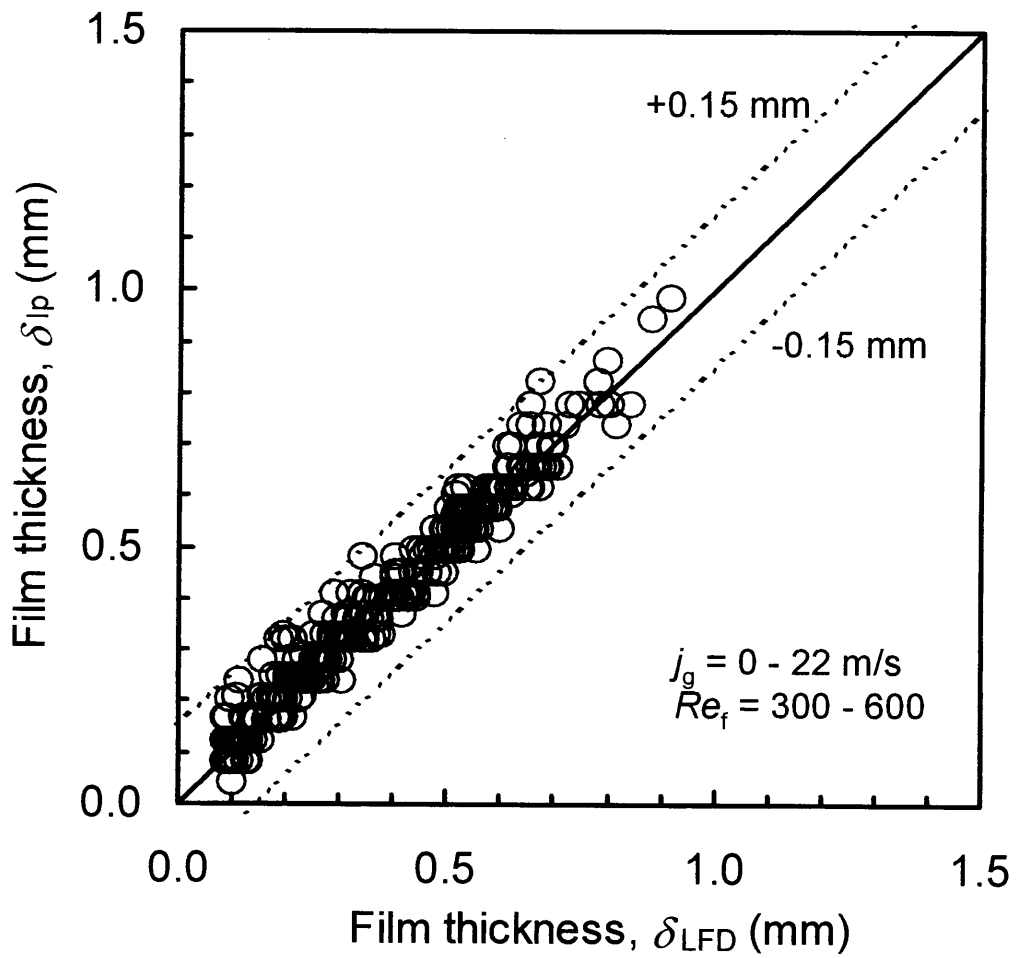


Fig. 2.34 Error estimation of film thickness measured by LFD and image-processing method

2.5 結言

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)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 μm 以下の変位に対して0.85 μm 、100 μm より大きい変位に対して1.45 μm であった。
- ・ LFDの応答時間は最大で1.1 msであった。
- ・ 透明体の表面傾斜に対する測定限界は約 30° 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) 透明平板壁裏面側から測定する場合の壁面両表面での屈折による誤差を評価し、その補正を行う式を得た。液膜が液界面および壁面の位置の差から計算されるときに屈折の補正係数は透明壁の厚さ、屈折率およびLFD-透明壁間の距離等にはよらず空気と液体の屈折率のみに依存し、式(2.4)で表されることが示された。予備実験により、透明壁を通過する際に生じる屈折の影響は式(2.4)によって評価でき、観測窓外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。
- (3) 液膜界面側から測定する場合、薄い液膜では液膜界面の位置信号とレンズ効果のために見掛け上移動してしまう壁面信号の識別がつかなくなり、波形データに欠落が生じることがあることがわかった。このような現象は、本予備実験では厚さ約0.6 mm以下の液膜を測定する際に生じた。このような薄い液膜の波形を測定する場合は、透明壁裏面側からのほうが精度よく測定できる。
- (4) 透明円管路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。作動流体と透明壁にそれぞれ水とアクリルを用いた場合の屈折の補正は式(2.13)のように表される。式(2.13)は観測窓における透明壁の厚さおよびLFD-透明壁間の距離

によらない。また、管径 $D = 10 - 30 \text{ mm}$ 、液膜厚さ $\delta = 2.4 \text{ mm}$ 以内の測定の場合、円管における液膜厚さを1 %以内の誤差で算出できる。

- (5) 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 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。