流体薄膜の可視化と定量測定*

大場謙吉**

Visualization and Quantitative Measurement of Thin Liquid Film /
Kenkichi OHBA**Key words:** thin liquid film, visualization, quantitative measurement, laser-induced fluorescence, pigment, luminance

1. はじめに

固体表面上を流動する流体薄膜は、回転軸受やピストン、シリンダ間などの潤滑、貫流ボイラの蒸発管壁、沸騰水型原子炉の炉心燃料棒表面を始めとして産業の様々な分野で見られ、その挙動や特性、すなわち局所瞬時の膜厚や移動速度、界面形状や物性値等を正確に知ることは、機器の運転や安全上きわめて重要である。

ここでは、液膜の可視化と膜厚測定に話を限定する。固体表面上を流動する液膜の局所膜厚さの測定¹⁾は気液二相流の分野ではほとんど日常的に行われており、膜導電法、触針法、静電容量法、蛍光法、光ファイバ法²⁾等が用いられている。しかし、これらはいずれも点測定法であり、面情報を得るためには Scanning や膨大な多点測定が必要となり、とくに瞬時瞬時の面情報を得ることは点測定法ではほとんど不可能となる。そこで、液膜の可視化技術との組合せが必要になる。本解説では、可視化法として顔料輝度法^{3)~5)}、Scanning 法としてレーザ誘起蛍光法⁶⁾⁷⁾を中心に述べる。

2. 顔料輝度法^{3)~5)}

2.1 顔料輝度法による液膜測定の概要

顔料輝度法は、気液二相環状流の界面波を可視化するために筆者らが始めた、水に少量の白色顔料（主成分二酸化

チタン）を混入することによって固体表面上を流動する薄い液膜を可視化する手法である³⁾⁴⁾。観測される輝度の強さとは、流路外側から液膜に照射された白色光が、液中に一樣に混入された白色顔料の微粒子によって後方散乱される場合の反射光の強さである。入射光と反射光の光路は定まっているので、この反射光強度は関与する散乱粒子の数、つまり液膜厚さにはほぼ比例すると考えられる。したがって、ある瞬間における液膜厚さの空間分布、すなわち界面波の波形はビデオ画像上では明暗の模様として示されるので、この模様の時々刻々の変化を追跡すれば界面の挙動を把握できる。さらに輝度と膜厚の間の信頼できる校正曲線を得ることができれば、画像処理によって輝度の空間分布を数値化しているので、液膜厚さの空間分布を定量的に得ることができる。

そのために、まず輝度と液膜厚さの関係の校正実験について述べる。そして、その結果と、光の透過率が指数減衰則に従うと考えて導出した輝度と液膜厚さの関係の理論式とを比較する。さらに、これらの結果に基づいて行った鉛直上昇気液二相環状流の界面波の可視化と液膜厚さの定量測定について述べる。

2.2 指数減衰則に基づく理論式の導出

我々の実験に用いた白色顔料は、二酸化チタン粒子（平均粒径約 $0.4\ \mu\text{m}$ ）と炭酸カルシウム粒子の2成分から成っているが、光の反射に寄与しているのは主に二酸化チタン粒子である（反射光強度中の TiO_2 と CaCO_3 の寄与分の比率は、約 25 : 2 である）ので、この系における光の減衰および散乱現象の物理を損なうことなくモデルを単純化するために二酸化チタンのみで考えることにする。また、粒径は一樣であるとする。理論式を誘導するために図1のようなモデルを考える。入射光 I_0 が液中を顔料粒子による散乱により減衰しながら進み、 z 面で dB' だけ反射

* 原稿受付 平成8年2月5日

** 関西大学工学部（吹田市山手町3-3-35）
1969年大阪大学工学研究科博士課程（超高温理工学研究施設）単位修得退学，工学博士。
1988年関西大学工学部機械システム工学科教授，現在に至る。研究分野：流体計測，生物流体力学，混相流。著書：流体計測法（分担執筆），生命科学とは（共著）

図1 顔料輝度法の理論モデル

し、反射光 dB' がさらに減衰され、液表面から dB で射出すると考える。ここで光の透過率は次式のように表される。

$$I^* = \frac{I}{I_0} = \exp[-n_{TD}\sigma_{TD}z] \quad (1)$$

ここで、 I は z 面に入射する光の強度である。また、 n_{TD} は粒子の数密度、 σ_{TD} は粒子の投影断面積であり、それぞれ次のように表される。

$$n_{TD} = \frac{6m_{TD}a}{\pi\rho_{TD}d_{TD}^3} \quad (2)$$

$$\sigma_{TD} = \frac{\pi d_{TD}^2}{4} \quad (3)$$

ここで、 a は作動流体 1 m^3 中に混入する白色顔料の質量、 m_{TD} は白色顔料中の粒子の質量分率、 ρ_{TD} は粒子の密度、 d_{TD} は粒子径である。次に、 z 面での光の反射を考える。 z 面に図1に示すように単位断面積1、幅 dz の微小領域を考え、単位断面積、単位深さの領域に含まれる粒子の全投影断面積を S_{TD} とすると次式を得る。

$$S_{TD} = \frac{n_{TD}\pi d_{TD}^2}{4} \quad (4)$$

粒子の反射率を単位断面積当たり R_{TD} とすると図1の微小領域に入射した光強度 I のうち、 $IR_{TD}S_{TD}dz$ ($\equiv dB'$) だけ反射されることになる。この dB' が粒子群中を z だけ逆進する間に、式(1)と同じ減衰を受けるので、結局図1下図の微小領域で反射された光の出口での強度は次式のようになる。

$$\begin{aligned} dB &= dB' \exp[-n_{TD}\sigma_{TD}z] \\ &= I_0 R_{TD} S_{TD} dz \exp[-2n_{TD}\sigma_{TD}z] \end{aligned} \quad (5)$$

よって、全反射光強度 B は

$$\begin{aligned} B &= \int dB = \int_0^z I_0 R_{TD} S_{TD} \exp[-2n_{TD}\sigma_{TD}z] dz \\ &= \frac{I_0 R_{TD} S_{TD}}{2n_{TD}\sigma_{TD}} (1 - \exp[-2n_{TD}\sigma_{TD}z]) \end{aligned} \quad (6)$$

式(2)~(4)を用いて

図2 顔料輝度法の測定系

図3 輝度-液膜厚さの校正曲線

$$B = \frac{1}{2} I_0 R_{TD} \left(1 - \exp \left[-\frac{3m_{TD}a}{\rho_{TD}d_{TD}} z \right] \right) \quad (7)$$

これが、輝度 B と液膜厚さ z の関係の理論式である。

2.3 校正実験

顔料輝度法の測定系の概略を図2に示す。校正実験では、図に示される流れ系の測定管の代わりに白色顔料を微量混入した水を満たしたアクリル樹脂製の透明容器を置き、容器壁と容器内の光吸収板の間の距離を変えることにより液膜厚さの変化を代表させた。照射光強度は光源ランプの電圧を変えることにより調整し、照度計を用いて測定した。得られた輝度画像を画像処理することにより校正曲線を得た。図3は得られた校正曲線であり、縦軸に輝度を照射光強度で割って標準化したものを、横軸に液膜厚さを取っている。顔料の質量濃度は0.07%一定とした。図中の実線は式(7)より計算した理論曲線である。図より、液膜厚さが1.5 mmまでは、どの照射光強度においても理論と実験はよく一致しているが、1.5 mmを越えると照射光強度の大きいものほど早く飽和している。これは、カメ

図4 可視化された3種類の界面波の挙動

ラの感度による飽和だと考えられる。これより、カメラの感度の飽和限界内では、理論と実験はよく一致し、校正曲線の信頼性が高いことがわかる。

2.4 鉛直上昇気液二相環状流における液膜の可視化と定量測定

鉛直に立てられた全長約3.9 m、内径30 mmのアクリル樹脂円管内に空気流を10~30 m/sの速度で流し、水を体積流量比で0.0002~0.003流すと、管中心部は高速の空気が流れ、壁面に環状に薄い液膜が形成される。その液膜を可視化し、測定した。測定位置は気水混合器より上方約3.2 mで、測定部には光学的ひずみ取り用の水槽を設け、円管による光線の屈折を補正した。また、測定部には空気流に対する攪乱を小さくするように工夫した光吸収体としての黒色薄板を挿入し、高速ビデオカメラ(200コマ/秒)によって撮影した。

図4は可視化された界面波の経時的挙動の一例である。10 ms ごとの動きが示されている。非常に輝度の強い(波

高数 mm) 波幅の広い高速の波が「じょう乱波」であり、1本の水平な線のように見える波幅の非常に狭い中速度の波(波高約1 mm)が、筆者らが見つけた「リング波」である。うろこ状の輝度の低い(波頂約0.1 mm, 波底約0.05 mm)低速度の波は「リップル波」である。このように、顔料輝度法によって可視化すると界面波がじょう乱波、リング波、リップル波の3種類に分類できることがはっきりとわかる。筆者らはこの3分類法を従来のじょう乱波、リップル波の2分類法に代わって用いるよう提案しているところである。

図5は、図4を画像処理して輝度分布を数値化し、図3の校正曲線によって膜厚に変換したものである。図4と図5よりリング波がじょう乱波尾部の取り残された部分から成長していく過程がはっきりとわかる。リップル波の合体からリング波が形成される過程も明確に可視化された。このような詳細な情報は点測定法からは得られないものである。これらのデータを、液流量-気相流量マップ上に各種の波の存在領域を示す流動様式線図上にプロットすると、領域の中に等波高線を描くことができ、各々の波の生成メカニズムの解明につながる詳細な情報を得ることができた⁵⁾。

3. Scanning-LIF 法

レーザー誘起蛍光(Laser-Induced Fluorescence, LIF)油膜測定法⁶⁾⁷⁾は、蛍光物質を含む潤滑油膜に短波長のレーザー光を照射したとき誘起される蛍光の強度が油膜厚さにはほぼ比例することを利用した計測法である。これは気液二相流の分野で用いられてきた図6の蛍光液膜測定法¹⁾の改良版で、励起光源として紫外レーザーを、光導波路として光ファイバを用いたものである。図7に三田らによって用いられた往復動型内燃機関のピストンの油膜計測システム⁷⁾を示す。以下、三田らの論文を紹介する。

波長442 nmのHe-Cdレーザー光を光ファイバを経てコリメータヘッドから高速回転するポリゴンミラーに照射し、透明シリンダを介してピストンのしゅう動方向に走査している。オイル中には蛍光色素Coumarin-6を混合した。レーザー光の照射により、この色素から波長450~600 nm(最大発光波長約500 nm)の蛍光が誘起される。この蛍光を入射レーザー光と同一の経路を介して戻した後ダイクロイックミラーおよびシャープカットフィルタで530 nmの波長成分を抽出し、その強度を光電子増倍管(PMT)で計測した。光ファイバとダイクロイックミラーを用いて照射レーザー光の投光系と蛍光の受光系を同一にした結果、

図5 界面波を示す液膜厚さの時空分布

図6 蛍光法による液膜測定装置¹⁾

Scanning 計測が可能になった。このシステムでは、光の走査速度がピストン速度に比べて十分速ければ、1回の入射光走査で得られる蛍光強度の波形は、ある瞬間のピストンしゅう動方向の油膜分布とみなすことができる。

検定および計測に先だって、レーザと蛍光剤を決定した。入射光には安定性の良い He-Cd レーザを選定した。また、蛍光剤としては、最大発光波長が 500 nm 付近にある数種類のうち、最もエンジン油と混合しやすい

Coumarin-6 を選定した。この Coumarin-6 は直接エンジン油に混合するのは困難であり、いったん溶剤（ジクロロメタン）に溶解した後、エンジン油（SG 級市販品）と混合した。また、ブリーチと呼ばれる緩やかな経時的減衰が 1 時間で 5% 以下になるように、入射レーザをフィルタで減光した。

Scanning-LIF 法における蛍光強度と油膜の間の校正曲線を得るための検定実験を行い、以下の要因が計測出力の

図7 Scanning-LIF法の測定系⁷⁾

図8 1サイクルの間の油膜厚さの変動⁷⁾

直線性および動特性に及ぼす影響を調べた。(1) 蛍光剤濃度, (2) 油温, (3) 油の酸化 (変色), (4) 金属面の反射率。また, Scanning-LIFの実施にあたり, 光を走査することに伴う計測精度への影響を次の要因について調べた。(5) Scanning速度, (6) レーザ入射角。その結果, 蛍光剤濃度と膜厚がある値以下では良好な直線性を示すこと, 油膜の乗っている金属面の反射率が蛍光強度に大きく影響すること, 油温, 油の変質は測定に影響しないことなどがわかった。

以上の準備を経て透明シリンダ機関の運転時におけるピストン周りの油膜計測を行った。図8は1サイクルの油膜厚さの変化の例, 図9はリング/ランド部の油膜変化の例である。トップおよびセカンドリング共に前縁から油膜が形成されない, いわゆるオイルスターベーション状態が生じていること, 吸気管負圧に起因するトップランドへのオイル上がり等の知見が得られた。これらの知見はピストン

図9 リング/ランド部における油膜厚さの変動⁷⁾

周りの潤滑およびオイル消費のメカニズム解析に有用である。

4. おわりに

以上, 様々な潤滑機器や気液環状二相流に見られる固体表面上を流動する流体薄膜の可視化と膜厚測定について, 時々刻々の面情報を得ることができる計測法として顔料輝度法とレーザ誘起蛍光法について述べた。時々刻々の面情報は微小液膜の運動を含む現象や機器の特性の把握にきわめて有用であり, 可視化から定量測定への道筋を追求することは重要な意義があると思われる。

参考文献

- 1) G. F. Hewitt: Measurement of Two Phase Flow Parameters, Academic Press, London, (1978).
- 2) 大場謙吉, 高田浩哉, 川上直之: 液膜の局所膜厚と界面波速度の同時測定のための光ファイバ液膜センサ, 混相流, 3, 1 (1988) 50.
- 3) K. Ohba and K. Nagae: Characteristics and Behavior of the Interfacial Wave on the Liquid Film in a Vertically Upward Air-water Two-phase Annular Flow, Nucl. Eng. Des., 141, (1993) 17.
- 4) 中村賢作, 大場謙吉: 気液二相環状流中の界面波の液膜厚さの定量測定のための顔料輝度法, 日本機械学会講演論文集 No. 954-2, (1995) 147.
- 5) K. Ohba, K. Nakamura and F. Naimi: A New Kind of Interfacial Wave on Liquid Film in Vertically Upward Air-Water Two-Phase Annular Flow, Proc. 2nd Int. Conf. Multiphase Flow, Kyoto, (1995) IP 1-27.
- 6) L. L. Ting: Development of a Laser Fluorescence Technique for Measuring Piston Ring Oil Film Thickness, Trans. ASME, Ser. F, 102, (1980) 165.
- 7) 三田修三ほか: Scanning-LIF法によるピストン油膜挙動の解析——計測システムの開発, 自動車技術会論文集, 24, 3 (1993) 128.