超音波エコー法による模擬燃料棒周りに形成される
液膜流の瞬時・二次元液膜厚さ分布の測定^{*}Measurement of Instantaneous Two-Dimensional Liquid Film Thickness
around a Simulated Nuclear Fuel Rod by Ultrasonic Echo Technique亀 井 敬 史^{**}
KAMEI Takashi芹 澤 昭 示^{**}
SERIZAWA Akimi

Abstract It is indispensable to know detailed behavior of liquid film flow on nuclear fuel rods for the prediction of critical heat flux in boiling water reactor. The authors have developed a new measuring method based on an ultrasonic transmission technique adopting a highly rotating reflector for the measurement of time-dependent two-dimensional liquid film thickness around a tube simulating a nuclear fuel rod. This method has been applied to measure annular dispersed flow. The results showed a promising tendency of the method.

Key words ; Two-Dimensional Measurement, Ultrasonic Technique,
Vertically Upward Flow

1. 緒 言

液膜流は原子炉炉心熱流動特性や安全性に深い係わりを有しているばかりでなく、エネルギー機器や化学工学をはじめとする多くの工学的装置で見られる気液二相流の典型的な流動様式の1つである。こうした液膜流の構造については古くからHewitt、Whalley、Azzopardiらを中心とするHarwell研究所のグループやHanrattyら、また、日本では世古口ら及び深野らの研究が報告されている。流路内を流れる液膜流表面の挙動の観察は単一の電気抵抗式プローブに代表されるインピーダンス法、コンダクタンス法、スクープ法、吸引法などによる平均液膜厚さ、液膜流量測定などを中心としたクラシカルなものから[1]、高速写真による直接撮影[2-4]、顔料輝度法[5,6]、蛍光染

料法[7,8]など、現象を直接可視化して観察する方法へと進展した。これらは、それまでの流れ場の1点の情報や時間、空間平均量に関する情報から、多次元情報、時間的变化に関する情報などが得られるようになったものの、得られるデジタル情報や分解能を始めとする測定精度の点で大きな限界があった。

その後、この限界を克服する方法として、世古口らによる超多点プローブ法[9,10]やKang[11]らによるフラッシュ・ワイヤー法が開発され、液膜流界面機構に関する時空間挙動がデジタル量として容易に画像化されるようになった。しかし、これらの方法では流れ場中にプローブを挿入するため、流れ場を局所的に大きく乱すという欠点を有している。今日では、数値シミュレーション手

* 1998.8.24 受付

** 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町
TEL/FAX 075-753-5829 E-mail : serizawa@kuiae.kyoto-u.ac.jp

法が高度に発達するとともに、多くの物理的モデルが構築されるようになってきている。しかし、それらの検証の為に、極めて精緻な実験による測定結果が必要とされている。先に述べた超多点プローブ法やフラッシュ・ワイヤー法はこの点からは好ましい方法とは言えない。また、流れ場に外乱を与えないということから、超音波エコー法がChangら[12]によって、また、レーザー変位計の使用が芹澤ら[13,14]によって初めて提案されたが、多次元情報という点から必ずしも十分な知見をもたらすものではなかった。その後、こうした非接触測定による多次元時間情報をデジタル量として多量に求める手法として、高速X線CT法[15]や中性子ラジオグラフィ法[16]が開発され、測定精度の高い、しかも直感的に理解しやすく画像化された液膜挙動が報告されるようになった。しかし、これらの測定装置は放射線の取り扱いに係わる使用上の制約や、その高価な機器であるが故に、実験室レベルで誰もが容易に使用できるものではない。

我々は、上に述べたように、非接触で、しかも液膜流挙動の時空間特性をデジタル量として大量にしかも精度良く処理でき、そのうえ、安価に容易に取り扱える手法として、超音波エコー法の改良を試みた。前述のように、従来の超音波エコー法は流れ場の外部に超音波トランスデューサーを固定・設置し、流路内を流れる液膜流挙動の局所値を測定するものであり、例えば、原子炉熱流動安全解析で詳細なデータベースが要求されている燃料チャンネルボックス内の原子炉燃料棒群回りの液膜挙動および液膜流挙動に及ぼすスパーサーの影響など、いわば時間空間領域に於ける特性を評価できなかった。我々は高速回転するリフレクターを組み合わせて使用することによって、この問題を解決した[17]。本報告では、開発した新しい超音波エコー法の測定原理と、それを用いた円柱回りの液膜流測定結果について述べる。

2. 超音波エコー法の測定原理

一般的な超音波エコー法による液膜厚さの測定原理をFig. 1に示す。図は水平矩形管内を流れる液膜流を想定している。流路外壁面に垂直に取り付けられたトランスデューサーから送信される超音波パルスは、伝播経路上に存在する異なる媒質の境界面において反射と透過を行う。図ではトランスデューサーと流路、流路と液膜、液膜と気相

の各界面がこれに相当する。液膜厚さは、簡単な波動理論に基づいてEq.(1)のように与えられる。

$$l = \frac{\Delta t \times v}{2} \quad (1)$$

ここで l は液膜厚さ、 Δt は超音波の飛行時間、 v は液相における超音波の伝播速度である。

Fig. 1 A Schematic of Ultrasonic Transmission Technique

これまでの超音波エコー法は外部に測定系を設置して、管内の流れ場中の固定された1点の特性を測定するのに用いられてきた。そのため冒頭で述べたような細管表面に形成されるいわば「管外流」の二次元的な液膜厚さ測定は困難であった。筆者らは、回転リフレクターを用いることによってこの制約を解決した。Fig. 2は新しく開発した超音波エコー法の測定デバイスの詳細を示したものである。本測定デバイスは主として超音波を送受信するためのトランスデューサーと、超音波を円管周方向にスキャンするためのアルミ製の回転リフレクターとから構成されている。

トランスデューサーとリフレクターは真鍮製の管に装着され、それらの間隔は幅1mmの支柱によって一定に保たれる。測定デバイスは模擬燃料棒として使用する円管の内部に挿入され、超音波の伝播を可能とするためにトランスデューサー周辺部の空間を水で満たす。リフレクターの回転に際して支柱からの反射波は測定時に周方向の基準位置を定めるために使用される。リフレクターの反射面はトランスデューサーの回転軸に対して45度の傾きを持っており、マイクロモーターによって毎分15,000回転する。本実験で使用した超音波

Fig. 2 Newly Developed Ultrasonic Device with a Rotating Reflector

の周波数は10MHz、繰り返し周波数は10kHzである。これは本実験体系における超音波の飛行時間に比べて十分に長い。超音波は媒質中を伝播する際にEq. (2)で与えられる角 ϕ_0 で拡がる。

$$\phi_0 \cong 70 \frac{C}{D_E f} \quad (2)$$

ここで、 ϕ_0 、 D_E 、 f 、 C はそれぞれ拡がり角、トランスデューサー径、超音波周波数及び超音波の伝播速度である。

本実験で使用したトランスデューサーの振動子径は6.4mmであり拡がり角 ϕ_0 は約1.6度である。トランスデューサーとリフレクターとの距離は8mm、リフレクターと円管内壁との距離は5.5mm、また管壁厚さが2mmであるので超音波ビームの直径は気液界面において約0.9mmとなる。液膜厚さ測定分解能は超音波の半波長から約75ミクロンとなる。ただし水中の音速を1,500m/sとした。

3. データ処理方法

反射波信号は分解能10MS/sのAD変換ボードに送られ、毎秒10,000個の反射波を受信処理した。連続測定時間はメモリ容量に依存し今回の実験では1.6秒である。以下に受信された信号波形の代

表的な形とその処理について述べる。ただし、ノイズ除去のためローパスフィルターをかけて1MHz以上の周波数成分を取り除いた。

Fig. 3は円管表面に液膜が存在する場合の信号波形の例である。図中にAで示されるピークはトランスデューサー表面での反射波であり、Bは円管内表面での反射波に対応する。3番目のピークCは円管外表面での反射波であり、ピークDが気液界面での反射波である。ピークCとピークDとの間の飛行時間がEq. (1)で用いられる Δt に相当する。

円管表面に液膜が存在しない場合には、Fig. 4に示すような波形となる。図中の4番目のピークEは円管壁内での超音波の多重反射によって生じたものである。多重反射の現れる位置は管壁厚さとアクリル中での超音波の伝播速度によって定まり、またその振幅は気液界面での反射波の振幅に

Fig. 3 Typical Raw Signal Obtained by Newly Developed Ultrasonic Transmission Technique for a Liquid Film Existing on the Outer Surface of the Test Tube

Fig. 4 Typical Raw Signal Obtained by Newly Developed Ultrasonic Transmission Technique without Liquid Film on the Test Tube

比べて小さいため、気液界面での反射波と容易に区別できる。

なお、本手法の測定精度を確認するため、容器内静止水の液膜厚さを触針法とともに測定し、両結果が本測定系の分解能の範囲内でよい一致を示すことを確認している。

本手法はトランスデューサーからの超音波パルスを回転リフレクターによってスキャンするため、測定はFig. 5に示すように円管周方向に螺旋状の軌跡を描くように測定される。そこで、ある瞬間の周方向の局所位置の液膜厚さを求めるために以下のような補完操作を行った。

$$V(i) (\text{"interpolated Value"}) =$$

$$\frac{V(t+4) - V(t)}{40} \times i + V(t)$$

$$(i: 0 \sim 40) \quad (3)$$

ここで $V(i)$ は時刻 i において直線補完によって与えられる液膜厚さの値であり、 $V(t+4)$ と $V(t)$ は注目している円管周方向の位置で4m秒のスキャン時間ごとに実測される値である。右辺第一項の分母の40は1スキャンの間の周方向測定位置の数である。

これより、円管周方向の各位置における測定の時間分解能はスキャン時間に依存する。そのため液膜上の界面波がスキャン時間よりも短い時間で測定部を通過する場合には、補完によって与えられた数値から再構成される波の形状は実際よりも

歪むことが想像される。

例えば、垂直二重管内を上昇する環状噴霧流領域での擾乱波の測定部通過時間を調べたところ、約20%程度の割合でスキャン時間よりも短くなるものが存在した。この点については、より高い回転数のリフレクターと、より高い繰返し周波数の超音波を用いることによって改善できる。

4. 垂直二重管内環状噴霧流の液膜厚さ

内径30mmの外管と、燃料棒を模擬した外径15mmの内管から構成される長さ1,000mmの環状流路での実験結果の例を示す。実験条件は見かけの気相流速が10.7m/sから30m/s、見かけの液相流速が0.013m/sから0.063m/sの間であり、全て大気圧・常温で行った。

4. 1 等高線図

測定結果を等高線図で表した例をFig. 6 (a)-(c)に示す。液膜厚さは0mmから1mmまでを0.1mm間隔に10段階に分けている。図中のラベルDは擾乱波と判定されたものである。図から分かるように、円周方向にわたって広がりのある擾乱波ははっきりと検出されている。これらの擾乱波は、世古口らが報告しているように[9,10]、周方向に複数の波頂を有していることが分かる。Fig. 6 (c)では見かけの気相流速が大きいため擾乱波の波高が小さくなっている。

4. 2 鳥瞰図

Fig. 6 (a)-(c)と同一の結果を鳥瞰図で表したものをFig. 7に示す。気液界面上に多くの擾乱波が現れており、見かけの気相流速の増大に伴って気液界面は全体的に薄くなり、擾乱波の波高も小さくなっている。

4. 3 擾乱波の周方向断面図

Fig. 6 (a)-(c)に示された擾乱波を、円管周方向の断面図としてFig. 8に示した。各図に1ミリ秒ごとの連続した20枚の断面図を記載している。各図右側の不連続点は支柱の位置を示す。向かって左の上から右に時間が経過し、最終的に右下の図に至る。

筆者らは、これまでに液膜流の液膜厚さ測定に対する超音波エコー法の適用限界についても検討を行った[13,18,19]。本手法は界面からの反射波を界面位置の検出に利用するため、傾斜角度の大きな液膜の場合、例えば擾乱波の前面などでは、反射波がトランスデューサーに帰着できずに測定

Fig. 5 Interpolating Operation

(a) $J_l = 0.05 \text{ m/s}, J_g = 13.5 \text{ m/s}$
 (b) $J_l = 0.05 \text{ m/s}, J_g = 17.0 \text{ m/s}$
 (c) $J_l = 0.05 \text{ m/s}, J_g = 20.0 \text{ m/s}$

Fig. 6 Contour Plots of Liquid Film Thickness Distribution around the Tube

の欠落を生じることがある。測定が可能な傾斜角の上限はトランスデューサーの振動子径、液膜厚さ、トランスデューサーと測定部との距離などによって定まる。今回行った実験範囲では、データ

Fig. 7 Bird's Eye View of the Film Flow Behavior of Gas-Liquid Interface around Tube

Fig. 8 Consecutive Plots of Circumferential Distribution of Liquid Film Thickness for Large Disturbance Waves.

数の割合でおよそ10%程度の測定の欠落が見られた。そのため、傾斜部での測定欠落は、前後の実測値により補完して与えている。

トランスデューサーの特性を決めるものに超音波の周波数があるが、既に述べたようにこれは超

音波の拡がり角を決める要因であるため、超音波エコー法を液膜厚さ測定に適用するに当たっては実験に応じた最適なトランスデューサーを選択することが重要となる。

5. 結 論

原子炉燃料棒のような円管周りに形成される液膜流の時間・空間依存の液膜挙動を測定する手法として、回転リフレクターを採用した超音波エコー法を新たに開発した。液膜流の1断面画像を再構成するためのスキャン時間は現時点では4 m秒であるが、より高速の回転リフレクターを採用することでスキャン時間の短縮をはかることが可能である。また、垂直二重管内を流動する気液二相環状噴霧流に対する実験結果から、本測定手法が非接触型液膜挙動測定法として極めて有効であることが確認された。

References

- [1] G.F.Hewitt, 1978, Measurement of Two Phase Flow Parameters, Academic Press.
- [2] G.F.Hewitt and N.S.Hall-Taylor, 1970, Annular Two-phase Flow, Pergamon Press.
- [3] P.B.Whalley, G.F.Hewitt, B.J.Azzopardi and L.Pshyk, 1977, Axial view photography of waves in annular two-phase flow, AERE-R8787.
- [4] G.F.Hewitt and P.B.Whalley, 1980, Advanced optical instrumentation methods, Int.J. Multiphase Flow, Vol. 6, pp. 139-156.
- [5] 大場謙吉、小幡健一、1990、垂直管内空気-水二相環状流における液膜の挙動と特性、混相流シンポジウム'90(第9回)講演論文集、pp.1-4.
- [6] Y.Hagiwara, 1982, A Study on Flow Characteristics and Heat Transfer of Annular and Dispersed Two Component Two-Phase Flows, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Kyoto University
- [7] 川路正裕、W.Pun, C.Lorenz, R.Karimi, 神永文人、秋本肇、数土幸夫、1994、垂直管内対抗環状流における落下液膜の流れの構造について、混相流シンポジウム'94(第13回)講演論文集、pp.79-82.
- [8] 芹澤昭示、亀井敬史、高橋修、河原全作、1994、可視化による液膜流の動的挙動測定法、混相流シンポジウム'94(第13回)講演論文集、pp.95-98.
- [9] K.Sekoguchi, M.Takeishi and T.Ishimatsu, 1985, Interfacial structure in vertical upward annular flow, PCH Physico Chemical Hydrodynamics, Vol. 6, No. 1/2, pp. 239-255.
- [10] K.Sekoguchi and M.Takeishi, 1989, Interfacial structure in upward huge wave flow and annular flow regimes, Int.J. Multiphase Flow, Vol. 15, pp. 295-305.
- [11] H.C.Kang and M.H.Kim, 1992, Measurement of three dimensional wave form and interfacial area in an air-water stratified flow, Nuclear Engineering and Design, Vol. 136, pp. 347-360.
- [12] J.S.Chang and E.C.Morala, 1990, Determination of two-phase interfacial areas by an ultrasonic technique, Nuclear Engineering and Design, 122, pp. 143-156.
- [13] A.Serizawa, K.Nagane, T.Ebisu, T.Kamei, Z.Kawara and K.Torikoshi, 1994, Dynamic measurement of liquid film thickness in stratified flow by using ultrasonic echo technique, Proc. of the 4th Int. Topical Meeting on Nuclear thermal Hydraulics, Operations and Safety, Taipei, Taiwan, April 5-8, 1994, Vol. 2, pp. 42-c-1-42-c-5.
- [14] 永根浩平、1993、超音波探傷器を用いた液膜厚さの測定、京都大学工学修士論文.
- [15] K.Hori., et. al., 1994, A High Speed X-ray Computed Tomography Scanner for Multiphase Flow Visualization, Proceedings of 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-hydraulics, Operations and Safety, pp. 43-D-1.
- [16] N.Takenaka, H.Asano, T.Fujii, Y.Nishi, M.Furuya, I.Kinoshita, M.Matsubayashi, 1997, Visualization and Image-processing of Multi-phase Flow by Neutron Radiography, Proc. of the 2nd Japanese-German Symposium on Multi-Phase Flow, Tokyo, pp. 383-394.
- [17] A.Serizawa, T.Kamei, I.Kataoka, 1997, Application of ultrasonic echo technique to the measurement of 2-dimensional local instantaneous liquid film thickness on a simulated nuclear fuel rod, Proc. of OECD/CSNI Specialist meeting on advanced instrumentation and measurement techniques, Santa Barbara, USA.
- [18] A.Serizawa, T.Kamei, K.Nagane, O.Takahashi and Z.Kawara, 1994, Non-Intrusive Measurement of Dynamic Behavior of a Liquid Film Flow, Proc. of the German-Japanese Symposium on Multiphase Flow, Supplement, Karlsruhe, Germany, pp. 63-73.
- [19] A.Serizawa, T.Kamei, I.Kataoka, Z.Kawara, T.Ebisu and K.Torikoshi, 1995, Measurement of Dynamic Behavior of a Liquid Film Flow with Liquid Droplets in a Horizontal Channel, Proc. of the 2nd International Conference on Multiphase Flow, Vol. 2, Kyoto, Japan, pp. P1-27-P1-34.