ワイヤ電極 CT によるボイド率分布測定法の開発*
(第 1 報, 測定原理と基本特性)坂 井 臣 司*¹, 早 矢 仕 英 謙*²
若 井 和 憲*¹, 隅 田 勲*¹Development of an Electrode Wire CT Method
for Void Distribution Measurement
(1st Report, Principle of Measurement and Fundamental Properties)Shinji SAKAI, Hideaki HAYASHI,
Kazunori WAKAI and Isao SUMIDA

Precise information on void distribution is required to assess multidimensional two-phase flow phenomena. For this purpose, a new electrode wire CT method for void distribution measurement is proposed. The principle of void measurement by this method is based on that of the well-known probe method which measures the conductance of a two-phase mixture between electrodes. The CT scanner of the method consists of ten pairs of two closely arranged electrode wires which allow measurement of the conductance of the two-phase mixture between wires. In this paper, the applicability of the proposed method to CT measurement is discussed and the experimental results using an air-water two-phase flow test apparatus are compared with the data obtained from a conventional probe method. Reasonable agreement of void data measured by the two different methods confirms the applicability of the proposed electrode wire CT method.

Key Words: Multiphase Flow, Bubble, Measurement, Electrode Wire, CT Scanner, Void Distribution, Conductance

1. 緒 言

ボイラや原子炉など気液二相流におけるボイド率分布の詳しい情報は、各機器の熱・安全設計、および性能向上のために重要な役割を果たしている。また最近では二流体モデルによる気液二相流の三次元解析手法の検証のためにボイド率分布などの詳細な二次元データが求められている。このボイド率計測については従来から多くの計測法が開発されているが、最もよく利用されているのは、探針プローブ法⁽¹⁾⁽²⁾である。しかし、この方法では二次元のボイド率分布を得るには、多くの労力が必要であった。

また、近年、二次元ボイド率分布を非接触で測定できる X 線、 γ 線などの放射線 CT 法⁽³⁾⁽⁴⁾が開発され、原子炉燃料集合体内などのボイド率分布について、興味ある結果が得られている。しかし、X 線や γ 線などの放射線を利用する計測は人体に対する安全性への配慮から、装置は複雑、高価なものとなり、手軽に利用することは困難である。

そこで、著者らは放射線以外で CT 計測可能な方法について検討し、探針プローブ法と同様に流体のコンダクタンスを測定する方法をベースとした新しい CT スキャナの開発に着手した。この CT スキャナは、2 本の接近した線状ワイヤ電極を用い、その電極間のコンダクタンスを CT の投影データとして利用している。このことから、以後ワイヤ電極 CT と呼ぶことにする。

本方法は X 線や γ 線 CT などと比較して装置が簡単、軽量で取付け、取扱いが容易である。

第 1 報ではワイヤ電極によって CT の投影データが得られることを示すとともにボイド率分布測定の原理を示し、さらに空気-水の簡単な二相流流路を用いてワイヤ電極 CT 法と探針プローブ法による測定結果を比較し、その有用性を明らかにした。

2. 測 定 原 理

例えば、X 線 CT による測定の場合、投影データは X 線光路に沿った被測定物体の透過率の対数として表される。これは光路上の各点での吸収係数の和に対応している。このように、一般に CT を適用するためには、

(1) 直線路に沿った測定値が得られること、

* 平成 5 年 10 月 30 日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 平成 6 年 2 月 2 日。

*¹ 正員、岐阜大学工学部 (〒501 11 岐阜市柳井 1-1)。

*² 学生員、岐阜大学大学院。

(2) 測定量がX線における吸収係数のように直線路に対して加算性のあること、の二つの条件を満足することが必要である。

一方、探針プローブには、針状電極と管壁などに設けられた電極を有するものと接近した2本の針状の電極を用いるものがある。このうち2本の電極を用いる場合、その電極間に形成される電場は、周囲に形成される電場に比べて強く、電極間の二相流のコンダクタンスにほぼ比例した電流出力が得られることが知られている⁽⁶⁾。このことから、本報告では、微小間隔で配置した2本の線状電極を利用し、この電極間の二相流のコンダクタンスを測定する方法について検討した。このようなワイヤ電極を流路中に張り、電圧 V_0 を印加すると、図1(a)に示すように電流出力 I_w が得られる。すなわち、この電流出力はワイヤに沿った方向をY、それに直角方向をX、Zとし、位置 (x, y, z) における二相流体のコンダクタンスを $\sigma(x, y, z)$ として次式で表される。

$$I_w = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^L \sigma(x, y, z) E(x, y, z) dY dX dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、電極間に生成される電場 $E(x, y, z)$ は電極近傍が強いことを考慮すると電極間の電位差 V_w を用いて式(1)は次のように近似できる。

$$I_w = \int_0^L \bar{\sigma}(x, y) V_w dY \quad \dots\dots\dots (2)$$

その結果、電極間の二相流体のコンダクタンス ($1/R_w$) は次式で表される。

$$1/R_w = I_w/V_w = \int_0^L \bar{\sigma}(x, y) dY \quad \dots\dots\dots (3)$$

もし、式(3)が成り立つような測定条件が実現されていれば、 $\bar{\sigma}(x, y)$ が電極 (x, y) 近傍におけるコンダク

タンス(以下局所コンダクタンスと呼ぶ)を表現しており、CT法の適用条件を満足できることは明らかである。なお $\bar{\sigma}(x, y)$ が局所コンダクタンスを十分に表現していることは後で実験により確認する。

このように式(3)の条件が成り立つ場合には、直線路Yに沿ったコンダクタンス $1/R_w$ が測定され、これをCTにおける投影データとすることができる。また、CT法では図1(b)に示すようにこの投影データを固定座標 (x, y) の回転 (θ) と並進(X)に対して測定する必要がある、これを $P(X, \theta)$ と表すと、式(4)のように書ける。

$$P(X, \theta) = \int_0^L \bar{\sigma}(x, y) dY \quad \dots\dots\dots (4)$$

図1(b)の上部に示したグラフは一つの θ に対する投影データ $P(X, \theta)$ を模式的に示したものである。このような投影データを多数のX、 θ について測定しておけば、コンボリューションを用いたCTアルゴリズムにより、測定流路断面におけるコンダクタンス $\bar{\sigma}(x, y)$ の分布を求めることができる。したがって、水中での局所コンダクタンスを σ_w 、空気中での値を $\sigma_A (=0)$ とすれば、いずれも既知であり、局所ボイド率 $f(x, y)$ は式(5)より求められる。

$$f(x, y) = \frac{\sigma_w - \bar{\sigma}(x, y)}{\sigma_w - \sigma_A} = 1 - \frac{\bar{\sigma}(x, y)}{\sigma_w} \quad \dots\dots (5)$$

ここで、投影データが瞬時に得られるならば、 $f(x, y)$ は、測定断面上における個々のボイドの断面形状から、空気(=1)、水(=0)の2値の分布となる。また今回のように、長時間の測定データの平均値を投影データとして用いる場合には、 $f(x, y)$ は気相が占めている時間の割合に相当する平均ボイド率を表す。

3. 実験装置および方法

ボイド率分布をワイヤ電極CTにより測定するための実験装置を図2に示す。装置は二相流装置とCTスキャナおよびデータ処理装置により構成されている。

二相流装置は気液混合部、分離部とポンプ、コンプレッサおよび貯水タンクより構成されている。試験部には内径30 mm、長さ650 mmの亚克力パイプ2本の間にワイヤ電極CTスキャナを取付けた。また半径方向の分布を測定する探針プローブをワイヤ電極の下流4.5 mmに設け、測定結果が比較できるようにした。

図3に今回試作したワイヤ電極を示す。ワイヤ電極は直径0.2 mmの細い2本のステンレスワイヤをそれぞれエナメルで電気絶縁した後、接着し、互いにその反対側のエナメル被膜を細い带状にはがして電極と

図1 ワイヤ電極の座標系および基本構成

した。両電極間の距離は0.4 mm となる。2本のワイヤを接合した電極は、中央にくぼみを有し、ボイドの移動によって取残された水を表面張力により速やかにくぼみに吸込む構造になっている。このため電極間の絶縁性がよくなり、応答性が向上すると考えられる。

図2 装置の全体構成

図3 ワイヤ電極CTスキャナの構成

図4 ワイヤ電極と測定回路

CT スキャナは10組のワイヤ電極から構成され、計測部の流路断面に3 mm 間隔で配置した。電極には、ワイヤを引っ張るためのばねおよびそのサポート部、回転装置が付属している。このスキャナは10組のワイヤ電極を用いているため並進操作は必要とせず、回転のみでよい。

10組のワイヤ電極からのコンダクタンスを得るための測定回路を図4に示す。電源は電極表面の電気分解による気泡の発生と化学変化を避けるため交流を使用した。また互いに他の電極からの電氣的干渉を避けるため、回路にはそれぞれフォトカプラを使用して各電極の回路を独立させた。次にこの測定系全体についてあらかじめ検定曲線を求めておき測定に使用した。出力信号は、10チャンネル12 bit A-D変換器を通してコンピュータメモリーに収録した。被測定流体の流動変化を考慮して、20 ms ごとに1000回繰返し測定し、その平均値を投影データに用いた。1回の投影データは10° 間隔で18方向について収録した。実際のCT計算には、この測定データを基にスプライン補間により投影データ数を増して像再構成に使用した。

4. 測定法の検討

実際にボイド測定を行うに当たって測定電極ワイヤの基本特性を確認しておく必要がある。この章では、まずワイヤ電極の作動条件を検討したうえで、実験によりその基本特性を調べる。

4・1 ワイヤ電極の作動条件 一般に投影データは、その収集に時間がかかるため、電氣的な信号ドリフトが問題となる。このドリフトのおもな原因の一つとして電極露出部の化学変化に伴う表面抵抗変化が考

図5 出力電圧ドリフト特性

えられる。この抵抗変化は、ワイヤ電極の材質、構造、および印加電圧、印加時間に関係するため、予備実験においてその影響を調べた。図5は銅線、ステンレス線、タングステン線に対して、直流印加電圧をパラメータとして、水中[図1(a)]にワイヤ電極を入れた場合の出力電圧の時間変化を示している。いずれも、印加電圧が低いほどドリフトは小さくなっている。

しかし印加電圧が小さいと出力電圧が低くなり、SN比が低下するため今回は、60 Hz、3 Vの交流電源を用いることとした。

その他、測定誤差の原因としては、ワイヤ電極の緩み、震動、劣化による形状の変化や絶縁性の不良などが考えられる。そのため線径0.2 mmのステンレス線を用い、一方をばねで固定し、緩みを吸収するようにした。

4.2 基本特性 式(2)~(4)の妥当性を調べるため、4.1節で述べた作動条件のもとで、次の二つの予備実験を行った。

まず、実際にボイドがワイヤ電極に接近した場合を

図6 ワイヤ電極の特性(ボイド接近の影響)

図7 ワイヤ電極の特性(水深による変化)

想定して、水槽内にボイドの代わりにアクリル板2枚を置きその中央にあるワイヤ電極との距離 l を変えて測定した出力電圧の結果を図6に示す。その縦軸は、出力電圧を電極が空気に覆われたときの値を1として規格化して示したものである。タイプAはアクリル板が電極面の上下にある場合、Bは電極面に向かい合っている場合である。Bがその幾何学的形態から影響が大きいと考えられるが、いずれも距離 l が0.3 mmでは出力電圧は10%以下に低下し、1 mm以上ではほとんど変化が現れない。これからワイヤ電極の形成する電場はワイヤ近傍のみが強く、ワイヤ電極はごく近傍のボイドのみに感度を有していることがわかる。すなわち式(2)~(4)が十分成り立つものと考えてよい。また、電極が感度を有する範囲は電極ワイヤ間の間隔3 mmと比べて十分小さい。

次に、図1(a)のワイヤ電極が水中に入っている長さ L_w を変化させて、コンダクタンスを測定した。図7に示すように、両者には比例関係が成り立っており、先に述べたように電極近傍のみに感度をもつ特性からコンダクタンスは式(2)のようにワイヤに沿った $\sigma(x, y)$ の積分で示されていると考えることができる。

4.3 CT スキャナの測定条件 定常二相流であっても二相流の場合は変動成分が含まれている。ここで定常二相流とは空気・水の入口流量を一定にした場合を意味している。二相流のCTでは、この二相流の変動によって再構成結果が悪くなる可能性がある。本実験においては投影データに時間平均値を用いることとし、対象とする二相流の状態を考慮して、測定回数を1000回とした。

またCT計算に使用する投影データの数が少なくても結果はよくない。ワイヤ電極の本数(10)に相当するサンプリング数をそのまま使用したのでは不十分である。そこでスプライン補間によりその数を100に増やした。しかし、空間分解能(3 mm)は本質的には変わらない。また、一般にプロジェクション数もサンプリングとほぼ同数を必要とする。ここでは、プロジェクション数を18としたが被測定物体が軸対称に近いものであればほぼ十分である。

5. 実験結果と考察

5.1 気液二相流断面ボイド率分布 ワイヤ電極CTスキャナを用いてボイド率分布の測定が可能かどうかを検討する。図2の試験装置を用い、常温大気圧のもとで水流量を15 l/min一定として空気流量を変化させ、定常な気液二相流の状態で測定した。まずCT計算に用いた投影データの例として、立体図を図8

(a) 投影データ(気泡流)

(b) 再構成像の例(気泡流)

図8 ボイド率分布の測定結果(気泡流)
(断面平均ボイド率0.20)

図9 再構成像の例(スラグ流)

(a)に示す、管内断面平均ボイド率が0.20(空気流量 8 l/min)の場合であり、CHは各ワイヤ電極の位置に対応している。

この投影データを用いて再構成したボイド率 $f(x, y)$ の分布が図8(b)である。管内測定領域内の黒い部

図10 半径方向ボイド率分布の再現性

図11 半径方向ボイド率分布の比較

分が水を示し、淡くなるほどボイド率が高くなる。

全体にボイド率分布は壁近傍で高く、中心付近ではやや低い平たんな分布となった。また、管壁形状やその内部の細かいボイド率分布が現れ、投影データ分布とは比較にならないほど分布の特徴がはっきりしてくる。この例は、比較的ボイド率の低い(断面平均ボイド率が0.20)気泡流であるが、図9は、断面平均ボイド率が0.26(空気流量 16 l/min)、スラグ流の場合である。ボイド率分布は管壁付近から中心部に向かって増加している。このように気泡流とスラグ流を比較しただけでも、かなり異なったボイド率分布を示すことがわかる。全体にスラグ流のボイド率が高いのは当然であるが、気泡流において中心よりも壁付近においてボイド率分布が高くなることなどは、小林ら⁽⁶⁾の測定結果と同じ傾向をもち、興味深い結果である。

5・2 半径方向ボイド率分布 次にもう少し定量

的に検討するため、半径方向のボイド率分布を探針プローブ法と比較した結果を図10, 11に示した。図10は断面平均ボイド率が0.26について、測定結果の再現性を見たものである。二相流の変動を考慮すると、全体に再現性もよく、探針プローブと比較してよい一致を示しているといえる。図11ではスラグ流と気泡流を同時に示しており、いずれも全体的な傾向は一致しているが、一部で探針プローブとのずれが見られる。今後、詳細な検討が必要である。

なお、本装置は γ 線やX線CTに比べ、測定部が簡単なワイヤのみによって構成されているため、容器の大小、材質、放射線の有無を問わず比較的複雑な曲がり管などの流路においても使用することができるなどの特徴をもっている。また、より単純な探針プローブと比べ、本質的に精度はそれほど劣るとは考えられない。むしろ、探針プローブ法の精度がボイド検出に対するしきい値の設定に依存しているのに対して、ワイヤ電極CTではしきい値の設定は不要であることや、流路断面のボイド分布が手軽に求められる点では他にない特徴をもった計測法であるといえる。

6. 結 論

X線、 γ 線CTほど複雑な装置を必要とせずに、より簡単、安全にボイド率分布を測定できるCT計測法について検討した結果、以下の結論を得た。

予備実験からワイヤ電極により測定したコンダクタンスは、ワイヤ電極に沿った電極近傍の局所コンダク

タンスの和に対応することを確認した。このことは本ワイヤ電極スキャナにより測定されたコンダクタンスがCTの投影データとして使用でき、CT法によるボイド率分布の測定が可能であることを示している。

次に、このワイヤ電極CTスキャナを空気-水二相流流路に適用した結果、スラグ流では中央部が高く壁面に向かって低くなる分布が得られ、気泡流では管壁近傍が高い分布形状が得られた。

また、半径方向のボイド率分布を探針プローブ法による測定と比較した結果、中心付近で多少差があるものの、全体として再現性もよく、両者は、ほぼ一致することがわかった。これより、測定原理の妥当性およびボイド率分布測定法としての有用性が示された。

終わりに、本研究を行うに当たって、装置の製作にご協力いただいた日立製作所エネルギー研究所の中尾俊次主任研究員および実験を担当した岐阜大学学生鈴木義康君に謝意を表す。

文 献

- (1) Herringe R. A. and Davis M. R., *J. Fluid Mech.*, **73**-1 (1976), 97.
- (2) 赤川, 機論, **29** 201 (1963), 924.
- (3) Ikeda, T., ほか3名, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **20**-1 (1983), 1.
- (4) 飯塚・ほか3名, 日本原子力学会誌, **26**-5 (1984), 421.
- (5) Teyssedou A. and Tapucu A., *Rev. Sci. Instrum.*, **59**-4 (1988), 631.
- (6) 小林・飯田, 機論, **35** 280 (1969), 2365.