774. X線CTスキャナによる二相流局所 ボイド率分布の測定

飯塚[✓]勝*, 師岡[✓]慎一*, 木村[✓]博信*, 香川[✓]達雄*

(1983年 8月29日 受理)

Measurement of Distribution of Local Void Fraction in Two-Phase Flow by X-Ray Computed Tomography

By Masaru IIZUKA, Shinichi MOROOKA,
Hironobu KIMURA and Tatsuo KAGAWA

A new X-ray CT scanner system, using time-averaged projection data (X-ray beam intensity), called Advanced Computed Tomography System (ACTS), was developed for measuring accurately the local void fraction distribution in the two-phase flow of various flow configurations and patterns.

A horizontal circular tube and a 4×4 rod bundle were used as test sections. Air-water mixtures were used as test fluids. The local void distribution measured by ACTS and that measured by an impedance probe were compared. The agreement was excellent for tested flow patterns (bubbly flow, slug flow, plug flow and annular flow) both in the horizontal tube and in the 4×4 rod bundle. It was concluded that ACTS can be applied to the measurement of local void distribution in any flow patterns and in any flow channel configurations.

KEYWORDS: two-phase flow, void fraction, flow pattern, CT scanning, measuring methods, accuracy

1. ま え が き

BWR (Boiling Water Reactor, 沸騰水型原子炉)では、炉心内のボイド率が流動や伝熱に影響を与えるので、その挙動については、これまで多くの研究が行われてきた。従来、ボイド率測定には、X線(γ線)密度計あるいはインピーダンス・プローブなどが使用されているが、最近X線CT (Computed Tomography)スキャナのこの分野への応用^①が試みられている。

CT スキャナ(以下、単にCTともいう)の二相流ボイド率測定への応用については、すでにいくつかの報告がある。Kulacki^②は、静止水柱に下部より空気を吹き込むことにより得られた気泡流の平均ボイド率をγ線CTにより測定した。彼らは、CTにより測定された平均ボイド率が、水柱の上昇より求めたボイド率と良好に一致することを示した。また池田^③は、空気-水系の水平二相流(層状流、気泡流)をX線CTで測

定し、その結果を締切り法および熱線風速計で得られた結果と比較することにより、CTによる平均ボイド率測定誤差を±10%と結論づけている。

これらの研究は、主に局所ボイド率の時間変動の少ない二相流を対象としており、二相流特有のスラグ流のような時間的変動の大きい流れに対してのCTの適用性についての研究はみられない。また、2次元局所ボイド率分布(以下、局所ボイド率分布)を容易に測定できることがCTの最大の利点であるにもかかわらず、従来の研究は平均ボイド率の検討に重きがおかれ、局所ボイド率分布についての検討が十分になされていない。著者らは、CTスキャナのボイド率測定への適用性を明らかにしようという観点から、前報^{④⑤}においてX線CTスキャナにより空気-水系の水平二相流のボイド率分布を測定し、CTによって流動様式の判別

* ㈱東芝 原子力技術研究所(Nucl. Eng. Lab., Toshiba Corp.)

は可能であり、層状流、環状流、気泡流などの局所ボイド率の変動(以下、単に変動という)の小さい流れでは、CT スキャナによって局所ボイド率分布測定が可能であるが、スラグ流のような変動の大きい流れに対しては、この測定システムがそのままでは誤差が大きくなることを示した(4X5)。

本報では、前報に続く一連の研究として、時間的に平均化された投影データ(X線の透過強度)を用いることにより、二相流のいかなる流動様式においても精度よく2次元局所ボイド率分布を測定可能なデータ収集処理システム(ACTS: Advanced Computed Tomogram System)を作成検証し、加えて、このシステムがバンドル流路内の2次元ボイド率分布測定にも適用できることを明確にしようとするものである。

II. 実験装置

実験装置の概略図をFig. 1に示す。流体は大気圧下の空気・水系の二相流である。循環ポンプ②からの水および圧縮機からの空気は各々フローメータで流量計測が行われた後、気水混合部③に入る。気水混合部で形成された気液二相流は、水平に設置された試験部に入り、試験部入口より約4 mの地点でX線 CT スキャナ⑤(東芝製 TCT-30)によって断層撮影が行われる。今回の実験で用いた試験部は内径27 mm(肉厚4 mm)の亚克力製の円管である。CTの測定断面下流2 cmの場所にはインピーダンスプローブが設置されており、管中心を垂直にトラバースさせて局所ボイド率分布が測定可能になっている。試験部を出た二相流は気水分離器①をかねたタンクに入る。

Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 に使用した CT の主な仕様を示す。

次に、CT を使ったボイド率測定法について、その原理を簡単に説明する。CT では、時間応答性が良好で極めて感度の良い BGO (Bismuth-Germanium-Oxide) シンチレーション検出器を用いて、Fig. 2 に示すように、並進(translation)、回転(rotation)の運動を繰り返し、約0.7° 間隔で180° にわたる投影データ(140万点)を求め、その値から画像再構成アルゴリズムによってX線の線吸収係数(cm^{-1})の分布を得ている。そして、得られたX線の線吸収係数は、次式で定義されるCT値に変換される。

$$\text{CT 値} = 1,000(\mu_w - \mu) / \mu_w \quad (1)$$

Table 1 Specifications of X-ray CT scanner (TCT-30)

Method of scanning	Translate-rotate method
Scanning time (s)	105
Counting time per one beam (ms)	4
Sampling time (ms)	4
X-ray tube voltage (kV)	120
Current (mA)	25
Detector	BGO scintillator
Detector response time (μs)	5.3
Dimension of reconstruction element (mm)	1.0×1.0

Fig. 2 Scanning method

ここで、 μ : CT 画像の小片, すなわち画素における線吸収係数の平均値

μ_w : 水の線吸収係数

(1)式で定義されるCT値は, 水は0, 空気は1,000となり, その間は1,000段階に等間隔で分割される。CRT上に表示されるCT画像は, 被検体のX線吸収係数の様子を濃淡で表わしており, CT値の小さい部分ほど濃く表示される。

被検体が二相流の場合, 画素の平均線吸収係数をボ

イド率 α を用いて書き換えると, (1)式は

$$CT \text{ 値} = 1,000 \alpha \quad (2)$$

と表わされる。したがって, CTを用いることにより画素単位*にボイド率が測定され, 流れ断面内のボイド率分布が得られるわけである。

Ⅲ. 実験結果の検討と考察

1. 局所ボイド率分布の再現性

CTで測定されたボイド率分布の再現性について検討するため, 気泡流(変動の少ない流れ)およびスラグ流(変動の大きい流れ)について, ボイド率分布を5回測定した。Fig. 3(a), (b)は, それぞれ気泡流およびスラグ流の場合について, 横軸にボイド率を, 縦軸に管底面からの距離をとり, 5回の測定結果より求めた管中心部分の鉛直線分上のボイド率分布の変化幅を示したものである。この図より, 比較の変動の小さい流れである気泡流では変化幅も小さく再現性も良好で, スラグ流のような変動の大きな流れではボイド率の値で最大25%の変化があり再現性も極めて悪いことがわかる。

Fig. 3(a), (b) Scattering of local void fraction

Fig. 4(a)~(c)に, 二相流が被検体の場合のある角度における投影データの時間変動を示す。Fig. 4(a), (b)の気泡流, 環状流では投影データは変動も小さくほぼ一定値を示しており, 上述した再現性が良好なことも理解できる。一方, Fig. 4(c)のスラグ流の場合, 本研

究で用いているCTが医療用のもので, 人体の影響を考慮して1方向の投影データの収集時間を4msと短

* TCT-30の画素は1mm×1mmである。したがって1mm×1mmの位置分解能でボイド率分布が得られる。

Fig. 4(a)~(c) Change of projection data

くしているため、気体プラグの通過によって投影データは時間的に変動してしまい、測定のたびに異なる値を示しており、これにより再現性の悪い原因は投影データの収集時間に帰因すると考えられる。ところで、二相流は流動条件(流量、圧力、温度)が一定である限り、スラグ流のような大きな変動を伴う場合でも、ボイド率分布は長時間の測定で一定値を示すことが知られている⁶⁾。したがって、長時間ある角度の投影データを積算して平均をとると、その平均値はFig. 5のように、ある値に収束すると考えられる。そこで、本報では、投影データを多数回測定して同じ角度のデータのみを平均化処理し、この平均化された投影データを用いることにより、CTによって得られるボイド率分布の測定精度の向上を試みた。

Fig. 5 Relation between projection data and sampling time

2. ボイド率分布測定用 CT スキャナシステム

多数回投影データを測定して平均化処理を行う、ボイド率計測のためのデータ収集処理システム—多数回回スキャン方式* (以下、ACTS: Advanced Computed Tomography System とする) を作成した。

Fig. 6にACTSのフローチャートを示す。その概略は次のようなものである。常に n 回の投影データの平均値と $(n-1)$ 回のものを計算機メモリー上に蓄えておき、両者の値が全投影データに対して基準値 ε 以内におさまった時、時間平均値に収束したとして測定を

終了し、 n 回の投影データの平均値を用いて画像再構成をするシステムである。

Fig. 6 Flow chart of ACTS

Fig. 7(a), (b)は、縦軸に代表的な投影データを、横軸に平均化処理の回数(CTのスキャン数)をとり、それぞれ気泡流とスラグ流について投影データが平均回数によってどのように変化するかを示したものである。気泡流ではFig. 7(a)のように数回のスキャンの平均化処理によって一定値に収束する。一方、スラグ流

* 従来のCTシステムでは、CTを1回スキャンすることにより全方向の投影データを測定し、これを用いて画像再構成をしている(単スキャン方式)。多数回スキャン方式とは通常の測定を多数回繰り返す、つまりCTを多数回スキャンして得られた投影データの平均値を得るシステムである。

Fig. 7(a), (b) Relation between average projection data and number of scan

のような変動の大きい流れでは、Fig. 7(b)にみられるように多くのスキャンを行い平均化処理を行わなければ、投影データは一定値に収束しない。以上の結果から、流動様式によって必要なスキャン回数は異なるが、投影データを多数回測定し平均化処理することによって、Fig. 5のように、平均値はある一定値に収束し、投影データの時間平均値を得られることがわかった。

Fig. 8は、ACTSによりFig. 4(b) (スラグ流)と同じ

Fig. 8 Scattering of local void fraction measured by ACTS

流動条件で数回ボイド分布を測定し、変化幅を示したものである。このように、ACTSを用いることにより、従来方式(単スキャン方式)に比較し、変化幅も少なく極めて再現性が良好になった。

3. ACTS による局所ボイド率分布

今回作成した、多数回スキャンを行い投影データを平均化処理するCT スキャナシステムによって得られた、局所ボイド率分布が妥当なものであるかを見るために、インピーダンス・プローブ(以下プローブ)により測定した結果と比較検討を行なった。プローブの測定は、Fig. 9に示すように、円管断面の中心部分の鉛直方向に沿って10数点で行なった。まず、プローブの測定精度を確認するため、Fig. 9に示す円管中心部の鉛直線上の時間平均ボイド率をプローブとX線透過法とで測定を行い、両者を比較した。

Fig. 9 Void measuring point

Fig. 10は、横軸にX線透過法によって測定された管中心線分上の平均ボイド率 $\bar{\alpha}_{X\text{-ray}}$ を、縦軸にプローブによる結果 $\bar{\alpha}_{\text{probe}}$ をとり両者を比較したものである。両者の測定結果は $\pm 6\%$ 程度で一致している。線分上の平均ボイド率を用いてプローブの局所ボイド率測定

値の妥当性を検討することには疑問が残るが、著者らの知る範囲では、現在のところ他に局所ボイド率分布を検証する方法がないので、とりあえず、この結果よ

Fig. 10 Comparison of centerline average void fraction between impedance probe and X-ray beam

(a) Bubbly flow and annular flow

りプローブの測定値は妥当なものと考えた。

次に、CTとプローブの測定結果について比較検討を行なった。Fig. 11 (a), (b)に、二相流の代表的な流れに対するFig. 9に示す位置の局所ボイド率分布の測定結果の比較を示す。各図で、横軸はボイド率、縦軸は測定位置である。また図(a), (b)でそれぞれ左側の図は従来方式(単スキャン方式)で測定した結果であり、右側の図は今回作成した ACTS(多数回スキャン方式)により測定した結果である。図中、実線および黒丸は、それぞれCTおよびプローブによる測定結果である。本研究で用いているCTは、1mm×1mmの位置分解能で2次元局所ボイド率分布を得ることができる。これらの図から、気泡流、環状流などの変動の小さい流れでは、従来方式とACTSとの間には大きな差はなく、両者ともプローブとCTの結果とが非常によく一致していることがわかる。

これは、前述した投影データの変動が少ないためであり、前報の結果の正当性を裏付けている。しかしながら、スラグ流のような流れでは、従来方法では、プローブの結果と傾向および数値的にもかなり食い違っている。

(b) Slug flow

Fig. 11(a), (b) Comparison of void fraction distributions by CT and impedance probe

一方、ACTSによる測定はプローブの結果と非常によく一致しており、今回作成したシステムを用いることにより、スラグ流のような変動のある流れにおいても、局所ボイド率分布を精度よく測定できることがわかる。ただし、Fig. 11(a)の環状流においてみられるように、管壁近傍でプローブとCTの結果の食い違いがみられる。これは、壁近傍の画素のCT値が管壁の影響を受けたためであり、今後、配管壁近傍の測定精度

を高めるためには、壁の影響の補正方法について検討する必要がある。

Fig. 12は、縦軸にACTSの結果を、横軸にプローブによる結果を取り、両者を比較したものである。この図から、両者は±6%程度で一致しており、ACTSにより局所ボイド率を±6%の誤差範囲内で測定できることがわかる。

Fig. 12 Comparison of local void fraction by ACTS and impedance probe

Ⅳ. バンドル内のボイド率分布

本章では、ACTSを用いて複雑な形状の流路(バンドル)内の局所ボイド率分布を測定し、プローブの測

定結果と比較検討した。テスト部の写真を **Photo. 1** (a), (b)に示す。Photo. 1(a)は外径 12.3mm のデルリン製ロッドを 4×4 の格子状に組み込んだものであり、ロッド中心間ピッチはスペーサにより 16.2mm に保持されている。Photo. 1(b)は、 (4×4) バンドルの試験体(チャンネルはアクリル製で、チャンネル幅は 68 mm)を、Fig. 1 のループに組み込んだ時のものである。

Photo. 2 に水平バンドル内の二相流(水流量 1×10^4 kg/h, 空気流量 0.85 kg/h)の代表的な CT 再構成画像を、**Photo. 3** に中心部サブチャンネルの CT 画像の拡大図を示す。また、写真で白線はピンおよびチャンネルの境界を示す。この写真からサブチャンネル間を不連続な気相が分散して流動し、ロッド表面に液膜が付着しているのが判別できる。

Fig. 13(a), (b)は、CT とプローブの局所ボイド率分布の測定結果を、横軸にボイド率、縦軸にチャンネル底面からの距離をとり比較したものである。Fig. 13(a)は従来方式の結果であり、(b)はACTSによる結果である。この流動条件でのバンドル内の流動様相は外部から観察できる範囲では、流路内を小さな気泡が比較的変動もなく流れている。それにもかかわらず、従来の方式で CT により測定した局所ボイド率分布(Fig. 13(a))は、プローブの結果に比較してかなり不連続に変化しており、バンドル内部ではサブチャンネル間でもかなり変動の大きい流れを呈していることが予想される。一方、ACTS による結果はプローブと良好に一致しており、たとえバンドル内部で局所ボイド率の大きな時間変動があったとしても、ACTS を用いることによ

(a) Rod

(b) Test section

Photo. 1(a), (b) 4×4 rod bundle test section

Photo. 2 Computed tomogram for two-phase flow in 4x4 rod bundle

Fig. 13 Comparison of void fraction distribution for 4x4 rod bundle between CT and impedance probe

り精度よく局所ボイド率分布が測定できると考えられる。Fig.14はサブチャンネル内の局所ボイド率分布*を示す。図中、数字999はロッドを表わしており、数値はボイド率の1,000倍の値となっている。

V. まとめ

本研究では、投影データを多数回測定して平均化処

Photo. 3 Enlarged computed tomogram for center sub-channel

197	85	-11	999	999	999	999	999	999	999
209	106	9	999	999	999	999	999	999	999
238	145	49	999	999	999	999	999	999	999
277	195	97	999	999	999	999	999	999	999
311	242	144	41	999	999	999	999	999	999
342	291	204	106	18	999	999	999	999	999
366	329	265	194	115	40	999	999	999	999
371	345	310	272	222	157	83	25	999	999
366	348	338	329	308	263	201	141	98	71
359	263	366	346	356	332	297	254	220	201
353	374	384	374	364	354	339	320	305	300
332	364	378	369	353	336	327	323	327	335
315	342	356	355	334	307	292	293	302	318
311	323	333	335	315	286	271	276	278	281
315	313	312	307	289	273	272	276	259	229
315	304	297	286	267	255	255	252	213	154
309	302	295	277	249	220	198	173	120	55
310	300	291	267	218	160	111	61	999	999
304	290	272	227	161	86	20	999	999	999
298	280	240	170	89	17	999	999	999	999
285	261	208	119	25	999	999	999	999	999
260	232	167	68	999	999	999	999	999	999
241	197	123	999	999	999	999	999	999	999
226	161	74	999	999	999	999	999	999	999
207	121	27	999	999	999	999	999	999	999

Fig. 14 Void distribution in sub-channel

理することにより、2次元局所ボイド率分布を得るACTSシステム(多数回スキャン方式)を作成し、プローブによって測定されたボイド率分布と比較検討することにより以下の結果を得た。

- (1) 変動の小さい気泡流、環状流においては、従来のCTシステム(単スキャン方式)でも、十分な精度で2次元局所ボイド率分布を1mm×1mmの

* 数値は1mm×1mmの画素の平均ボイド率。

位置分解能で測定できるが、変動の大きいスラグ流では、プローブの結果と食い違ってくる。

- (2) ACTS により測定された 2 次元局所ボイド率分布は、局所ボイド率の変動の大小にかかわらずプローブの結果と良好に一致しており、ACTS を用いることにより、いかなる流動様式の二相流に対しても精度よく 2 次元局所ボイド率分布を 1 mm × 1 mm の位置分解能で測定できる。ただし、管壁近傍では、プローブと CT の結果の食い違いがみられ、壁近傍の測定精度を高めるためには、今後壁の影響の補正方法について検討する必要がある。

- (3) ACTS により、管群内の流動様式が判別可能であり、サブチャンネル内局所ボイド率分布測定が精度よく行える。

以上より、著者らが作成した二相流測定用 CT スキヤナシステム(ACTS)により二相流の流動様式および

流路形状にかかわらず、局所ボイド率分布を十分な精度で測定できることがわかった。

最後に、本研究の遂行にあたってプローブを提供して頂き、加えて貴重なご助言を賜った九州大学 世古口言彦教授に謝意を表す。

— 参 考 文 献 —

- (1) 鈴木 徹, 木村博信: 原子力誌, 25[1], 2~9 (1983).
- (2) KULACKI, F.A., et al.: ANS/ASME/NRC Int. Topical Mtg. on Nuclear Reactor Hydraulics, NU-REG/CP-0014, 2, pp. 904~922 (1980).
- (3) IKEDA, T., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 20[1], 1~12 (1983).
- (4) 飯塚 勝, 木村博信, 師岡慎一: 原子力誌, 24[6], 463~465 (1982).
- (5) 飯塚 勝, 他: 機械学会関西支部第 4 回気液二相流シンポジウム講演論文集, No. 824-11, pp. 17~20 (1982).
- (6) LAHEY, R.T. Jr., MOODY, F.J.: "The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor", pp. 175 (1977), ANS.

○「技術士補」制度新設のお知らせ○

昭和58年4月、技術士法が全面的に改正されて、技術士試験では予備試験が廃止され、さらに技術士の補助者として「技術士補」という資格制度が新たに設けられました。また技術士および技術士補の試験・登録の事務が科学技術庁から指定機関(日本技術士会)へ移されました。この新技術士制度は昭和59年4月から施行されましたので、その中から主に、技術士補の定義・試験・登録に関する部分を抜粋してお知らせします。

1. 定 義

「技術士」は従来と変わりませんので略します。

「技術士補」とは、技術士補の名称を用いて技術士を補助する業務を行う者をいいます。

2. 試 験

2.1 技術士の試験は、第1次試験(技術士補)、第2次試験(技術士)に分けられ、それぞれ次の17技術部門ごとに、指定試験機関によって行われます。

機械、船舶、航空機、電気、化学、繊維、金属、鉱業、建設、水道、衛生工学、農業、林業、水産、経営工学、情報処理、応用理学

2.2 第1次試験(技術士補試験)(第1回は昭和60年1~3月の間に実施される予定です)

- (1) 第1次試験の受験資格には、学歴、学歴の条件は一切なく、誰でも無条件で受験できます。例えば文科系の学生でもかまいません。
- (2) 第1次試験で求められる知識の水準は、理工系4年制大学の卒業程度のものであり、技術士となるべき素養の試験であります。
- (3) 第1次試験は筆記試験のみでその内容は、①全部門

に共通の基礎知識(数学、物理、化学、生物、地学のうち2科目選択)、②受験を志す技術部門に関する基礎知識および専門知識であります。

- (4) 筆記試験の一部免除。理科系4年制大学卒業生、上記と同程度の教育課程を修めた者、理科系4年制大学卒業程度の知識を必要とする国家資格を有する者は、筆記試験の内容①を免除されます。

2.3 第2次試験(技術士試験)(例年通り昭和59年8月に実施され、試験内容は従来と変わりません。)

- (1) 第2次試験の受験資格には、技術士業務に相当しい業務経験が7年以上あればよく、学歴の有無を問いません。
- (2) 技術士補が第2次試験を受験する場合は、技術士補助業務経験が4年以上あれば受験できます。

3. 合格証・登録証

合格証は科学技術庁長官より授与され、登録証は指定登録機関から交付されます。

詳細問合せ先 (〒105)東京都港区虎の門 2-8-10 第15森ビル
日本技術士会 技術士試験センター
(Tel. 03-591-7111(代))