プローブとして中性子を用いた金属管内気液二相流の可視化と計測* (第3報, 中性子ラジオグラフィー画像の定量化法)

日 引 俊*, 三 島 嘉 一 郎*

Visualization and Measurements of Two-Phase Flows in Metallic Ducts Using Neutrons as Microscopic Probes (3rd Report, Quantitative Measurement of Neutron Radiography Image)

Takashi HIBIKI and Kaichiro MISHIMA

The quantitative measurement of an image obtained by neutron radiography technique was proposed in order to accurately measure the void fraction of a two-phase flow in a metallic duct. It was shown experimentally that the spatial distribution of the dark-current component was homogeneous and the temporal variation could not be ignored. Since the scattered neutrons falling on the image converter could be homogenized by setting the test section at a distance from the converter, it was clarified that the corrections for dark-current and scattered neutrons could be represented by an offset value. It was proposed that the offset value could be determined by using the total macroscopic cross section of the material (Σ -scaling method). By comparing the calculated void fractions with the measured ones obtained by simulating the known void profile using a standard test section, the void fraction could be measured by this method within 2% error. The measurement error was estimated to be up to 10% when no corrections for scattered neutrons were made or no arbitrary offset value was used.

Key Words: Flow Measurements, Digital Image Processing, Flow Visualization, Multiphase Flow, Neutron Radiography, Neutron Radioscopy, Two-Phase Flow, Void Fraction

1. 結 言

X線あるいは γ 線ラジオグラフィーと相補的な特徴を有する中性子ラジオグラフィー(Neutron Radiography, NR)は当初, 航空機産業や自動車産業における非破壊検査法として発達してきた⁽¹⁾。近年, 高中性子束が得られるようになり⁽²⁾中性子ラジオグラフィーは非破壊検査の一手法から中性子を積極的にプローブとして用いる有力な可視化・計測法の一つとして発展しつつあり熱流動研究への応用はその一例である⁽³⁾。

中性子ラジオグラフィーの流れの可視化への応用に関しては中性子に不透明な粒子を流体に懸濁させて流体の速度場, 流線を可視化した例がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そのほかにも中性子ラジオグラフィー動画法を用いて原子炉再冠水を模擬した垂直円管内のリフラクティング現象⁽⁶⁾, 1 MPaの圧力条件下における沸騰二相流の流動様式および発熱面近傍における限界熱流動現象⁽⁷⁾, 宇宙排熱システムのステンジャー型コールドプレート内流動⁽⁸⁾, 37本バンドル集合体内の空気-水二相流⁽⁹⁾の

可視化が行われている。一方, 中性子ラジオグラフィーのボイド率計測への応用に関しては狭小流路内空気-水二相流のボイド率の計測例⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾があり, 光学法, プローブ法による計測結果との比較から, 得られたボイド率の計測誤差は $\pm 5\%$ 程度と推定されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。最近, これら以外にも熱流動現象におけるボイド率計測に中性子ラジオグラフィーの応用が試みられようとしている。しかし, 現在, ボイド率計測を行うにあたって基礎となる散乱中性子成分の補正など中性子ラジオグラフィー画像の定量化に関して系統的に十分な検討がなされていない状況である。例えば, Kobayashi⁽¹⁵⁾によってコンバータ面上での遮へい体からの散乱中性子成分は設備によっては20%にも及ぶことが報告されていることから散乱中性子成分の補正を行わずに計測されたボイド率には, 無視できない計測誤差が含まれる可能性がある。

本研究グループでは低中性子束場における中性子の計測誤差⁽¹⁶⁾, 定量化可能な水膜厚さ⁽¹⁷⁾等, これまで中性子ラジオグラフィー画像の定量化⁽¹⁸⁾に関して研究を行ってきた。ここでは, 散乱中性子成分の補正を考慮に入れたボイド率計測法を提案し三重管試験部により得られた既知の水膜厚さ分布を用い本法によりボイド率は計測誤差2%以内で計測可能であることを示

* 原稿受付 1995年3月15日。

*1 正員, 京都大学原子炉実験所(〒590 04 大阪府泉南郡熊取町野田)。

した。また、補正を行わない場合にはその計測誤差は10%にも及ぶことを明らかにした。

記 号

C : ゲイン

D : コリメータ開孔部の直径 m

G : 輝度

G_0 : オフセット

G_D : 暗電流

L : コリメータ開孔部から撮像面までの距離 m

L' : 撮像面から試験部までの距離 m

r_i : 三重管構成管の各管径 m

t : 時間 s

U_g : 画像の不鮮明度(ぼけ) m

x : 円管の管径方向座標 m

x_i : 内管中心軸と各管中心軸とのずれ m

x_p : x 方向画素位置

y_p : 流れ方向画素位置

α : ボイド率

γ : 撮像系の γ 値

δ : 物質厚さ m

δ_i : 液膜厚さ $= 2\sqrt{r_i^2 - (x - x_i)^2}$ m

Σ : 中性子の巨視的断面積 m^{-1}

ϕ : コンバータに到達する全中性子束 $n/(m^2 \cdot s)$

ϕ_A : 吸収体後方の透過中性子束 $n/(m^2 \cdot s)$

ϕ_P : 透過中性子束 $n/(m^2 \cdot s)$

ϕ_{th} : 入射中性子束 $n/(m^2 \cdot s)$

ϕ_S : 散乱中性子束 $n/(m^2 \cdot s)$

ϕ_{SM} : 物質内散乱中性子束 $n/(m^2 \cdot s)$

ϕ_{SS} : 遮へい体からの散乱中性子束 $n/(m^2 \cdot s)$

添 字

A : 中性子吸収体

G : 気相あるいは気相単相

L : 液相あるいは液相単相

M : 二相流

MG : 二相流の気相部分

ML : 二相流の液相部分

T : 試験部壁

W : 水

2. ボイド率計測法

2.1 中性子ラジオグラフィー動画法の基本原理

可視化・計測体系の一例として金属製試験部内気液二相流を考えると、入射中性子束 ϕ_{th} は試験部を透過

するとき、式(1)で表されるようにその行路の物質厚さ δ に応じて減衰することから透過中性子束 ϕ_P は試験部内の二相流情報を包含している⁽¹⁹⁾。

$$\phi_P = \phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_G \delta_{MG} - \Sigma_L \delta_{ML} - \Sigma_T \delta_T) \quad \cdots (1)$$

コンバータ面上に到達する中性子はその中性子束 ϕ に比例して可視光線に変換され、高感度カメラによって二相流画像として記録される。二相流画像の輝度分布は画像処理装置によってデジタル化されるが、得られた画像データにおいてカメラへの入射光量と出力信号 G は、式(2)で表されるように一般には比例しない。

$$G = (C \cdot \phi)^\gamma + G_D \quad \cdots (2)$$

したがって、画像データから定量的計測を行う場合には、あらかじめ撮像系の γ 特性を調べ暗電流項 G_D を補正した出力信号に $1/\gamma$ を乗ずることによって γ 補正を行う必要がある。 γ 補正には画像処理装置のlookupテーブルを用いる方法⁽²⁰⁾が簡便であるが、中性子ラジオグラフィーの撮像系としてよく使用されるSIT(Silicone Intensifier Target)管の γ 値はほぼ1であり特に γ 補正を必要としないことから式(2)を式(3)のように簡略化する。

$$G = C \cdot \phi + G_D \quad \cdots (3)$$

2.2 暗電流補正 カメラの出力には、光が入射していない場合でも暗電流と呼ばれる成分 G_D が含まれている。この暗電流成分は、中性子を照射しない状態で得られる画像データを用いて補正することが可能である。なお、アナログ信号系やADCのオフセット成分も一種の暗電流成分とみなすことができ、これらの成分はすべての画像データに和の形で重畳されている⁽²¹⁾。

2.3 散乱中性子補正

図1(a)に示したように

(a) Without neutron absorber (b) With neutron absorber

Fig.1 Schematic diagram of neutron component detected by the converter

コンバータ面上のある位置に到達する中性子束 ϕ は試験部を直進して透過してきた中性子成分 ϕ_P のほかに試験部内で散乱してきた中性子成分 ϕ_{SM} 、および照射室内で散乱し試験部のない方向からコンバータに入射してきた中性子成分 ϕ_{SS} が含まれる。

$$\phi = \phi_P + \phi_{SM} + \phi_{SS} \cdots \cdots \cdots (4)$$

散乱中性子成分 $\phi_S (= \phi_{SM} + \phi_{SS})$ は画像に不鮮明さ(ぼけ)を生じさせたり、ボイド率計測等の画像データ定量化の際の誤差原因となる。

これらの散乱中性子成分の除去法についてはカドミウムグリッド等の中性子吸収体を用いる本影法が静止画に関して提案されている⁽²²⁾。すなわち、図1(b)に示したように試験部前面に中性子吸収体をおき、その幅が吸収体の後ろに散乱中性子が回り込むだけの大きさをもっているとすると吸収体後方でコンバータに到達する中性子束 ϕ_A は式(5)で表される。

$$\begin{aligned} \phi_A &= \{\phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_A \delta_A)\} \cdot \exp(-\Sigma \delta) + \phi_S \\ &= \phi_P \cdot \exp(-\Sigma_A \delta_A) + \phi_S \cdots \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

Σ_A が非常に大きい場合には、 $\phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_A \delta_A) \cong 0$ となるため、 $\phi_A \cong \phi_S$ となる。したがって、純透過成分 ϕ_P は検出値 ϕ から吸収体後方の検出値 ϕ_A を差引くことにより式(6)のように近似的に求めることができる。

$$\phi_P = \phi - \phi_A \cdots \cdots \cdots (6)$$

このようにして散乱線が回り込むだけの大きさもちつつスポット的に吸収体の位置を配置し、上下左右に少しずつずらしていくことによって散乱線の二次元分布を求めることができる。

しかし、動画に関して、例えば、二相流のように液

膜厚さが時間的に変化する場合には、液膜厚さの変動に伴い、物質内散乱による中性子成分 ϕ_{SM} が変化する。ことから、あらかじめ散乱中性子成分のデータを採取しておき、それを差引くという本影法を用いることはできない。さらに本影法は、中性子吸収体グリッドを試験部前面に配置することから、その点のデータが得られないなどの問題がある。したがって、本研究では、散乱中性子補正法として本影法の代わりに以下に述べる方法を用いることにする。

図2に物質内で散乱された中性子の空間分布と試験部-コンバータ間距離の関係を概略的に示した。試験部-コンバータ間距離を十分大きくとることにより物質内散乱中性子成分の空間分布は一様となり⁽²³⁾、その強度はその距離とともに減少する⁽²⁴⁾と予想される。他方、周囲からの散乱中性子成分は試験部-コンバータ間距離には依存しないと考えられることから、試験部-コンバータ間距離を十分大きくとることにより、周囲からの散乱中性子成分 ϕ_{SS} が物質内散乱成分 ϕ_{SM} に対して支配的になる(すなわち $\phi_{SM} \ll \phi_{SS}$) と考えられる。ここで、 ϕ_{SS} は物質厚さの変化に依存しないので、散乱中性子束 ϕ_S は物質厚さの変化に依存しないことになる。この場合、画像輝度に及ぼす散乱中性子の影響は、全中性子束から散乱中性子成分をオフセットとして差引くことにより補正することが可能である。

2.4 線源強度の揺らぎおよび撮像系のドリフト補正

加速器を中性子線源として用いる場合には、入射中性子束 ϕ_{th} の揺らぎが無視できない場合がある。また、式(3)中の C , G_D は、画像処理装置も含めた撮像系のドリフトによって変動を受ける⁽¹⁸⁾。したがって、解析を進める前処理として、解析画像中で中性子透過率の変化がない領域の輝度の画像間比較により、この ϕ_{th} , C , G_D が各画像間で等しくなるよう補正する必要がある。

2.5 Σ スケーリング法 散乱中性子補正法として

平滑化法を用いるために、式(3)を以下のように変形する。

$$G = C \cdot \phi_P + G_0 \cdots \cdots \cdots (7)$$

$$G_0 = G_S + G_D \cdots \cdots \cdots (8)$$

$$G_S = C \cdot (\phi_{SM} + \phi_{SS}) \cdots \cdots \cdots (9)$$

高压条件下の³He等の一部の気体を除いて気相の中性子の巨視的断面積は、試験部および液相のそれに比べて無視できることから気相で満たされた試験部および液相で満たされた試験部の画像より、それぞれ式(10), (11)が得られる。

$$G_G = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_T \delta_T) + G_0 \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$G_L = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_L \delta_L - \Sigma_T \delta_T) + G_0 \cdots \cdots \cdots (11)$$

Fig. 2 Dependence of scattered neutron on the distance between test section and converter

式(10), (11)より G_0 は式(12)のように求めることができる。

$$G_0 = \frac{G_L - G_G \cdot \exp(-\Sigma_L \delta_L)}{1 - \exp(-\Sigma_L \delta_L)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式(12)を満足するように G_0 を決定し、画像処理により各画像の輝度を G_0 で正規化する。このように中性子の巨視的断面積 Σ を基準とし暗電流成分および散乱中性子成分の補正項をオフセットとして求めることにより相対的な輝度情報から定量的な情報を得ることから、以下、本法を Σ スケーリング法と呼ぶ。図3に Σ スケーリング法の概略を示した。

2・6 Σ スケーリング法による二相流画像の定量化

気相で満たされた試験部、液相で満たされた試験部の画像輝度の分布は、それぞれ式(10), (11)で与えられる。また、気液二相流画像の輝度分布は式(13)で与えられる。

$$G_M = C \cdot \phi_{th} \cdot \exp(-\Sigma_L \delta_{ML} - \Sigma_T \delta_T) + G_0 \quad \dots (13)$$

式(10), (11), (13)よりボイド率分布は式(14)のように求めることができる。

$$\alpha = 1 - \frac{\delta_{ML}}{\delta_L} = \frac{\ln\left(\frac{G_L - G_0}{G_M - G_0}\right)}{\ln\left(\frac{G_L - G_0}{G_G - G_0}\right)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

2・7 画像定量化に及ぼす画像ひずみおよび画像ぼけの影響 カメラレンズやイメージインテンシファイアおよび撮像管の偏向走査の不完全性などに起因する画像ひずみは画像計測の際の誤差要因となる。現在、撮像管の偏向走査パターンをメモリーに書き込み

DACを介して偏向信号を撮像管に送ることによる撮像系ひずみの補正法が開発されている⁽²⁶⁾。一方、撮像系ひずみ補正機能を有していない撮像系を用いる場合にはあらかじめひずみの無視できる撮像領域を確認し撮像を行うことが重要である。

入射中性子ビームの非平行度起因する画像のぼけも画像計測の際の誤差要因となる。いま、ダイバージェント型コリメータの開孔部の直径を D 、全長を L 、試験部とコンバータ間の距離を L' とすると画像のぼけ U_g は式(15)で表される⁽¹⁾。

Table 1 Dimensions of the test section

Tube	In or Out	Measured Dia.	Symbol	Central Pos.	Symbol
Inner Tube	Inner Dia.	1.48 mm	r_1	0.00 mm	x_1
	Outer Dia.	2.02 mm	r_2	0.00 mm	x_2
Center Tube	Inner Dia.	3.05 mm	r_3	-0.357 mm	x_3
	Outer Dia.	4.05 mm	r_4	-0.357 mm	x_4
Outer Tube	Inner Dia.	4.92 mm	r_5	-0.446 mm	x_5
	Outer Dia.	6.00 mm	r_6	-0.446 mm	x_6

Table 2 Simulated void fraction by the triple tube test section

Case	Condition	Void fraction*
Case 1	Inner gap filled with water	0.910
Case 2	Center gap filled with water	0.784
Case 3	Outer gap filled with water	0.678
Case 4	Inner and center gaps filled with water	0.694
Case 5	Center and outer gaps filled with water	0.462
Case 6	Inner and outer gaps filled with water	0.587
Case 7	All gaps filled with water	0.371

*) The aluminum walls of the inner and center tubes were assumed to be void.

Fig. 3 Schematic diagram of Σ -scaling method ("Transmitted Neutron" means the neutron component falling on the converter without absorbed and scattered neutrons in an object)

Fig. 4 Schematic diagram of the triple tube test section

Table 3 Neutron radiography system used in this experiment

Neutron Source	Facility	JRR-3M, TNRF2(JAERI)
	Power [MW]	20
	Neutron Flux [$n/(cm^2s)$]	1.5×10^8
	Cd Ratio (Au) [-]	130
	L/D Ratio [-]	153(V), 176(H)
	Object Field [mm]	305(V) X 255(H)
	n γ Ratio [$n/(cm^2\mu Sv)$]	2.5×10^3
	Collimator Type	Divergent
Imaging System	Converter	Kasei NR Converter
	Zooming Lens	Canon V10 X 18R
	SIT Tube	Hamamatsu C1000-12 ($\gamma=1$)
Image Processing System	Image Memory	PIAS α -1
	Image Processor	PIAS-III

$$U_g = \frac{L'}{L/D} \dots\dots\dots (15)$$

したがって、2・3節で述べた物質内散乱中性子成分の平滑化および低減化のためには画像のぼけが無視できる範囲内で試験部-コンバータ間距離を離す必要がある。

3. 実 験

Σ スケーリング法による中性子ラジオグラフィ画像の定量性の検討を目的として以下に示す実験を行った。

試験部としては既知のボイド率分布を有する模擬気液二相流画像を得るために図4に示したアルミニウム製三重管試験部を用いた。試験部寸法を表1に示した。この三重管試験部の空げきに水を満たし、その空げきの組合せにより表2に示した既知とボイド率分布を得ることができる。また、表3に実験に用いた中性子源、撮像系、画像処理系を示した。実験は、試験部中心からコンバータまでの距離を16, 50, 200 mmに変化させて行った。なお、コンバータ前面にはアルミニウム製の保護板が装着され、その保護板も固定板により固定されていることから試験部からコンバータ面までの最短距離は10 mmである。したがって、管外径12 mmの三重管試験部の中心からコンバータまでの最短距離は16 mmとなる。

4. 結果 と 考 察

4・1 暗電流の空間分布と経時変化 図5に中性

Fig. 5 Spatial distribution of dark current

Fig. 6 Temporal distribution of dark current

子ビームの方向と試験部の長さ方向に垂直な方向(以下 x 方向と記す)の暗電流の空間分布を、図6に空間平均された暗電流の経時変化を示した。図5より暗電流成分は x 方向でほとんど一様であることがわかる。さらに試験部-コンバータ間距離を大きくとることにより散乱中性子成分も x 方向にほぼ一様になると考えられることから式(8)に示したように式(7)中の $G_0(=G_S+G_D)$ は x 方向にほぼ一様であると考えられる。これは試験部外に設置された中性子透過特性が既知の標準試料から Σ スケーリングが行えることを意味しており多孔質媒体等の内部形状が未知の被検体にも本法が適用可能であることがわかる。

図6より撮像系の電源投入後の暗電流の経時変化は

Fig. 7 Verification of Σ scaling method for void fraction measurement

最大で10%程度に及んでおり定常値に達した後も2%程度の変動が認められる。現在の定量化法ではあらかじめ採取された暗電流データを用いてその補正を行っている⁽²¹⁾ため暗電流画像と二相流画像の撮像条件を同一にする必要があるが Σ スケーリング法によれば暗電流、散乱中性子成分からなるオフセット成分 G_0 は中性子の巨視的断面積から決定されるので暗電流の変動に依存せず撮像条件が異なっている場合でも定量的データを得ることが可能である。

4.2 Σ スケーリング法による試験部断面平均ボイド率の計測値と計算値との比較 図7に試験部中心からコンバータまでの距離を16 mmとした場合の試験部断面平均ボイド率の設計値と Σ スケーリング法からの計測値の比較を示した。本実験では試験部形状が既知であるため特に Σ スケーリング用の標準試験部は用いず三重管の全かんげきが水で満たされている画像中の水膜厚さが最大値をとる位置で Σ スケーリングを行い、式(12)より G_0 を決定した。

一方、散乱中性子の補正を行わない場合や暗電流に変動がある場合、 G_0 は Σ スケーリング法から得られる値とは異なる値をもつ。そして式(12)を変形して得られる式(16)から明らかなように、その G_0 を用いて計算された Σ_L の値は水の巨視的断面積の値 $\Sigma_w (= 0.345 \text{ mm}^{-1})$ とは異なる値となる。

$$\Sigma_L = \frac{1}{\delta_L} \ln \frac{G_G - G_0}{G_L - G_0} \dots \dots \dots (16)$$

例えば、 $G_G = 250$, $G_L = 200$, $\delta_L = 10 \text{ mm}$, $G_S / (G_G - G_0) = 0.25$ のとき、式(12)より $G_0 = 198$ ($G_S = 17.2$,

Fig. 8 Comparison of the calculated void-profile with the measured one (Condition: Distance between test section and converter is 16 mm. All gaps are filled with water. The y coordinate is 350)

$G_D = 181$)となる。 G_S が補正されていない場合には $G_0 = G_D = 181$ となり、この値を用いて式(16)から計算した Σ_L は 0.129 mm^{-1} となる。さらに G_D が5%変動し $G_D = 172$ となった場合、 Σ_L は 0.102 mm^{-1} となる。このように散乱中性子成分、暗電流成分の補正により Σ_L は大きく変動することから、 Σ_L (すなわち G_0)をパラメータとしてその変動がボイド率の計測誤差に及ぼす影響を調べ図7に示した。 $\Sigma_L = 0.345 \text{ mm}^{-1} (= \Sigma_w)$ が水の巨視的断面積に相当し、これを用いた結果(○印)が Σ スケーリング法によるものである。

図7より Σ スケーリング法によるボイド率の計測誤差は最大で2.16%、平均で1.08%であるのに対し、 G_0 が Σ スケーリング法から得られる値と異なる場合、例えば $\Sigma_L = 0.099 \text{ mm}^{-1}$ とした場合の計測誤差は最大で10%に及ぶことが明らかとなった。ここで、 Σ スケーリング法によって得られたボイド率(図7中の○印)は三重管の全かんげきが水で満たされている画像中の水膜厚さが最大値をとる位置で決定された同じ G_0 を用いて計算されたものであるにもかかわらず、ボイド率の計測値と設計値からの計算値は誤差2%以内で一致している。これは2.3節で述べたように $\phi_{SM} \ll \phi_{SS}$ が成立し、 G_0 が近似的に水膜厚さの変動に依存しないことを示している。

4.3 Σ スケーリング法による水膜厚さ分布の計測値と計算値との比較 Σ スケーリング法によるボイド率分布(すなわち水膜厚さ分布)計測の可能性を調べるために、三重管試験部による既知の水膜厚さ分布

Fig. 9 Comparison of the calculated void profile with the measured one (Condition: Distance between test section and converter is 16 mm. Outer gap is filled with water. The y coordinate is 350)

Fig. 10 Comparison of the calculated void profile with the measured one (Condition: Distance between test section and converter is 200 mm. All gaps are filled with water. The y coordinate is 350)

と計測値の比較を試みた。

三重管試験部の内管、中管、外管に水を満たしたとき、外管にのみ水を満たしたときの水膜厚さ分布は、それぞれ式(17)、(18)から計算でき、その他の場合も同様に計算可能である。

内管、中管、外管に水を満たしたとき：

$$\left. \begin{aligned} \delta_w &= \delta_5 - \delta_4 + \delta_3 - \delta_2 + \delta_1 \quad (0 \leq |x| \leq r_1) \\ \delta_w &= \delta_5 - \delta_4 + \delta_3 - \delta_2 \quad (r_1 \leq |x| \leq r_2) \\ \delta_w &= \delta_5 - \delta_4 + \delta_3 \quad (r_2 \leq |x| \leq r_3) \\ \delta_w &= \delta_5 - \delta_4 \quad (r_3 \leq |x| \leq r_4) \\ \delta_w &= \delta_5 \quad (r_4 \leq |x| \leq r_5) \end{aligned} \right\} \dots (17)$$

外管に水を満たしたとき：

$$\left. \begin{aligned} \delta_w &= \delta_5 - \delta_4 \quad (0 \leq |x| \leq r_4) \\ \delta_w &= \delta_5 \quad (r_4 \leq |x| \leq r_5) \end{aligned} \right\} \dots (18)$$

ただし、

$$\delta_i = 2\sqrt{r_i^2 - (x - x_i)^2} \dots (19)$$

内管、中管、外管に水を満たしたときおよび外管のみに水を満たしたときの水膜厚さの計測値と式(17)、(18)からの計算値の比較を、それぞれ図8、9に示した。なお、解析に用いた画像の試験部中心とコンバータとの間の距離は16 mmである。図8、9より計測値は設計値からの水膜分布の計算値と良好に一致していることがわかる。したがって、本試験部に対してはコンバータからの距離16 mmをとることによって十分に物質内散乱中性子は平滑化および低減化されていることがわかる。この結果は高速中性子の散乱中性子に対してYoshii⁽²⁴⁾が行った「入射中性子に対して試験部の幅程度、試験部とコンバータを離すことにより散乱中性子成分を無視できる」とする計算結果とよく一致している。

4.4 画像定量化に及ぼす画像の不鮮明度の影響

図10には、試験部中心-コンバータ間距離が200 mmの場合の結果を示した。図10より試験部中心からコンバータまでの距離を離れたことにより、散乱中性子はさらに一様となるものの入射中性子ビームの平行度起因して画像に不鮮明さ(ぼけ)が生じ、水膜厚さ分布に計算値で示されるような鋭さを欠いていることがわかる。例えば、本実験で用いたJRR-3Mのコリメータはダイバージェント型でありその水平方向の L/D は176であるので試験部とコンバータとの距離 L' を16, 50, 200 mmとすると水平方向の画像の不鮮明度(ぼけ)は式(15)よりそれぞれ0.0909, 0.284, 0.568 mmとなる。したがって、本実験で用いた内径10 mmの試験部の場合、その不鮮明度の割合(=不鮮明度/試験部幅)は、0.909, 2.84, 5.68%となる。また、本実験における画像の空間解像度は中性子ラジオグラフィー動画法の空間解像度のほぼ限界値(≈ 0.100 mm/pixel)⁽²⁵⁾にあたる0.0943 mm/pixelであり、ぼけの影響の及ぶ画素数は $L'=16, 50, 200$ mmに対し、それぞれ1, 3, 6画素である。

したがって、中性子ラジオグラフィー動画法により

得られた画像の定量化を行う際には本研究で作成したような既知のボイド率分布が模擬可能な試験部により散乱中性子が平滑化される試験部-コンバータ間距離を実験的に決定し、その範囲内でできるだけ試験部をコンバータに近接させる必要がある。また、その距離としては試験部の幅程度の値が目安となる。

5. 結 論

中性子ラジオグラフィー動画像から得られる画像の定量化法に関し解析的、実験的に検討し以下の結果を得た。

(1) 物質内散乱中性子成分は試験部とコンバータの距離を離すことにより平滑化および低減化でき、暗電流成分とともにオフセットとして補正することが可能である。

(2) オフセットの決定は中性子の巨視的断面積をもとに行うことができ(Σ スケーリング法)、本法によるボイド率の計測誤差は2%以内であった。

(3) 散乱中性子成分を補正しない場合やオフセットの決定に Σ スケーリング法を用いない場合の計測誤差は10%に及ぶ場合もあることがわかった。

Σ スケーリング法の妥当性の検討に用いた画像データは日本原子力研究所 JRR-3M を用いて採取されたものであり、実験にご協力いただいた同研究所 鶴野晃氏、松林政仁氏に謝意を表す。

文 献

- (1) Von der Hardt, P. and Röttger, H., eds., *NEUTRON RADIOGRAPHY HANDBOOK*, (1981), 1-170, D. Reidel.
- (2) Matsubayashi, M. and Tsuruno, A., *NEUTRON RADIOGRAPHY*, (4), (1994), 415-422, Gordon & Breach Sci.
- (3) 三島嘉一郎・日引俊, 原子力工業, **41** (1995), 46-53.
- (4) Sathianathan, D., *Ph. D. Thesis*, Pennsylvania State Univ., (1991).
- (5) Takenaka, N., Fujii, T., Ono, A. and Tsuruno, A., *Proc. 4th Int. Topical Mtg. Nucl. Thermal Hydraul., Oper., Safe.*, Taipei, Taiwan, **2** (1994), 43-C 1-43-C-6.
- (6) Hewitt, G. F., Costigan, G. and Lee, D. H., *NUREG/CP-0058*, **1** (1985).
- (7) Iwamura, T., Watanabe, H. and Murao, Y., *Nucl. Eng. Des.*, **149** (1994), 195-201.
- (8) 藤井照重・中澤武・宮崎芳郎・古川正夫, 第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **1** (1994), 136-138.
- (9) Chang, J. S., Campeau, J. C., Harvel, G. D., Osamusali, S. I., Wang, S. H. and Butler, M. P., *NURETH-4* (1989), 413-417.
- (10) Mishima, K., Hibiki, T. and Nishihara, H., *Int. J. Multiphase Flow*, **19** (1993), 115-124.
- (11) 三島嘉一郎・日引俊, 機論, **61** 589, B (1995), 3197-3204.
- (12) Mishima, K., Hibiki, T., Yoneda, K., Fujine, S., Kanda, K., Nishihara, H. and Chung, N., *Annu. Rep. Res. React. Inst., Kyoto Univ.*, **27** (1994), 245-253.
- (13) Mishima, K., Fujine, S., Yoneda, K., Yonebayashi, K., Kanda, K. and Nishihara, H., *Dynamics of Two-Phase Flow*, (1992), 142-160, CRC Press.
- (14) Hibiki, T., Mishima, K. and Tsuruno, A., *Proc. 1995 ASME/JSME Fluids Eng. Laser Anemometry Conf. Exhib.*, FED-209 (1995), 243-250.
- (15) Kobayashi, H., *Radiation Detectors and Their Uses*, *KEK Proc.*, **93** 8 (1993), 174-185.
- (16) Hibiki, T. and Mishima, K., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, A369 (1996), 186-194.
- (17) 三島嘉一郎・日引俊, 機論, **62** 593, B (1996), 137-144.
- (18) Hibiki, T., Mishima, K., Yoneda, K., Fujine, S., Kanda, K., Nishihara, H., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **30** (1993), 516-523.
- (19) Hibiki, T., Mishima, K. and Matsubayashi, M., *Nucl. Tech.*, **110** (1995), 422-435.
- (20) 河田聡・南茂夫, 科学計測のための画像データ処理, (1994), 95-118, CQ 出版.
- (21) 持木幸一, 原子力工業, **41** (1995), 37-42.
- (22) Kobayashi, H., Ikeda, Y., Ohkubo, K. and Wakao, H., *NEUTRON RADIOGRAPHY*, (3) (1990), 903-912, Kluwer Academic Press.
- (23) Hrdlicka, Z. and Peterka, F., *NEUTRON RADIOGRAPHY*, (3) (1990), 131-143, Kluwer Academic Press.
- (24) Yoshii, K. and Kobayashi, H., *Proc. Sec. Int. Top. Mtg. NR Sys. Des. Chanc.*, (1995), 178-183, Shonan Village Center & Rikkyo Univ., Japan.
- (25) 小林久夫, 原子力工業, **41** (1995), 21-28.
- (26) 赤池裕貴・田口亮・持木幸一・村田裕, 日本原子力学会 1995 年春の年会要旨集, (1995), 306.