



キャパシタンス CT とウェーブレット多重解像度を用いた管路内固気二相流の特徴抽出*

武居 昌宏¹, 李 輝², 越智 光昭¹, 斎藤 兆古³, 堀井清之⁴

Feature Extraction of Solid-Air Two Phase Flow with Capacitance CT and Wavelets Multiresolution

Masahiro TAKEI, Hui LI, Mitsuaki OCHI, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

A concept to extract a feature of solid-air two-phase flow in a pipeline has been launched with a combination of a capacitance-computed tomography and wavelets transform. With this concept, particle distribution images obtained by CT are transformed with discrete wavelets multiresolution. As a result, in the case of low open area ratio of the pipe cross-section, high particle densities are shown in secondarily dominant levels as well as a substantial space level. The high value in the secondary level results from unhomogeneous density due to collision between particles and wall. In the experiment, the CT acquires the capacitances between 12 electrodes distributing around the outside of the pipeline. Clay is attached inside the pipeline in order to verify the open area ratio. The images are reconstructed from the capacitances with a linear back projection method.

Keywords : Capacitance CT, Air-solid two phase flow, Discrete wavelets transform

1. 緒 言

近年、管路内混相流の流動状態を非破壊非接触で可視化する手法として、コンピューティッド・トモグラフィ（CT）法¹⁾が、広く用いられるようになってきた。例えば、気液二相流の分野では、X線を用いたボイド率変動の測定²⁾、ラジオグラフィを用いた可視化計測^{3),4)}、超音波を用いた三相成分の計測⁵⁾、および、レジスタンスを用いた流動計測⁶⁾などが報告されている。一方、固気二相流の分野では、比較的安価であるキャパシタンス CT が開発され⁷⁾、流動層内の気泡合体⁸⁾やバブル挙動の可視化⁹⁾、空気輸送における粒子挙動の可視化に適用された¹⁰⁾。このキャパシタンス CT は、多数の電極からなるセンサを管路外周に配置し、各電極間のキャパシタンスを 10 ms 程度の短時間で測定し、画像再構成法により管路断面の誘電率分布、すなわち、気体分布と固体分布と

を求めるものである。しかしながら、このようなキャパシタンス CT は、不適切逆問題を解法とした近似的な二次元分布画像しか得ることができず、その画像は不明瞭なものであり、詳細な二次元粒子分布の特徴を抽出することは難しい。

このような不明瞭な画像やノイズを含んだ画像の特徴抽出手段として、最近ウェーブレット解析が注目を集めており¹¹⁾、正規直交性を利用した多重解像度解析が、各種工学分野に応用されている。例えば、電磁気学分野において、斎藤らはそれを電磁界計算へ応用し¹²⁾、ノイズフィルタ評価に適用した¹³⁾。流体工学分野においては、連続ウェーブレットを用いた乱流渦構造を解析した例¹⁴⁾が報告された。また筆者らは、離散ウェーブレット多重解像度解析を、噴流断面の流体画像に適用し、乱流渦構造を解析した¹⁵⁾。

そこで、本研究は、キャパシタンス CT とウェーブレット多重解像度を用いた管路内固気二相流における二次元粒子分布の特徴抽出方法を提案することをひとつの目的とする。さらに、実際に流動状態を示した CT 画像に対して、離散ウェーブレット多重解像度を施し支配的な二次元粒子分布を抽出し、その特徴抽出の妥当性について検討することも目的としている。

* 原稿受付 2001年4月26日 (可視化情報学会全国講演会にて一部講演)

¹ 正会員 日本大学 理工学部 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

² 正会員 鹿児島大学 工学部

³ 法政大学 工学部

⁴ 正会員 白百合女子大学

2. 実験装置

2.1 キャパシタンス CT センサ

Fig. 1 (A) (B) は本研究で用いたキャパシタンス CT センサの概略図であり、管路外周に配置したセンサの内部は 12 個の測定電極から構成されている¹⁶⁾。センサ内の電極対はコンデンサと見なすことができ、各電極間のキャパシタンスを測定する。測定電極の展開図は Fig. 2 に示した通りで、フォトリソグラフィにより、内部がプラスチックであるラミネート銅薄板（周長 168 mm×軸方向長 200 mm）を、測定電極（周方向長 12 mm×軸方向長 101 mm）と、その電極間の軸方向アースガードとに分離した。測定電極上下のアース終端部（周方向長 168 mm×軸方向長 50 mm）は、測定電極対内の電気力線の発散を防ぎ、CT センサの空間分解能を向上させる。この CT センサは、測定電極対間に矩形高周波電圧を印加しキャパシタンスに依存する出力電圧を得る信号処理器¹⁶⁾に接続されている。出力電圧には、誤差電圧も含まれるので、信号処理器内電気回路のゼロバランス電圧と誤差キャパシタンスとをあらかじめ測定し、CT センサによって得られたキャパシタンスを補正する。

基準電極 i と検出電極 j 間のキャパシタンス C_{ij} は、ガウスの法則より、

$$C_{i,j} = -\frac{\epsilon_0}{V_c} \oint_{r \in \Gamma_j} \epsilon(\mathbf{r}) \nabla V_i(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} \quad (1)$$

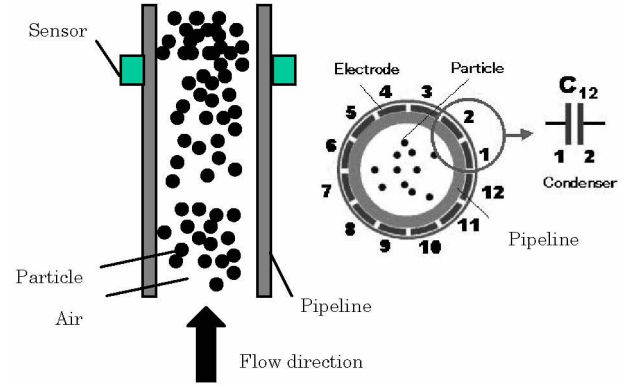
であり、 \mathbf{r} は管路断面内の位置ベクトル、 $\epsilon(\mathbf{r})$ は管路断面位置 \mathbf{r} における誘電率、 ϵ_0 は真空誘電率、 V_c は基準電極 i の印加電圧、 $V_i(\mathbf{r})$ は i が基準電極であるときの管路断面位置 \mathbf{r} のポテンシャル、 Γ_j は基準電極 i と検出電極 j 間の電気力線の及ぶ領域である。式(1)は $V_i(\mathbf{r})$ が未知であるので、

$$\nabla \cdot [\epsilon(\mathbf{r}) \nabla V_i(\mathbf{r})] = 0 \quad (2)$$

のラプラス方程式を管路断面内で仮定し、この式を離散化し FEM により $V_i(\mathbf{r})$ を求め、式(1)の各定数と $\nabla V_i(\mathbf{r})$ とからなるセンシティビティマップを得て、式(1)を整理し行列表示にすると、

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}\mathbf{e}\mathbf{E} \quad (3)$$

となる。ここで、 \mathbf{C} は測定されたキャパシタンス行列、 $\mathbf{S}\mathbf{e}$ は計算されたセンシティビティマップ行列、 \mathbf{E} は求める誘電率分布行列である。12 個の電極を用いると電極対の組み合わせは 66 通りであるので、 \mathbf{C} は 66×1 行列となる。Fig. 3 に示したように、管路断面を $32 \times 32 = 1024$ の空間解像度で表現すると、 \mathbf{E} は 1024×1 行列となる。センシティビティマップ行列 $\mathbf{S}\mathbf{e}$ の誘電率係数 ($\mathbf{S}\mathbf{e}$ の行要素) は 66 要素 \times 1024 組、キャパシタンス係数 ($\mathbf{S}\mathbf{e}$ の列要素) は 1024 要素 \times 66 組存在し、 $\mathbf{S}\mathbf{e}$ は 66×1024 行列となる。その $\mathbf{S}\mathbf{e}$ 各要素は、電極の印加電圧、電極長さ、



(A) Front section view (B) Cross section view

Fig. 1 Overview of capacitance tomography.

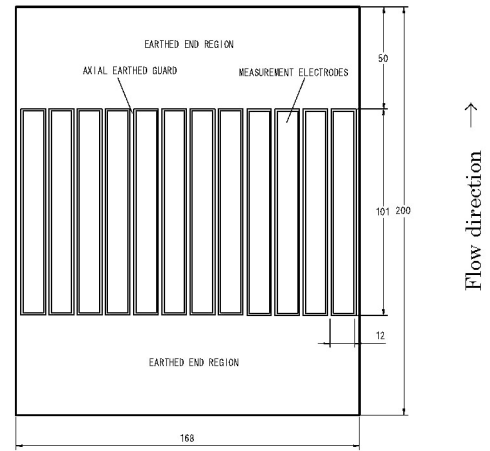


Fig. 2 Extend elevation of CT sensor.

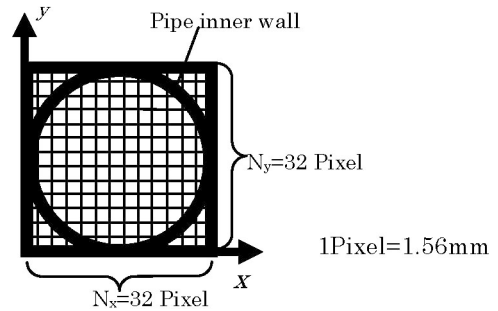


Fig. 3 Space resolution.

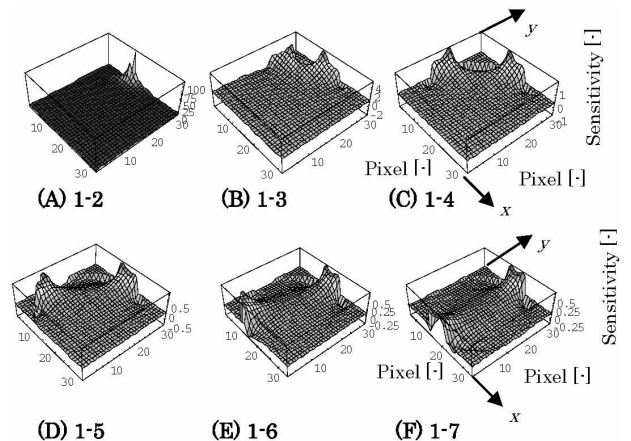


Fig. 4 Sensitivity map matrices.

(Standard electrode 1 - Reference electrode from 2 to 7)

電極厚さなどの CT 構造によって異なる。Fig. 4 は、本研究で用いた CT センサのセンシティブティマップ行列 Se におけるキャパシタンス係数の 1 列目から 6 列目を、 32×32 要素の行列として、(A) から (F) に 3 次元表示したものである。これらの図は Fig. 1 (B) の 1 番目の測定電極を基準電極とし、2 番目から 7 番目までの測定電極を検出電極としたときの、式(1)におけるポテンシャル V_i 二次元分布に相当するものである。これらの図から、本 CT センサは隣り合った電極間の感度が一番高く電極が離れるにつれて感度が低下する様子と、電極付近では感度が高く管路中心付近では感度が低下する性質を備えていることがわかる。

式(3)において、測定値 C と既知 Se から未知 E を求める画像再構成過程は、式数よりも未知数の方が多く、 E の解が無限数存在してしまう不適切逆問題¹⁷⁾ となる。本研究では、バックプロジェクション法¹⁸⁾ を用いて近似的に二次元粒子分布を示す誘電率画像を求めた。本 CT センサは、粒子群の大きさが小さくなるほどその空間精度は低下する。既往研究¹⁹⁾ の静止円柱棒による再構成画像の空間精度を本研究の管路直径に換算すると、直径 20 mm の粒子群は 10% の直径誤差、直径 7.5 mm の粒子群は 40% の直径誤差を含むこととなる。

2.2 実験装置・条件・方法

実験装置は Fig. 5 に示した通り、フィードタンク、レシーバータンク、輸送管路、ルーツブロワ、キャパシタンス CT センサ、信号処理器、およびパーソナルコンピュータからなる。CT センサは内径 50.0 mm 長さ 4.0 m の鉛直管路のほぼ中央位置、すなわち、ベンド下端部から 2.0 m の高さに配置した。フィードタンクから投入された粒子は吸引輸送された後、レシーバータンクへ回収された。粒子の流れが安定した後、本キャパシタンス CT を用いて、模擬障害物直後の管路内固気二相流のキャパシタンスを測定し、10 ms 間隔で 500 ms 間、連続 50 フレームの二次元誘電率分布画像を得た。模擬障害物はセンサ中央から上流側 215 mm の管路内壁に設置し、Table 1 に示すように、開放面積比 S を四通りとした。 $S = 1.0$ は模擬障害物を設置しない状態を意味する。吸引空気流量は $0.034 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、それから求めた管路内の平均気流

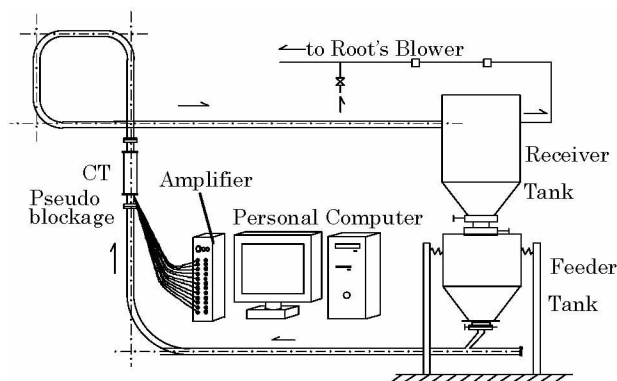


Fig. 5 Experimental equipment.

Table 1 Experimental condition.

		Open area ratio S [-]			
		1.000	0.805	0.500	0.195
Solid air mass ratio	6.24	Case1-1	Case2-1	Case3-1	Case4-1
	16.7	Case1-2	Case2-2	Case3-2	Case4-2

速度は 16.8 m/s であり、レイノルズ数は 4.71×10^4 であった。粒子供給量を 0.22 kg/s と 0.54 kg/s の 2 種類、すなわち、固気質量比 Mt を 6.24 と 16.7 とした。粒子はほぼ球形のポリエチレンペレットを用い、その平均粒子径は 3.26 mm 、真密度は 910 kg/m^3 である。空気の比誘電率は 1.0006 であり、ポリエチレンペレットの比誘電率は 2.3 である。この比誘電率の差から、ポリエチレンペレットにより多くの電荷が生じる。

ポリエチレンペレットでセンサ内を満たしたときの再構成画像の誘電率を 1.0、空気でセンサ内を満たしたときの再構成画像の誘電率を 0.0 と正規化し、固気二相流状態の二次元誘電率分布を、その正規化した値を基準とした比で求めた。

2.3 実験結果

得られた 50 フレームの二次元誘電率分布画像 E_{xyt} は、画像全体の平均値 \bar{E} と画像全体の平方自乗平均 E_{RMS} 、すなわち、

$$\bar{E} = \frac{1}{N_t N_y N_x} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{x=1}^{N_x} E_{xyt} \quad (4)$$

$$E_{RMS} = \frac{1}{N_t N_y N_x} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sqrt{(E_{xyt} - \bar{E})^2} \quad (5)$$

を用いて、二次元誘電率分布画像の変動 E'_{xyt} 、すなわち、

$$E'_{xyt} = (E_{xyt} - \bar{E}) / E_{RMS} \quad (6)$$

に変換した。ここで、 N_x 、 N_y および N_t は前記 Fig. 3 に示した通り、 x 軸と y 軸方向の空間解像度、および、時間におけるフレーム数であり、 $N_x = N_y = 32$ 、 $N_t = 50$ である。そして、この二次元誘電率分布画像の変動 E'_{xyt} から、

$$\bar{E}'_{xy} = \sum_{t=1}^{N_t} E'_{xyt} \quad (7)$$

によって、粒子濃度変動の時間平均画像 \bar{E}'_{xy} を求めた。Fig. 6 (A) は Case*-1 の場合の \bar{E}'_{xy} であり、Fig. 6 (B) は Case*-2 の場合の \bar{E}'_{xy} である。ここで * は 1 から 4 の数字を意味する。各実験条件において、カラーマップの最大値と最小値は異なる。白色は高い粒子濃度を示し、濃色になるに従い粒子濃度が低くなり、黒色は空気のみが存在することを示す。この Fig. 6 より、多少不明瞭ではあるものの、粒子流動状態の二次元分布を定性的に把握することができ、開放面積比 S が小さくなる

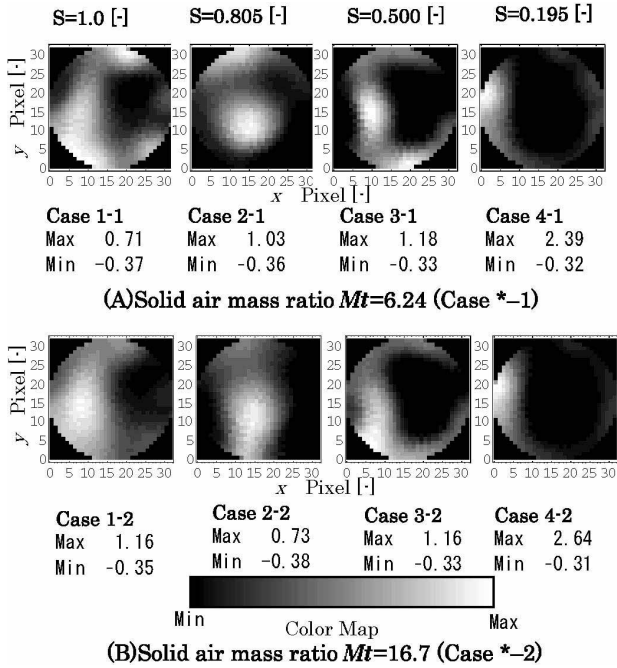


Fig. 6 Time mean particle density fluctuation CT image.

に従って粒子群が偏っていく様子が確認できる。

3. ウェーブレット多重解像度による画像処理

3.1 画像処理方法と画像処理条件

Fig. 6 のキャパシタンス CT センサにより得られた粒子濃度変動の時間平均画像を、誘電率分布行列 E として、これにウェーブレット多重解像度を施し、支配的な空間粒子分布を抽出した²⁰⁾。二次元離散ウェーブレット変換の行列表現²¹⁾は、

$$S = WET^T \quad (8)$$

で表され、 S はウェーブレットスペクトラム、 W はアナライジングウェーブレット行列、 W^T は W の転置行列である。式(8)のウェーブレット逆変換は、

$$E = W^T S W \quad (9)$$

となり、その多重解像度は、

$$E = W^T S_0 W + W^T S_1 W + W^T S_2 W + W^T S_3 W + W^T S_4 W \quad (10)$$

であり、低周波成分(レベル0)から高周波成分(レベル4)として正規直交空間で分解することができる。本研究で用いたアナライジングウェーブレット行列 W は、4 次の Daubechies 基底関数であり、対象画像が 32×32 要素であるので、その多重解像度はレベル0からレベル4の5段階に分解される。このアナライジングウェーブレット行列のフーリエ変換によるパワースペクトラム絶対値(P.S.D.)の交点から求めた各レベルのおよその空間周波数帯域は、Table 2 に示した通りである。この表に示した各レベルの平均空間サイズと実験で用いた障害物

Table 2 Relation between wavelet level and representative space frequency

Level	Space frequency[mm-1]	Space size[mm]	Mean value of space size[mm]
L0	0.02 ~ 0.05	50 ~ 20	35.0
L1	0.05 ~ 0.06	20 ~ 14.6	17.3
L2	0.06 ~ 0.11	14.6 ~ 9.2	11.9
L3	0.11 ~ 0.21	9.2 ~ 4.8	7.0
L4	0.21 ~ 0.32	4.8 ~ 3.1	3.95

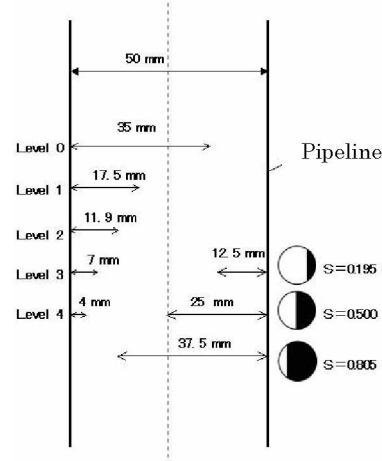


Fig. 7 Relation between mean space size and blockage length.

の大きさとの関係は、Fig. 7 に示した通りであり、この図より各ウェーブレットレベルがどの大きさの粒子群を示しているかがわかる。

3.2 画像処理結果

Fig. 6 の粒子濃度変動の時間平均画像に対して多重解像度解析を行った結果は、Fig. 8 に示した通りであり、(A) は Case*-1 固気質量比 $Mt = 6.24$ の場合、(B) は Case*-2 固気質量比 $Mt = 16.7$ の場合を示す。前述の本 CT センサの空間精度と Table 2 より、レベル4の粒子群は精度誤差が非常に大きいので、その表示を省略した。各レベルは前記 Fig. 7 および Table 2 に示した平均空間サイズ付近の大きさを持った粒子群分布を示しており、白色は高い粒子濃度を示し、黒色に近づくに従い粒子濃度が低くなり、黒色は空気のみが存在することを示す。各実験条件において、最大値と最小値間を10段階としたグレースケールで表示した。離散ウェーブレットの正規直交性から、この Fig. 8 においてレベル0からレベル4の各要素をすべて加えると、Fig. 6 の元画像を再構成することができる。このウェーブレット多重解像度により、元画像では見られない支配的な粒子群の大きさ、その空間位置を把握することができる。具体的には、Fig. 8 (A) (B) の各固気質量比 Mt において、開放面積比 S が大きい場合 (Case 1-* と Case 2-* の場合) では、大きな粒子群を構成するレベル0 (●印で示したレベル) に、粒子濃度の高い値が広く見られ、レベル1以降の高レベ

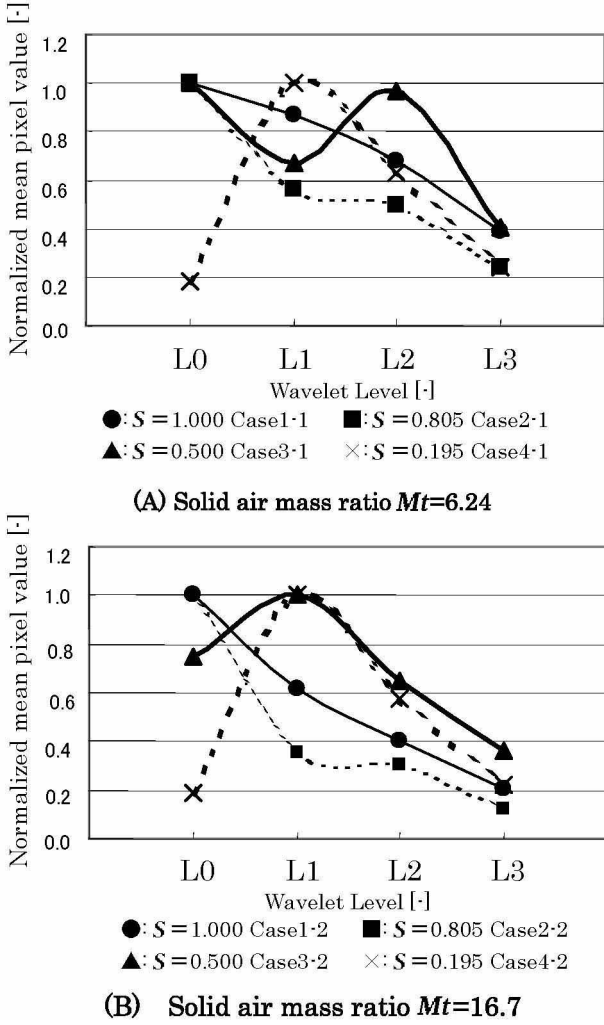


Fig. 9 Mean pixel values in wavelet image.

ルでは、粒子濃度の高い値は顕著には見られない。一方、開放面積比 S がやや小さい場合 (Case 3* の場合) では、大きな粒子群を構成するレベル 0 (●印で示したレベル) に、粒子濃度の高い値が広く見られ、さらに、これらのレベル以降の高レベル (■印で示したレベル) でも粒子濃度の高い値が多く見られる。さらに、開放面積比 S が非常に小さい場合 (Case 4* の場合) では、レベル 0 の粒子濃度の値は小さく、レベル 1 (●印で示したレベル) に粒子濃度の高い値が見られ、それ以降の高レベルでは、粒子濃度の高い値は顕著には見られない。すなわち、開放面積比 S が大きい場合には、開放面積に相当する一次的支配レベルのみが存在するが、開放面積比 S がやや小さい場合には、その一次的支配レベルの他に、それよりも高レベルの二次的支配レベルが存在することが何われ、さらに、開放面積比 S が非常に小さい場合には、開放面積に相当する一次的支配レベルのみが存在する。

この画像の特徴抽出の妥当性を定量的に示すため、Fig. 8 の多重解像度画像について、1 ピクセルあたりの平均値を求めた。このとき、各画像における正值のみを加算し、その正值の占めるピクセル数で除した値を求め、さらにそれらを実験条件ごとの最大値で除した。このよ

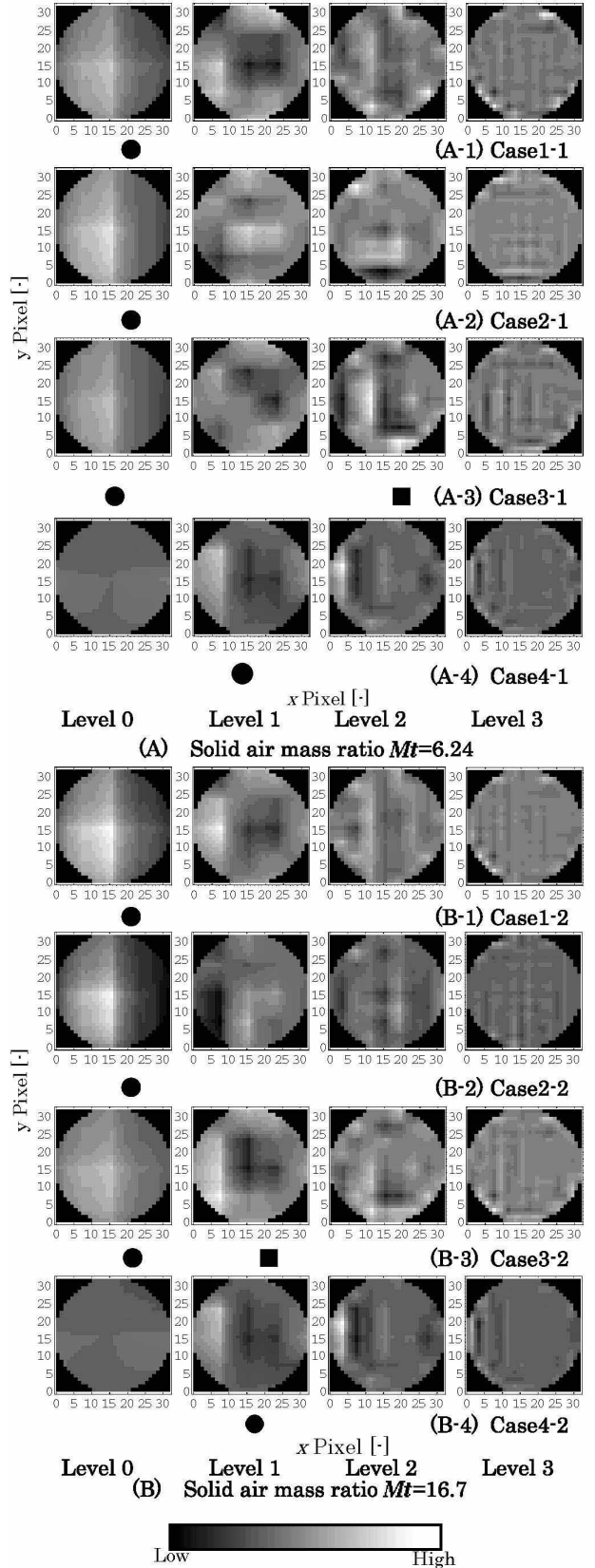


Fig. 8 Multiresolution of CT images.

うにして求めた多重解像度画像の 1 ピクセルあたりの平均値とウェーブレットレベルとの関係は、開放面積比 S をパラメータとして、Fig. 9 に示した通りである。この図の各固気質量比 Mt において、開放面積比 S が大きい

場合 (Case 1-* と Case 2-* の場合) では, その平均値はレベル 0 で最大であり, レベル 1 で大きく減少し, その後レベルが増加するに従って減少またはほぼ一定値をもつ傾向にある. すなわち, Fig. 8 において開放面積比 S が大きい場合は, レベル 0 に粒子濃度の大きな値が存在することを裏付けている. しかしながら, 開放面積比 S がやや小さい場合 (Case 3-* の場合) には, レベル 0 で大きな値を示し, それ以降のレベル ($Mt = 6.24$ の場合はレベル 2, $Mt = 16.7$ の場合はレベル 1) でも, 大きな値を持つ. さらに, 開放面積比 S が非常に小さい場合 (Case 4-* の場合) には, 各 Mt のレベル 0 で最小値を示し, レベルが増加するに従って 1 ピクセルあたりの平均値は, レベル 1 で極大値をとり, その後急激に減少する傾向にある. 以上から, 開放面積比 S がやや小さい場合には, その一次的支配レベルの他に, その一次的支配レベルよりも高レベルである二次的支配レベルが存在することを裏付けている.

4. 考 察

4.1 一次的支配レベルの検討

ウェーブレット多重解像度を用いた画像処理結果から, 本実験における固気二相流 CT 画像には, 一次的支配レベルと二次的支配レベルが存在することを示した. ここでは, その一次的支配レベルの物理的意味について考察するために, 模擬的に障害物の大きさを変えた基準画像と, Fig. 8 のウェーブレット多重解像度画像との画像相関係数を求める. その画像相関係数を求める際の基準画像の元画像は Fig. 10 (A) に示した通りであり, (1) は $S = 1.0$ (Case 1-*), (2) は $S = 0.805$ (Case 2-*), (3) は $S = 0.5$ (Case 3-*), および, (4) は $S = 0.195$ (Case 4-*)

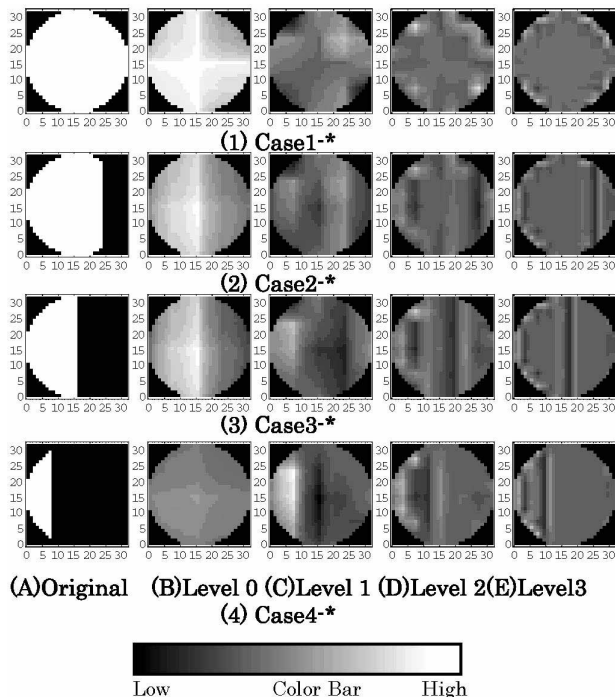


Fig. 10 Standard image and its wavelet multiresolution.

の開放面積比を模擬したもので, これらの画像はパイプライン断面の開放領域に粒子が均等に充填された状態を想定したものである. Fig. 10 (A) において, 白色領域の値は, 前記 Fig. 6 の各実験条件におけるレンジ (最大値-最小値) の平均値, すなわち, 固気質量比 $Mt = 6.24$ のときは 2.71, $Mt = 16.7$ のときは 2.96 とした. Fig. 10 (B) ~ (E) は, 基準画像の元画像にウェーブレット多重解像度を施した画像であり, これらの画像は, Fig. 8 の多重解像度画像に対する基準画像となる. 例えば, Fig. 8 (A-1) のレベル 0 の基準画像は, Fig. 10 (1) (B) のレベル 0 の画像であり, Fig. 8 (A-4) のレベル 3 の基準画像は, Fig. 10 (4) (E) のレベル 3 の画像である. ウェーブレットレベル L の画像間における画像相関係数 C_L は,

$$C_L = \frac{(\overline{E_L} - \overline{E_L})(\overline{I_L} - \overline{I_L})}{\sqrt{(\overline{E_L} - \overline{E_L})^2} \sqrt{(\overline{I_L} - \overline{I_L})^2}} \quad (11)$$

により求める. ここで, は Fig. 8 に示した粒子濃度変動の時間平均画像のレベル $\overline{E_L}$ 画像, はその空間平均値, $\overline{I_L}$ は Fig. 10 に示した基準画像のレベル L 画像, $\overline{I_L}$ はその空間平均値である.

Fig. 11 は画像相関係数を示したものであり, 各固気質

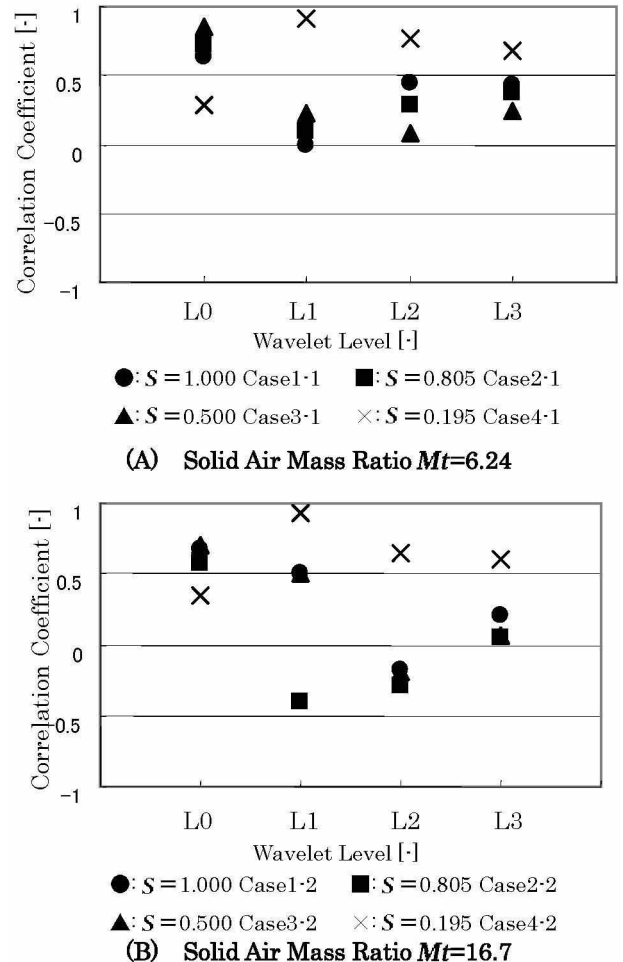


Fig. 11 Image correlation between pseudo image and CT Image.

量比 Mt において, 開放面積比 $S = 1.0$ (Case 1-*)、 $S = 0.805$ (Case 2-*)、および、 $S = 0.5$ (Case 3-*) の場合はレベル 0 に最高の相関値が現れ、 $S = 0.195$ (Case 4-*) の場合はレベル 1 に最高の相関値が現れる。これらの最高の相関値を示したレベルは、前記 Fig. 8 および Fig. 9 の画像処理で示した一次的支配レベルと一致しており、さらに、前記 Table 2 と Fig. 7 に示した開放領域の大きさと各レベルの平均空間サイズとの関係からも類推できるように、Fig. 8 の多重解像度画像において本来最も支配的な空間領域を示すレベルと言える。

4. 2 二次的支配レベルの検討

画像処理結果から、開放面積比 S がやや小さい場合では、一次的支配レベルである空間周波数領域内に、さらに小さな空間周波数帯の粒子群を示す二次的支配レベルの存在が確認された。一般的に、管路内固気二相流においては、粒子二次元分布は一様ではなく、いわゆる、濃度むらが生じることが言われており、本研究の比較的粒子径が大きい場合では、粒子濃度むらは、乱流渦の影響よりも、粒子同士および粒子と管壁との衝突が主要因となる。そこで、粒子濃度むらに関する既往研究と、本研究における画像処理結果について比較検討を行い、二次的支配レベルの物理的意味を考察する。Peng et al. は、鉛直管の上部から一定量の粒子を自由落下させ、鉛直管の一断面における粒子濃度を、格子ガスオートマトン (LGA) 法により時間ステップで計算し、その時間の濃度変動に対してフーリエ変換を行った²²⁾。そして彼らは、粒子濃度が低い場合は、フーリエ波形の P.S.D. は時間周波数に対して一定であり、これは粒子間衝突が少ないため、粒子濃度変動は時間に対して小さいことを指摘した。また、粒子濃度がやや高い場合は、フーリエ波形の P.S.D. は時間周波数に対して一定ではなく減少の傾向にあり、これは粒子間および粒子と管壁間の衝突が大きくなり、粒子の濃度変動が時間に対して変化することも指摘した。すなわち、粒子濃度がやや高い場合は、粒子濃度むらが生じており、より高い空間周波数領域にも粒子群が存在することがわかる。またさらに、彼らは、粒子濃度が非常に高い場合は、フーリエ波形の P.S.D. は時間周波数に対して一定となり、これは粒子間および粒子と管壁間の衝突が非常に大きいもの、粒子濃度が高すぎるために、空間的自由度が小さく、粒子濃度むらが生じないことも指摘した。

つまり、本研究の実験において、開放面積比 S が大きい場合 (Case 1-* と Case 2-* の場合) では、粒子間衝突が少ないため、粒子濃度変動が小さく、一次的支配レベルのみが生じたものと考えられる。また、開放面積比 S がやや小さい場合 (Case 3-* の場合) では、障害物通過時において、粒子濃度が高くなり、その結果、粒子同士および粒子と管壁との衝突が生じ、粒子濃度むらが生じていると定性的に考えられる。そして、これらの衝突によって、一次的支配レベル以外にも、二次的支配レベル

が生じたものと考えられる。またさらに、開放面積比 S が非常に小さい場合 (Case 4-* 場合) では、障害物通過時において、粒子濃度が非常に高くなり、空間的自由度が小さいために、粒子濃度むらが生じず、結果として、一次的支配レベルのみが生じたものと考えられる。

5. 結 言

キャパシタンス CT とウェーブレット多重解像度を用いた管路内固気二相流における二次元粒子分布の特徴抽出方法を提案した。そして、開放面積比を変化させた障害物直後の管路内固気二相流の流動状態の CT 画像を得て、その CT 画像に対して離散ウェーブレット多重解像度を施し、支配的な二次元粒子分布を抽出した。その結果、開放面積比がやや小さい場合には、開放面積比に依存するウェーブレットレベルよりも高い二次的支配レベルに、粒子濃度の大きな値が見られた。この二次的支配レベルは、粒子間および粒子と管壁との衝突によって起こる濃度むら現象の影響であると考えられる。しかしながら、開放面積比が大きい場合、および、非常に小さい場合には、開放面積比に相当するウェーブレットレベル (一次的支配レベル) のみにしか、粒子濃度の大きな値が見られない。これは粒子間衝突が少ないため、および、粒子の空間的自由度が小さいためと考えられる。

本研究は平成 11 年度科学技術振興事業団 (JST) 独自の研究成果育成事業によりなされました。本実験を行うにあたり、英国 UMIST の Dr. Tomasz DYAKOWSKI, 英国 PTL 社の Mr. Malcolm Byars, 日本カノマックス (株) 名越正穂氏、および、日本大学理工学部学生加藤浩一君にご協力いただきました。ここに感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば、岩井喜典, 斎藤雄督, 今里悠一: 医用画像診断装置, コロナ社 (1988).
- 2) 師岡慎一, 堀慶一: 軽水炉研究でのボイド率の可視化, 可視化情報学会誌, Vol. 21, No. 80 (2001) pp. 20-24.
- 3) 竹中信幸: 気液二相流の可視化・計測におけるラジオグラフィ, 可視化情報学会誌, Vol. 21, No. 80 (2001) pp. 14-19.
- 4) 三島嘉一郎, 日引俊: プローブとして中性子を用いた金属管路内気液二相流の可視化と計測, 機械学会論文集 B, Vol. 62, No. 593 (1996) pp. 137-144.
- 5) Warsito, Utomo, M.B., 内田重男: 三相系における粒子及び気泡濃度二次元分布測定用の超音波 CT 法, 混相流, Vol. 14, No. 4 (2000) pp. 434-441.
- 6) Dickin, F. and Wang, M.: Electrical resistance tomography for process applications, *Measurement science & technology*, Vol. 7, No. 3 (1996) pp. 247-260.
- 7) Huang, S.M., Plaskowski, A.B., Xie, C.G. and Beck, M.S.: Tomographic imaging of two-component flow using capacitance sensors, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 22 (1989) pp. 173-177.
- 8) Halow, J.S. and Nicoletti, P.: Observations of fluidized bed coalescence using capacitance imaging, *Powder Technology*, Vol. 69 (1992) pp. 255-277.

- 9) Wang, S.J., Dyakowski, T., Xie, C.G., Williams, R.A., and Beck, M.S.: Real time capacitance imaging of bubble formation at the distributor of a fluidized bed, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 56, No. 3 (1995) pp. 95–100.
- 10) Ostrowski, K.L., Luke, S.P., Bennett, M.A. and Williams, R.A.: Real time visualization and analysis of dense phase powder conveying, *Powder technology* Vol. 102 (1999) pp. 1–13.
- 11) 例えば, 新島耕一: ウェーブレット画像解析, 科学技術出版 (1999).
- 12) 斉藤兆古: 離散値系ウェーブレット変換の電磁界計算への応用, 電気学会論文誌 A, Vol. 116A, No. 10 (1996) pp. 833–839.
- 13) 緑川洋一, 早野誠治, 斉藤兆古: 離散値系ウェーブレット変換によるノイズフィルタ評価の検討, 電気学会論文誌 A, Vol. 117A, No. 2 (1997) pp. 128–133.
- 14) Farge, M.: Wavelet transforms and their applications to turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 24 (1992) pp. 395–457.
- 15) Li, H, Takei, M., Ochi, M., Saito, Y. and Horii, K.: Application of two-dimensional orthogonal wavelets to multiresolution image analysis of a turbulent jet, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 137 (1999) pp. 120–127.
- 16) Yang, W.Q.: Hardware design of electrical capacitance tomography systems, *Measurement science & technology*, Vol. 7, No. 3 (1996) pp. 225–232.
- 17) 例えば, 数理科学 特集「逆問題のひろがり」, サイエンス社, No. 403 (1997).
- 18) Isaksen, O.: A review of reconstruction techniques for capacitance tomography, *Measurement science & technology*, Vol. 7, No. 3 (1996) pp. 325–337.
- 19) Huang, S.M. and Xie, C.G.: Error analysis of tomography systems a case study, *Process Tomography Principles Techniques and Applications*, edited by M.S. Beck and R.A. Williams, Butterworth Heinemann (1995) pp. 367–390.
- 20) 武居昌宏, 斎藤兆古, 堀井清之: ウェーブレット変換を用いたトモグラフィ画像の処理方法とその装置, 公開特許公報, 特開 2001 – 56342 号 (2001).
- 21) 木村元昭, 武居昌宏, Ho C.H., 李輝, 斎藤兆古, 堀井清之: MEMS せん断応力チップと離散ウェーブレットによる乱流境界層せん断応力の可視化, 可視化情報学会誌, Vol. 21, No. 4 (2001) pp. 71–78.
- 22) Peng, G. and Herrmann, H.J.: Density waves and 1/f density fluctuation in granular flow, *Phys. Rev. E*, Vol. 51, No 3 (1995) pp. 1745–1756.