

キャパシタンス・トモグラフィーと三次元ウェーブレットによる
水平管路内高濃度固気二相流の特徴抽出*

Feature Extraction of Dense Solid Air Two-Phase Flow in a Horizontal Pipeline
Using Capacitance Tomography and 3D Wavelets

武居昌宏** 李輝*** 越智光昭** 斎藤兆古† 堀井清之††

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

Abstract Particle density distribution images of a dense solid-air two-phase flow have been obtained at 10 milli-second intervals at a bend pipe upstream in a horizontal pipeline by means of a capacitance computed tomography. The three dimensional images (time and two dimensional space images) have been decomposed to the wavelet time levels to extract the dominant particle density distribution using three-dimensional discrete wavelets multiresolution. As a result, the time dominant particle distribution with specific time frequency is visualized in a cross section. In detail, the high density of the particle spatial distribution at the dense flow front, which composes high time frequency levels 6 and 7, is located at the center above the stationary layer. The distribution image at the front is reasonable as compared with the previous result of particles velocity distribution by LDV which indicates the particles discharged toward the front air phase at the center line.

Keywords: Capacitance CT, 3D Wavelets, Solid-Air Two-Phase Flow, Image Processing

1. 緒言

固体粒子の空気輸送方式のひとつである高濃度輸送(プラグ輸送)は、管の摩耗や粒子の破損が少ない点で優れており、多くの産業分野で広く利用されている。このような高濃度輸送に関して、最適輸送効率の検討[1]、プラグ輸送のスケールアップ[2]、輸送特性[3]、および圧力損失[4]などのマクロ的な視点に立った研究が多く報告されている。一方、高濃度輸送の更なる効率化を目指す上では、個々の粒子(プラグ構成粒子)に着目したミクロ的な視点に立った研究が必要不可欠である。例えば、Konrad[5]やKlinzing[6]は、観察結果からプラグ構成粒子の挙動を定性的に示し、Tsujii[7]は離散要素法を用いて、プラグ構成粒子の挙動シミュレーションを行った。また筆者らはレーザー流速計(LDV)を用いて、プラグ前後端部の粒子の速度分布を測定した[8]。しかしながら、このようなLDV法では、瞬時の管路断面一点における速度しか測定することができず、管路断面全体についての粒子挙動を可視化することは難しい。したがって、プラグ構成粒子の挙動の把握には、自ずと制限があった。

近年、管路内混相流の流動状態を三次元的に可視化する手法として、コンピューティッド・トモグラフィー(CT)法が、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[9]、X線CTの精度の検討[10]、ラジオグラフィを用いた可視化計測[11][12]、超

音波を用いた三相成分の計測[13]、および、レジスタンスを用いた流動計測[14]などが報告された。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[15]、流動層内の気泡合体[16]やバブル挙動の可視化[17]、空気輸送における粒子挙動の可視化に適用された[18]。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[19]の解法による近似的な画像しか得ることができず、詳細な粒子濃度分布の特徴を抽出するには工夫が必要である。

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[20]、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[21]、流体工学分野において、筆者らは噴流断面の流体画像に適用し乱流渦構造を解析した[22]。さらに、筆者らは低濃度固気二相流の時間平均二次元CT画像に、二次元ウェーブレット多重解像度解析を施し、二次元空間内の特徴抽出を行なった[23]。従来までのウェーブレット解析は、時間変動を示した一次元波動、空間変動を示した二次元画像に対するものがほとんどであり、二次元空間と時間との三次元画像については、ほとんどなされておらず、ごく最近になり、三次元ウェーブレット解析に関する研究が始まったといえる[24]。

* 2002.6.10 受付

** 日本大学理工学部機械工学科 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14
TEL & FAX (03)3259-0749 E-mail: takei@mech.cst.nihon-u.ac.jp

*** 鹿児島大学工学部機械工学科 † 法政大学工学部情報電気電子工学科 †† 白百合女子大学共通科目

そこで、本研究は、三次元ウェーブレット多重解像度解析を、管路内の高濃度固気二相流における、二次元空間および時間の三次元CT画像に適用し、プラグ構成粒子の挙動について考察することを目的としている。

2. 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、アクリル製の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[25]。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 168mm×軸方向長 200mm)を、測定電極(周方向長 12mm×軸方向長 101mm)と、その電極間の軸方向アースガードとに分離した構造をもつ。測定電極上下のアース終端部(周方向長 168mm×軸方向長 50mm)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 15V、1.25MHz で印加し、キャパシタンスに依存する出力電圧を得る信号処理器[25]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 $C_{i,j}$ は、ガウスの法則より、

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

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。この式(1)において、 ϵ_0 と V_c は既知、 $C_{i,j}$ は測定値で既知であり、 $\epsilon(\mathbf{r})$ と $V_i(\mathbf{r})$ は未知である。ここで、位置 \mathbf{r} における粒子濃度と $\epsilon(\mathbf{r})$ とが線形関係であること、および、粒子に帯電した電荷を、感度(センシティビティ)を重みとして、 Γ_j の領域について線形結合した値が全電荷であることを仮定すれば、式(1)の $\epsilon(\mathbf{r})$ を近似的に求めることができる。具体的には、 $\mathbf{r}=\mathbf{r}_0$ のみに粒子が存在し、他の位置には空気のみが存在するとき、

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

の二階微分方程式を管路断面内で仮定する。このときの式(2)を有限要素法(FEM)により離散化し境界条件により $V_i(\mathbf{r})$ の分布を求め、これを式(1)に代入して $\mathbf{r}=\mathbf{r}_0$ のみに粒子が存在するときのキャパシタンス $C_{i,j}^m$ を求める。さらにその値から

$$S_{i,j}^m = \left(\frac{1}{\beta} \right) \frac{C_{i,j}^{r0} - C_{i,j}^{air}}{C_{i,j}^{particle} - C_{i,j}^{air}} \quad \beta = \left(\frac{D^2}{N_x N_y} \right) / \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (3)$$

により、 $\mathbf{r}=\mathbf{r}_0$ に粒子が存在するときのセンシティビティ値

$S_{i,j}^m$ を求める。ここで $C_{i,j}^{air}$ と $C_{i,j}^{particle}$ は、管路をすべて空気が占有するときのキャパシタンスと、管路をすべて粒子が占有するときのキャパシタンスである。係数 β は管路断面積に対する 1 ピクセルの面積の比を表し、 D は管路直径、 N_x, N_y は Fig.1(c) に示した通り、 x 軸と y 軸の空間解像度である。このセンシティビティ値を各電極対におけるすべての離散値 \mathbf{r} について求めると、結局、未知の粒子分布のとき、

$C_{i,j}$ は $S_{i,j}^r$ を重みとした $\epsilon(\mathbf{r})$ の線形結合で、

$$C_{i,j} = \sum_{\mathbf{r}=(1,1)}^{(N_x, N_y)} S_{i,j}^r \epsilon(\mathbf{r}) \quad (4)$$

となり、さらにこの式(4)は、

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}_e \mathbf{E} \quad (5)$$

の行列式で表現できる。ここで、 \mathbf{C} は測定されたキャパシタンス列ベクトル、 \mathbf{S}_e はそのセンシティビティ値をマップとし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列ベクトルである。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 個の要素をもつ。 $N_x=N_y=32$ とし、管路断面を 1024 ピクセルの空間解像度で表現すると、 \mathbf{E} は 1024 個の要素をもつ。センシティビティマップ行列 \mathbf{S}_e は 66×1024 行列となる。その \mathbf{S}_e 各要素は、電極の印加電圧、電極長さ、電極厚さなどの CT 構造によって異なる。Fig.3 は、本研究で用いた CT センサのセンシティビティマップ行列 \mathbf{S}_e における 1 行目から 6 行目までを、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。

既往研究[26]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 20mm の粒子群が管路中心に存在する場合、画像処理を何も施さないと、直径 22mm まで値が存在し、再構成画像には 10% の直径誤差を含んでいる。

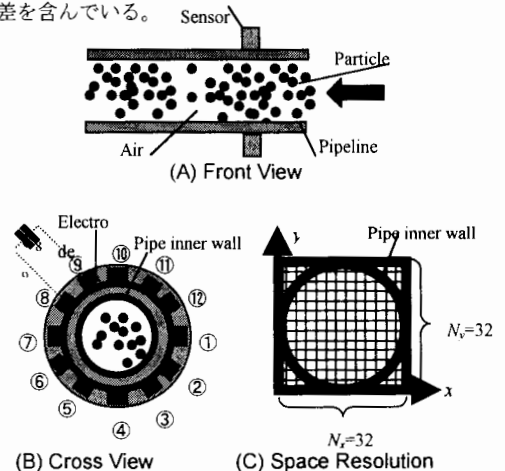


Fig.1 Overview of capacitance tomography and associated space resolution

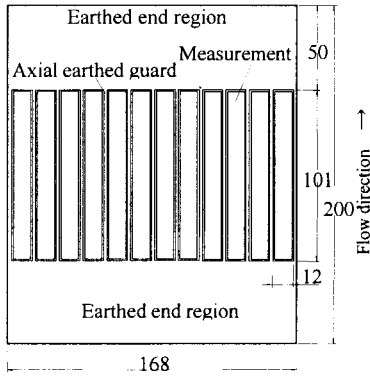


Fig.2 Extend elevation of CT sensor

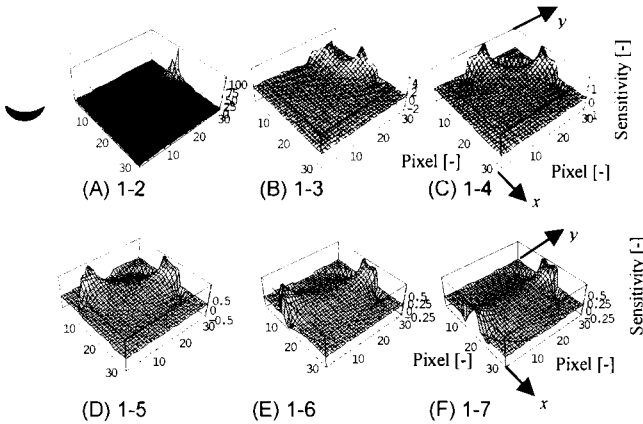


Fig.3 Sensitivity map matrices
(Standard electrode 1 - Reference electrode from 2 to 7)

3. 実験

3.1. 実験装置・条件・方法

実験装置は Fig.4 に示した通り、フィードタンク、レーザータンク、輸送管路、ルーツブロウ、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 49.0mm 管路のベンダ直前 1.0 m の位置に配置した。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、レーザ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、 $\Delta t = 10$ ms 間隔で 60 秒間、管路内固気二相流のキャパシタンスを測定した。吸引空気流量は $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、それから求めた管路内の平均気流速度は $V_a = 9.10 \text{ m/s}$ であり、レイノルズ数は 2.92×10^4 であった。粒子供給量は 390.0 g/s 、固気質量比は 12.46 であった。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、ポリエチレンペレットの比誘電率は 2.3 であり、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。

本研究の実験では、粒子流れが定常で粒子速度 V_p とすると、時刻 t から $t + \Delta t$ 時間の間に粒子は $V_p \Delta t$ 進み、 $V_p \Delta t < V_a \Delta t < l$ の関係がある。このとき本キャパシタンス CT は、 $t + V_p \Delta t$ 間の粒子濃度平均値を、その時刻 t の管路断面の粒子濃度分布として表示し、厳密には管路断面を示している

わけではないが、管路断面情報であると見なす。また、静電気力に起因する粒子一個の管断面方向の速度は、 $10^{-18} \sim 10^{-21} \text{ [m]}$ のオーダーであり、この軸速度 10^0 [m] のオーダーと比較して非常に微小であり、本 CT による静電気力の粒子濃度変化の影響は無視できる。

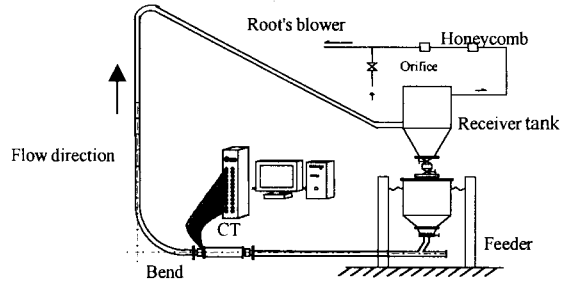


Fig.4 Experimental equipment

3.2. 画像処理条件と実験結果

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 の解が無数存在してしまう不適切逆問題[19]となる。本研究では、ニュートン・ラプソン法[27]を用いて近似的に粒子濃度分布を示す誘電率画像を求めた。このとき、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 に正規化し、その値を基準とした比で粒子濃度を求めた。1 ピクセルは、 $1.53 \times 1.53 \text{ mm}^2$ であり、管路内径を 32×32 ピクセルに分割しているため、1 つの粒子は 2.13 ピクセルを占有する。測定されたキャパシタンスデータから、上記の画像再構成法により、任意の連続 512 フレーム ($N_f = 512$) 5.12 秒間の粒子濃度分布画像 E_{xyt} を得た。 E_{xyt} の代表的な画像として、 $50\Delta t$ から $500\Delta t$ の $50\Delta t$ ステップの画像を Fig.5 に示す。粒子が存在せず空気のみ存在するところは青色で表示し、粒子濃度が増加するにしたがって赤色に変化する。この図からベンダ上流側では、高濃度になると強制的にプラグを作らなくてもプラグ流が自然的に発生することがわかる。参考までに、そのプラグ流の前端部および後端部を側面から観察した写真を Fig.6 に示す。

粒子濃度の空間平均値を、

$$\overline{D}_p(t) = \frac{1}{N_x N_y - N_{op}} \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{x=1}^{N_x} E_{xyt} \quad (6)$$

により求め、その時間変化を Fig.7 に示す。ここで、 N_{opt} は Fig.1(C)において、管路肉厚および管路外側のピクセル数であり、206ピクセルに相当する。この図より本実験時間で粒子濃度が高いときが 5 回現れ(①, ②, ③, ④および⑤と表示している)、これらの中で①, ②および③のときは、粒子が管路上面まで達しているが、④と⑤のときは、粒子は管路上面まで達していない。次の 4 章では、これらの①, ②および③の期間についてのみ解析する。

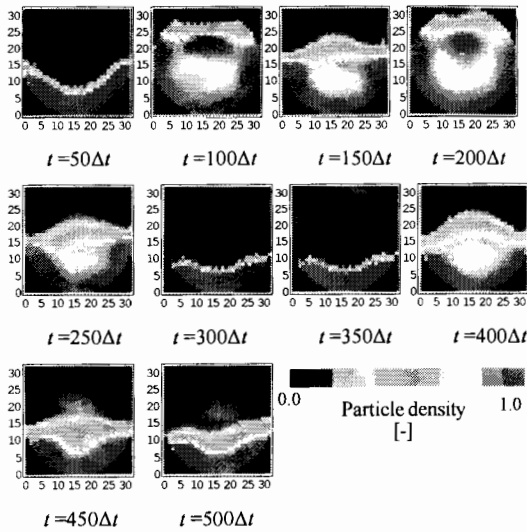


Fig.5 Representative Images of particle density

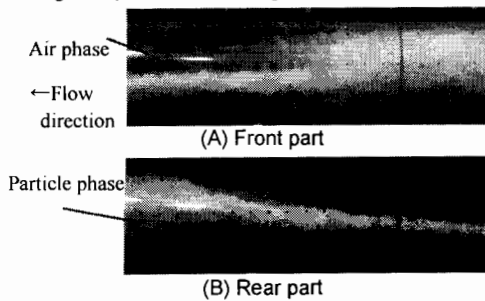


Fig.6 Side view of plug

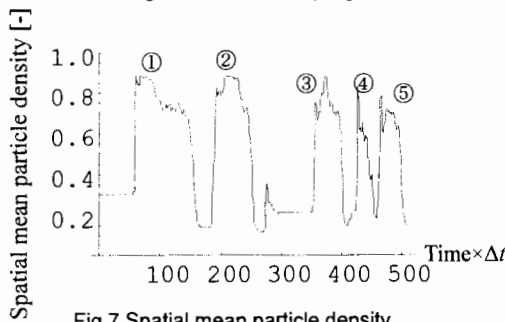


Fig.7 Spatial mean particle density

4. 画像解析と考察

4. 1. 三次元離散ウェーブレット

$N_x \times N_y \times N_z$ ピクセルからなる三次元画像 E_{xyt} に対する三次元離散ウェーブレット変換は、

$$S_{lyx} = [W_l[W_y[W_x E_{xyt}]]^T]^T \quad (7)$$

で表され、ここで、 S_{lyx} はウェーブレットスペクトラム、 W_x 、 W_y および W_l は、 $N_x \times N_x$ ピクセル、 $N_y \times N_y$ ピクセル、および、 $N_t \times N_t$ ピクセルからなるアナライジングウェーブレット行列である。式(7)において、 $N_x \times N_y \times N_t$ ピクセルからなる三次元行列の転置行列を、

$$[E_{xyt}]^T = E_{txy} \quad [E_{lyx}]^T = E_{ytx} \quad [E_{lyt}]^T = E_{tyl} \quad (8)$$

と定義すると、式(8)の右辺である各転置行列は、それぞれ、 $N_t \times N_x \times N_y$ ピクセル、 $N_y \times N_t \times N_x$ ピクセル、および $N_x \times N_t \times N_y$ ピクセルとなり、式(7)の左辺であるウェーブレットスペクトラム S_{lyx} は、 $N_x \times N_y \times N_t$ ピクセルとなる。式(7)の三次元ウェーブレット逆変換は、

$$E_{xyt} = [W_x[W_y[W_l S_{lyx}]]^T]^T \quad (9)$$

である。本研究ではアナライジングウェーブレット行列として Fig.8 に示した 2 次の Daubechies 関数行列を用いた。この Fig.8 には代表的に 32×32 行列である W_x および W_y のみを示し、 512×512 行列である W_l の表示は省略している。式(9)において、 S_{lyx} の要素を部分的に逆変換することにより、元画像は各時間周波数を備えた時間レベルに分解され、すなわち式(9)は、

$$E_{xyt} = E_0 + E_1 + E_2 + \dots + E_8 + E_9$$

$$E_0 = [W_x[W_y[W_l S_0]]^T]^T \quad E_1 = [W_x[W_y[W_l S_1]]^T]^T \quad (10)$$

$E_8 = [W_x[W_y[W_l S_8]]^T]^T \quad E_9 = [W_x[W_y[W_l S_9]]^T]^T$ となる。式(10)で、 S_0 はウェーブレットスペクトラム S_{lyx} の要素の一部である最低周波数スペクトラム、 S_9 はその最高周波数スペクトラムである。 S_0 から逆変換された画像である E_0 は最低時間周波数を持った二次元粒子濃度分布であり、本研究ではこれを時間レベル 0 の画像と呼ぶ。つまり時間レベル 0 の二次元粒子濃度分布画像は、 $512 \Delta t$ 秒間における時間平均の二次元粒子濃度分布を示す。一方、 S_9 から逆変換された画像である E_9 は、最高時間周波数を持った二次元粒子濃度分布であり、本研究ではこれを時間レベル 9 と呼ぶ。つまり、時間レベル 9 の二次元粒子濃度分布画像は、 $512 \Delta t$ 秒間において最も非定常性の強い（高時間周波数）の二次元粒子濃度分布を示している。以上の分解過程を模式的に示したのが Fig.9 であり、離散ウェーブレットの正規直交性から、時間レベル 0 から時間レベル 9 の各要素をすべて加えると、元の三次元画像を構成する。この三次元ウェーブレット多重解像度により、元画像からでは把握することが難しい時間に対して支配的である粒子濃度分布を把握することができる。Fig.8 の 2 次の Daubechies 関数行列に対するフーリエ変換の絶対値は、Fig.10 に示した通りである。さらにこの Fig.10 の各時間レベルの交点から求めた時間周波数と時間レベルとの関係、および、その時間周波数の中間値を示した平均時間周波数は、Table 1 に示した通りである。この表からウェーブレット時間レベルと時間周波数との関係が把握できる。

4. 2. 解析結果と考察

4. 2. 1. 粒子濃度の空間平均値

Fig.5 に示した粒子濃度の元画像を式(10)の三次元ウェーブレット多重解像度に分解し、その粒子濃度の空間平均値についての時間変化から、特徴を示す時間とその時間レベルについて考察する。一例として $t=100 \Delta t$ の各時間レベルの画像は、Fig.11 に示した通りである。Fig.7 との比較によりこの $t=100 \Delta t$ の画像は、ひとつ目のプラグの後端部を示す。各画像において、各軸のピクセル値は Fig.5 と同じであるためその表示を省略している。カラーマップ値の範囲は、変化を強調させるために、元画像では 0.0~1.0、時間レベ

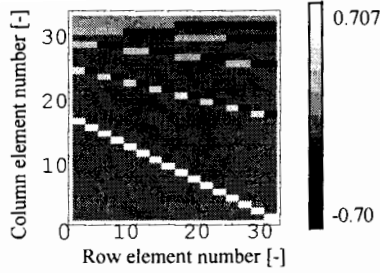


Fig.8 Analyzing wavelet matrix

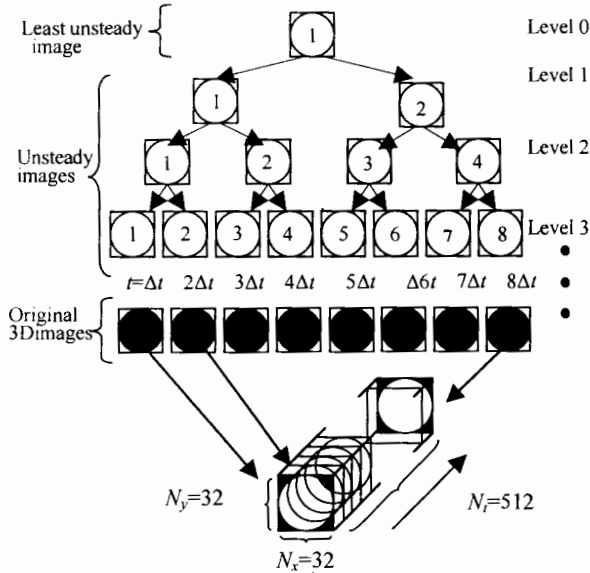


Fig.9 Multiresolution by 3D wavelets

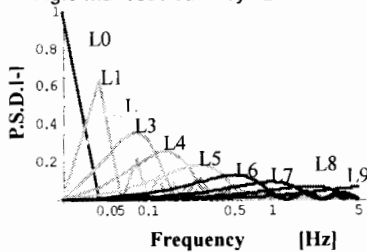


Fig.10 Power spectrum of analyzing wavelet

Table 1 Relationship between wavelet levels and representative frequency

Time level	Time Frequency [Hz]	Mean Frequency [Hz]
0	0.150~0.195	0.17
1	0.195~0.390	0.29
2	0.390~0.586	0.49
3	0.586~0.781	0.68
4	0.781~1.953	1.37
5	1.953~3.320	2.64
6	3.320~7.227	5.27
7	7.227~14.84	11.03
8	14.84~30.85	22.85
9	30.85~50.00	40.3

ル 0 画像では-0.45~0.98、および、その他の時間レベルの画像では、-0.45~0.45とした。ここで、アナライジングウェーブレットが正負の値を持つので、多重解像度画像の値も、正負の値を持つことになる。最も低い時間レベル0は、測定時間における時間平均的な粒子濃度の二次元分布を示す。最も高い時間レベル9は、最も周波数の高い時間変動の粒子濃度二次元分布を示す。Fig.11 から、時間レベル0の粒子濃度分布は管路底部に位置し、元画像から堆積層 (Stationary layer)のみを抽出していることがわかる。また、Fig.11 から、時間レベル3にも高い値が多く見られ、この時間レベルが 100Δt において支配的な粒子挙動を示し、その粒子濃度分布は堆積層上部に位置していることがわかる。さらに、時間レベル1においては、堆積層の両側上部に、幾分高い値を持ち (矢印Aを参照)、時間レベル6と7においては、管路断面上部にわずかに高い値が見られる (矢印Bを参照)。このことは、この管路断面位置において粒子濃度が各時間レベルの周波数で微妙に変化したことを意味する。以上の通り、ウェーブレット多重解像度により、元画像からでは判断しづらい詳細な粒子挙動の様子を画像として抽出することができる。

Fig.12 は、分解した各時間レベルの画像から式(6)により粒子濃度の空間平均値を求め、その時間変化について時間レベル0から7までを示した結果である。ここで、時間レベル8と9はそのピーク値が明確ではなかったため、その表示を省略した。この Fig.12(D)の時間レベル3において、 $t=65\Delta t$ から $128\Delta t$ まで(①と表示している)、 $193\Delta t$ から $250\Delta t$ まで(②と表示している)、および、 $354\Delta t$ から $384\Delta t$ まで(③と表示している)の3つの期間について、比較的高い値が見られる。これらの期間は、Fig.7 に示した①~③の時間にはほぼ相当するものである。これらの各期間の開始時付近と終了時付近の粒子濃度について、各時間レベルを検討する。最初に期間①については、その直前の $64\Delta t$ で、時間レベル6と7に高い値が現れた (記号①-s 参照)。期間①の終了後の $132\Delta t$ では、時間レベル4と5に比較的高い値が現れ (記号①-e 参照)、その後の $148\Delta t$ では時間レベル6に高い値が現れ (記号①-e 参照)、さらにその後の $156\Delta t$ では時間レベル7に高い値が現れた。次に、期間②については、その直前の $192\Delta t$ で、時間レベル6と7に高い値が現れた(②-s 参照)。期間②の終了直後の $240\Delta t$ では、時間レベル5に高い値が現れ(記号②-e 参照)、その後の $243\Delta t$ では時間レベル6に高い値が現れ(記号②-e 参照)、さらにその後の $250\Delta t$ では、時間レベル7に高い値が現れた(記号②-e 参照)。最後に、期間③については、その開始時の $354\Delta t$ で、時間レベル4に高い値が現れ(記号③-s 参照)、それは期間③の終了時である $384\Delta t$ まで続いた。期間③の終了後の $400\Delta t$ では、時間レベル5に高い値が現れ (記号③-e 参照)、その後 $400\Delta t$ では時間レベル7に微小ではあるが高い値が存在する (記号③-e 参照)。以上より、期間③のプラグについてはそれほど明確ではないが、期間①と②のプラグについては、各期間開始直前に高時間レベルに高い値が見られ、各期間終了後では時間が経過するごとに、高い値は低い時間レベルから高い時間レベルにシフトしていくことがわかる。

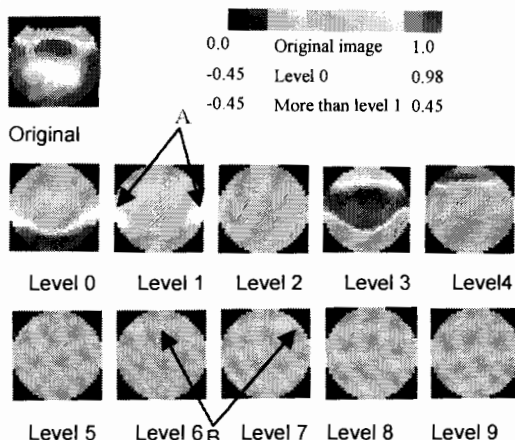


Fig.11 Original and the decomposed images at 100Δt

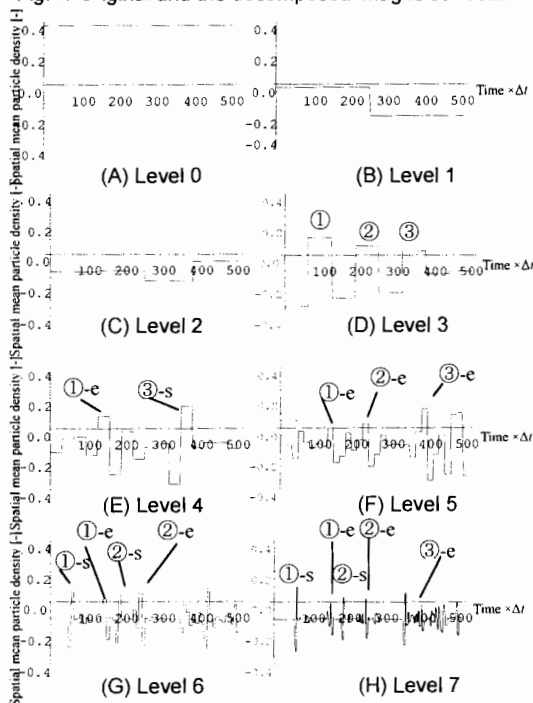


Fig.12 Spatial mean value of decomposed images

4. 2. 2. 多重解像度画像と既往研究との比較

ここでは、粒子濃度の空間平均値が特徴を示す時間において、ウェーブレット多重解像度画像を示し、既往研究[8]と比較することにより、その画像の妥当性を考察する。Fig.13はその多重解像度画像であり、これらの図の水平側は時間、垂直側は時間レベルを示す、各画像において、各軸のピクセル値は Fig.5 と同じであるためその表示を省略している。この Fig.13(A)の期間①のプラグ前端部64Δtにおいて、時間レベル6の堆積層上部に比較的高い粒子濃度が存在し(矢印C参照)、さらに管路断面中心上部には、それよりも高い粒子濃度が存在する(矢印D参照)。さらに高

時間レベル7の堆積層上部にも高い粒子濃度が存在する(矢印E参照)。しかし、時間レベル3、4および5には粒子の存在はほとんどない。これは高周波数成分の粒子がプラグ前端部を構成することを意味する。期間①のプラグ主部である65Δtから128Δtまでは(同画像であるので途中時間の画像は表示を省略している)、時間レベル3が支配的であり、高濃度の粒子が堆積層上部に位置し、65Δtでは時間レベル4が管路断面最上部までも到達していることがわかる。期間①のプラグ後端部である132Δtでは、時間レベル4の堆積層上部と時間レベル5の管路断面上部に高い粒子濃度が見られる。その後の148Δtについては、高い粒子濃度は時間レベル6と7の管路断面中央部に移動する。さらにその後の156Δtにおいては、高い粒子濃度は時間レベル7の管路断面底部に移動する。以上をまとめると、期間①のプラグ前端部では高時間レベルの堆積層上部に高い粒子濃度が存在し、プラグ主部では低時間レベルが支配的であり、プラグ後端部では時間経過とともに、高濃度の粒子が、低時間レベルの管路断面上部から高時間レベルの管路底部に徐々に移動する。このことは、Fig.5のプラグ側面からの写真から判断して妥当であると考えられる。Fig.13(B)の期間②およびFig.13(C)の期間③も同様の傾向がある。具体的には、期間②のプラグ前端部192Δtにおいて、時間レベル6と7の堆積層上部両側面に高い粒子濃度が存在し(矢印F参照)、管路断面中心においては若干ではあるが高い粒子濃度が存在する(矢印IとJ参照)。期間②のプラグ主部である193Δtから240Δtまでは時間レベル3が支配的で、比較的高い濃度粒子が堆積層上部に位置し、193Δtで時間レベル4が管路最上部までも到達していることがわかる。期間②のプラグ後端部である240Δtでは、時間レベル5の管路断面上部に比較的高い粒子濃度が見られる。その後の243Δtについては、高い粒子濃度は時間レベル6の管路断面中央部に移動する。さらにその後の250Δtにおいては、高い粒子濃度が時間レベル7の管路底部に移動する。期間③のプラグ前端部については、それほど明確に前述の特徴は見られないが、期間③のプラグ主部である354Δtから384Δtまでは、時間レベル4が支配的であり、高濃度粒子が堆積層上部に位置していることがわかる。期間③のプラグ後端部である400Δtでは、時間レベル5の管路断面上部から中央部に高い粒子濃度が見られ、さらにその後の時間402Δtでは、時間レベル6と7の管路下部に多少ながらも高い粒子濃度が見られる(矢印G,H参照)。

Fig.14は筆者らの既往研究である、LDVを用いて計測したプラグ前端部における粒子速度を、空気速度 U をパラメータとして示したものである[8]。水平軸は速度比 V_p/V_c (V_p はプラグ前端部の粒子速度、 V_c はプラグ速度)、垂直軸は高さ比 y/D (y は管路高さ位置、 D は管路直径)である。Fig.14(A)および(B)は、 $x/R=0$ 管路断面中心、および $x/R=0.79$ (x は管路断面中心から水平方向の距離、 R は管路半径)における粒子速度を示したものである。Fig.14(A)から、粒子速度は管路断面中心部において、プラグ主部速度よりも速いが、Fig.14(B)より測定点が壁近傍に至ると、粒子速度は空気速度にかかわらず、プラグ主部速度よりも低

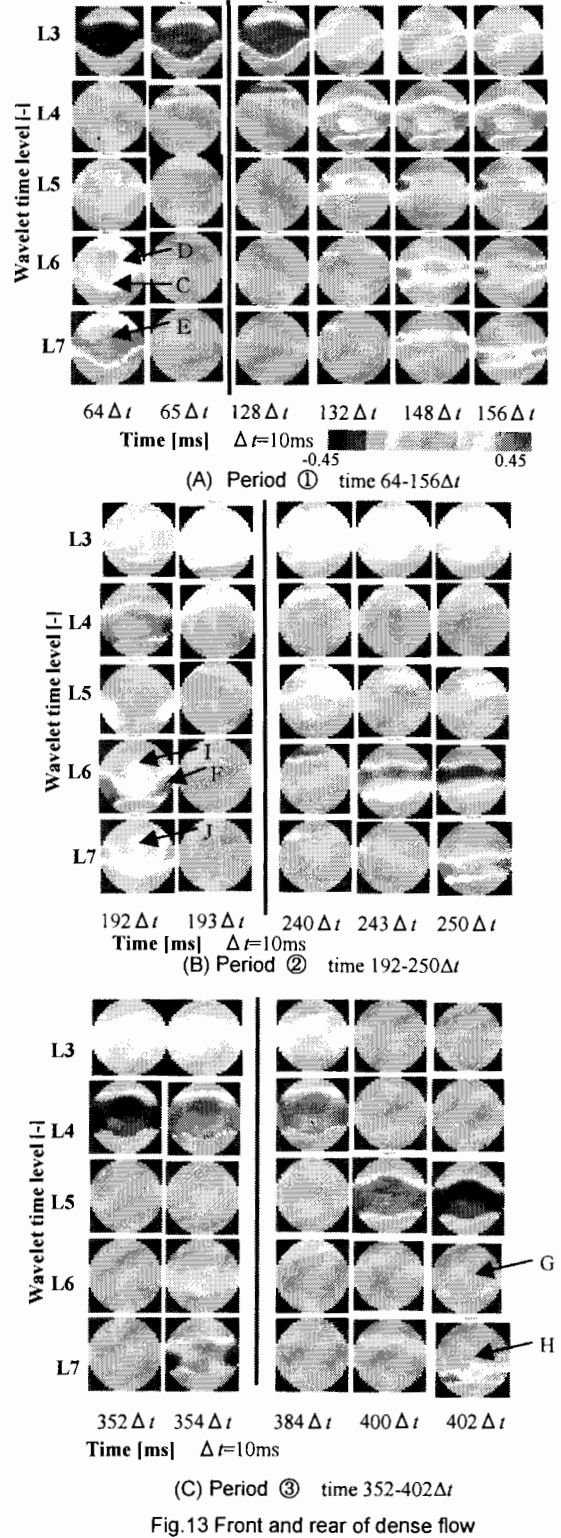
くなる。Fig.15は既往研究[8]で述べた Fig.14を元にして予測したプラグ前端部の粒子挙動である。これらの図から、プラグを構成している前端部では、管路中心付近において、構成粒子が直前の空気相に放出されていることが予測される。前述の Fig.13(A)と(B)の多重解像度画像において、矢印DとE、矢印IとJに示した通り、管路断面中心において、比較的高い濃度の粒子が存在することは、Fig.14の粒子放出を考慮すると、妥当な画像処理結果であり、さらに、その粒子放出場所が、管路中心付近であると確認できる。このことは、従来まで予測に過ぎなかった粒子放出の管路断面位置が、CT画像とその多重解像度解析により明らかになったことと思われる。また、管路側面からの観察結果である Fig.6 に示した通り、プラグ前端部は急な斜面を形成し、後端部は緩やかな斜面を形成し、本研究ではそのプラグ構成粒子挙動を管路断面の多重解像度画像として抽出することができ、プラグ前端部では時間レベル6と7である高時間レベルである粒子が急斜面を構成し、一方、プラグ主部が通過した後端部では、時間レベル5から時間レベル7までの中へ高時間レベルである粒子が、徐々に変化する緩やかな斜面を構成する。

5. 結論

キャパシタンス・トモグラフィーにより二次元管路断面と時間とからなる高濃度固気二相流の三次元粒子濃度画像を取得し、その画像に対して正規直交系の三次元離散ウェーブレット変換を用いて多重解像度に分解した結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 本手法により、高濃度固気二相流の支配的な時間レベルにおける管路断面の粒子濃度分布を、画像として詳細に抽出することができた。
- (2) プラグ前端部において、粒子濃度は高時間周波数であるウェーブレット時間レベル6と7を構成し、その粒子空間分布の位置は、堆積層上部から管路中央部に位置した。このことはプラグ前端部の構成粒子が、急な斜面を形成していることを意味する。
- (3) プラグ後端部において、時間経過に従って、粒子濃度分布はウェーブレット時間レベル5の管路断面上部からレベル7の管路断面底部へ徐々に移動した。このことは、プラグ後端部の構成粒子が、緩やかな斜面を形成することを示す。
- (4) 高時間レベルの多重解像度画像の管路中央部付近に比較的高濃度の粒子分布が存在した。既往研究のプラグ前端部構成粒子の空気相への放出を考慮すると、本研究で得られたCT画像が定性的に妥当であることが確認できた。

本研究を行なうにあたって、英国マンチェスター工科大学UMISTのDr. Tomasz Dyakowski、PTL社のMr. Malcolm Byarsに、CT計測に関するご助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。



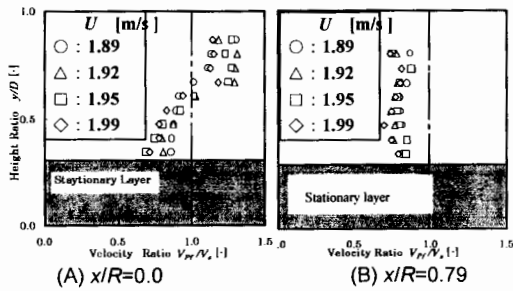


Fig. 14 Particle velocities by LDV

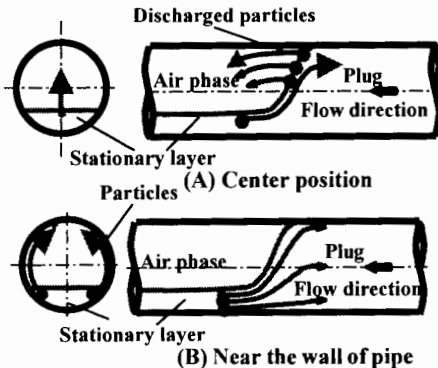


Fig. 15 Particle movement model at the front part

参考文献

[1] Aziz, Z. B. and Klinzing, G. E., Optimizing the Performance of a Plug Flow System, *Powder Technology*, 62, pp77-84 (1990)

[2] 二村光司, プラグ輸送の圧力損失とスケールアップ, 粉体工学会誌, Vol.33, No.2, pp121-128(1996)

[3] 永徳久登, 廣田満昭, 鈴木道隆, 大島敏男, 岩田芳和, 松本敏克, 粉体の水平管路内高濃度輸送に関する研究, 粉体工学会誌, Vol.32, No.9, pp606-611(1995)

[4] Mi, B., Wypych, P. W., Pressure Drop Prediction in Low-velocity Pneumatic Conveying, *Power Technology*, 81, pp125-137 (1994)

[5] Konrad, K., Dense-Phase Pneumatic Conveying, A Review, *Powder Technology*, 49, pp1-35 (1986)

[6] Klinzing G.E, Dense Phase (plug) Conveying—Observations and Projections—, *Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids*, Edited by A.Levy, and H.Kalman, Elsevier Science B.V., pp329-341(2001)

[7] Tsuji, Y., Tanaka, T. and Ishida, T., Langrangian Numerical Simulation of Plug Flow Cohesionless Particles in a Horizontal Pipe, *Powder Technology*, 71, pp239-250 (1992)

[8] 武居昌宏, 越智光昭, 石川泰司, 西村浩, 高木浩之, 高部洋一, プラグ前端構成粒子の挙動についての研究, 日本機械学会論文集, Vol.64, No.628-B, pp86-92(1998)

[9] 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, pp20-24(2001)

[10] 三沢雅樹, 高田尚樹, 市川直樹, 赤井誠, 高速線X線スキャナによる移動体の界面形状測定, 可視化情報学会論文集, Vol.20, No.2, pp38-44(2001)

[11] 竹中幸幸, 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, pp14-19(2001)

[12] 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, pp137-144(1996)

[13] 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, pp434-441(2000)

[14] Dickin, F. and Wang, M., Electrical resistance tomography for process applications, *Measurement science & technology*, Vol.7, No.3 pp247-260(1996)

[15] 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, pp173-177(1989)

[16] Halow, J.S. and Nicoletti, P., Observations of fluidized bed coalescence using capacitance imaging, *Powder Technology*, Vol.69, pp255-277(1992)

[17] 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, pp95-100(1995)

[18] 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, pp1-13(1999)

[19] 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)

[20] 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)

[21] 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, pp833-839 (1996)

[22] 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, pp120-127 (1999)

[23] 武居昌宏, 李輝, 越智光昭, 斎藤兆古, 堀井清之, 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, 可視化情報学会誌, Vol.22, No.5 pp.36-43(2002)

[24] 松山佐和, n 次元双直交ウェーブ変換コードの開発とその応用, 可視化情報学会誌, Vol.21, Supple.No.1, pp347-350 (2001)

[25] Yang, W.Q., Hardware design of electrical capacitance tomography systems, *Measurement science & technology*, Vol.7, No.3, pp225-232 (1996)

[26] 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) pp367-390

[27] Isaksen, O., A review of reconstruction techniques for capacitance tomography, *Measurement science & technology*, Vol.7, No.3, pp325-337 (1996)