

GVSPM法を用いた鉛直管内自由落下粒子濃度分布の ECT画像再構成*

武居昌宏^{*1}, 斎藤兆古^{*2}, 越智光昭^{*1}

ECT Images Reconstruction of Freely Falling Particles Concentration Distribution in Vertical Pipe Using GVSPM

Masahiro TAKEI^{*3}, Yoshifuru SAITO and Mitsuaki OCHI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, College of Science and Technology, Nihon University,
1-8-14 Kanda-surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308 Japan

A new reconstruction method called Generalized Vector Sampled Pattern Matching (GVSPM) was applied to the image reconstruction of an electrical capacitance computed tomography (ECT) in freely falling particles in a vertical pipe. This new method is able to achieve stable convergence without the use of an empirical value. Experiments were carried out using three particle types with various electric charges and four particle flow rates to measure the capacitance of a pipe cross section. The three particle types were polyethylene pellets (PP), silica sand (SS) and polyvinyl chloride (PVC). Four flow rate settings were used resulting in a volume flow rate ranging from 3.08×10^{-5} to 1.04×10^{-3} [m³/s]. The GVSPM method is compared with conventional methods in terms of volume fraction, residual capacitance, and capacitance correlation. Overall, the GVSPM method proved superior to conventional methods in the case of polyethylene pellets with high electric charge. GVSPM achieves accurate reconstruction by using an objective function that is calculated as the inner product calculation between the experimental capacitance and the reconstructed image capacitance.

Key Words: Multiphase Flow, Electrical Computed Tomography, Image Reconstruction, Generalized Sampled Pattern Matching Method, Ill Posed Inverse Problem

1. 緒 言

鉛直管内の気流中の粒子挙動は、固気二相流の中でも非常に基本的な流れであり、その粒子濃度の可視化や計算など多くの研究がなされている。例えば、HorioらやFesslerらは、レーザーシート法により、管路水平断面の粒子濃度分布を可視化し、その分布は一様ではなく濃度むらが生じることを指摘した⁽¹⁾。一方、Kajishimaらは管内の粒子濃度分布を直接数値計算(DNS)法により計算し⁽²⁾、さらに、Pengらは鉛直管内の自由落下粒子の断面粒子濃度を、格子ガスオートマトン(LGA)法により計算し、粒子間および粒子と管壁間の衝突が、濃度むらの要因であることを指摘した⁽³⁾。このように鉛直管内の粒子挙動や濃度分布に関する研究は多くあるものの、管路断面の濃度分布を測定した例は、あまり存在しない。また、管路水平断面についてはレーザーシート法により定量的な濃度分布の計測が可能ではあるが、断面濃度分布を計測することはできない。管路内の粒子濃度分布の計測は、単なる管路内のモニタリングだけにとどまらず、非定常

非一様な流れにおける高精度な速度分布計測や混相流流量計への可能性が存在する。

近年、管路断面濃度分布を測定する方法として静電容量型CTが開発され、流動層や空気輸送における気泡や粒子の可視化計測がなされている⁽⁴⁾。この静電容量型CTにおいて、計測した静電容量から粒子断面分布を求めるには、不適切逆問題を解法としており、粒子断面分布は近似解しか求めることができない。現在まで多数の画像再構成法が提案されており⁽⁵⁾、どの手法も粒子分布やパラメータに強く依存し、最適な画像再構成法について解明されているわけではない。その画像再構成法の中でも、非繰り返し法で高速計算が可能なりニア・バック・プロジェクト(Liner Back Projection: LBP)法、繰り返し法で高精度な計算が可能ランドウェーバー(Landweber: LW)法、および、反復ティコノフ正規化(Iterative Tikhonov regularization: ITR)法が、比較的多く用いられてきた⁽⁶⁾。しかしながら、LW法とITR法は解を収束させるための人為的な経験値が必要不可欠であり、その値は反復回数および粒子分布に強く依存してしまう。筆者らは、人為的なパラメータなしでも解を安定的に収束させる画像再構成法として、一般化ベクトル型サンプルドパターンマッ

* 原稿受付 2006年1月12日。

^{*1} 正員、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} 正員、法政大学工学部(〒184-8584 小金井市梶野町3-7-2)。
E-mail: takei@mech.cst.nihon-u.ac.jp

チング (Generalized Vector Sampled Pattern Matching: GVSPM) 法を提案し、模擬粒子分布画像を用いて、画像パターン、反復回数などの詳細な画像条件についての比較検討を行なった。その結果、模擬粒子分布画像を用いた結果では、人為的なパラメータを必要としない GVSPM 法は ITR 法や LW 法と同等またはそれ以上に精度が良いことを明らかにした⁹⁾。しかしながら、前報では、模擬粒子分布画像に限られており、実際の粒子分布に対して、GVSPM 法と ITR 法や LW 法との比較検討は、まったく行なわれていなかった。ましてや、粒子種類や粒子流量に対する再構成画像精度の検討は、実際の固気二相流 CT 計測のためには必要不可欠であるものの、それはなされていなかった。

そこで本研究は、鉛直管内において粒子種類と粒子濃度を変化させた自由落下粒子の静電容量計測から、GVSPM 法、LW 法、ITR 法、および LBP 法を用いて画像再構成を行い、各画像再構成法の精度についての特徴を把握し比較検討を行なうことを目的としている。

2. 支配行列式と GVSPM 法

図 1(a), (b) は本研究で用いた静電容量型 CT センサの概略図であり、アクリル製の水平管外周に配置したセンサの内部は、管軸方向 $l=100\text{mm}$ の 12 個の測定電極から構成されている¹⁰⁾。センサ内の電極対はコンデンサと見なすことができ、各電極間の静電容量を測定する。この CT センサは、測定電極対間に 15V の矩形高周波電圧を 1.25MHz で印加し、静電容量に依存する出力電圧を得る信号処理器に接続されている。基準電極 i と検出電極 j の静電容量 $C_{i,j}$ は、ガウスの法則より、

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

であり、 \mathbf{r} は水平管断面内の位置ベクトル、 $\epsilon(\mathbf{r})$ は水平管断面位置 \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水平管断面位置 \mathbf{r} のポテンシャル、 Γ_j は基準電極 i と検出電極 j の電気力線の及ぶ領域である。本論文では、ゴシックの文字はベクトルまたは行列を表す。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 $\epsilon(\mathbf{r})$ が線形関係であること、および、感度(センシティブティ)の重みとして、粒子上の電荷を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¹¹⁾。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、

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

の二階微分方程式を水平管断面内で仮定する。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)に代入して静電容量を求める。この操作を各電極対におけるすべての離散値 \mathbf{r} について行くと、式(1)は

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

の行列式で表現できる。式(3)で、 \mathbf{C} は測定された静電容量列ベクトル、 \mathbf{S}_e はその感度値をマップとした感度行列、 \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 $n=66$ 通りであるので、 \mathbf{C} は測定値の既知で $n=66$ 個の要素をもつ。図 1(c) に示した通り、管路断面の空間解像度を $N_x=N_y=32$ とし、管路断面を 1024 ピクセルで分解すると、 \mathbf{E} は未知で 1024 個の要素をもつ。感度行列 \mathbf{S}_e はあらかじめ計算した既知で、 66×1024 行列となる。図 2 は、本研究で用いた CT センサの \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) に濃淡で表示したものである。式(1)において、測定値 \mathbf{C} と既知 \mathbf{S}_e から未知 \mathbf{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 \mathbf{E} の解の一意性が保証されない不適切逆問題となる。

前報で詳細を示した通り⁹⁾、GVSPM 法の k 回目の反復解 $\mathbf{E}^{(k)}$ と $(k-1)$ 回目の反復解 $\mathbf{E}^{(k-1)}$ との関係は、

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{(k)} &= \mathbf{E}^{(k-1)} - \mathbf{S}_e^{-T} \Delta \mathbf{C}^{(k-1)} \\ &= \mathbf{E}^{(k-1)} - \mathbf{S}_e^{-T} \left(\frac{\mathbf{S}_e \cdot \mathbf{E}^{(k-1)} - \mathbf{C}^{(exp)}}{\|\mathbf{S}_e \cdot \mathbf{E}^{(k-1)} - \mathbf{C}^{(exp)}\|} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

である。ここで、「 $\|\cdot\|$ 」はノルムによる正規化を示し、 $\mathbf{C}^{(exp)}$ は、測定値を示す。

GVSPM 法は、マッチングの評価関数を備えた反復法の一つで、既知である入力ベクトル $\mathbf{C}^{(exp)}$ と、反復演算から計算された出力ベクトル $\mathbf{E}^{(k)}$ から求めた入力ベクトル $\mathbf{C}^{(k)}$ 間の内積演算を行い、その値が 1.0 に限りなく近づいたときの出力ベクトルを解とするものである。そのため反復演算から得られた出力ベクトルの要素パターン (サンプルパターン) が、既知である入力ベクトルの要素パターンに限りなく一致するという特徴がある。したがって、GVSPM 法は人為的にゲインを設定することなく、画像再構成を行なうことができ、また、空間解像度に関係なく適用することができる。

一方、LW 法の一般解は、

$$\mathbf{E}^{*(k)} = \mathbf{E}^{*(k-1)} - \alpha \mathbf{S}_e^{-T} (\mathbf{S}_e \mathbf{E}^{*(k-1)} - \mathbf{C}^{(exp)}) \quad (5)$$

で、ITR法の一般解は、

$$\mathbf{E}^{*(k)} = \mathbf{E}^{*(k-1)} - (\mathbf{S}_e^T \mathbf{S}_e + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{S}_e^T (\mathbf{S}_e \mathbf{E}^{*(k-1)} - \mathbf{C}^{*(exp)}) \quad (6)$$

である。ここで、 \mathbf{C} の「 \cdot 」は最小値0.0と最大値1.0とで反復ごとに正規化することを示す。 \mathbf{E} の「 \cdot 」はそれ自身では正規化していない。これらの式において、 α と γ は人為的な経験値である。また、非反復法のLBP法の解は、

$$\mathbf{E} = \mathbf{S}_e^T \mathbf{C}^{(exp)} \quad (7)$$

である。

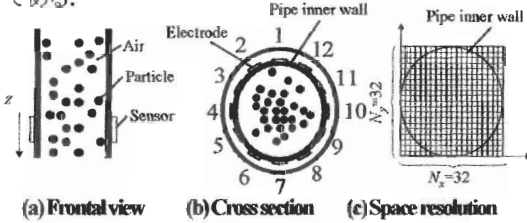


Fig. 1 Overview of capacitance tomography.



(a) 1-2 (b) 1-3 (c) 1-4 (d) 1-5 (e) 1-6 (f) 1-7
Fig. 2 Sensitivity map matrices.

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

3. 実験

実験装置は図3に示した通りであり、ホッパー、レーザーバタンク、鉛直管、静電容量型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 $D=50.0$ [mm]、長さ 2.0 [m]の鉛直管の下端に配置した。ホッパーから投入された粒子は自由落下し、レーザーバタンクで回収された。レーザーバタンクは十分大きく、粒子がレーザーバタンク内に落下しても気流が管内を上昇する影響はないと思われる。図4に示した通り、粒子はほぼ球形のポリエチレンペレット(PP)、シリカ粒子(SP)、ポリ塩化ビニール(PVC)の三種類とし、それらの粒子固有の値は、表1に示した通りである。これら各粒子と空気との比誘電率の差から、粒子により多くの電荷が生じ、同体積の粒子では電荷量はPVC、SP、PPの順に大きくなる。粒子体積流量はホッパー上部に設置したフィードのノズル口径 d の大きさを 20 mmから 50 mmまで 10 mm刻みで変化することにより正確に調整され、表2に示した通り Q_1 から Q_4 の計4種類とした。ここで、シリカ粒子とPVCの場合の Q_1 は、粒子供給がフィードの性能を超えるため、この Q_1 の条件での実験は行っていない。図5は自由落下しているポリエチレンペレットの様子の写真であり、管軸方向の粒子分布は一樣ではなく、管断面においても粒子

分布は一樣でないことが予測される。また、図6は粒子流量をグラフに表したものである。

1フレームの画像再構成に必要な66組の電極対の静電容量測定時間は、 $\Delta t=10.0$ [ms]とした。 i 番目の電極対で測定された静電容量 $C_{i,j}^{(exp)}$ は、空気を満たしたときの静電容量 $C_{i,j}^{air}$ と各粒子を満したときの静電容量 $C_{i,j}^{particle}$ を用いて、

$$C_{i,j} = \frac{C_{i,j}^{(exp)} - C_{i,j}^{air}}{C_{i,j}^{particle} - C_{i,j}^{air}} \quad (8)$$

の通り正規化し、さらに、この $C_{i,j}$ の値をMaxwellモデルにより正規化した。これは、粒子濃度と静電容量とが線形でないことに由来する。各種粒子でセンサ内を満たしたときの再構成画像の誘電率が 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が 0.0 [-]となり、粒子の存在する状態の二次元誘電率分布が、その正規化した値を基準とした比となる。したがって、粒子を球、配位数を12、粒子内の空隙は存在しない(粒子密度と真密度は等しい)と仮定すると、空隙率は 0.26 であるので、粒子体積率 100% とは、かさ密度/真密度 $=0.74$ のときを示す。

各粒子を各体積流量 Q で自由落下させ、その直後から1秒経過後の時間を0基準時間として静電容量の計測をはじめ、 $765\Delta t$ 時間(=7.65秒間)まですべての電極対で静電容量を測定した。図7は、一例としてポリエチレンペレット、シリカ粒子、およびPVCを質量流量 Q_2 で落下させたときの $t=1\Delta t$ のときの正規化静電容量を示す。

なお、本研究の実験では、粒子速度 v_p とすると、時刻 t から Δt 時間に粒子は $v_p \Delta t$ 落下する。後述の通り、本実験条件ではおよそ $v_p=1.39$ [m/s] ~ 7.15 [m/s]であり、 $v_p \Delta t=13.9$ [mm] ~ 71.5 [mm]となり、粒子移動距離はセンサ長さ l よりも小さく、 $v_p \Delta t < l$ の関係がある。このとき本静電容量型CTセンサは、 $t+v_p \Delta t$ 間の粒子濃度を、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みなす。

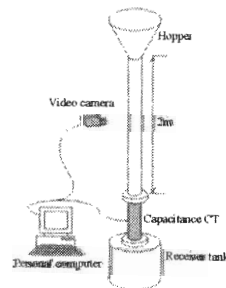


Fig. 3 Experimental equipment.



(a) Polyethylene pellet (b) Silica particle (c) PVC

Fig. 4 Sample particle

Table 1 Properties of particles.

Particles	Mean particle diameter d_p [mm]	Density [kg/m ³]	Relative Permittivity	Relative electric charge of one particle
PP	3.26	910	2.3	2.28×10^4
SP	8.18×10^{-2}	2580	3.6	22.43
PVC	1.75×10^{-2}	1500	3.5	1

PP: Polyethylene pellet, SP: Silica particle, PVC: Polyvinyl chloride

Table 2 Particle flow rate.

Diameter of feeder [mm]	d_1	d_2	d_3	d_4
Volume flow rate [m ³ /s]	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
PP	3.08×10^{-5}	1.27×10^{-4}	2.80×10^{-4}	5.56×10^{-4}
SP	5.43×10^{-5}	1.74×10^{-4}	8.26×10^{-4}	-
PVC	6.13×10^{-5}	2.01×10^{-4}	4.56×10^{-4}	-

PP: Polyethylene pellet, SP: Silica particle, PVC: Polyvinyl chloride

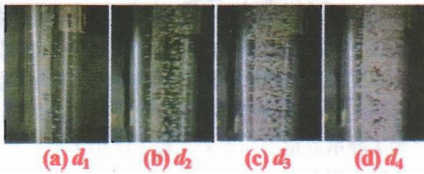


Fig. 5 Falling particle picture (Polyethylene pellet).

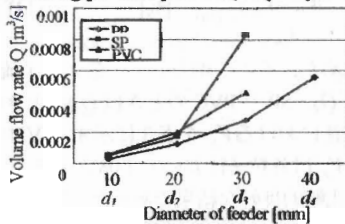
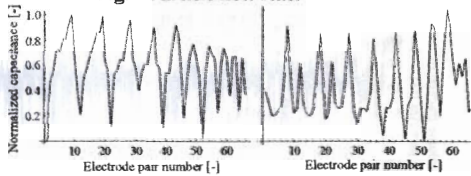
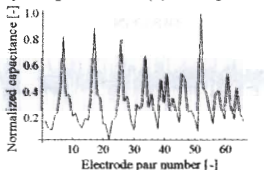


Fig. 6 Particle flow rate.



(a) Polyethylene pellet



(b) Silica particle

(c) PVC

Fig. 7 Example of normalized capacitance.

4. 画像再構成と考察

4.1 再構成条件と再構成画像例 GVSPM 法, LW 法, ITR 法および LBP 法の精度を比較検討するために, 実験で得られた自由落下粒子の静電容量から, 画像再構成を行なった. その再構成過程において次のルールを定めた.

- 1) 元の模擬画像と最終再構成画像の管外側すべてのピクセルは画像比較の対象としていない.
- 2) LW 法と ITR 法の場合, 式(5)と式(6)に示し通り反復ごとに静電容量を最小値 0.0 と最大値 1.0 とで正規化した. 一方, GVSPM 法は式(4)に示したように, 各反復ごとに静電容量をノルムで正規化した.
- 3) すべての方法で, 再構成画像は, 各反復過程においては正規化しない. しかし, 後述の C_R と C_C を計算するために, 最終再構成画像と最終静電容量については, すべての方法において, 最小値 0.0 と最大値 1.0 とで正規化した.
- 4) 粒子濃度 E の各要素の値は, すべての方法の反復計算過程で, 閾値を用いずにそのまま反復を繰り返す.
- 5) LW 法と ITR 法による再構成画像は, 式(5)と(6)の係数 α と γ に強く依存する. そこで, 前報⁹⁾に従い, 反復回数 $I=30$ のときの画像相関が最も高い値, すなわち $\alpha=2.0$ および $\gamma=0.01$ を採用した. また画像再構成の反復回数は $I=30$ とした.

図 8 は, 一例として $1\Delta t$ 時間における Q_3 のときの GVSPM 法, LW 法, ITR 法, および LBP 法によって再構成された粒子分布画像であり, 図 8(a) はポリエチレンペレット, 図 8(b) はシリカ粒子, 図 8(c) は PVC の場合を示す. 赤色は高い粒子濃度を示し, 青色になるにしたがい粒子濃度が低くなる. この図より, どの画像再構成法においても, 管断面の粒子分布は一樣でなく濃度にむらが生じていることがわかる. その理由は粒子同士の衝突, および管路との衝突が均一に起こらないためである. さらに図 8 より, 各画像再構成法により粒子濃度分布が大きく異なることがわかる. GVSPM 法と LW 法は粒子濃度分布が比較的似ており, ITR 法は, 最小ノルム解に近い値を表していることが推測され, 正確に粒子濃度分布を示していないと思われる. さらに, LBP 法は, 高電荷量のポリエチレンペレットや中電荷量のシリカ粒子の場合, おおよそ GVSPM 法や LW 法の特徴を示しているものの, 低電荷量の PVC では他の再構成法と比較して, 大きく異なることがわかる.

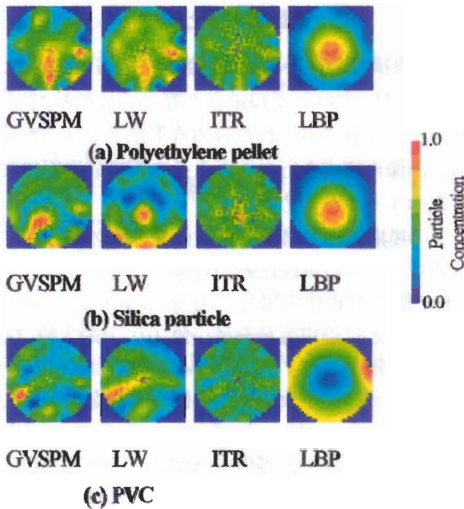


Fig. 8 Example of reconstructed images.

(Particle flow rate: Q_2 , Time: $1\Delta t$)

4-2 再構成画像の評価

4-2-1 粒子体積率の評価 まず、式(4)(5)(6)および(7)より各画像再構成法により求めた t 秒時の粒子濃度分布を E_{xy} とし、その空間平均値を粒子体積率 V_{FI} とみなし、

$$V_{FI} = \frac{1}{N_x N_y - N_w} \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{x=1}^{N_x} E_{xy} \times 100 \quad [\%] \quad (9)$$

により V_{FI} を求めた。ここで、 N_w は図 1(c)における管壁厚および管外側のピクセル数であり、206 ピクセルに相当する。図 9 は、一例としてポリエチレンペレットの Q_4 の場合の V_{FI} の時間変化である。また、 t 秒時の i 番目の電極の測定静電容量 C_i から、粒子体積率 V_{FC} を、

$$V_{FC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i^{(exp)} \times 100 \quad [\%] \quad (10)$$

より求めた⁽¹²⁾。さらに各粒子について、各画像再構成法の粒子体積率の時間平均値 $\overline{V_E}$ を図 10 に示す。これらの図より、 Q が増加すると $\overline{V_E}$ も増加することがわかる。粒子が管軸方向長さ l の測定電極内に滞留する時間を t_R 、粒子の管軸方向速度を v_p とすると $\overline{V_E}$ は、

$$\overline{V_E} = \frac{4Ql}{D^2 \pi} \times 100 = \frac{4Q}{D^2 v_p} \times 100 \quad [\%] \quad (11)$$

であり、粒子速度 v_p に依存する。参考までに、図 10

の測定静電容量より求めた $\overline{V_E}$ を式(11)に代入して求めた v_p の最小値は、SP の Q_1 の場合で 139[m/s]、その v_p の最大値は、PP の Q_3 の場合で 7.15[m/s] である。図 6 では粒子流量 Q は曲線的に増加しており、図 10 が図 6 の曲線に従わないのは、 v_p の影響があるためである。

また、 $1\Delta t$ 間に粒子がセンサ内を通過する個数 N_{pdt} および、粒子がセンサ内に存在する平均個数 N_{pvt} を、

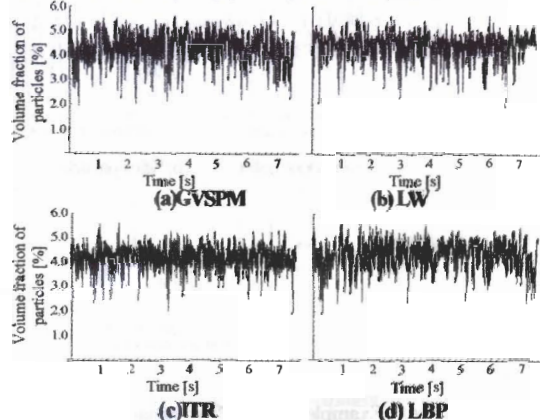
$$N_{pdt} = \frac{6Q}{\pi d_p^3} \times \Delta t \quad N_{pvt} = \frac{6Q}{\pi d_p^3} \times \frac{l}{v_p} \quad (12)$$

より求めると、 N_{pdt} の最小値は、PP の Q_1 の場合で 1.70×10^6 個、 N_{pdt} の最大値は、PVC の Q_3 の場合で 1.63×10^9 個となる。また、 N_{pvt} の最小値は、PP の Q_1 の場合で 1.16×10^6 個、 N_{pvt} の最大値は、PVC の Q_3 の場合で、 3.52×10^9 となる。さらに、粒子直径 d_p 、 v_p 、および空気の動粘性係数から落下粒子のレイノルズ数 Re を求めると、PP の場合 $1.21 \times 10^3 \sim 3.18 \times 10^3$ 、SP 場合 $7.52 \sim 3.47 \times 10^4$ 、PVC の場合 $2.37 \sim 5.40$ の範囲である。

高精度の画像再構成法は、少なくとも式(9)の V_{FI} の時間平均値である $\overline{V_{FI}}$ が、式(10)の V_{FC} の時間平均値である $\overline{V_{FC}}$ に近似している必要がある。図 10(a)より、高電荷量を持つポリエチレンペレットでは Q_1 から Q_4 において、 $\overline{V_{FI}}$ が $\overline{V_{FC}}$ に近似しており、さらに、各画像再構成法の $\overline{V_E}$ は大きな開きがない。一方、中低電荷量を持つシリカ粒子や PVC では、 Q_1 から Q_3 において、 $\overline{V_{FI}}$ と $\overline{V_{FC}}$ との誤差が多少大きくなり、各画像再構成法の $\overline{V_E}$ も多少大きな開きとなる。より詳細に各画像再構成法の精度を評価するために、各再構成画像から求めた粒子体積率 $\overline{V_{FI}}$ と測定静電容量から求めた粒子体積率 $\overline{V_{FC}}$ との、粒子体積率誤差 $\overline{V_E}$ を、

$$\overline{V_E} = \left| \frac{\overline{V_{FI}} - \overline{V_{FC}}}{\overline{V_{FC}}} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (13)$$

により求めた。その一例として、最大粒子流量(PP のときは Q_4 、SP と PVC のときは Q_3)のときの各画像再構成法における $\overline{V_E}$ を表 3 に示す。GVSPM 法と LW 法の $\overline{V_E}$ は各粒子において 1.08 から 5.53 の範囲にあり、比較的良好な結果であった。しかしながら、ITR の $\overline{V_E}$ は 5.50 から 9.15 であり、LBP の $\overline{V_E}$ は 4.84 から 13.1 であり、良好な結果とは言い難い。

Fig. 9 Volume fraction of PP. (Particle flow rate: Q_4)

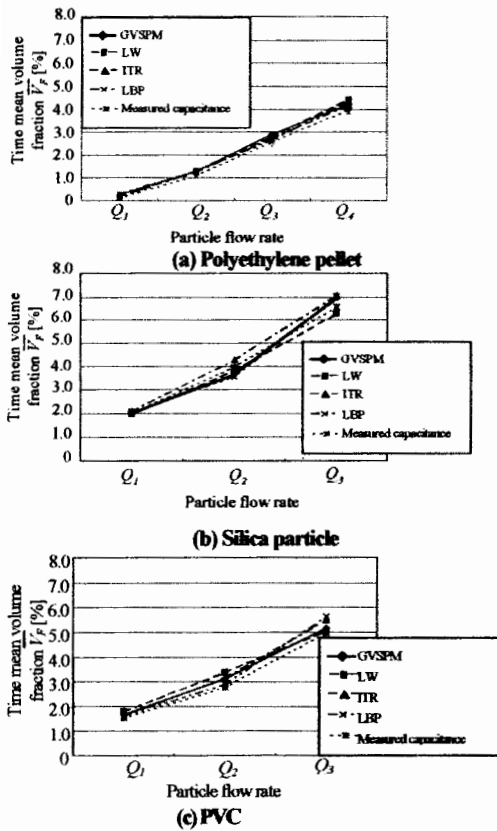


Fig. 10 Time mean volume fraction of particles.

Table 3 Volume fraction error \bar{V}_E

Particles	Reconstruction method			
	GVSPM	LW	ITR	LBP
PP	5.15	5.04	5.50	4.84
SP	5.53	4.81	7.56	6.72
PVC	3.32	1.08	9.15	13.1

PP: Polyethylene pellet, SP: Silica particle, PVC: Polyvinyl chloride

4-2-2 残差静電容量の評価 前項の粒子体積率の評価より、GVSPM法による再構成画像は、粒子体積率をほぼ正確に表していることがわかった。しかし、自由落下粒子の真の管断面粒子分布は未知なので、各手法による再構成画像の粒子濃度分布を直接的に評価することはできない。そこで、時間 i における残差静電容量 C_R を、

$$C_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i^{(k+1)} - C_i^{(exp)})^2}}{\sqrt{\overline{C^{(exp)}}}} \quad [-] \quad (14)$$

の通り定義し、この指標により、再構成画像の粒子濃度分布の精度を間接的に評価した。ここで、 n は電極対の組み合わせ数 66、 $C_i^{(k+1)}$ は最終再構成画像 $E^{(k)}$ から計算される最終静電容量 $C^{(k+1)}$ の i 番目の要素、 $\overline{C^{(exp)}}$ は測定静電容量の平均値である。すなわち、

C_R は k 回反復計算を行った再構成画像に対して、式 (3) より再度静電容量を求め、その静電容量と実験で得られている静電容量との残差である。 C_R は値が小さい方が精度の高い画像再構成法であると言える。

図 11 は一例として、ポリエチレンペレットの Q_4 のときの各画像再構成法によって求めた C_R の時間変化を示す。図 11(a) より、GVSPM 法は C_R の値が小さくその乱れも小さいことがわかる。図 11(b) より、LW 法は C_R の平均値は比較的小さいがその乱れは大きいことがわかる。図 11(c) と (d) より、ITR 法と LBP 法は C_R が他の方法と比べて大きいことがわかる。さらに、それらの各条件における C_R の時間平均値 $\overline{C_R}$ を図 12 に示す。図 12(a) は、ポリエチレンペレットの $\overline{C_R}$ であり、各手法とも Q が増加すると $\overline{C_R}$ は減少する傾向がある。粒子がポリエチレンペレットの場合、GVSPM 法が他の方法と比べて一番 $\overline{C_R}$ 値が小さい。例えば Q_4 のとき、GVSPM 法の $\overline{C_R}$ は LW 法のそれと比較して 44.11[%]、ITR 法のそれと比較して 56.05[%]、LBP 法のそれと比較して 68.61[%] それぞれ低い。図 12(b) はシリカ粒子の $\overline{C_R}$ であり、LBP 法を除いては、 Q が増加すると $\overline{C_R}$ は多少減少またはほぼ一定の傾向を示す。この場合、LBP 法を除いた各方法の $\overline{C_R}$ は小さく、LBP 法は他の方法と比べて非常に大きな $\overline{C_R}$ を示し、LBP 法は高精度の画像再構成法とは言い難い。図 12(c) は PVC の $\overline{C_R}$ であり、 Q が増加すると $\overline{C_R}$ は減少の傾向を示す。この PVC の場合の ITR 法の $\overline{C_R}$ は、他の方法と比べて非常に小さいが、前記図 8 の実際の再構成画像に示した通り、最小ノルム解に近い値を表しており、本実験条件では ITR 法は精度の高い画像再構成法とは言えない。以上のことから、高電荷量のポリエチレンペレットの場合、GVSPM 法は他の方法と比較して優れた方法であり、中低電荷量のシリカ粒子や PVC の場合でも、GVSPM 法は LW 法と同等以上の精度をもつことがわかる。

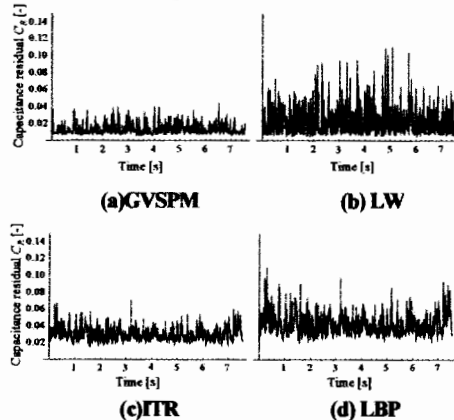


Fig. 11 Residual capacitance of polyethylene pellet.

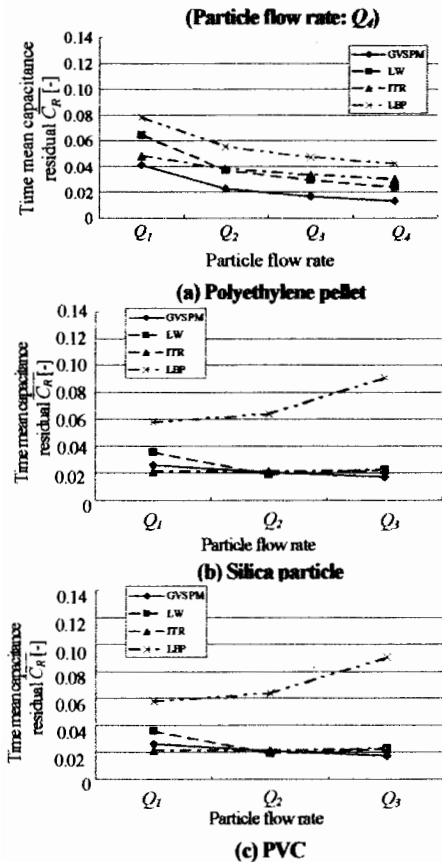


Fig. 12 Time mean residual capacitance.

4・2・3 静電容量相関の評価 次に、時間 t における静電容量相関 C_c を、

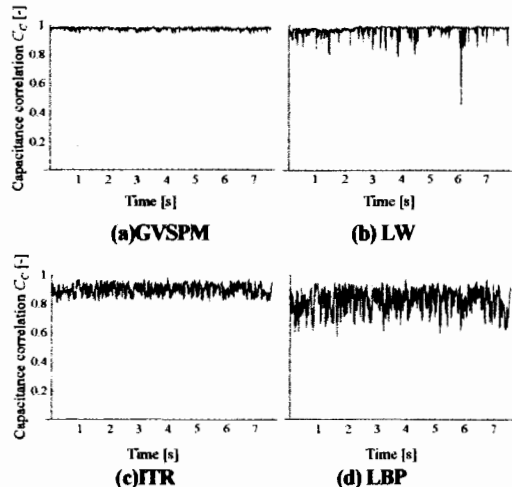
$$C_c = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i^{(k+1)} - \bar{C}^{(k+1)}) (C_i^{(exp)} - \bar{C}^{(exp)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i^{(k+1)} - \bar{C}^{(k+1)})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i^{(exp)} - \bar{C}^{(exp)})^2}} \quad [-] \quad (15)$$

の通り定義し、この指標により、再構成画像の粒子濃度分布の精度を間接的に評価した。すなわち C_c は、 k 回反復計算を行った再構成画像に対して、(3) 式より再度静電容量を求め、その静電容量と実験で得られている静電容量との n 電極対数の相関である。 C_c は値が大きい方が精度の高い画像再構成法であると言える。

図 13 は一例として、ポリエチレンペレットの Q_1 のときの C_c の時間変化を示す。図 13(a)より、GVSPM 法は C_c の値が大きくその乱れも小さいことがわかる。図 13(b)より、LW 法は C_c の平均値は大きいもののその乱れは多少大きいことがわかる。図 13(c)と(d)より、ITR 法と LBP 法は C_c が他の方法と比べて小さく乱れも大きいことがわかる。さらに、それらの各条件における C_c の時間平均値 \bar{C}_c を図 14 に示す。図 14(a)はポリエチレンペレットの C_c で

あり、各手法とも Q が増加すると \bar{C}_c は増加する傾向がある。粒子がポリエチレンペレットの場合、GVSPM 法が他の方法と比べて一番 \bar{C}_c の値が大きい。例えば Q_1 のとき、GVSPM 法の \bar{C}_c は LW 法のそれと比較して 12.06[%]、ITR 法のそれと比較して 7.95[%]、LBP 法のそれと比較して 17.85[%]それぞれ高い。図 14(b)はシリカ粒子の \bar{C}_c であり、LBP 法を除いては、 Q が増加すると \bar{C}_c は多少増加減少またはほぼ一定の傾向を示す。この場合、LBP 法を除いた各方法の \bar{C}_c は大きく、LBP 法は他の方法と比べて非常に小さな \bar{C}_c を示し、LBP 法は高精度の画像再構成法とは言えない。図 14(c)は PVC の \bar{C}_c であり、 Q が増加すると \bar{C}_c は多少増加減少またはほぼ一定の傾向を示す。この PVC の場合の ITR 法の \bar{C}_c 値は、他の方法と比べて非常に高いが、前述の通り最小ノルム解に近い値を示し、本実験条件では精度の高い画像再構成法とは言えない。

以上のことから、高電荷量のポリエチレンペレットの場合には、GVSPM 法は他の方法と比較して優れた方法であり、中低電荷量のシリカ粒子や PVC の場合でも、GVSPM 法は LW 法と同等以上の精度をもつことがわかる。この GVSPM 法の優位性の理由として、GVSPM 法は $C^{(exp)}$ と $C^{(k)}$ 間の内積値である評価関数を反復解の内部に備え、その評価関数を 1.0 に限りなく近づけたために、 $C^{(exp)}$ の要素パターンと $C^{(k)}$ の要素パターンとがマッチングを取りながら画像を再構成したことに起因する。しかしながら、LW 法や ITR 法は評価関数を持たず、再構成画像における $\Delta E^{(k)}$ の値が 0 であっても、 $C^{(exp)}$ の要素パターンと $C^{(k)}$ の要素パターン間のマッチングの保証は、反復時に存在しない。

Fig. 13 Capacitance correlation of PP. (Particle flow rate: Q_1)

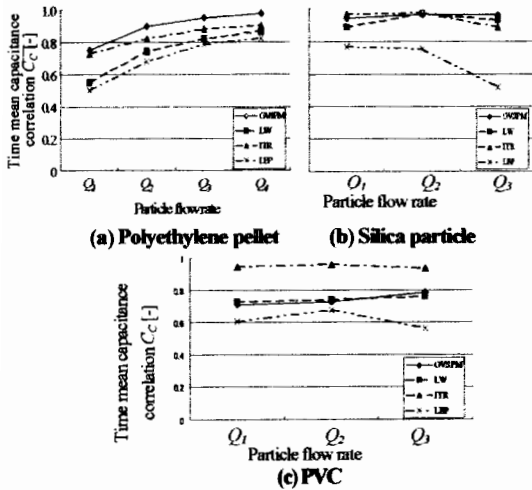


Fig.14 Time mean capacitance correlation.

5. 結論

高電荷量のポリエチレンペレット(PP), 中電荷量のシリカ粒子(SP), および低電荷量のポリ塩化ビニール(PVC)を鉛直管内に自由落下させ、管路断面の静電容量を測定した。そして、人為的な経験値が不必要な一般化ベクトル型サンプルド・パターン・マッチング(GVSPM)法, 一般的なランドウェバー(LW)法, 反復ティコノフ正規化(ITR)法, および, リニア・バック・プロジェクション(LBP)法とを用い, その鉛直管内自由落下粒子の濃度分布の画像再構成を行った結果, 次のことが明らかとなった。

- (1) GVSPM法とLW法の粒子体積率誤差 $\overline{V_E}$ は1.08[%]から5.53[%]と小さく, LBP法の $\overline{V_E}$ は4.84[%]から13.1[%]と大きかった。
- (2) GVSPM法の残差静電容量 $\overline{C_R}$ は, 粒子がPPの場合, 他の方法と比べて一番値が小さかった。具体的には, LW法に対して44.11[%], ITR法に対して56.05[%], LBP法に対して68.61[%]それぞれ小さかった。
- (3) GVSPM法の静電容量相関 $\overline{C_c}$ は, 粒子がPPの場合, 他の方法と比べて一番値が大きかった。具体的には, LW法に対して12.06[%], ITR法に対して7.95[%], LBP法に対して17.85[%]それぞれ大きかった。
- (4) 以上の点を踏まえて, GVSPM法は高電荷量の粒子の画像再構成法として非常に優れた方法であり, 中低電荷量の粒子についてはLWと同程度に精度が高いといえる。

本研究の実験を行うにあたり, 日本大学理工学部大学院生, 辻野真也君, および, 長田裕行君にご協力いただきました。本研究は, (独)日本学術振興会, 平成17年度科学研究費補助金基盤研究C(課題番号16560159), およ

び日本大学理工学部特別推進研究費にて行われました。ここに御礼申し上げます。

6. 参考文献

- (1) Horio, M. and Kuroki, H., Three-dimensional flow visualization of dilute dispersed solids in bubbling and circulating fluidized beds, *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No. 15 (1994), pp. 2413-2421.
- (2) Fessler, J., Jonathan, D. and Eaton, J., Preferential concentration of heavy particles in a turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol. 6, No. 11 (1994), pp. 3742-3749.
- (3) Kajishima, T. and Takiguchi, S., Interaction between particle clusters and particle-induced turbulence, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 23 (2002), pp. 639-646.
- (4) Peng, G. and Hermann, H.J., Density waves and 1/f density fluctuation in granular flow, *Physical Review E*, Vol. 51, No. 3 (1995), pp. 1745-1756.
- (5) Halow, J. S. and Nicoletti, P., Observations of fluidized bed coalescence using capacitance imaging, *Powder Technology*, Vol. 69 (1992), pp. 255-277.
- (6) Dyakowski, T., Luke, S. P., Ostrowski, K. L. and Williams, R. A., On-line monitoring of dense phase flow using real time dielectric imaging, *Powder Technology*, Vol. 104 (1999), pp. 287-295.
- (7) Isaksen, O., A review of reconstruction techniques for capacitance tomography, *Measurement Science & Technology*, Vol. 7, No. 3 (1996), pp. 325-337.
- (8) Yang, W. Q. and Peng, L., Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography, *Measurement Science & Technology*, Vol. 14 (2003), R1-R13.
- (9) Takei, M. and Saito, Y., Application of GVSPM to reconstruction of solid-air two-phase flow CT images, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 71(2005), No. 703, pp. 745-752.
- (10) Yang, W. Q., Hardware design of electrical capacitance tomography systems, *Measurement Science & Technology*, Vol. 7, No. 3 (1996), pp. 225-232.
- (11) Khan, S.H., Xie, C.G. and Abdullah, F., Computer modeling of process tomography sensors and systems, *Process Tomography Principles Techniques and Applications*, edited by M.S. Beck and R.A. Williams, Butterworth Heinemann (1995) pp. 325-365.
- (12) Wiesendorf, V. and Werther, J., Capacitance probes for solids volume concentration and velocity measurements in industrial fluidized bed reactors, *Powder Technology*, Vol. 110, No. 1 (2000), pp. 143-157.