

## 平成 20 年度研究助成報告 (兼、終了報告)

研究題名	食品粉体製造プロセス制御を目指したプロセス・トモグラフィーの基礎研究
研究期間	平成 18 年 4 月 01 日～平成 21 年 3 月 31 日
研究機関・所属 研究者名	日本大学理工学部機械工学科 教授 武居 昌宏

## 1. 平成 20 年度研究成果の概要

本年度は、キャパシタンス PT を循環流動層プロセスに応用することを最終目的とし、その基礎研究として管内の粉体の濃度分布について計測した。粉体をホップで供給し、エアームキサを通し、アクリル管内を自由落下させた。アクリル管の上部とエアームキサから下流側に PT センサを設置した。

GVSPM 法を用いて画像再構成を行ったところ、粒子体積流量が高くなるほど粒子体積率も増加し、さらに、計測位置が下降するに従い粒子体積率は低下した。各 Case とともに、低い粒子体積率は  $r=7R/16$  から  $r=12R/16$  程度の管路中心と管壁の間で、エアームキサの粒子投入口に相当する。また、最も高い粒子体積率は  $r=15R/16$  付近に存在する。さらに、計測位置が下流に行くに従い、管路半径方向の粒子体積率は平均化された。

## 2. 助成期間内での研究成果の概要

## 1. はじめに

食品、薬品、化学プロセスにおける粉粒体の流動は、固体、気体、液体が混在した混相流となる場合が多く、各相の濃度分布、流量、速度分布などを非接触で計測する技術が求められている。管路やチャンバー内の混相流動状態を非破壊非接触で可視化する手法として、コンピュータッド・トモグラフィー(CT)法の一つであるプロセス・トモグラフィー(PT 法)法が、研究レベルとして広く用いられるようになってきた。本研究では、キャパシタンス PT の基礎開発と粉体プロセスへの応用を行ったので、ここに報告する。

## 2. プロセス・トモグラフィーの原理

電気プロセス・トモグラフィー(PT)には、キャパシタンスを計測する方法と、インピーダンスを計測する方法とがある。空気などの非導電性の媒体中に誘電率の高い粒子が存在する場合は、キャパシタンスを計測する。図 1 は研究で用いているキャパシタンス式の PT 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絶縁物質により分離された 12 個の測定電極から構成されている。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、

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

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、 $\epsilon_0$  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、 $I_j$  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、 $\epsilon_0$  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(センシティブティ)を重みとして、 $I_j$  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 $V(\mathbf{r})$ の分布を求め、これを式(1)に代入して管路内のある位置のみに粒子が存在するときのキャパシタンスを求める。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、

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

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。

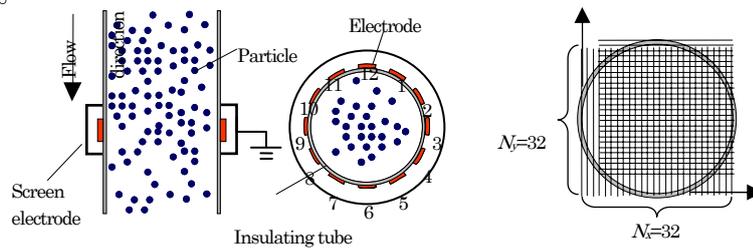


図1 キャパシタンス PT の概要

### 3. 平成 18 年度の研究

新しく製作したキャパシタンス PT センサーの管路に対して、ガウス法則とラプラス方程式の連立微分方程式を解き、管路断面マイクロ粒子位置の全パターンについて感度マップを計算し、感度マップの計算を行った。次に高精度な画像再構成のコード開発するために、従来 PT において実績の有る一般化ベルトル形サンプルパターンマッチング(GVSPM)法を用いた画像再構成法を開発し、GVSPM 法の最適なパラメータを調整した。シミュレーションにおいて、従来法と比較して、およそ 10%再構成精度を向上させることができた。そして、静止物体を用いた画像再構成を調整するために、感度マップを求め、静止標準画像を用いてその精度の評価を行い、実画像においても、再構成精度を向上させることができた。さらに、実際に流動状態を示した PT 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した。その例として、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を、一例として Case 1-1 から Case 4-1 の場合について図 2 に示す。これより、開放面積比  $S$  が大きい場合(Case 1-1 と Case 2-1 の場合)では、大きな粒子群を構成するレベル 0 のみ粒子濃度の高い値が広く見られた。一方、開放面積比  $S$  がやや小さい場合(Case 3-1 の場合)では、レベル 0 の他にレベル 2 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 4-1 の場合)では、レベル 0 の粒子濃度の値は小さく、レベル 1 に粒子濃度の高い値が見られた。以上のように、キャパシタンス PT 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、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 PT 画像を得て、その PT 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することができた。

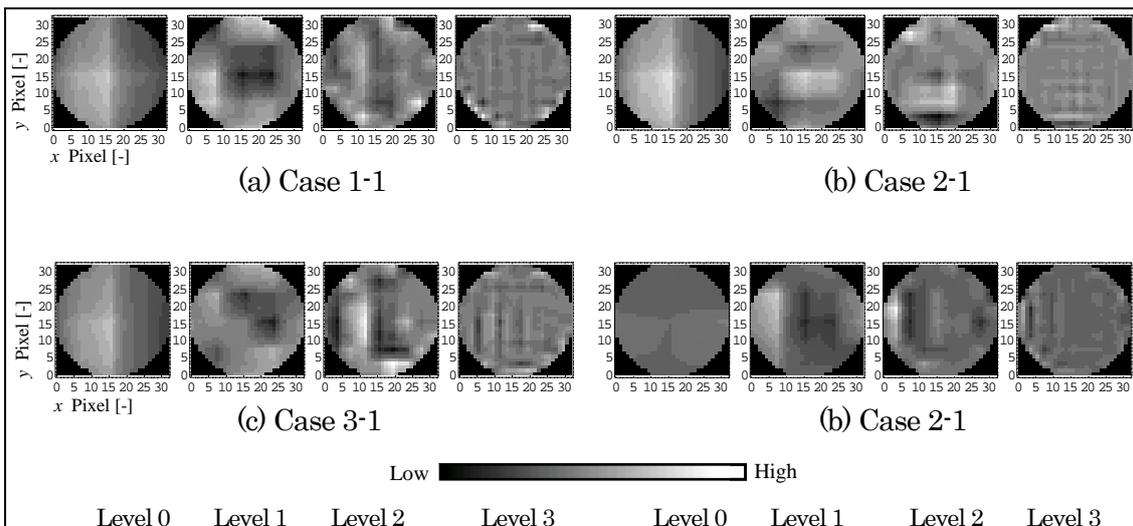


図2 PT画像の多重解像度解析 (Solid air mass ratio  $Mt=6.24$ )

#### 4. 平成19年度の研究

第2ステージとして、外乱に強いセンサーを開発し、各種超高速回路とノイズ除去による各種粉体濃度の精度を明らかにした。

まず、大管路キャパシタンス PT センサの開発を行った。図3はPTの構造を示す。

このキャパシタンスPTセンサには3つの特徴を設けた。1. 測定電極の上下にガード電極を設置した。2. 測定電極アース電極間に

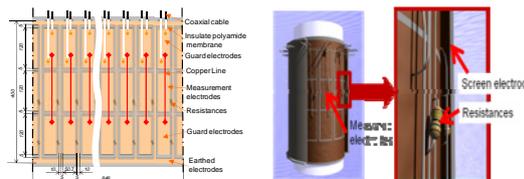


図3 Inside configuration of PT sensor

抵抗を取り付けた。3. スクリーン電極を設置した。実際の実験に備え、アクリル棒を用い大管路キャパシタンス PT

の精度について検討を行った。青は誘電率が低く、赤は誘電率が高いことを表す。今回は空気を青く、アクリル棒を赤く示している。図4より可視化されたアクリル棒位置

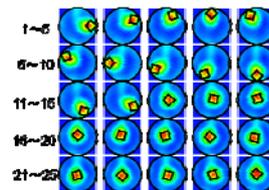


図4 Reconstructed images

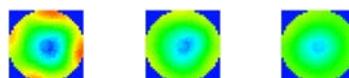
は、25か所ほぼすべて実際に置いた位置と一致していることがわかる。したがって定常的に物体の位置を特定することができる。図5に示すように流動層装置で、粉体はホッ

パータンクから供給され、エアーミキサーで拡散させる。粉体をAirで拡散させながら落下する様子が大管路キャパシタンス PT センサで測定を行った。大管路キャパシタンス PT センサを上段、中段、下段に取り付け、66通りの



図5 Experimental equipment

のキャパシタンスを測定する。必要な時間は10msである。この実験では60秒間測定を行った。図6は管路断面中の画像6000枚を平均したものである。その結果、粉体量が増加するにしたがって管壁付近で部分的に赤く示す割合が増えていることがわかった。また時間平均粒子体積率は、下段の方が濃度は低くなるこ



(a) Top (b) Middle (c) Bottom

図6 Time averaged images of powder concentration distribution (Case 5.4)

わかった。この実験では60秒間測定を行った。図6は管路断面中の画像6000枚を平均したものである。その結果、粉体量が増加するにしたがって管壁付近で部分的に赤く示す割合が増えていることがわかった。また時間平均粒子体積率は、下段の方が濃度は低くなるこ

## 5. 本年度（平成 20 年度）の研究と最終成果

最終ステージとして、キャパシタンス PT を循環流動層プロセスに応用することを最終目的とし、その基礎研究として直径 270[mm]の管内の粉体の濃度分布について計測した。

実験装置は、ホッパ、センダーの下部にエアーミキサが設置されており、内径 270[mm]、長さ 5.3[m]の亚克力管に接続されている。エアーミキサでは 4 方向のノズルから空気が供給される。亚克力管の上部には、長さ 0.66[m]の 3 つの PT センサが、エアーミキサから下流側に  $h=0.33$ [m]、 $h=0.99$ [m]、および  $h=1.65$ [m] に設置されている。粉体は、ホッパで供給されエアーミキサを通り亚克力管内を自由落下する。このとき、半径方向  $r=7R/16$  から  $r=12R/16$  領域が、粒子投入口に相当する領域である。落下した粉体はレシーバタンクで回収され再びホッパから供給された。表 1 と表 2 は実験条件であり、粒子の体積流量  $Q_p$  を  $8.33 \times 10^{-3}$  [m<sup>3</sup>/s] から  $1.57 \times 10^{-2}$  [m<sup>3</sup>/s]、と空気の体積流量  $Q_a$  を  $0.472$  [m<sup>3</sup>/s] に設定し、それらの固気体積比をとり Case No. をつけた。実験では  $\Delta t=10.0$  [ms] ごとに合計 500  $\Delta t$  間計測が行われ、GVSPM法を用いて画像再構成を行った。図 7 は各 Case の計測位置  $h$  における時間平均の粒子濃度分布を示す再構成画像である。粒子体積率  $V_i$  は各時間における再構成画像から、

$$V_t = \frac{1}{N_x N_y - N_w} \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{x=1}^{N_x} E_{xyt} \times 100 [\%] \quad (4)$$

により計算することができる。 $N_w$  は管外および管壁の厚さのピクセルの数であり、206 のピクセルに相当する。 $N_x$  および  $N_y$  はピクセル数で、 $N_x=N_y=32$  である。 $E_{xyt}$  は時間  $t$  の再構成画像のマトリックスの位置  $(x,y)$  の粒子濃度である。その粒子体積率  $V_t$  の時間平均値を図 8 に示す。この図に示すように、粒子体積流量  $Q_p$  が高くなるほど (Case 1 から Case 4 になるに従って)、粒子体積率  $V_t$  も増加する。さらに、各 Case において、計測位置  $h$  が下降するに従って、粒子体積率  $V_t$  は低下する。

再構成画像は管路断面を 16 の環状の領域に分け、各々の環状領域の粒子体積率

$$V_{\Gamma_q} = \frac{1}{p} \sum_{(x,y) \in \Gamma_q} E_{xyt} \times 100 [\%] \quad (5)$$

計算した。 $p$  は分けられた環状領域 ( $q=1,2,3,\dots,16$ ) のピクセル数ある。図 9 はその管路半径方向の粒子体積率であり、Case 1 から Case 4 と粒子濃度が高くなるに従って、粒子体積率は高くなる。各 Case ともに、低い粒子体積率は、 $r=7R/16$  から  $r=12R/16$  程度の管路中心と管壁の間に存在する。この領域は、エアーミキサの粒子投入口に相当する領域である。また、最も高い粒子体積率は  $r=15R/16$  付近に存在する。さらに、計測位置  $h$  が下流に行くに従って、管路半径方向の粒子体積率は平均化される。

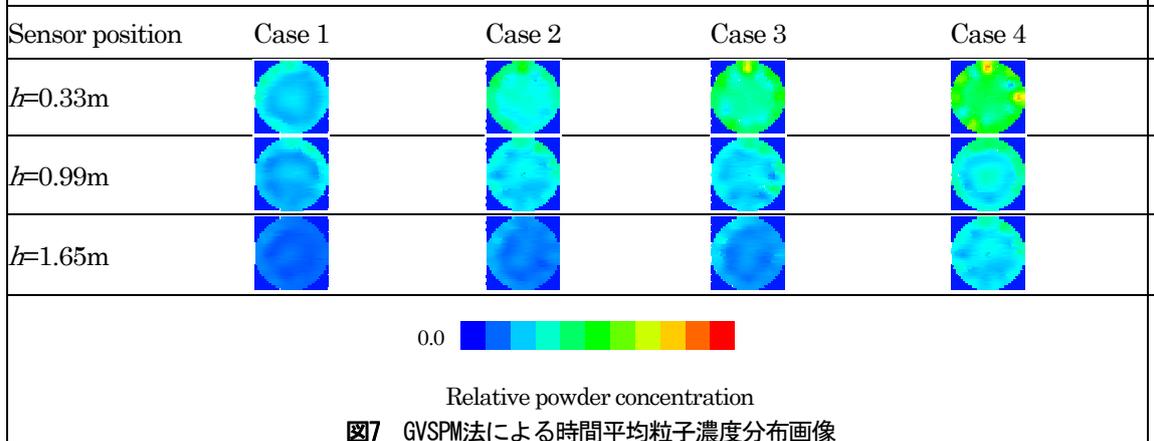


図7 GVSPM法による時間平均粒子濃度分布画像

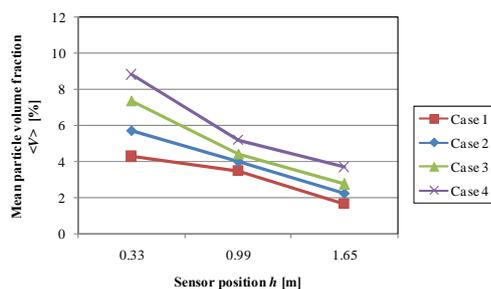


図8 時間空間平均の粒子濃度

表1 粒子の特性

Powder	Mean powder diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Relative Permittivity
Powder	69.6	1200	2.7

表2 固気流量比

Airvolume flowrate [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Particle volume flow rate [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]			
	$Q_p=8.33 \times 10^3$ (600kg/min)	$Q_p=1.11 \times 10^2$ (800kg/min)	$Q_p=1.39 \times 10^2$ (1000kg/min)	$Q_p=1.57 \times 10^2$ (1200kg/min)
$Q_f=0.472$ (1700 $\text{m}^3/\text{hr}$ )	Case1	Case2	Case3	Case4

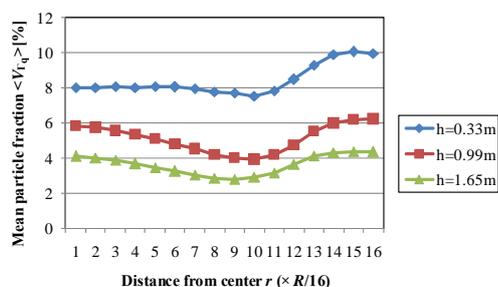


図9 半径方向の粒子濃度分布

### 3. 助成期間内での研究発表

#### 平成 18 年度

1. M. Takei, M. Ochi, Y. Saito and K. Horii: Extraction of Particle Concentration Distribution from plug flow CT Images Using 3D wavelet multiresolution, International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing (IJWMIP), World Scientific Publishing, Vol.4, No.2, pp.239- 251, 2006-5.
2. 正木健太、武居昌宏、小木曾良治、中尾光治：キャパシタンス CT センサのプラントへの応用、日本機械学会第 11 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集、

pp253-254、OS9-4、2006-6.

3. 武居昌宏、越智光昭：パウダーコーティングプロセスにおけるキャパシタンス CT を用いた粒子濃度計測、可視化情報学会第 34 回可視化情報シンポジウム講演論文集、Vol.26、No.1、pp369-372、D-310、2006-7.
4. M. Takei: GVSPM image reconstruction for capacitance CT images of particles in a vertical pipe and comparison with the conventional method, Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp.2104-2112, 2006-8.
5. M. Takei and M. Ochi: Measurement of Particle Concentration in Powder Coating Process Using Capacitance Computed Tomography, The 5th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, August 27-31, 2006, Sorrento, Italy, CD-ROM NO. Chapter 04-2.
6. M. Takei: Sampled Pattern Matching Image Reconstruction for Electrical Computed Tomography and Comparison with Conventional Method, 4th International Symposium on Process Tomography, September 14-15, 2006, Warsaw, Poland pp.64-67.
7. 正木健太、武居昌宏、小木曾良治、中尾光治：実プラント用キャパシタンストモグラフィセンサーの製作と触媒の電気特性、可視化情報学会可視化情報全国講演会（神戸 2006）講演論文集、Vol.26、No.2、pp181-182、A-205、2006-9.
8. 武居昌宏、斎藤兆古、越智光昭：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、日本機械学会論文集（B 編）、Vol. 72-B、No.723、pp.64-71、2006-11.

#### 平成 19 年度

9. 河府賢治、越智光昭、武居昌宏：粒子直線率および壁面効果による修正 Ergun 式の提案、粉体工学会会誌、Vol.44、No.4、pp.259-266、2007-4.
10. 河府賢治、越智光昭、武居昌宏：圧力損失中間計算法の充填層長さに対する適用性、粉体工学会会誌、Vol.44、No.5、pp.353-360、2007-5.
11. T. Zhao, M. Takei, F. Uchikoba and H. S. Lee: CT Visualization and Analysis of Plug Formation, The 9<sup>th</sup> Asian Symposium on Visualization, June 4-8, 2007, Hong Kong, China, pp.123-124.
12. T.Zhao, M.Takei, K.Masaki, R.Ogiso, K.Nakao and A.Uchimura: Sensor Design and Image Accuracy for Application of Capacitance CT to the Petroleum Refinery Process Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, Vol.18, pp.268-276, 2007-7.
13. T. Zhao, M. Takei, R. Ogiso and K. Nakao: Measurement of Powder Catalyst Fluidization Using Capacitance CT in Petroleum Refinery Process World Congress on Industrial Process Tomography (WCIPT), September 3-6, 2007, Bergen, Norway, CD-ROM (CRE05).
14. 河府賢治、越智光昭、武居昌宏：水平管粒体プラグ輸送における圧力損失予測式の導出（粒子種類および管内径に対する高応用性）、日本機械学会論文集（B 編）、Vol.73、No.733、pp.1868-1875、2007-10.
15. 河府賢治、越智光昭、武居昌宏：鉛直管粒体プラグ輸送の粒子流動を考慮した粒子速度と圧力損失予測式の提案、粉体工学会会誌、Vol.44、No.10、pp.723-731、2007-10.
16. 武居昌宏、都徳照、越智光昭：水平管内におけるプラグ自然形成に関するキャパシタンス CT 計測、非破壊検査、Vol.56、No.12、pp.636-642、2007-12.
17. M. Takei, D. H. Doh and M. Ochi: Electrical CT Image Reconstruction Technique for Powder Flow in Petroleum Refinery Process, Experiments in Fluids, Springer, Vol.44, No.3, pp.481-490, 2008-3.
18. K.Kofu, M.Ochi and M.Takei: Derivation of Predicted Pressure Drop Equation on Granular Particle Plug Transportation in Horizontal Pipe, Journal of Fluid Science

and Technology, JSME, Vol.3, No.1, pp.104-115, 2008-3.

平成 20 年度

19. T.Noguchi, M.Honda, M.Takei, K.Hoshino, S.Ishii and M.Ochi: Particles Concentration Measurement of Fluidized Bed in Wavy Flow by Impedance Method Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics, JSEM, Vol. 8, pp.37-42, 2008-6.
20. T. Zhao and M. Takei: Design of Plug Formation detector based on Capacitance Measurement Technique, Advanced Powder Technology, VSP, Vol.19, No.6, pp.559-572, 2008-12.
21. Takei, T.Zhao and K.Yamane: Measurement of Particle Concentration in Powder Coating Process Using Capacitance Computed Tomography and Wavelet Analysis Powder Technology, Elsevier, 2009 (in Press).