

# 2000年度 春期研究発表会講演論文集

日 時 2000年5月17日 (水)

5月18日 (木)

会 場 京 大 会 館

(京都市左京区吉田河原町15-9)

## 粉 体 工 学 会

京都市左京区田中関田町 2-7

〒606-8203 思文閣会館33号

TEL 075-751-0195 FAX 075-751-2851

「研究報告」

## キャパシタンスCTを用いた管内粒子分布のリアルタイム観察

日本大学理工学部機械工学科  
法政大学工学部電気・電子工学科  
白百合女子大学共通科目

○武居 昌宏\*, 越智 光昭  
斉藤 兆古  
堀井 清之

University of Manchester Institute of Science and Technology Tomasz DYAKOWSKI

## 1. 緒言

粉粒体の空気輸送において、閉塞などのパイプライン異常は絶対的に回避する必要があり、そのために筆者らは、粉粒体の最小輸送流速[1]やプラグ特性[2]について実験的な検討を行い、旋回流空気輸送[3]や特殊形状ベンド管[4]を提案してきた。そして、新しいパイプライン異常の診断方法として、コンピュータシミュレーション(CT)を用いて、管内粒子挙動を直接リアルタイムで観察する方法について模索している。

CTは、対象物の外部からX線や音波などの透過線を照射し、多数の透過像を得ることにより、非破壊で内部状態を可視化するもので、医療分野を中心に大きく発展してきた。ところが、産業分野の各種混相流機器の内部状態を非破壊で可視化するには、このような医療機器分野のCTを直接用いることは非常に難しい。なぜならば、このようなCT医療機器は機械的な駆動部分が存在しているため、スキャン時間は短くても1秒前後であり[5]、瞬時に移動する混相流状態を可視化するにはスキャン時間が長すぎる。最近、気液二相流の分野においては、0.5msで連続スライスが可能な超高速X線CT装置が開発された[6]。しかながら、このようなX線CTは非常に高価で装置が大きく、粉粒体パイプラインの異常診断に用いるには、簡便な方法とは言いがたい。これに対し、安価なインピーダンスCTを用い、ニューラルネットワークにより画像再構成を行う例[7]もあるが、インピーダンスCTは、導電性の高い気液二相流に適用可能であって、導電性が極めて低い気体内の粉粒体分布の観察には適していない。

ごく最近になって、固気二相流の固体挙動を非破壊で可視化する手法として、キャパシタンスCTが研究され始めた[8]。これは多数の電極からなるセンサを管路外側に配置させてスキャンし、各電極間の静電容量を測定し、画像再構成により管路断面の誘電率分布、すなわち、粒子分布を求めるものである。

そこで本研究は、このキャパシタンスCTを粉粒体パイプラインの異常診断に応用するためのファーストステップとし、閉塞状態を模擬的に作成したパイプライン内の固気二相流における静電容量を測定し、画像再構成により粒子分布を可視化し、本手法の有用性とその可能性について検討した。

## 2. キャパシタンスCTの原理

本研究で用いたキャパシタンスCT装置は、Fig.1(A)(B)に示した通りであり、パイプラインの外周にセンサーを配置し、センサー内部は絶縁物質により分離された12個の電極からなる。その静電容量Cと誘電率 $\epsilon$ との関係は、

$$C_{i,j} = -\frac{\epsilon_0}{V_c} \oint_{r \in \Gamma_i} \epsilon(\mathbf{r}) \nabla V_i(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (i=1,2,\dots,11; j=i+1,\dots,12) \quad (1), \quad \nabla \cdot [\epsilon(\mathbf{r}) \nabla V(\mathbf{r})] = 0 \quad (2)$$

であり、 $i$ は基準電極番号、 $j$ は対極電極番号、 $C_{i,j}$ は $i$ と $j$ 番目電極間の静電容量、 $\epsilon_0$ は真空誘電率、 $\epsilon(\mathbf{r})$ は管路断面における誘電率、 $V_c$ は $i$ 電極にかかる電圧、 $V_i(\mathbf{r})$ は $i$ が基準電極であるときのポテンシャル分布である。この管路断面において式(2)を仮定しこの式を離散化しFEMにより $V(\mathbf{r})$ を求め、これを式(1)に代入してセンシティブリティマップ行列 $S$ を得ると、誘電率の分布 $E$ と各電極間の静電容量 $C$ の行列表現は、

$$C = SE \quad (3)$$

となる。すなわち、このキャパシタンスCTでは、測定値である静電容量行列 $C$ と、既知のセンシティブリティマップ行列 $S$ から、誘電率の管路断面分布すなわち粒子分布行列 $E$ を求める問題となる。

## 3. 画像再構成方法

式(3)において12個の電極を用いた場合、静電容量 $C$ は $66 \times 1$ 行列、管路断面を $32 \times 32 = 1024$ 個の正方形メッシュで表現すると、センシティブリティマップ $S$ は $66 \times 1024$ 行列、誘電率分布 $E$ は $1024 \times 1$ 行列

\* Masahiro TAKEI TEL:03-3259-0749 E-Mail:takei@mech.cst.nihon-u.ac.jp

となる。ここで、静電容量  $C$ 、および、センシティブリティマップ  $S$  から、誘電率分布  $E$  を求める画像再構成は、 $S^{-1}$  が存在しないので正解が存在しない不適切逆問題となる。本研究では、バックプロジェクション法を基本とした修正 Newton-Raphson 法[9]の繰り返し計算を用いて画像再構成を行った。具体的には、測定された静電容量  $C_1$  に対して、

$$E_1 = S^T C_1 \quad (5) \quad C_2 = S E_1 \quad (6) \quad \Delta C = (C_2 - C_1) \quad (7) \quad \Delta E = S^T - \Delta C \quad (8)$$

により、誤差誘電率  $\Delta E$  を求め、近似的な誘電率  $E_2$  を、

$$E_2 = (E_1 - \Delta E) \quad (9)$$

により計算し、 $\Delta C$  が  $-\mu < \Delta C < \mu$  の範囲になるまで式(5)~(9)の計算を繰り返し、近似的な誘電率分布を求めた。本研究では  $\mu = 0.05$  とした。

#### 4. 実験

##### 4. 1. 実験装置

実験装置はFig. 2に示した通りであり、フィーダータンク、内径49mmのパイプライン、レシーバタンクおよびルーツブローヤからなる。パイプラインは、長さ4mの鉛直管、バンド管、および斜平管からなり、鉛直管部分には管路吸引口から2mの地点に模擬閉塞部を設け、その下流側直後のパイプライン外周に12個の電極からなるCTセンサーを設けた。

##### 4. 2. 実験条件と実験方法

まず初めにCTの特性を把握するために、直径12mmのポリエチレン性チューブを管路の中心部、中心と管壁の中間地点、および外周付近に挿入しファントム画像を得た。

次に、吸引装置の吸引空気流量を0.019m<sup>3</sup>/s、フィーダの粒子供給量を71.2g/s、142.4g/s、213.6g/sおよび284.8g/sの4種類とし、模擬閉塞部直後の粒子分布を観察した。空気吸引量から求めた管路内の平均気流速度は9.68m/sであり、レイノルズ数は3.22×10<sup>4</sup>で、固気質量比は、3.114、6.228、9.342および12.46であった。模擬閉塞部は、管断面積の1/4、1/2および3/4の割合で管路内部にパテを付着させ、開放面積比  $S$  を0.805、0.500および0.195とした。また、まったくパテを付着させない非閉塞状態 ( $S=1.0$ ) についても行った。それぞれの条件についてTable 1に示した様に便宜上Case1-1からCase4-4とした。粒子はほぼ球形のポリエチレンペレットを用い、その平均粒径は3.26mm、真密度は910kg/m<sup>3</sup>であった。測定は1.0ms毎に100frameを得て、前記の繰り返し法により画像再構成処理を行った。

Table 1 Experimental Conditions

$M_t \backslash S$	1.000 [-]	0.805 [-]	0.500 [-]	0.195 [-]
3.114	Case1-1	Case2-1	Case3-1	Case4-1
6.228	Case1-2	Case2-2	Case3-2	Case4-2
9.342	Case1-3	Case2-3	Case3-3	Case4-3
12.46	Case1-4	Case2-4	Case3-4	Case4-4

S: Open area rate

$M_t$ : Solid air ratio

##### 4. 3. 実験結果

ファントム画像のバックプロジェクション法により求めた誘電率分布  $E$  は、Fig. 3に示した通りであり、チューブの形状と位置を再現していることがわかる。前記の繰り返し計算を行うことで、より精度を上げられるが、ここではその表記を省略している。

各実験条件における結果はFig. 4に示した通りである。これらの図において、粒子が存在しない画素は青色であり、粒子密度が高くなるにつれて青色から赤色へと表示され、粒子群が多く存在する画素は赤色で表される。管内径49mmを32×32画素で分割表示しているので、1画素あたりの管路断面における面積は1.53×1.53mm<sup>2</sup>となる。粒子直径が3.26mmであるので、仮に測定断面に粒子中心部が到着した場合、粒子1個の最大直径は2.13画素を占めることになる。

固気質量比  $M_t$  が3.114と6.228の非常に小さいとき(粒子供給量が少ないとき)(Case\*-1、Case\*-2)では、粒子分布は薄く全体的に現れており、開放面積の割合に関係なく、あまりはっきりとした違いはみられない。しかし、固気質量比  $M_t$  が9.342、12.46と粒子供給量が増えていくにつれて(Case\*-3、Case\*-4)、粒子分布状態が明確に可視化できる。特に、固気質量比  $M_t$  が最大の12.46の場合の方が、 $M_t=9.342$ の場合よりも、より誘電率の高い値が見られる。これは粒子濃度が高いことを意味しリーズナブルな結果といえる。また固気質量比  $M_t$  が比

較的大きな場合において、 $S=1.0$ すなわち閉塞部が存在しない正常状態では、管断面全体的に粒子分布(緑色)が広がっているが、開放面積が減少するにつれて粒子分布が極端に偏ってきている。特に、 $S=0.195$ では粒子分布が下方に偏っていることが定性的に可視化される。

## 5. 結言

本研究により、キャパシタンスCTにより、管路内の固気二相流の粒子分布を詳細に可視化することが可能となり、特に、固気質量比 $M_1$ が9.342よりも大きい場合、その特徴は明確に可視化された。また、擬似的に閉塞部を設けてその直後の流れを観察した場合、粒子の偏りが明確に可視化された。以上のことにより、キャパシタンスCTにより、粉粒体の輸送におけるモニタリング、パイプラインの異常診断の可能性がある。

## 謝辞

本研究は平成11年度科学技術振興事業団(JST)独創的研究成果育成事業によりなされました。また本実験を行うにあたり、日本カノマックス(株)名越正徳氏、日本大学理工学部大学院学生、加藤浩一君および梅津俊之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] 西村浩,越智光昭,武居昌宏,千代田明, 固気二相流におけるベンド管内の最小輸送流速, 日本機械学会論文集B編, Vol.65, No.639 (1999) pp77-83
- [2] 武居昌宏, 越智光昭, 高部洋一, プラグの自然的な形成段階におけるプラグ臨界長さ, 粉体工学会誌, Vol.34, No.6, (1997) 405-410
- [3] 上田寛, 武居昌宏, 趙耀輝, 李輝, 越智光昭, 富田侑嗣, 堀井清之, スパイラルフローを用いた管内壁への低接触化空気輸送, 日本航空宇宙学会誌, Vol.46, No.534(1998) pp393-397
- [4] K.Horii, Y.Matsumae, X.Cheng, M.Takei and B.Hashimoto, An Erosion Resistant Pipe Bend, *Journal of Fluids Engineering ASME*, Vol. 113, No. 149 (1991) pp149-151
- [5] 岩井喜典ほか2名, 医用画像診断装置, pp56, コロナ社 (1988)
- [6] 堀慶一, 藤本哲郎, 川西康平, 西川日出男, 超高速X線CTスキャナシステムの開発(気液二相流ボイド率分布変動計測への適用), 日本機械学会論文集B編, Vol.64, No.617 (1998) pp239-244
- [7] ニューラルネットワークを用いたインピーダンスCT法による気液二相流のボイド率分布測定, 日本機械学会論文集B編, Vol.62, No.593, (1998) pp130-136
- [8] S.M.Huang, A.B.Plaskowski, C.G.Xie and M.S.Beck, Tomographic imaging of two-component flow using capacitance sensors, *J.Phys. E: Sci. Instrum.*, 22 (1989) pp173-177
- [9] Abdullah, M.Z., Quick, S.V. and Dickin, F.J., Quantitative algorithm and computer architecture for real-time image reconstruction in process tomography, *Proc. of the 1<sup>st</sup> Meeting on European Concerted Action on Process Tomography* (1992) pp179-192

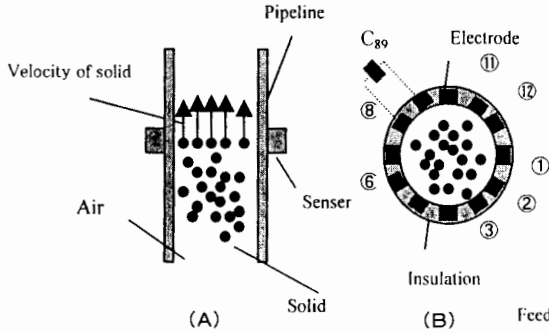


Fig.1 Overview of Process Tomography

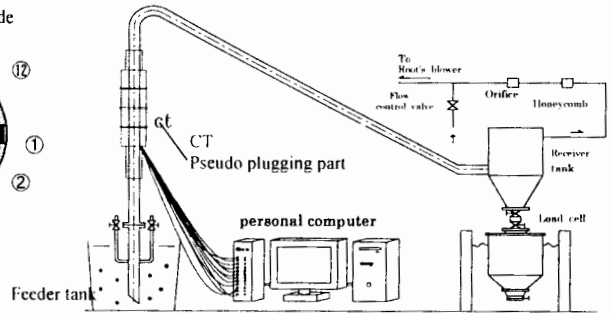
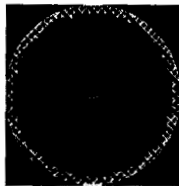
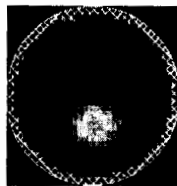


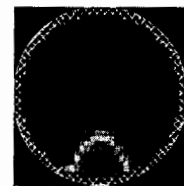
Fig.2 Experimental Equipment



(A)Center

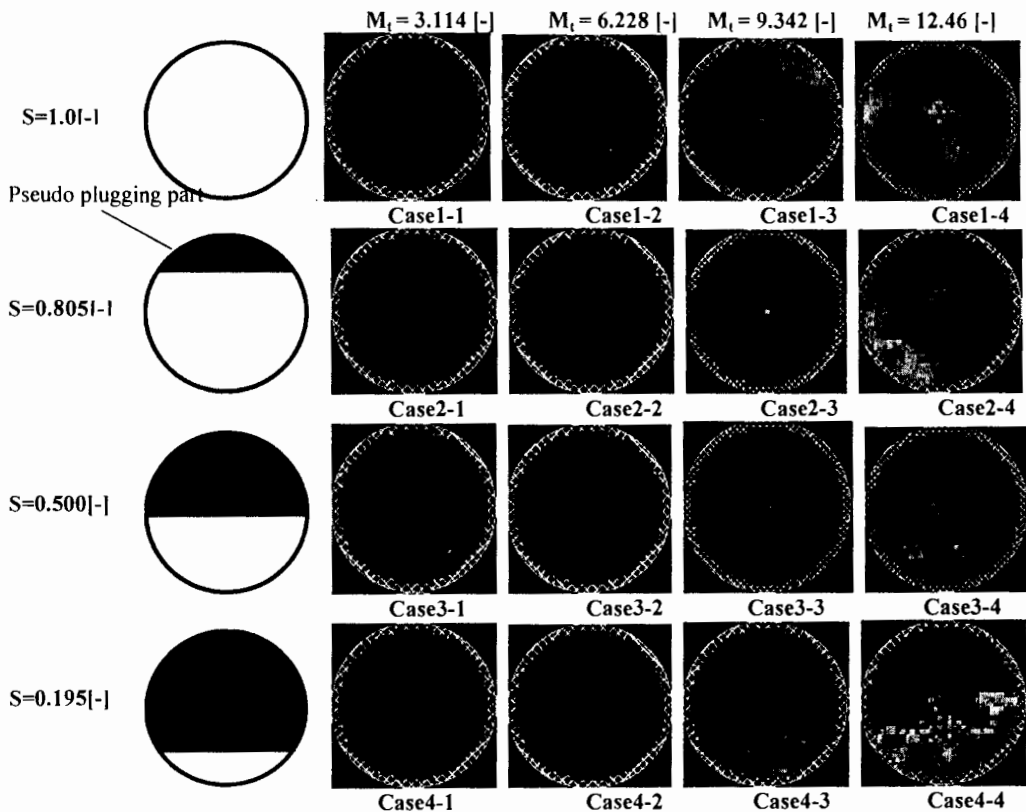


(B) Between center and wall



(C) Near wall

Fig.3 Phantom Image



S : Open area ratio  $M_i$ : Solid-air ratio

Fig.4 Tomography Image

Low Permittivity High Permittivity