B205 CTを用いた管内固気二相流の粒子の観察 —離散ウェーブレットによる画像特徴抽出—

武居昌宏[○] (日大理工) 李輝 (鹿児島大工) 斎藤兆古 (法政大工)

越智光昭 (日大理工) 堀井清之 (白百合女子大) Tomasz DYAKOWSKY (UMIST)

Observation of Particles in Solid Air Two Phase Flow Using CT

—Image Feature Extract with Discrete Wavelets—

Masahiro TAKEI, Hui LI, Yoshifuru SAITO

Mitsuaki OCHI, Kiyoshi HORII, and Tomasz DYAKOWSKY

Abstract

Particle distribution in a pipeline has been clearly visualized by capacitance-computed tomography at 10 milli-second intervals. The image is transformed with discrete wavelets multiresolution. The particle distribution just after the plugging point gets partial clearly on the wavelets level 0. This technique contributes to predicting pipeline emergency such as plugging. In the experiments, clay is attached the inside of the pipeline in order to simulate near plugging. The CT obtains the capacitance between 12 electrodes distributed around the outside of the pipeline. The particle and air distributions can be separated because of individual permittivity by the reconstruction technique. The technique calculates the permittivity distribution on the cross section from the capacitance values by an iterative method of inverse problem.

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

1. 緒言

粉粒体のパイプライン空気輸送[1]においては、閉塞などのパイプライン異常を未然に回避する必要がある。そのためモニタリング手法として、筆者らはコンピュータッドトモグラフィー(CT) [2]を用いて、管内粒子挙動を直接リアルタイムで可視化する手法について模索している[3]。その手法は、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、各電極間のキャパシタンスを 10ms 程度の短時間で測定し、逆問題の画像再構成法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。しかしながら、それは逆問題による近似画像でばけており、直接的にパイプライン異常を判断することは難しい。

そこで本研究は、離散ウェーブレット多重解像度をその CT 画像に適用して特徴抽出を行い、パイプラインの異常診断の可能性について検討することを目的としている。

2. 離散ウェーブレット多重解像度

本研究においては、キャパシタンス CT により得られた 32×32 ピクセルからなる粒子誘電率 2 次元分布画像 $\mathbf{E}$ に対して、離散ウェーブレット多重解像度を施す。2 次元離散ウェーブレット変換の行列表現は、

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{E}\mathbf{W}^T$$

で表させ、 $\mathbf{S}$ はウェーブレットスペクトラム、 $\mathbf{W}$ はアナライジングウェーブレット行列、 $\mathbf{W}^T$ は $\mathbf{W}$ の転置行列である。その逆変換は、

$$\mathbf{E} = \mathbf{W}^T \mathbf{S} \mathbf{W}$$

となり、その多重解像度は、 $\mathbf{W}$ に 4 次ドビッシー基底を用いた場合、

$\mathbf{E} = \mathbf{W}^T \mathbf{S}_0 \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{S}_1 \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{S}_2 \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{S}_3 \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{S}_4 \mathbf{W}$ のように、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。4 次ドビッシー基底のフーリエ変換のパワースペクトラム密度は、Fig. 1 に示した通りであり、横軸は後述の管路内径 49mm を基準としている。この図から各ウェーブレットレベルは、空間周波数に対して一種のフィルターの役割を果たしている。すなわち、本研究の基本コンセプトは、粒子塊が大きい部分のみを低レベル画像に出現させ、その特徴抽

出により、閉塞状態を特徴づけしようとするものである。

3. プロセスキャパシタンス CT

本研究で用いた CT はプロセスキャパシタンス CT と呼ばれているものであり[2]、その断面図は Fig. 2 に示したように、パイプラインの外周にセンサを配置し、センサ内部は絶縁物質により分離された 12 個の電極からなる。そのキャパシタンス C と誘電率 ε との関係は、ガウスの法則より、

$$C_{i,j} = -\frac{\varepsilon_0}{V_c} \oint_{r \in r_j} \varepsilon(\mathbf{r}) \nabla V_i(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} \quad (1)$$

であり、ここで i は基準電極番号、 j は対極電極番号を示し、 i は 1 から 11 までの値をとり、 j は $i+1$ から 12 までの値をとる。 $C_{i,j}$ は i と j 番目電極間のキャパシタンス、 ε_0 は真空誘電率、 $\varepsilon(\mathbf{r})$ は管路断面における誘電率、 $\mathbf{r}$ は管路断面内の位置ベクトル、 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管路内のポテンシャル分布である。(1)式のままでは、 $V_i(\mathbf{r})$ が未知であるので、

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

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 $V(\mathbf{r})$ を求め、(1)式の定数と $\nabla V(\mathbf{r})$ とからなるセンシティビティマップ行列 $\mathbf{S}$ を得ると、(1)式より誘電率分布行列 $\mathbf{E}$ とキャパシタンス行列 $\mathbf{C}$ は、

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

となる。式(3)において 12 個の電極用いた場合、 $\mathbf{C}$ は 66×1 行列、管路断面を $32 \times 32 = 1024$ 個の解像度(メッシュ数)で表現すると、 $\mathbf{S}$ は 66×1024 行列、 $\mathbf{E}$ は 1024×1 行列となる。ここで、 $\mathbf{C}$ と $\mathbf{S}$ から $\mathbf{E}$ を求める画像再構成は不適切な逆問題となる。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[4]の繰り返し計算を用いて画像再構成を行った。

4. 実験

実験装置は Fig. 3 に示した通りであり、管内径 49mm、吸引空気流量 0.019m³/s、粒子供給量 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 3.22×10^4 で、

Table1 に示したように、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 1.0、0.805、0.500、0.195 とした。粒子はほぼ球形のポリエチレンベレットを用い、その平均粒径は 3.26mm、真密度は 910kg/m³ であった。100Hz の間隔で得た画像を前記の画像再構成処理を施し、離散ウェーブレット多重解像度を計算した。

Fig.1 Fourier Spectrum of 4th Dabechies Analyzing Function

Fig.2 Cross-view of CT Fig.3 Experimental Equipment

Table 1 Experimental Condition

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

S : Open area ratio M_t : Solid-air ratio

5. 実験結果と考察

各実験条件において得られた画像の一例は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黒色であり、粒子密度が高くなるにつれて黒色から白色へと表示され、最も密度が高い画素は白色で表される。管内径49mmを32×32画素で分割表示しているため、1画素あたりの管路断面における面積は1.53×1.53mm²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 が小さい3.114のとき(Case*-1)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、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 が増えていくにつれて(Case*-3、Case*-4)、粒子分布状態が明瞭に可視化できる。

次に、代表として Case2-1、Case1-4 および Case4-4 の各画像について離散ウェーブレット多重解像度を求め、そのレベル 0 から 2 までを表したものは Fig. 5 に示した通りである。レベル 0 では大きな粒子塊の分布を示し、レベル

が高くなるにつれて、小さな粒子塊の分布を示している。例えば Case2-1 や Case1-4 の非閉塞時のレベル 0 では、その濃度の違いはあるものの、粒子分布の偏りは観察できない。しかし、Case4-4 の閉塞時のレベル 0 では、粒子塊の偏りが容易に判断できる。一方、高レベル例えば Case2-1 のレベル 2 に着目すると、元画像の小さな粒子塊の分布が抽出されていることがわかる。

Fig.4 Tomography Image

Fig.5 Multiresolution of Tomography Image

6. 結言

擬似的に閉塞部を設けたパイプライン内の粒子塊分布を観察し、その画像に対して離散ウェーブレット多重解析を行った結果、閉塞に近いパイプラインでは、レベル 0 にその偏りが明確に可視化された。この多重解像度のレベルにける粒子塊の偏りを評価することにより、粒子塊の大きな偏りから生じる閉塞異常は、より明確に判断できる可能性がある。今後は相関係数などを用いて、より定量的な判断基準について研究を進める予定である。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) 名越正穂氏にご協力いただきました。

参考文献

- [1] 西村浩他, 日本機械学会論文集, Vol.65, No.639 (1999) pp77-83
- [2] S.M.Huang et al., *J.Phys. E. Sci. Instrum.*, 22 (1989) pp173-177
- [3] 武居昌宏他, 粉体工学会春期研究発表講演会, (2000) pp153-154
- [4] Abdullah, M.Z. et al., *Proc. of the 1st Meeting on European Concerted Action on Process Tomography* (1992) pp179-192