

# W12-(3) 固気二相流 CT 画像の三次元離散ウェーブレット解析 3D Wavelets Analysis to Gas-Solid Two Phase CT Image

○田中 賢 (日本大学)      武居昌宏 (日本大学)      越智光昭 (日本大学)  
齋藤兆古 (法政大学)      堀井清之 (白百合女子大学)

Ken TANAKA, Nihon University      Masahiro TAKEI, Nihon University      Mitsuaki OCHI, Nihon University  
Yoshifuru SAITO, Hosei University      Kiyoshi HORII, Shirayuri College

A concept to extract dominant particle density in various time-space frequency levels on a pipeline cross section has been launched using a capacitance-computed tomography and three-dimensional discrete wavelets transform. With this concept, particle density at the downstream of a bend pipe is decomposed to the time-space levels. As a result, this concept enable to realize the time and position when and where particle density with dominant time-space levels pass through the pipeline.

Keyword : 3D Wavelet, Capacitance CT, Solid Air Two Phase Flow

## 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ために、粒子分布のモニタリングが非常に重要であり、そのための手法として、コンピュータドトモグラフィ(CT)[2]を用いた可視化手法が開発された。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、その画像から特徴的な粒子分布を把握することが難しかった。

そこで本研究は、三次元離散ウェーブレット多重解像度をそのCT画像に適用し、管路固気二相流粒子分布の解析をし、特徴抽出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により得られた空間ピクセルの32×32と時間ピクセル64ピクセルからなる粒子誘電率3次元分布画像Eに対して、離散ウェーブレット多重解像度を施す。3次元離散ウェーブレット変換の行列表現は、

$$[E_{lmn}]^T = E_{nlm}$$

$$[E_{nlm}]^T = E_{lmn}$$

$$[E_{mnl}]^T = E_{lmn}$$

$$S = [W_n \cdot [W_m \cdot [W_l \cdot E]^T]^T]^T \quad (1)$$

で表され、Sはウェーブレットスペクトラム、Wはアナライジングウェーブレット行列、W<sup>T</sup>はWの転置行列である。SとEはそれぞれ、1×m×nの三次元CT画像行列である。また、W<sub>l</sub>、W<sub>m</sub>、W<sub>n</sub>は、それぞれ、1×1、m×m、n×nのウェーブレット変換行列である。その逆変換は

$$E = [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot S^T]^T]^T]^T \quad (2)$$

となり、その多重解像度は、Wに2次ドビッシー基底を用いた場合、

$$E = [[W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot S_0^T]^T]^T]^T + [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot S_2^T]^T]^T]^T + \dots + [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot S_5^T]^T]^T]^T + [W_l \cdot [W_m \cdot [W_n \cdot S_6^T]^T]^T]^T] \quad (3)$$

のように、低周波成分(レベル0)から高周波成分(レベル6)として正規直交空間で分解することができる。

## 3. 実験

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.1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。この内の一組の電極対が一つのコンデンサと見なすことができ、電極間に蓄積される電気をキャパシタンスとして測定する。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、

$$C_{i,j} = -\frac{\epsilon_0}{V_c} \int_V \epsilon(r) \nabla V_i(r) \cdot dr \quad (4)$$

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、C<sub>i,j</sub>はiとj番目電極間のキャパシタンス、ε<sub>0</sub>は真空誘電率、ε(r)は管路断面における誘電率、rは管路断面内の位置ベクトル、V<sub>c</sub>はi電極にかかる電圧、V<sub>i</sub>(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。(4)式のままで、V<sub>i</sub>(r)が未知であるので、

$$\nabla \cdot [\epsilon(r) \nabla V(r)] = 0 \quad (5)$$

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(r)を求め、(4)式の定数と∇V(r)とからなるセンシティブリティマップ行列Seを得て、(1)式を整理し、行列表示にすると、

$$C = SeE \quad (6)$$

となる。式(6)において12個の電極用いた場合、Cは66×1行列、管路断面を32×32=1024個の解像度(メッシュ数)で表現すると、Seは66×1024行列、Eは1024×1行列となる。ここで、CとSeからEを求める画像再構成は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用いて近似的に誘電率画像を求めた。

実験装置はFig.2に示した通りであり、管内径50mm、吸引空気流量0.034m<sup>3</sup>/s、粒子供給量0.54kg/s、100Hz間隔で連続150frame観測した。空気吸引量から求めた管路内の平均気流速度は16.8m/sであり、レイノルズ数は4.71×10<sup>4</sup>で、粒子は直径3mmの球形のポリエチレンペレットを用いた。

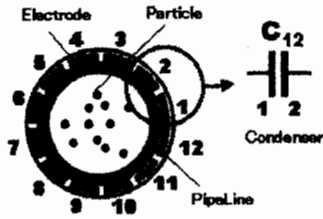


Fig.1 Cross-View of CT Sensor

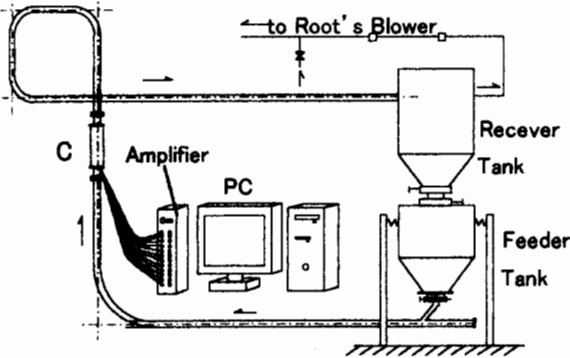


Fig.2 Experimental Equipment

#### 4. 解析と考察

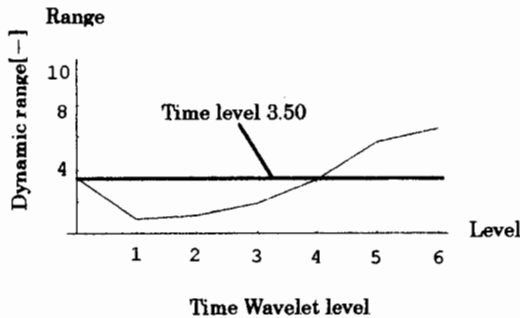
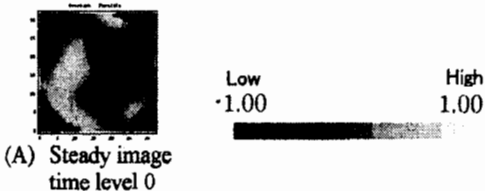


Fig.4 Dynamic range at each wavelet

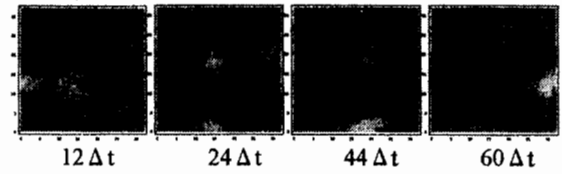
実験によって得られた 64frame 連続画像に対して離散ウェーブレット多重解像度を行いレベル0からレベル6に分類した。粒子密度分布のピークが現われている時間、空間周波数帯域には、支配的な粒子分布の時間空間位置を検出できる。

時間ウェーブレットレベルで最大値から最小値を引いたダイナミックレンジを Fig.4 に示す。時間レベル1で最小になり、時間レベル6で最大となる。この図から、レベル5およびレベル6のダイナミックレンジがレベル0よりも高いことがわかる。定常粒子密度を示すダイナミックレンジは3.50である。このことから、支配的な粒子密度はレベル5とレベル6の影響をうけると考えられる。

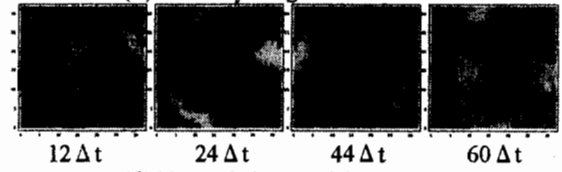
この研究ではダイナミックレンジの高いレベル5とレベル6の粒子密度の特徴に着目した。Fig.5のFig.5(A)はレベル0、Fig.5(B)はレベル5、Fig.5(C)はレベル6の代表的な画像である。粒子が存在しない画素は黒色であり、粒子密度が高くなるにつれて黒色から白色へと表示される。また、レベル0では定常な粒子。レベルが高くなるにつれて、より非定常な分布を示している。



(A) Steady image time level 0



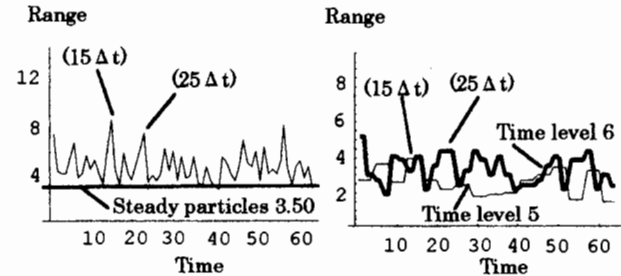
(B) Unsteady image of time level 5



(C) Unsteady image of time level 6

Fig.5 Steady and unsteady particle density image

粒子分布の定常と非定常成分のダイナミックレンジは、Fig.6(A)に示されている。この図から、例えば、 $15 \Delta t$ と $25 \Delta t$ にピークが存在する。時間レベル5とレベル6の粒子密度の時間変化はFig.6(B)に示す。 $15 \Delta t$ の最初のピークは特に時間レベル5と時間レベル6に影響をうける。しかし、 $25 \Delta t$ のピークは、時間レベル6に影響をうける。



(A) Dynamic range of steady and unsteady particles

(B) Dynamic range time levels 5 and 6

Fig.6 Dynamic range of steady and unsteady particle density to time

Fig.7は、時間レベル6の画像に対して2次元ウェーブレット多重解析を施し、空間レベルと時間との関係を示している。空間レベルが高くなるほどより大きな粒子塊を示す。

この図から、例えば $15 \Delta t$ では、空間レベル5および空間レベル3に高い値が示される。

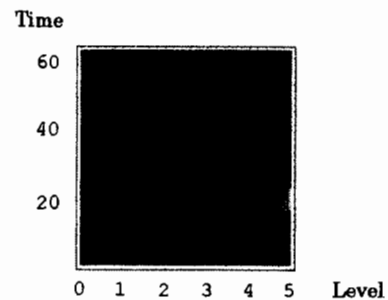


Fig.7 The most dominant level6 in space

#### 5. 結言

キャパシタンス CT と三次元離散ウェーブレット多重解像度を用いて粒子分布の画像を解析した。

粒子密度の支配的な時間レベルと空間レベルを把握できた。さらに、その特徴的な粒子分布を示す事ができた。

#### 6. 参考文献

- [1]西村浩他,機論 B, Vol.65, No.639 (1999)pp77-83
- [2]S.M.Huang, J.Phys, E:Sci, Intrrum, Vol.22(1989) pp173-177