

# 114 固気二相流の離散値系ウェーブレット逆変換解析 —— 速度ベクトルデータのノイズリダクション ——

○武居 昌宏(日本大学理工学部) 李 輝(鹿児島大学工学部) 越智光昭(日本大学理工学部)  
齊藤兆古(法政大学理工学部) 堀井 清之(白百合女子大学文学部)

## Discrete Inverse Wavelet Transform Analysis for Gas-Solid Two Phase Flow —— Noise Reduction of Velocity Vector Data ——

Masahiro Takei(Nihon Univ.), Hui Li(Kagoshima Univ.), Mitsuaki OCHI(Nihon Univ.)  
Yoshifuru SAITO(Hosei Univ.), Kiyoshi HORII(Shirayuri Women's College)

### Abstract

Air velocity distribution in solid-air two phase flow model has been clearly obtained from particle velocity distribution by discrete inverse wavelet transform. The particle velocity distribution of solid-air two phase flow consists of the exact air velocity and random noise velocity caused by the wake behind the particles. The discrete inverse wavelet transform extracts the exact air velocity from the particle velocity. The discrete wavelet transform collects the vector data of particle velocity in the vicinity of the mother wavelet spectrum. A matrix consisting of the spectrum data near the mother wavelet spectrum is inversely transformed. The matrix reduces the noise data, resulting in the exact air velocity data.

### 1. 緒言

従来から粉粒体を圧縮空気て輸送する管路輸送方式は、効率的な輸送が可能であるため多くの産業で用いられている。このような管路輸送方式の中でも特に低濃度高速輸送方式においては、固気二相流中の粉粒体の速度分布と気流の速度分布との関係を明らかにすることは非常に重要である。筆者らは以前から気流の速度分布を制御することにより、その流体力を受ける粉粒体の挙動を制御することを試みており<sup>1)</sup>、管壁への非接触輸送や低圧損輸送といった未来的な輸送方法の可能性を模索している。そして、固気二相流の速度分布の関係を明らかにすることは、このような未来的な輸送方法の確立に対して大きな指針を与えるものと思われる。

現在までの固気二相流の速度分布の関係を求める方法としては、気流の速度分布から粉粒体の速度分布を求める順問題を解析する手法が一般的に用いられている。しかしながら、このような順問題の解析は、混合比が非常に低い固気二相流においては比較的容易であるものの、混合比が高く多数の粉粒体が輸送される固気二相流状態においては、その解析は非常に困難である。その理由

のひとつとして、完全な球形ではない粉粒体の後方には非定常非対称のウェークが発生し、さらにそのウェークがお互いに干渉し合い、粉粒体近傍の圧力分布は非定常非対称に変化している。その結果、混相流内の粉粒体は非常に複雑な挙動を示す。

本研究においては、従来までの粉粒体と気流との速度分布の関係を、順問題から解明することをせずに、粉粒体の速度分布から気流の速度分布を求める逆問題を用いることを基本的な考えとし、その手段として、離散値系ウェーブレット逆変換を用いたことに大きな特徴がある。そこで、本報告ではその第1ステップとして、速度ベクトルデータのノイズリダクションに焦点を当てた。具体的には、擬似的に作成した粉粒体の2次元速度ベクトルデータに対して、離散値系ウェーブレット変換を行い、マザーウェーブレットスペクトラム周辺の特徴ある成分のみを抽出し、そのデータをウェーブレット逆変換することにより、単相気流の速度ベクトルを類推した。

### 2. 計算モデルの仮定と設定

本研究においては、Fig.1に例示した矩形の輸送管内を粉粒体が輸送されているモデルを考え、解析する領域は点線で示した2次元平面のA面とし、この2次元平面内の気流および粉粒体の速度分布について解析を試みる。粉粒体の速度ベクトルはFig.2に例示したプロセスに従って決定されるものと仮定する。つまり、単相気流中に粉粒体が混入された混相流中では、完全な球形ではない粉粒体の後方には非定常非対称のウェークが発生し、さらにそのウェークがお互いに干渉し合い、その結果、混相流内の粉粒体は非常に複雑な挙動を示す。このような付加的な影響について、2次元平面の各位置における単相気流の速度ベクトルに、粒子混入を起因とするノイズデータが単相気流に付加され、その合成気流速度ベクトルが粉粒体の流体力となると仮定する。すなわち、Fig.2

に例示したように、混相流中の粉粒体の速度ベクトル  $V_p$  は、単相気流の速度ベクトル  $v_a$  と、粉粒体が存在することによる付加的な気流の速度変動ベクトル  $v_{sp}$  の2つから構成された合成気流速度ベクトル  $V_a$  から影響を受けるものであり、単相気流の速度ベクトル  $v_a$  は時間平均的な速度変動を0と見なし、付加的な気流の速度変動  $v_{sp}$  はランダムなノイズ成分とする。そして、その合成気流速度ベクトル  $V_a$  は、次式のように、単相気流の速度ベクトル  $v_a$  に粉粒体が混入したときの気流の変動ベクトル  $v_{sp}$  を加えることにより求められる。

$$V_a = v_a + v_{sp} \quad \text{---(1)}$$

そして、実際の粉粒体の速度ベクトル  $V_p$  は、合成気流速度ベクトルの流体力から求まるので、

$$V_p = K \cdot V_a \quad K \text{は定数} \quad \text{---(2)}$$

で表されると仮定する。

本研究では粉粒体を混入しない場合の単相気流のベクトルデータは Fig. 3(a) に例示したモデル化した旋回流を用いて解析を試みる。このような旋回流は筆者らが以前から研究している流れであり<sup>2-3)</sup>、このような旋回流を用いた管路輸送の特徴についてはすでに報告している<sup>4)</sup>。そして、この旋回流の渦の中心付近の旋回速度を 1.0m/s としている。ノイズデータは Fig. 3(b) に示したように、-0.5m/s~0.5m/s の範囲で変動する乱数により発生させた。さらに、式(2)において、 $K=1$  と仮定すると、実際に観察される混相流中の粉粒体の速度ベクトルデータは Fig. 3(c) に例示した通りとなる。

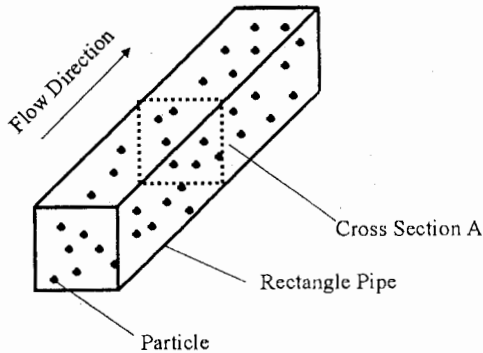


Fig.1 Pipeline transportation model

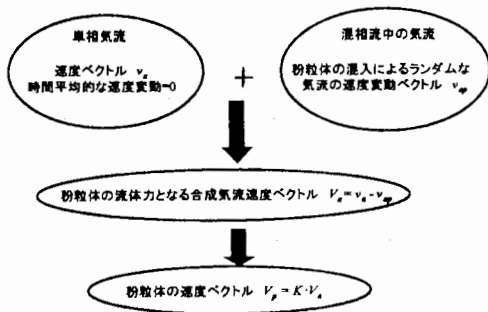


Fig.2 assumption to decide particle velocity in multiphase flow

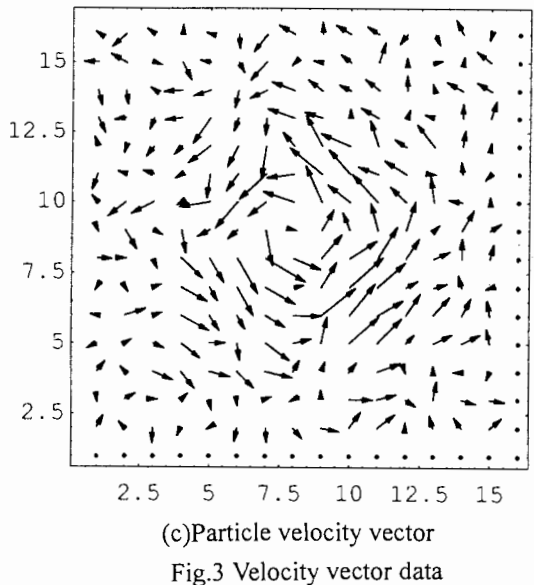
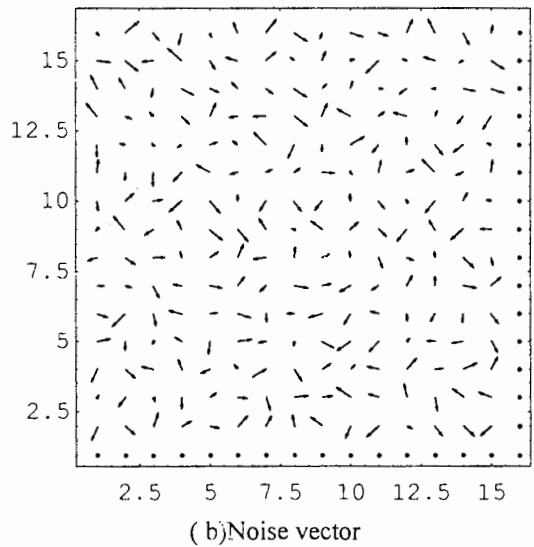
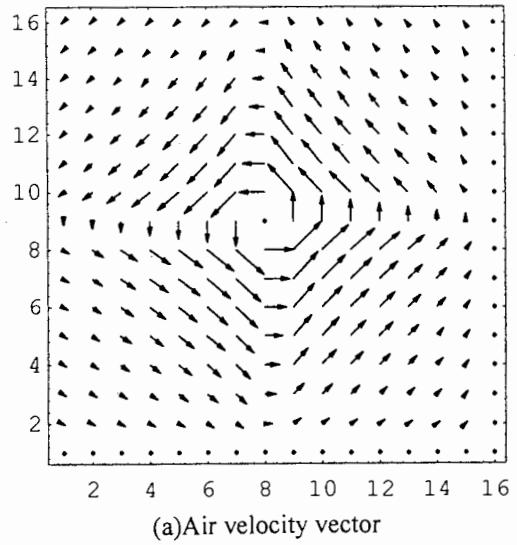


Fig.3 Velocity vector data

3. ベクトルデータ離散値系ウェーブレット変換

ベクトルデータの離散値系ウェーブレット変換<sup>5)</sup>を用いて、粉粒体の速度分布から気流の速度分布を求める方法を次に述べる。まずはじめに、前記の Fig. 3(c)の粉粒体の速度ベクトルデータについて、離散値系ウェーブレット変換を行い、マザーウェーブレットスペクトラム周辺に特徴のある成分を集め、そのスペクトラム周辺の成分のみを抽出する。そして、その抽出された成分からなるデータに対して逆ウェーブレット変換を行い、ノイズデータを除去した単相気流の速度ベクトルを求める。

いま縦方向に  $n$  個、横方向に  $m$  個サンプリングされた 2 次元データが  $n$  行  $m$  列の長方形列  $H$  に与えられているとする。ただし、 $n, m$  は両方とも 2 のべき乗個とする。このデータは 2 次元であるから、縦方向と横方向について離散値系ウェーブレット変換を行う。2 次元離散値系ウェーブレットスペクトラム  $S_2$  は、縦方向のウェーブレット変換について、 $H$  の左から  $n$  行の  $m$  列の基底関数  $W_n$  を掛け算して求め、横方向のウェーブレット変換について、 $H$  の右から  $W_m^T$  を掛け算することで求められ、その  $S_2$  は、

$$S_2 = W_n \cdot H \cdot W_m^T \quad (3)$$

で表せられる。ここで、 $W_m^T$  は  $W_m$  の転置行列を示す。

この 2 次元ウェーブレットスペクトラム  $S_2$  のマザーウェーブレットスペクトラム周辺に特徴のある成分を集め、そのスペクトラム周辺の成分のみを抽出する。具体的には、 $n'$  ( $< n$ ) 行  $n'$  列の部分のみを抽出し、その他の部分を 0 とする行列  $S_2'$  を作る。そして、その  $S_2'$  に対して、離散値系ウェーブレット逆変換を行う。このウェーブレット逆変換は (1) 式の左右から掛け算した変換行列を単位正方行列とすればよいので、

$$H' = W_n'^T \cdot S_2' \cdot W_m \quad (4)$$

で表される。ここで、 $H'$  はもとの  $H$  に対して、特徴のあるデータを含み、すなわちノイズデータを除去した気相のみの速度ベクトルを求めることができる。本研究においては、基底関数としてドビッシー (Daubechies) 基底を用いた。

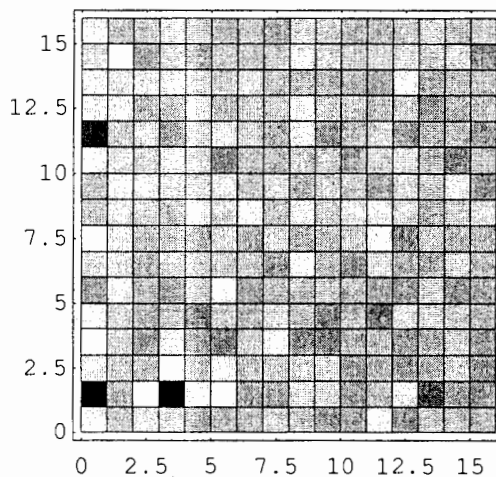
4. 離散値系ウェーブレット解析

4.1. 順変換による解析

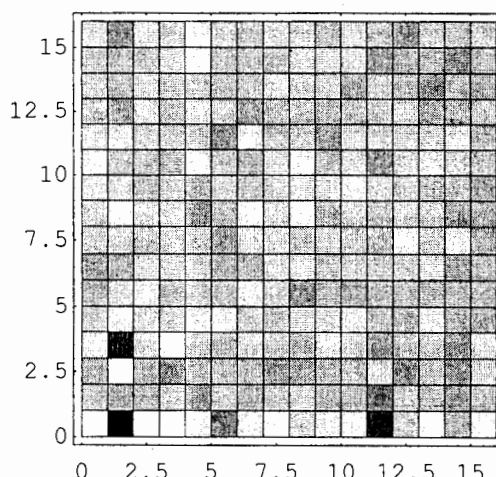
前記 Fig. 3(c) に示した粉粒体の速度ベクトルデータに対して離散値系ウェーブレット変換を行い、そのウェーブレットスペクトラムを求めた。Fig. 4(a) は、そのウェーブレットスペクトラムの  $x$  方向成分の大きさ、Fig. 4(b) は  $y$  方向成分の大きさを示すものである。これらの図では濃淡によりベクトルの大きさを表し、白色に近づくほど大きな値を示す。

さらに、Fig. 5(a) はそのスペクトルベクトルの大きさを示したものであり、また、Fig. 5(b) はそ

のスペクトルベクトルを示すものである。ベクトルデータのウェーブレットスペクトラムは依然としてベクトルであり方向と大きさを持つことがわかる。また、大きなベクトルがマザーウェーブレット近傍に集中しており、この付近を抽出することにより、ノイズリダクションが可能であることを示唆する。

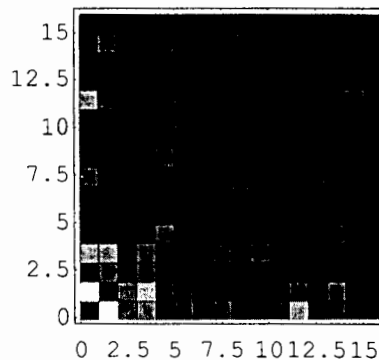


(a)x-spectrum



(b)y-spectrum

Fig. 4 Wavelet spectrum in x and y directions



(a)Spectrum magnitude

Fig. 5 Spectrum magnitude and spectrum vectors

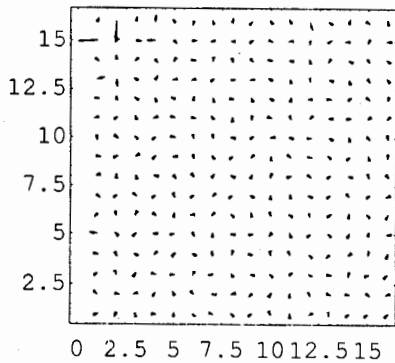


Fig.5 Spectrum magnitude and spectrum vectors  
(b) Spectrum vectors

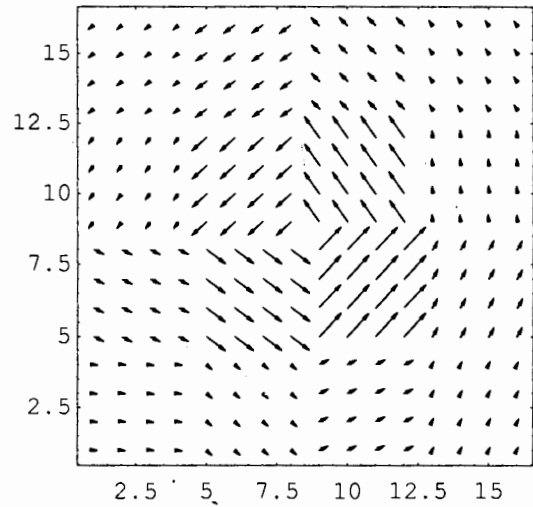


Fig.7 Recovered velocity data ( $n'=4$ )

#### 4.2. 逆変換による解析

前記の Fig. 5(a)において、マザーウェーブレット近傍の  $8 \times 8$  ( $n'=8$ ) と  $4 \times 4$  ( $n'=4$ ) を抽出した2種類の部分行列を用い、その部分行列において他の成分を0とし、すなわち、データを25%と6.25%とに圧縮してウェーブレット逆変換を用いて、単相気流の速度ベクトルデータを再現した。

Fig. 6 はマザーウェーブレット近傍の  $8 \times 8$  ( $n'=8$ ) を抽出した場合の結果であり、また、Fig. 7 は  $4 \times 4$  ( $n'=4$ ) を抽出した場合の結果である。これらの図から、再現された単相気流の速度ベクトルデータは、前記 Fig. 3(c) の混相流内の粉粒体の速度ベクトルデータからノイズ成分が除去され、前記の Fig. 3(a) の単相気流を示す速度ベクトルデータに非常に近くなっていることがわかる。

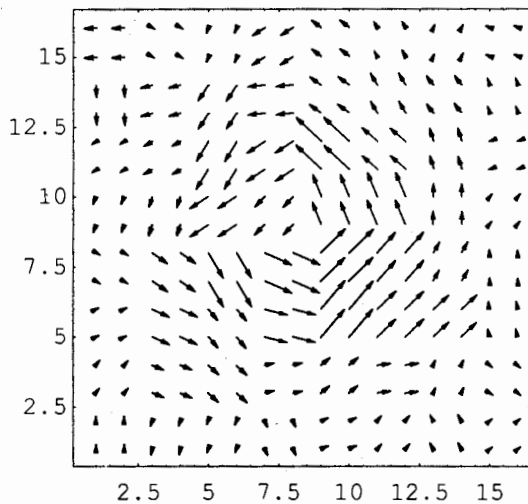


Fig.6 Recovered velocity data ( $n'=8$ )

#### 5. 結論

固気二相流内の粉粒体の速度ベクトルについて離散値系ウェーブレット逆変換を用いて、単相気流の速度ベクトルを推測した。その具体的な方法は、粉粒体の速度ベクトルに離散値系ウェーブレット変換を行い、そのマザーウェーブレットスペクトラム周辺に特徴のある成分を集め、そのスペクトラム周辺の成分のみを抽出した。そして、その抽出された成分からなるデータに対して逆ウェーブレット変換を行い、ノイズデータを除去した単相気流のみの速度ベクトルを求めた。この復元された気流の速度ベクトルと、はじめに仮定した気流の速度ベクトルデータとは、非常によい近似を示した。

#### 参考文献

- 1) Takei, M. et al., ASME Summer Meeting FED, Vancouver, Canada June (1997)
- 2) 武居昌宏ら, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 43 No. 494, pp129-136 (1995)
- 3) Horii, K. et al., *Mechanical Engineering - ASME*, Vol. 112, No. 8, pp68-69 (1990)
- 3) Horii, K. et al. *Trans. of the Japan Soc. for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 28, No. 81, pp123-131 (1985)
- 5) 斎藤兆古, 電気学会論文誌 A, Vol. 116A, No10, pp833-839 (1996)