

I-031

音波による河川の流速分布のリアルタイム可視化

Real-time imaging about flow velocity distribution of the river by the sound wave

矢島 邦昭[†] 三浦 裕介^{††} 遠藤 茉莉香[†] 田山 典男^{†††} 岩橋 政宏^{††††}

Kuniaki YAJIMA Yusuke MIURA Marika ENDOH Norio TAYMA Masahiro IWAHASHI

1 はじめに

現在、日本の各地で異常気象が問題となっており、集中豪雨による河川氾濫などによる家屋の浸水被害が深刻な問題となっている。これらを未然に防ぐには水位や流量などをリアルタイムに監視する必要がある [1]。河川表面の流速を計測する方法として画像解析法があるが、水中の流速を計測することは困難である。また、計測機器を直接河川に投入して計測する方法があるが広範囲の計測には多くの時間を必要とする [2]。

これまでに極少数の音波伝播時間から音速分布を再構成する手法として WMR (Wavelet Model Reconstruction) 法を提案 [3] し、高速に再構成が可能であることをシミュレーションとプールを用いた小規模実験により確認している [4] [5]。

本論では流速の影響を受けて変化する送受信器間での往路と復路の伝播時間を振り分け WMR 法により、流速成分を含んだ音速分布再構成画像から流速分布を再構成する方法について報告する。シミュレーションは、河川設置を考慮して送受信器の配置の検討し、再構成画像の精度について考察を行い、リアルタイム性の可能性とその有効性について報告する。

2 WMR 法

図 1 に示すように 2 次元標本化定理を満たす音速 $v(x, y)$ と流速 $u(x, y)$ が分布している観測領域を考える。この領域に対して音波の送受信機を設置し、領域内を通過するための伝播時間を考える。送信機から受信機までの音波は伝播経路 Γ を直進伝播すると仮定する。

[†] 仙台電波工業高等専門学校 Sendai National College of Technology

^{††} 中部電力 CHUBU Electric Power Co., Inc

^{†††} 岩手大学 Iwate University

^{††††} 長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology

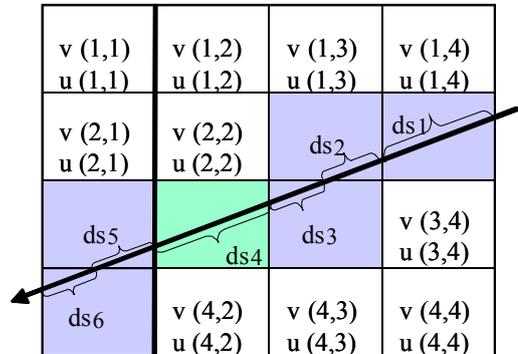


図 1 音波伝播経路

この時、伝播時間 T_k は音速分布と流速分布をもとに式 (1) で表すことができる。添え字 k は、観測領域の送受信器を切替えたときの k 番目の伝播経路である。ds は微小区間、 τ は音線ベクトルである。

$$T_k = \int_{\Gamma_k} \frac{ds}{v(x, y) + u(x, y) \cdot \tau} \quad (1)$$

再構成領域の濃度値 $f(x, y)$ として式 (2) のように音速分布、流速分布の逆数を用いる。

$$f(x, y) = \frac{1}{v(x, y) + u(x, y) \cdot \tau} \quad (2)$$

濃度分布の最大空間周波数が f_m の時、 $2f_m$ 以上の周波数で濃度分布の標本化を行えば標本化定理より、式 (3) のように標本値 $f(x_i, y_j)$ とウェーブレット標本化関数 $W0$ を用いて任意の濃度分布 $f(x, y)$ が復元できる。

$$f(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} f(x_i, y_j) \cdot W(x-x_i) \cdot W(y-y_j) \quad (3)$$

これより式 (1) の伝播時間は式 (4) となる。

$$\begin{aligned} T_k &= \int \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} f(x_i, y_j) \cdot W(x-x_i) \cdot W(y-y_j) ds \\ &\cong \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} C_{ij} \cdot f(x_i, y_j) \quad (4) \\ C_{ij} &= \int_{\Gamma_k} W(x-x_i) \cdot W(y-y_j) ds \end{aligned}$$

各伝播経路における音速分布と伝播時間の連立方程式を行列表現すると式 (5) となる。

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & \dots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & \dots & C_{2N} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ C_{M1} & C_{M2} & \dots & \dots & C_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

t :伝播時間 C :線積分影響係数 f :標本点濃度値

式(5)より伝播時間 T から標本点濃度 f を求めるには、行列 C の逆行列に伝播時間 T を乗じればよい。行列 C は式(4)で示すように、音線数と標本点数から一意に定まるものであり、測定条件に応じて先に計算することが可能である。一般に行列 C は長方形となるため、再構成画像を得るために必要な行列を特異値分解により逆行列の近似解を求めている。WMR法は、行列の乗算(積和演算)のみで高速に再構成画像を取得することが可能である。

3 流速分布の再構成

3.1 流速を考慮した伝播時間の算出

図2(a)のような流れの存在する領域に音波送受信器を設置し伝播時間を計測する場合、音波の伝播経路で音線と流速の関係は図2(b)で示される。

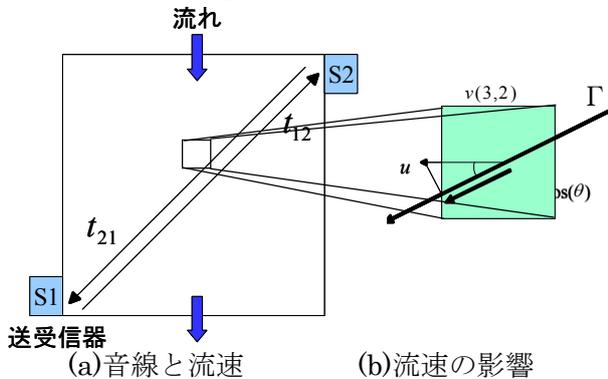


図2 流速を考慮した伝播時間の算出

流速のベクトルと音線との偏角を θ とすると流速の影響を含めた伝播時間は式(6)となる。

$$T_k = \int_{\Gamma_k} \frac{ds}{v(x,y) + u(x,y) \cdot \cos(\theta)} \quad (6)$$

3.2 音速分布と流速分布の再構成

式(6)より伝播経路に対し流速成分より往路と復路で伝播時間が異なり、平均の伝播時間との間に式(7)が成立する。

$$T_{21} < t < T_{12} \quad (7)$$

算出した同経路の伝播時間を分類し、WMR法

により2つの音速分布画像 $f'_f(x,y)$ 、 $f'_s(x,y)$ を再構成する。これより式(8)(9)を用いて音速と流速分布画像を求める。

$$u'(x,y) = \frac{(1/f'_f(x,y)) - (1/f'_s(x,y))}{2} \quad (8)$$

$$v'(x,y) = \frac{(1/f'_f(x,y)) + (1/f'_s(x,y))}{2} \quad (9)$$

4 シミュレーションによる評価

コンピュータシミュレーションにより音速分布、流速分布の原画像を与え、センサ間の伝播時間を求め音速分布を再構成した。原画像サイズは 32×32 [pixel]、8bitデータとした。音速は $1402 \sim 1509$ [m/sec] (水温:0度~30度)の一定の勾配とし、流速は $0 \sim 5$ [m/sec] (激流)の2つのガウス分布が異なる方向の画像とした[7]。音速分布画像では、青から赤へ $1402 \sim 1509$ [m/sec]、流速分布画像では青から赤へ $0 \sim 5$ [m/sec]としている。流速は、矢印を用いて大きさと方向を示している。図3,4にそれぞれの原画像の一部を示す。

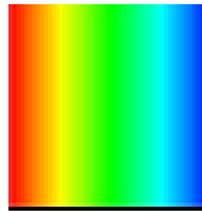


図3 音速分布画像

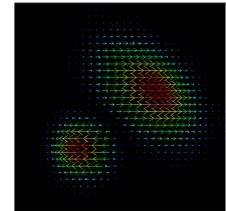
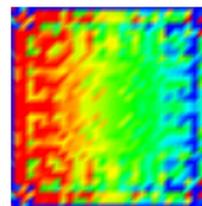
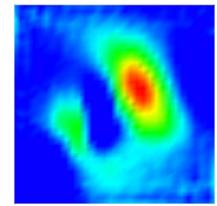


図4 流速分布

画像再構成の計算条件として、一辺に送受信器を32個配置する。同一返上のセンサには送信できないが、残りの3辺に対し送信を行う。これにより、伝播経路は5642本となる。図5に再構成画像を示す。音速分布は原画像と同様に一定勾配の分布を表現している。流速分布もスカラー値を良好に再構成しているが流速方向に伸張している。これは伝播時間の算出のために、経路に沿った積分の影響と思われる。



(a) 音速分布



(b) 流速分布

図5 再構成画像

図6に送受信器の数を変えたときの流速分布の再構成画像を擬似カラーで示す。実際の送受信器

の配置を考慮し、左右の送受信器数より上下の個数を減少させて再構成した。

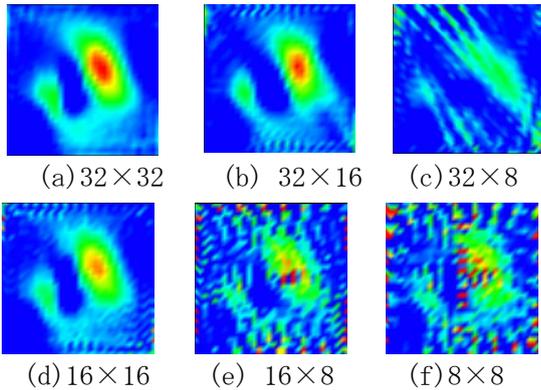


図6 送受信器数を変化させた再構成画像

再構成画像の結果から伝播経路に沿った伝播時間の算出の影響を軽減させるため、式(10)による平均流速を用いて流速分布を再構成した。伝播経路長を Γ 、同一経路で送受信を切替えた時の短い伝播時間を T_f 、長い伝播時間を T_s とする。

$$\frac{L}{T_f} = v' + u', \quad \frac{L}{T_s} = v' - u' \quad \text{より} \quad (10)$$

$$u' = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \left(\frac{L}{T_f} - \frac{L}{T_s} \right), \quad v' = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \left(\frac{L}{T_f} + \frac{L}{T_s} \right)$$

u' , v' より流速、音速分布を WMR 法で再構成した結果を図7に示す。

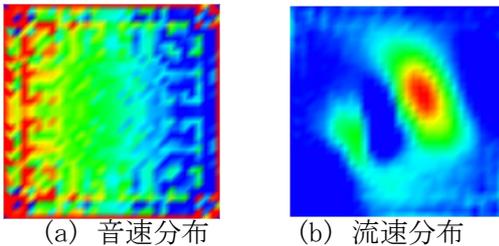


図7 再構成画像

同じ条件で5種類の音速分布、8種類の流速分布を組み合わせた40種類に対して流速分布と音速分布の再構成を行った。40種類の組み合わせによる流速分布の再構成誤差を式(11)に示す正規化誤差分散で求めた結果を表1に示す。

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{NN} (f_n - f'_n)^2}{\sum_{n=1}^{NN} (f_n - F)^2}} \quad (11)$$

表1 センサ数の組み合わせによる

- f_n : 原画像の各標本点分布値
- F : 原画像の平均値
- f'_n : 再構成画像の各標本点分布値

誤差

伝播経路数	画像差分法	平均流速法
32×32(5642)	0.5867	0.5879
32×16(2954)	0.6003	0.6009
32×8(1802)	0.7520	0.7247
16×16(1290)	0.6054	0.6056
16×8(650)	1.2316	0.8334
8×8(266)	21.2985	0.8682

これより送受信器の減少させても、上下左右のバランスにより良好な画像再構成が可能であることがわかる。しかし送受信器を極端に減少させると音速分布や流速分布の確認が困難である。

5 まとめ

流速分布再構成法の検証として、コンピュータシミュレーションにより、音速分布、流速分布を与え、流速の影響を含んだ伝播時間を計算し、WMR法を用いて音速分布画像、流速分布画像の再構成した。コンピュータシミュレーションの結果からは送受信器の数を多くすることで良好な画像再構成が可能となり流速分布を得ることができた。しかし、流速方向に対して超音波送受信器が少ない場合など、流速分布や音速分布が再構成されていなかった。この問題を解決するために、平均流速法を用いると少ない送受信器数でも良好な再構成が可能であることが確認できた。さらに精度を向上させるには、送受信器の数を増やすことや流速方向に音波を送受信できるように送受信の配置位置などを工夫する必要がある。WMR法は、伝播時間計測後行列演算のみで再構成が行えるため、音波による計測を同時に行うことが可能になればリアルタイム計測も可能となる。

参考文献

- [1] 奥島 基良: 日本音響学会誌 38 巻 8 号「河川海洋における流速測定 (1982)
- [2] 海洋音響学会: 「海洋音響の基礎と応用」, 成山堂書店 (2004)
- [3] 矢島, 田山: 少数投影データからの海洋の音速分布画像再構成シミュレーション, 画像電子学会 Vol. 34, No1, (2005. 01), pp2-8
- [4] 矢島, 杜, 加藤, 田山: 海洋トモグラフィーの音速分布画像再構成シミュレーション, 情処理東北支部研究会, 02-4-A17.
- [5] 佐伯, 矢島, 八重倉: 超音波を用いた液体の音速分布の再構成に関する基礎実験, 情処東北支部研究会, 03-5-A5-2.
- [6] 矢島邦昭, 千葉倫子, 片桐伸吾, 田山典男: 超音波を用いた Wavelet 標本化モデルによる画像再構成法の検討 画像電子学会 Vol. 33, No. 3, (2004. 02), pp. 343-349
- [7] 超音波便覧編集委員会: 超音波便覧, 丸善, 1999