

【建設工学研究所論文報告集第 66 号〔報告〕 2024 年 11 月】

## 河川表面流計測に基づく洪水時横断水深分布の推定

### Estimation of Cross-Sectional Profile during Flood Condition

#### by Measurement of River-Water-Surface Flow

吉 村 英 人

Hideto Yoshimura

#### 1. はじめに

河川洪水時の流量観測では無人化・省力化に向けて、電波流速計や画像解析による非接触型手法の活用が進められている<sup>1)</sup>。非接触型手法の場合、流量 $Q$ は計測した表面流速から区分積法に基づき $Q = \sum_i^N \alpha_i U_{s,i} b_i h_i$ （ただし、 $\alpha_i$ は更正係数、 $U_{s,i}$ は表面流速、 $b_i$ は区分幅、 $h_i$ は平均水深、 $N$ は横断面の区分数）として求められる。したがって、正しい流量を得るには表面流速の計測精度だけでなく、流況に応じた更正係数や正確な水深分布を用いることが重要となる。

水深分布には通常平水時あるいは洪水前後に行われる測量結果が用いられるが、大規模な洪水時には河床変動により河床高が変化することもあり<sup>2)</sup>、そのような場合に既知の水深分布を用いると推定流量に誤差が生じる。また、流量観測に限らず洪水時の河床変動を把握することは、洪水時の流れや土砂の移動現象の解明において重要であり、表面流速に加えて、水深分布も把握することが求められている。

洪水時の河川表面の波紋は乱れと波の性質を有することが著者らを含めた研究<sup>3),4)</sup>から明らかになっている。Johnson & Cowen<sup>5)</sup>はその乱れの積分スケールから水深を推定する手法を提案し、その有用性を実験で検証した。また、椿ら<sup>6)</sup>は同手法を実河川に適用している。しかしながら、積分スケールを算出するには高精度かつ高解像度での表面流計測が必要であることや、積分スケールから水深への変換係数の水理条件依存性が不明なことなど、実河川で用いるには課題が多い。

これらに対して、著者らは波紋の波の性質を利用した横断水深分布を推定する手法を新たに提案している<sup>7)</sup>。本手法は STIV (Space-Time Image Velocimetry)<sup>8)</sup>に基づき、河川表面の主流方向の時空間画像から得られる水面変動の波数-周波数スペクトルと波の分散関係の対応から水深を推定するものである。本報ではその実河川への適用結果について報告する。

#### 2. 提案する水深推定手法

##### 2. 1 水面変動の分散関係

河川などの開水路における水面変動は水面下の乱れに起因する移流成分と重力と表面張力を復元力とする波動成分に分類できる<sup>3),4)</sup>。いま、主流方向に平行に伝播する波を考えると移流成分と波動成分の分散関係はそれぞれ次式で表される。

$$\omega_A(k_x) = U_s k_x \quad (1)$$

$$\omega_{GW}(k_x) = U_s k_x \pm \{g k_x \tanh(k_x h)\}^{0.5} \quad (2)$$

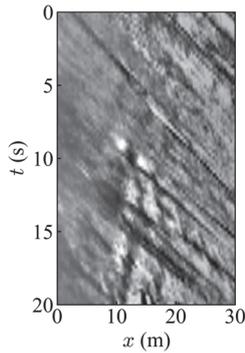


図-1 時空間画像STI

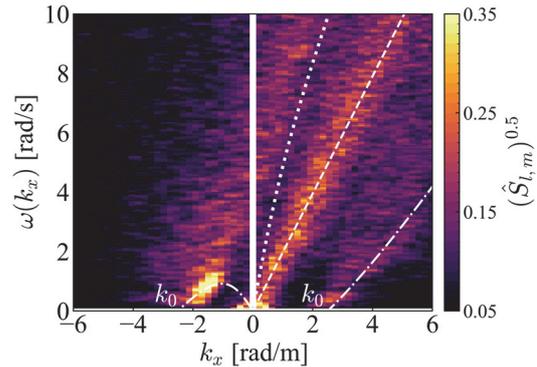


図-2 波数-周波数スペクトル, 破線: 移流 (式(1)), 一点鎖線: 後退波 (式(2) 負符号), 点線: 前進波 (式(2) 正符号)

ここで、 $\omega_A$ と $\omega_{GW}$ はそれぞれ移流成分と波動成分の角周波数、 $k_x$ は主流方向の波数、 $U_s$ は主流方向の平均表面流速、 $g$ は重力加速度、 $h$ は水深である。なお、式(2)では表面張力の影響を無視し、主流方向速度の鉛直勾配が十分に小さい渦なし流れを仮定している。また、右辺第二項の正負の符号は流れに対してそれぞれ下流に伝播する前進波と上流に伝播する後退波を示しており、主流方向には $\omega_{GW}(k_0) = 0$ すなわち $U_s k_0 = \{g k_0 \tanh(k_0 h)\}^{0.5}$ を満たす波数 $k_0$ の定在波が生じる<sup>3)</sup>。提案手法では式(2)の主流方向の分散関係を用いて水深の推定を行う。

## 2. 2 水深の推定手順

河川表面の動画画像から水深を推定する手順を説明する。まず、STIVと同様に幾何補正した画像上で主流方向に平行な検査線を設定し、検査線上の輝度値を時間方向に積み重ねた時空間画像 (STI, Space-Time Image) (図-1)を作成する。ここで、STIはピクセルサイズ $N_x \times N_t$ 、実スケールで長さ $L_x \times$  時間 $T$ の画像とし、各ピクセルの輝度値を $I(x_i, t_j)$ で表す。ただし、 $x_i = i\Delta x$  ( $i = 1, \dots, N_x$ )、 $t_j = j\Delta t$  ( $j = 1, \dots, N_t$ )、 $\Delta x = L_x/N_x$ 、 $\Delta t = T/N_t$ である。次に、STIに窓関数 $W(x, t)$ を掛けた後、二次元離散フーリエ変換 (DFT) を行い、波数-周波数スペクトル、

$$S(k_{x,l}, \omega_m) = |\text{DFT}\{I(x_i, t_j)\}|^2 \quad (3)$$

を得る。ここで、 $k_{x,l} = l\Delta k_x$  ( $l = -N_x/2, \dots, N_x/2 - 1$ )、 $\omega_m = m\Delta\omega$  ( $m = 0, \dots, N_t - 1$ )であり、 $\Delta k_x = 2\pi/L_x$ と $\Delta\omega = 2\pi/T$ はそれぞれ波数と周波数の解像度である。窓関数 $W(w, t)$ には以下を用いた。

$$W(x, t) = \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_m^2}\left[\frac{(x-x_c)^2}{L_x^2} + \frac{(t-t_c)^2}{T^2}\right]\right\} \quad (4)$$

ただし、 $\sigma_m = 1/4$ 、 $x_c = L_x/2$ 、 $t_c = T/2$ である。図-2に波数-周波数スペクトルの例を示す。図にはSTIVで得られた平均表面流速 $U_s^{\text{est}}$ と測量水深 $h^{\text{meas}}$ から決まる式(1)と式(2)の分散関係も示しているが、 $k_x > 0$ の移流(破線)と $k_x < 0$ の後退波(一点鎖線)の分散関係に沿ってスペクトルのピークが生じており、 $k_x > 0$ の前進波と後退波(それぞれ点線と一点鎖線)の分散関係周辺でもスペクトル強度が強くなっている。また、このとき $k_0 \approx 2.5$  rad/mである。したがって、平均表面流速が既知の場合、式(2)の波動成分の分散関係がスペクトルのピークに最も適合する水深を求めることで、水深を推定できると予想される。

次に、水深の最適値をNSP (Normalized Scalar Product)<sup>9)</sup>により探索する。NSPは次式で定義され、

$$M = \frac{\langle G(k_{x,l}, \omega_m, h)S(k_{x,l}, \omega_j) \rangle}{\langle G \rangle \langle S \rangle} \quad (5)$$

これが最大となる水深 $h^{\text{est}} = \arg \max_h (M)$ を最適値とする。ただし、 $\langle \dots \rangle = \sum_{l,m} (\dots)$ であり、 $G$ は次式のガウス分布の重み関数である。

$$G(k_{x,l}, \omega_m, h) = \max(G_\omega, G_k), \quad (6a)$$

$$G_\omega(k_{x,l}, \omega_m, h) = \exp\left\{-\frac{[\omega_m - \omega_{\text{GW}}(k_{x,l}, h)]^2}{\sigma_\omega^2}\right\}, \quad (6b)$$

$$G_k(k_{x,l}, \omega_m, h) = \exp\left\{-\frac{[k_{x,l} - k_{x,\text{GW}}(\omega_m, h)]^2}{\sigma_k^2}\right\} \quad (6c)$$

ここで、 $k_{x,\text{GW}}$ は $\omega = \omega_m$ のとき式(2)を満たす波数である。重み関数 $G$ は $\omega_m \approx \omega_{\text{GW}}(k_{x,l}, h)$ あるいは $k_{x,l} \approx k_{x,\text{GW}}(\omega_m, h)$ で1となり、そこから離れるにつれて0に減衰する関数であり、これを波数-周波数スペクトル $S(k_{x,l}, \omega_m)$ に乗じることで、与えた水深 $h$ の分散関係に近いスペクトル成分のみを抽出することができる。なお、分散関係には式(2)の前進波と後退波の両方あるいはいずれかを用いることができるが、本研究ではスペクトル強度が強く観測された後退波(図-2の一点鎖線)の分散関係を用いた。また、 $\sigma_\omega$ と $\sigma_k$ はガウス分布の幅を指定するパラメータであり、重み関数 $G$ には周波数方向の重みづけ $G_\omega$ と波数方向の重みづけ $G_k$ のいずれかの大きい方を採用した。

河川の水面変動の波数-周波数スペクトルには海洋波とは異なり乱れ成分のピークが強く存在する。そのため、得られた波数-周波数スペクトルをそのまま用いるとNSPが乱れ成分の影響を受けて推定誤差が大きくなる。これを回避するため、波数-周波数スペクトルに対して以下の前処理を行った。まず、DFTで得られたスペクトルに対して式(1)を満たす $(k_x, \omega)$ の $(k_x - \Delta k_x) \sim (k_x + \Delta k_x)$ および $(\omega - \Delta \omega) \sim (\omega + \Delta \omega)$ で $S_{l,m} = 0$ とする。次にスペクトルを $\hat{S}_{l,m} = S_{l,m} / \sum_l S_{l,m}$ として正規化する。最後にノイズ成分を除去するため、正規化スペクトル $\hat{S}_{l,m}$ の各周波数において波数方向のスペクトル平均値を求め、これの2倍より小さい成分を $\hat{S}_{l,m} = 0$ とした。

### 3. 実河川への適用

#### 3.1 観測概要

提案手法の検証には木曾川水系長良川の岐阜市忠節橋下流を撮影した動画(解像度: 1920×1080 pixel, フレームレート: 30Hz)(図-3)を用いた。撮影日時は2023年8月16日の出水時における18時20分からの10分間であり、このときの水位は14.46 T.P. m, 最大水深は6.03 mであり、西向き1.34 m/sの風が吹いていた。対象地点では2023年1月と2024年1月に横断測量が行なわれているが、両者を比較したところ河床高に有為な差はみられなかった。また、出水中の無次元掃流力は平均0.07であり、多少の土砂移動が生じていた可能性はあるものの、河床変動量は小さいと考えられる。さらに、2023年はこれ以降大きな出水は生じていないことから、本研究では推定した水深を2024年1月の横断測量結果と比較した。

検査線は図-3に示すように左岸から15 m間隔で14本設置した。STIのサイズは $L_x \times T = 31.4 \text{ m} \times 120 \text{ sec}$ とし、10分間の動画から時間方向に75%オーバーラップさせて抽出したSTIごとにDFTを実施し、その平均値から波数-周波数スペクトルを得た。STIVにより表面流速 $U_s^{\text{est}}$ を求めた後、NSPにより水深 $h^{\text{est}}$ を探索した。水深は0.5~6.5 mの範囲で0.1 mずつ増加させて探索した。式(6)の重み関数 $G$ のパラメータは周波数方向は $\sigma_\omega = 0.5\Delta\omega$ で固定とし、波数方向は $\sigma_k = 0.5\Delta k_x, \Delta k_x, 1.5\Delta k_x$ と変化させて推定結果に与える影響を調べた。STIVにはHydro-STIV<sup>10)</sup>を用いた。

#### 3.2 推定結果

図-4に動画撮影日時の水位と推定された水深 $h^{\text{est}}$ から換算した河床高の分布を測量結果と比較して示す。推定結果は $\sigma_k$ によらず、いずれも全体の分布傾向を捉えているが、推定精度は $\sigma_k$ により異なる。 $\sigma_k = 0.5\Delta k_x$ の場合には4番、5番および8番の検査線で明らかな異常値が算出されている。 $\sigma_k = 1.5\Delta k_x$ の場合には2番および3番の検査線で他ケースよりも過大に推定されているが、4番、5番および8番の異常値は改善されている。一方、 $\sigma_k = \Delta k_x$ の場合には5番の検査線で異常値が算出されているものの、それを除けば全体的に他ケースよりも推定精度の高い結果が得られている。このときの推定精度は、一部の異常値と外れ値を除けば、全体的には20%以下の誤差で推定ができており、それらの誤差の標準偏差は約0.4 mと航空レーザー測深で求められる誤差0.3 mと同程度であった。

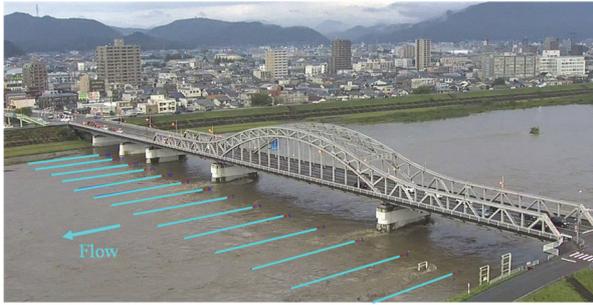


図-3 撮影画像と検査線 (2023/8/16 18:20)

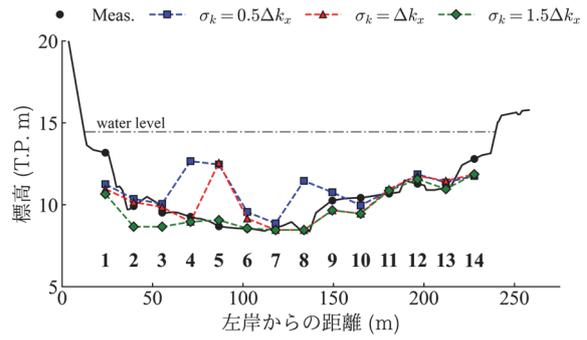


図-4 水深分布の推定結果

4. おわりに

本報では、著者らが提案した河川表面流計測に基づく洪水時の横断水深分布の推定手法を示し、その実河川への適用結果を報告した。推定された水深は一部の異常値を除けば 20%以下の誤差で測量水深と一致しており、その有用性を示した。提案手法は計測が困難な洪水時の水深分布の把握を可能とし、洪水時の流れや土砂の移動現象の解明への貢献も期待できる。なお、提案手法とその検証の詳細については文献<sup>7)</sup>を参照されたい。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 河川情報企画室：非接触型流速計測法の手引き（案），2023年3月。
- 2) 工藤俊，萬矢敦啓，小関博司，笹田俊治，中津川誠：洪水時の河床変動を考慮した流量の推定，土木学会論文集G(環境)，Vol. 72, No. 5, p. I\_313-I\_320, 2016。
- 3) 谷昂二郎，藤田一郎：実河川における自由水面の支配的挙動，土木学会論文集B1(水工学)，Vol. 75, No. 2, p. I\_637-I\_642, 2019。
- 4) Yoshimura, H. and Fujita, I.: Investigation of free-surface dynamics in an open channel flow, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 58, No. 2, pp. 231–247, 2020。
- 5) Johnson, E. D. and Cowen, E. A.: Remote monitoring of volumetric discharge employing bathymetry determined from surface turbulence metrics, *Water Resources Research*, Vol. 52, No. 3, pp. 2178–2193, 2016。
- 6) 椿涼太，加藤敦貴：実河川の可視化表面流速分布データを利用した水深分布の推定に関する研究，河川技術論文集，Vol. 26, pp. 143–148, 2020。
- 7) 吉村英人，椿涼太，大森嘉郎，藤田一郎：河川表面の時空間画像を用いた波の分散関係に基づく横断水深分布の推定，土木学会論文集，Vol. 81, No. 16, 2025 (Accepted)。
- 8) Fujita, I., Omori, Y., Watanabe, K., Iguchi, M., Hasegawa, M. and Yoshimura, H.: Estimating surface velocity coefficient from entropy theory for STIV discharge measurements, *New Waves in Hydrometry*, Vol. 1, pp. 17–35, 2024。
- 9) Smeltzer, B. K., Aesøy, E., Ådnøy, A. and Ellingsen, S. Å.: An improved method for determining near-surface currents from wave dispersion measurements, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 124, No. 12, pp. 8832–8851, 2019。
- 10) Hydro-STIV HP: <https://hydrosoken.co.jp/service/hydrostiv.php>

著 者

吉村 英人 研究員，博士（工学），河川工学