

平水時と洪水時の流速・流量の推定におけるマイクロ波エコー画像のSTIV解析の適用性

新潟大学大学院 自然科学研究科
新潟大学大学院 自然科学研究科
新潟大学 ビックデータアクティベーション研究センター
新潟大学 災害・復興科学研究所

学生会員 ○大川原 大智
学生会員 大原 由暉
正会員 茂木 大知
正会員 安田 浩保

1 はじめに

河川の流量は、河川計画の立案や洪水時の危機管理などの治水の観点と生態系の保全などの環境の観点における基本的な物理量である。このため、河川工学においては流量の把握を非常に重要視する。現在の流量観測の方法は、低水流量観測と高水流量観測に大きく分けられ、低水流量観測は、観測者が直接、水深と流速を計測する流速計測法、高水流量は浮子計測法が常用される。近年では、流量の推定には、ADCP¹⁾等の計測機による直接的な流速の測定や、ビデオ画像をSTIV解析²⁾やPIV解析³⁾などの画像解析から流速を求めた上で流量の推定が試行されている。しかし、ADCPを用いる方法は一定以上の流速となると安全な測定が困難となるという運用上の制約がある。また、我が国の洪水は昼夜を問わずに数時間から数日間ほど継続するが、ビデオ画像を用いる方法は、一定以上の照度を必要とし、夜間の性能が著しく低下する他、見通し距離が200 mほどとなる制約がある。

洪水時の観測の理想的な要件は、昼夜問わずに時間的に連続かつ平面的な観測である。しかし、現状ではこれら要件を満たす方法は未確立である。このような技術的な背景から、推定精度が問題視されているにも関わらず、現在においてもなお流量と連続的観測が可能な水位との関係を表すH-Q曲線が常用されている。H-Q曲線の関数には最小自乗法から導いた回帰式が用いられる。しかし、この回帰式は非常に限定的な観測値に基づくものである上、ある時期における河道断面の形状において決定されるものであるため、その信頼度は十分とは言えない。ベイズ推定⁴⁾を用いたH-Q曲線の推定も実施されているが、その信頼度の問題の本質的な解決はできない。

現時点における流量の把握における問題点はいくつかあるが、その一つは、洪水時の流速は浮子を用いて日中に1時間ごとに空間的に非常に疎に測定されるため、流速の測定値が非常に少なく、その精度が不十分なことである。この問題は、昼夜問わずに時間的に連続かつ平面的な観測ができれば大きく改善できる。著者らの研究グループでは、

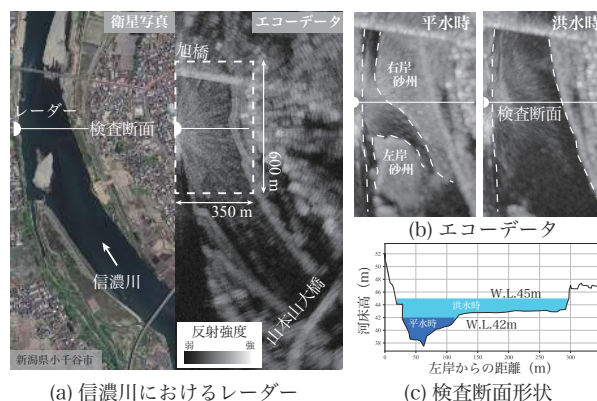


図-1: 新潟県小千谷市におけるマイクロ波レーダー概要

可視光に依存しないため昼夜連続して均質な観測を半径数kmの広範囲を数秒間隔で観測できる地上マイクロ波レーダーを河川の観測に適用し⁵⁾、水面のエコー画像のSTIV解析による流量推定の可能性を示している⁶⁾。しかし、流量の推定に対する適用性の確認は洪水ピーク時のみに限られ、平水時の適用性は不明である。また、洪水時のエコー画像の処理にも検討の余地が残る。本研究では、マイクロ波の水面のエコー画像のSTIV解析により、平水時と洪水時のそれぞれにおける流速と流量をどれほどの精度で推定できるかについて調べた。

2 地上マイクロ波レーダーおよび観測概要

本研究は、信濃川中流部にあたる新潟県小千谷市を対象地点として、マイクロ波レーダーを設置し観測を実施した(図-1-(a))。本研究で用いたマイクロ波レーダーは、レーダーにより発射されたマイクロ波のエコー強度の空間分布を数秒毎に記録できる。記録したエコー強度の空間と時間のそれぞれの分解能は、半径1.5 kmの範囲を空間分解能約1.84 m、時間分解能1.25秒である。このエコー強度を輝度と対応させた画像(以下、エコーデータと称す)より水面の動態を把握できる(図-1-(a))。数秒毎に記録されるエコーデータを時系列に見ると、水面の動態を確認できる。本研究では、この動態は表面流速と対応するものと仮定し、以降の解析を実施した。

本研究における対象期間は、最大水位が 45.11 m を記録した 2022 年 9 月 19 日から 25 日の約 6 日間エコーデータである。最大水位 45.11 m は、対象地点における平水時水位が 42 m 程度であり、通常時の水位から 3 m 程度上昇しており、年に 1 回程度の高水位である。また、20 日 19 時には水位が 43.5 m まで上昇した後、平水位まで低下、その後再び水位が上昇し 24 日 15 時に最大水位を記録しており、短期間の連続した 2 回の水位上昇の特徴がある。この間、1.25 秒間隔の連続したエコーデータが取得できており、その例として、平水時（水位 42 m）と洪水時（水位 45.11 m）のそれぞれのエコーデータを図-1-(b) に示す。

本研究では、国土交通省の実施する横断測量における基準断面（図-1 内に示す）において流量の推定をした。2022 年 7 月時点における、検査断面の断面図を図-1-(c) に示す。この断面は、左岸側が最深河床となり、右岸側には砂州が形成されているため、平水時は左岸に流れが偏っている。そのため、水位が 43 m を超えると右岸砂州上にも流れが発生する。

3 レーダーによる流速・流量推定手法

本章では、本研究における地上マイクロ波レーダーによる河川流量推定方法について述べる。本研究の解析は、既往研究と概ね同一の条件下で実施した。そのため、解析条件に関しては異なる点のみを記述し、その他の条件については詳細を省略する。未記載の条件については、既往研究⁶⁾を参照されたい。

表面流速の推定には、流下方向流速が推定可能な STIV 解析²⁾⁷⁾を用いた。STIV 解析は、流下方向へ検査測線を設定し、その測線から得られる時空間画像において輝度の移動により発生する縞パターンの傾きを計算することで表面流速を測定する画像解析の一つである。

3.1 エコーデータの直交座標変換

レーダーにより取得されるデータの測定点は、極座標形式で設定されるため、一般的な画像解析を実施するには直交座標形式への変換とそれに伴う補間が必要となる。既往研究⁶⁾では、その補間には全変動の最小化による補間をしているが、計算時間の都合上、本研究では、周辺の測定点の平均値より補間を実施した。この違いによる本解析結果への影響がないことは、確認している。

3.2 エコーデータに対する STIV 解析による流速推定

直交座標変換されたエコーデータに対して、STIV 解析を実施し流速を推定する。既往研究⁶⁾では、洪水ピーク時の流量推定に最適となる解析を実施したが、平水時には解

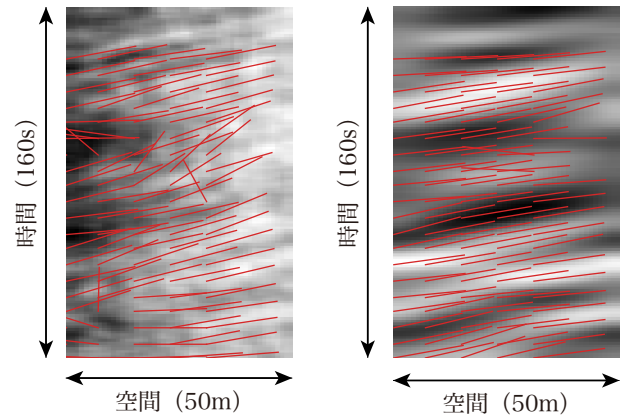


図-2: 時空間画像に対するフィルター適用例

析精度の低下が想定されたため、本研究では精度向上のため 2 つの方法を実施・検証した。

その 1 つ目は、流速のより高精度な推定が可能となる、時空間画像に対してのフィルターの適用である⁸⁾。時空間画像内の輝度分布を規格化する標準化フィルターと、波数周波数スペクトルにマスキングをかけ、流れの計測に有用な情報のみを抽出してノイズの少ない様な時空間画像を生成する波数周波数フィルターを用いる。図-2 には、エコーデータから作成した時空間画像に対してのフィルターの適用例を示す。また、画像内には STIV 解析による縞パターンの傾きの計算結果を赤線で示している。フィルターの適用に伴い、より鮮明な勾配が視覚的に確認でき、フィルターの適用前と比べ局所的な変化による異常値が少ないことがわかる。フィルターによる事前処理は、これまでビデオ画像に対しての有用性は示されたが、エコーデータに対しての有用性は不明であるため、その検証をした。

2 つ目は、時空間画像の違いに対する表面流速の推定結果の影響の検証である。画像解析である STIV 解析では、時空間画像の少しの違いが解析結果に大きく影響することが想定される。そこで、本研究では 1 スキャン (1.25 秒) 毎に変化させた時空間画像のデータセットを作成し、繰り返し解析を実施することで、時空間画像の違いが解析結果にもたらす影響について検証した。以上の処理・解析に基づき、表面流速の横断分布を推定する。

3.3 推定流速に基づく流量推定

STIV 解析により推定した表面流速の横断分布に基づき、流量を推定する。流量の推定には、検査断面内 1 m ごとの各地点における流速と水深の積による単位幅流量を算出し、その合計値により流量を決定する。ただし、表面流速を用いた流量の算定では、水深方向の平均流速の換算のために補正係数が用いられるため、流量観測の高度化マニュアル⁹⁾を参考に一律 0.85 を用いた。また、水深は水文水質データベースにおける水位と河床高より逆算するため、

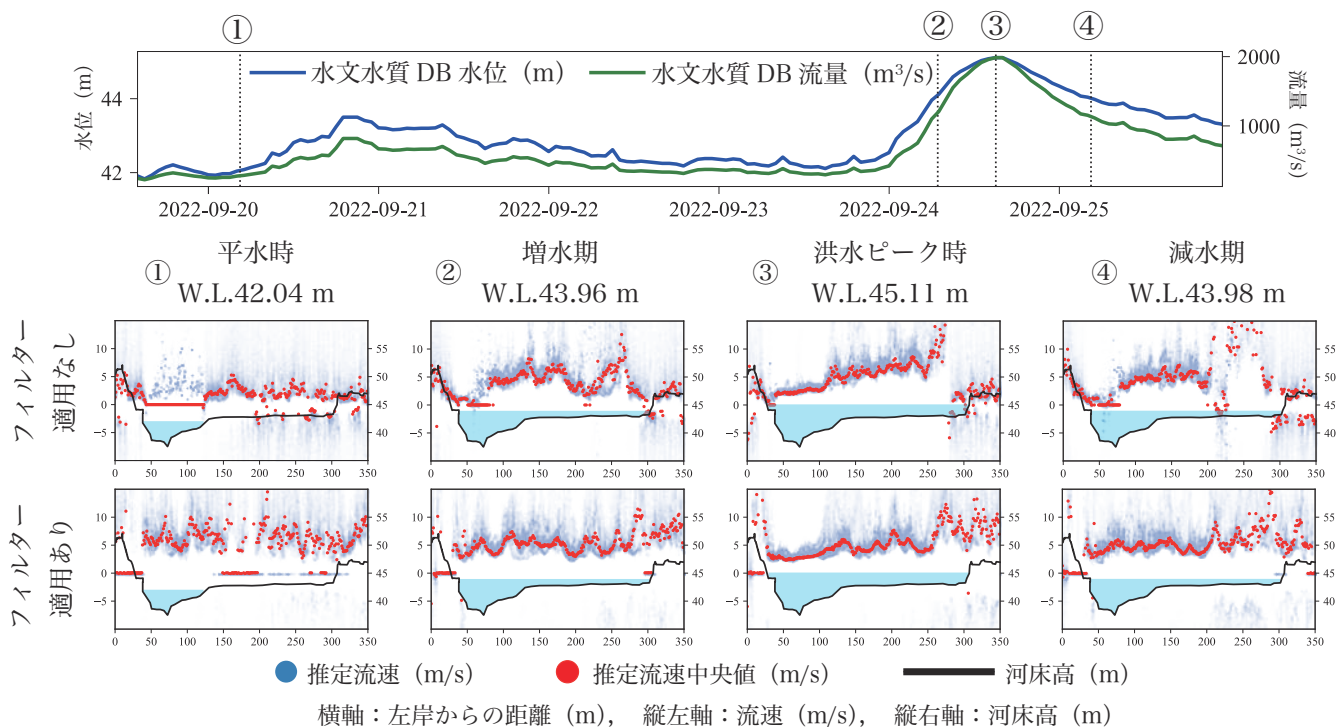


図-3: エコー画像の STIV 解析による流下方向流速の横断分布 (上段: 対象期間の水位・流量, 下段: 流速分布)

洪水時の河床変動はないものとした。

4 解析結果

4.1 エコーデータに基づく表面流速の横断分布の推定結果

2022年9月19日から25日までを1時間毎に、各10分間(480 スキャン)のエコーデータを用いて解析を実施した。紙面の都合上、平水時・増水期・2回目洪水ピーク時・減水期の表面流速の横断分布の推定結果を図-3に示す。図-3上段には、本研究における水文水質データベースの水位と流量の時間変化を示す。図-3下段は、各時刻における横断流速分布であり、横軸は左岸からの距離(m)、縦左軸は推定流速(m/s)を表し、縦右軸は河床高(m)を表している。図内には、フィルターを適用していない場合、フィルターを適用した場合のそれぞれを示している。推定流速は、青点が1つの時空間画像に対して推定した流速を表しており、濃くなるほどデータの集まりを表している。また、赤点はデータの25%から75%の範囲内における中央値を示しており、本研究ではこれを、各時間各側線における10分間の水表面平均流速とし、後述する流量推定において用いた。

フィルターの適用がない場合の横断流速分布では、左岸からの距離130mあたりの右岸砂州を境界として左右岸で傾向が異なることがわかる。①平水時のフィルター適用がない場合、水面幅の範囲では各時空間画像による推定流速がまばらになり、推定流速の中央値は0 m/sとなった。一方で、フィルター適用により流速の推定が可能になり、流

れのない右岸側では推定流速が0 m/sとなった。③洪水時は、フィルターの有無によらず流速推定に概ね良好と言える。しかし、フィルターの適用がない場合、左右の水深の違いにより横断流速分布に大きな差がある一方で、フィルターの適用により、横断流速分布が同程度となった。また、フィルター適用した洪水ピーク時の横断流速分布では、浅い水深となる右岸側では、深い水深となる左岸と比べて各時空間画像による推定流速結果が分布する傾向が確認できる。これは、浅い水深の場合、河床の影響が水面に表出することが考えられ、この影響と推察される。また、水位がほとんど等しい②洪水増水期④洪水減水期では、フィルターの適用に伴い横断流速分布が同水位では、流速推定が似た分布となり、洪水時の流速の推定可能性を示した。

一方で、フィルターの適用により、左岸側においては5 m/s程度の流速を常に推定する傾向となった。この断面における流速は、これまでの観測や水理学的な検討から平水時は4 m/s程度であり本研究により推定された流速は過大に推定する傾向があることに留意されたい。

4.2 推定流速に基づく洪水時の連続した流量の推定結果

前節で決定した、各時刻の流速の横断分布に基づく流量の時間変化を推定した。推定した流量の時間変化を図-4左に示す。横軸は日時、縦左軸は水位(m)、縦右軸は流量(m³/s)である。水文水質データベースによる流量を緑線、本研究で推定した流量を橙点(フィルターなし)、赤点(フィルターあり)で表す。また、推定した流量とその

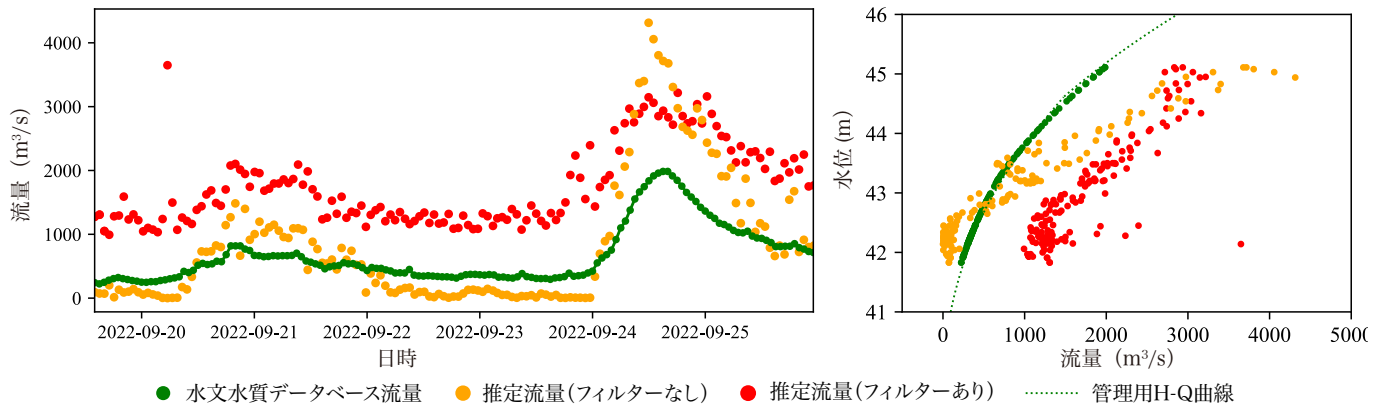


図-4: 横断流速分布に基づき推定した流量の時間変化 (左図), および水位と流量の関係 (H-Q 曲線, 右図)

際の水位の関係を表す H-Q 曲線図を図-4 右に示す. フィルターの適用がない場合, 平水時の低水流量観測に対しては $0 \text{ m}^3/\text{s}$ と推定が困難であり, 水位 42.5 m を境界に推定されるようになる一方, 高水流量観測では過大評価になる傾向となった. フィルターを適用した場合は, 水文水質データベースに比べて全体的に過大に推定するが, H-Q 曲線図では, 波形は良好に推定できていることが確認でき, エコーデータに対する事前処理により, 低水・高水流量の連続した推定の可能性が示された.

5 終わりに

本研究では, 平水時と洪水時の水面のマイクロ波のエコーデータに対して STIV 解析を適用し, 各々における流速と流量の推定精度を調べた. その結果, 平水時と洪水時のどちらもの流速及び流量を時間的に連続した推定できる可能性を示した. ただし, 推定精度については改善の余地が残る結果となった. 今後の課題は以下のとおりである.

1. エコーデータに対する最適な事前処理の検討

本研究では, STIV 解析に用いる時空間画像に対して事前処理を実施した. その結果, 事前処理がない場合と比べ, 事前処理を施した時空間画像から推定した流速の精度は過大評価の傾向となることが分かった. 時空間画像の生成源であるエコーデータの前処理¹¹⁾も研究され, そのエコーデータから生成した時空間画像を用いた SITV 解析の適用性も調べる必要がある.

2. 流速の推定方法の検討

画像解析による流速推定には, 本研究で用いた STIV 解析以外に, 平面二次元流速を推定できる PIV 解析³⁾がある. 河口域のエコーデータに対する PIV 解析の適用例¹⁰⁾もあるが, 河川中流域のエコーデータに対する PIV 解析の適用性は不明で, その検証は必要である.

3. 探査範囲の変更・拡大

本研究では, マイクロ波の発信源に近い 1 つの検査

断面を対象にした. しかし, レーダーの観測範囲のごく一部への適用に過ぎない. 今後は, マイクロ波の発信源からどれほど離れても流速と流量を推定できるかを把握する必要がある. また, レーダの観測範囲を増減させることができる. 観測範囲が狭いほどに観測密度が高くなるものの, エコーデータに基づく流速の推定精度は必ずしも観測範囲が狭いほど良好とは限らないことが分かってきており, 流速と流量の推定に最適な観測範囲の特定も今後の課題である.

参考文献

- 1) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橘田隆史, 深見和彦: 日本における ADCP を用いた高水流量観測手法, 河川流量観測の新時代, 2011 年.
- 2) 藤田一郎, 椿涼太: 時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測, 河川技術論文集, 第 9 巻, 2003.
- 3) 藤田一郎: 時空間微分に基づく高精度 PIV の開発, 水工学論文集, 第 48 巻, 2004.
- 4) 高橋啓, 許士達広, 石黒真木夫: ベイズ型スプライン回帰による水位-流量曲線のフィッティング, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, NO.1, 38-48, 2016.
- 5) 茂木大知, 大原由暉, 他 7 名: マイクロ波レーダーによる河川モニタリングの概念実証, 河川技術論文集, 第 27 巻, 2021.
- 6) 大原由暉, 茂木大知, 早坂圭司, 村松正吾, 安田浩保, 地上マイクロ波レーダーのエコーデータ処理による洪水流量の推定, 河川技術論文集, 第 29 巻, 2023.
- 7) Fujita, I., Watanabe, H., and Tsubaki, R. : Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV). International Journal of River Basin Management, Vol. 5, No. 2, pp105-114, 2011.
- 8) 藤田一郎, 柴野達至, 谷昂二郎, 悪条件で撮影されたビデオ画像に対する STIV 解析の高性能化, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.5, I619-I624, 2018.
- 9) 国立研究開発法人土木研究所水工研究グループ水文チーム, 流量観測の高度化マニュアル (高水流量観測編).
- 10) Humam IA, Takewaka S: Estimations of Surface Velocity Distributions from X-Band Radar Images during Floods Observed at the Mouth of Tenryu River, Japan. Journal of Hydraulic Research, 2023.
- 11) 岡本充生, 大原由暉, 村松正吾, 安田浩保, 早坂圭司, 全変動正規化によるマイクロ波レーダ河川観測画像復元, 映像学技報, vol. 47, no. 20, ME2023-62, pp. 1-4, 2023 年 7 月.