

Xbandレーダによる水文観測の高度化について

丸山 聖司¹・若林 ゆきこ¹

¹信濃川河川事務所 流域治水課 (〒940-0098 住所 新潟県長岡市信濃1丁目5番30号)

課題の多い浮子観測に変わる流量観測手法として、マイクロ波レーダを用いた流量観測について検討した。信濃川河川事務所管内に設置したXbandレーダから得られたエコーデータに波数周波数フィルタリングを行うことでSTIV解析による流速推定を良好に行うことができた。推定した流速から流量を算定し、精度に課題があるものの、既存H-Q式と同傾向の曲線を確認することができた。

キーワード 河川，流量観測，水文観測，レーダ

1. はじめに

出水時に行われる高水流量観測は従来より浮子観測により実施されてきた。浮子観測における課題として、出水時における観測員の安全確保、ピーク時に合わせた観測体制の確保及び浮子が蛇行する等に対する計測データの精度確保等が挙げられる。

これらの課題に対する解決策として、Xbandレーダ（写真-1）を用いた流量観測手法について述べる。Xbandレーダは陸上・海上問わず観測・監視に用いられているものであり、可視光に依存しないため無人で半径数kmの範囲を24時間体制で観測できることが特長である。レーダはマイクロ波を発射し、物標に当たり帰ってきたマイクロ波を受信することで観測している。ここでは、信濃川河川事務所管内に設置し、観測を行ったXbandレーダにより受信したマイクロ波のエコー画像をSTIV解析することにより流速を求め、流量推定を行った結果について報告する。

1.1 現況の流量観測に関する課題について

高水流量観測において広く実施されている浮子観測における課題については下記の通り。

- ・浮子の投下による流速の測定は測線毎に実施する必要があるため、同一時間における流速の測定ができない。
- ・特に信濃川中流域のような川幅が広い河川や急流河川においては測定精度への影響が懸念されるだけでなく、1回あたり観測作業に係る時間が長くなるため、十分な観測回数がとれていないのが実態である。
- ・浮子投下は主に橋梁等から実施するため、高水流量



写真-1 湯殿川樋門建屋に設置したXbandレーダ（右側）

観測の実施箇所に大きな制限がある。そのため、地形により浮子が蛇行するような箇所では実施せざるを得ない観測所では、観測を実施しても計測データの精度が低く、有効な計測データが中々得られない。

さらに、水位上昇の状況に応じて安全確保のために観測員の退避を行う必要があり、記録的な豪雨が多発している近年においてピーク時の観測が困難になりつつある。

- ・浮子観測においては1観測所あたり最低でも5名の人員が必要であり、これを出水が生じている観測所全てで実施する必要がある。建設業界においては担い手不足が深刻な状況であり、人員確保の観点から観測体制の構築が困難になりつつある。

上記の課題を踏まえ、無人による定常的な観測ができる観測体制を検討する。既に確立された手法としてカメ

ラにより撮影された写真データを画像解析することで流量算定するSTIV解析が挙げられるが、降雨による画像データへの影響が懸念されること、現地状況に応じて必要なカメラ性能・台数が異なることなど検討が必要な要素が多いことが課題となっている。

そこで本論では、可視光に依存しないため昼夜問わず観測可能なXbandレーダによる流量観測の実現可能性について述べる。

2. 地上マイクロ波レーダおよび観測概要

信濃川河川事務所管内にマイクロ波を発信して観測を行うXbandレーダを3箇所設置し、観測の実施及び精度検証を行った。

2.1 Xbandレーダの設置状況

写真-2に示すとおり、信濃川の河道に位置する長岡市上水道妙見取水設備、茶郷川樋門、湯殿川樋門の計3観測地点にレーダを設置し観測を行った。

発出したマイクロ波のエコーは反射する物標や距離に応じて反射強度が変わるため、写真-2において反射強度が強い箇所は白く、弱い箇所は黒く写っている。

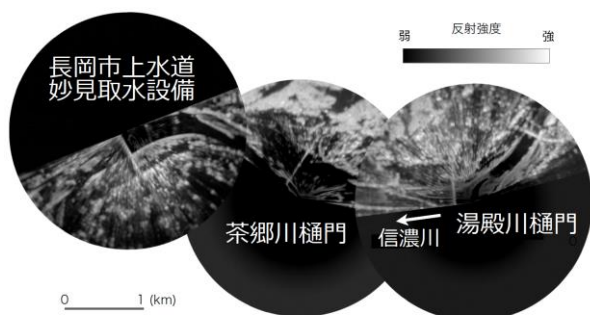


写真-2 Xbandレーダにより撮影した信濃川

2.2 Xbandレーダにより取得するエコーデータについて

本論で用いたマイクロ波レーダは、レーダ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（写真-3右）。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。本論では、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。

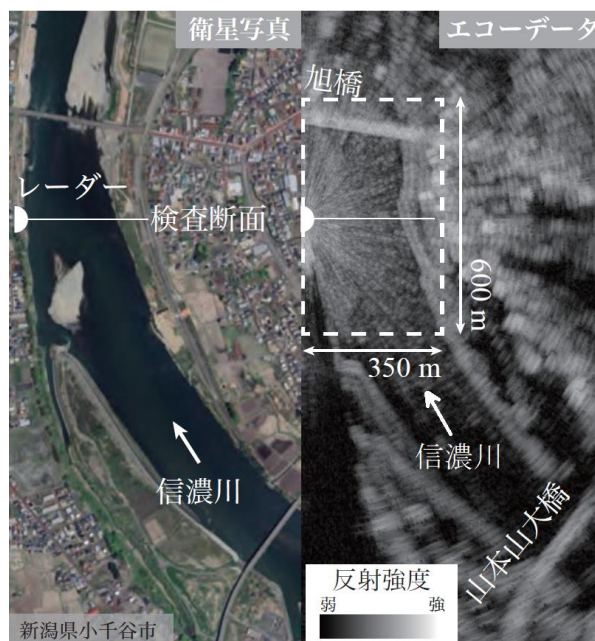


写真-3 湯殿川樋門に設置したマイクロ波レーダ概要

本論では、湯殿川樋門の2022年9月19日から25 日の約 6 日間をXbandレーダで観測したエコーデータを解析に用いる。

これは最高水位が 45.11 mを記録した期間のエコーデータである。最高水位 45.11 mは、平水時水位から3 m程度上昇しており、年に1回程度の高水位となった。また、20日19時には水位が43.5m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 時に最高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写真-4 に示す。

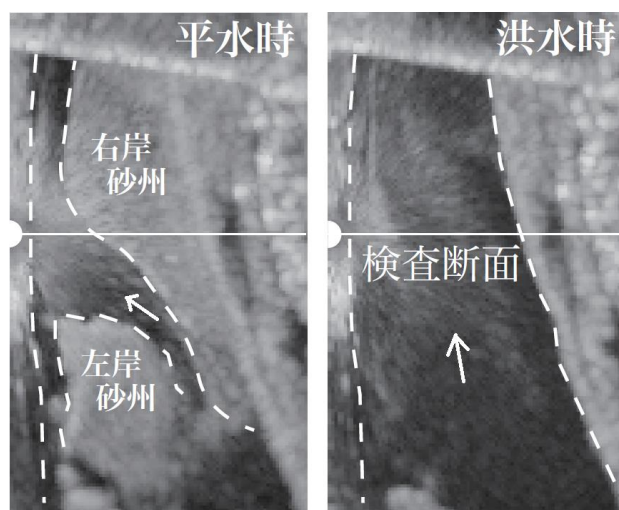


写真-4 平水時（左）および洪水時（右）のエコーデータ
流速および流量の推定に使用した検査断面は小千谷水

位観測所の基準断面であり、図-1に2022年7月時点における基準断面を示す。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。水位が43mを超えると右岸砂州上にも流れが発生することがエコーデータから確認できる。

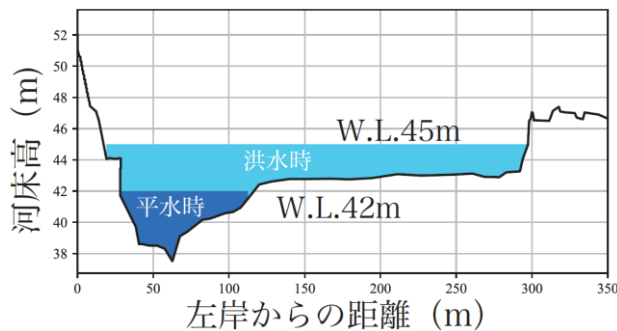


図-1 小千谷水位観測所 基準断面

3. レーダによる流速・流量推定手法

本論における地上マイクロ波レーダによる河川流量推定方法について述べる。ここでは、電磁流速計のように水の動きを直接的に観測したものではなく、マイクロ波レーダが水面に発生した波が流れにより移動する様子を捕捉していると推測できるため、エコーに基づく水表面の流速推定が可能と考えた¹⁾。データ処理については既往研究¹⁾と概ね同一の条件下で実施している。

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⁾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 レーダによる流速推定

レーダで観測されるエコーデータの測定点は極座標形式で設定されるため、直交座標変換が必要となる。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¹⁾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、平水時には解析精度の低下が想定されたため、本論では精度向上のため2つの方法を実施・検証した。

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するフィルターの適用である⁴⁾。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。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てきたが、エコーデータに対しての有用性は不明であったため、今回、検証を行った。図-2には、エコーデータから作成した時空間画像に対するフィルターの適用例を示す。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くなることがわかる。

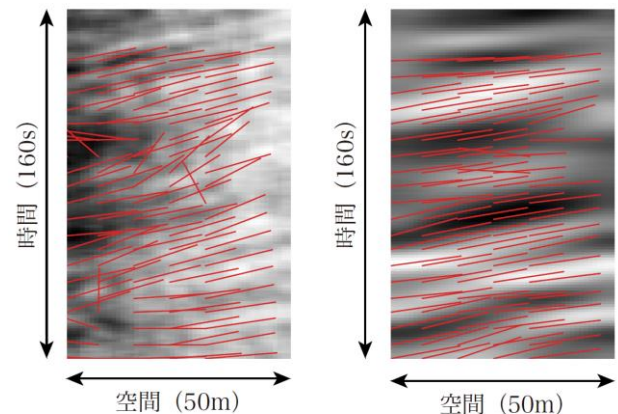


図-2 時空間画像に対するフィルター適用

2つ目は、繰返し解析の実施である。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、本論では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した結果は4.1に示す。

3.2 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1m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⁵⁾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、洪水時の河床変動はないものとした。

流量推定の結果については4.2に示す。

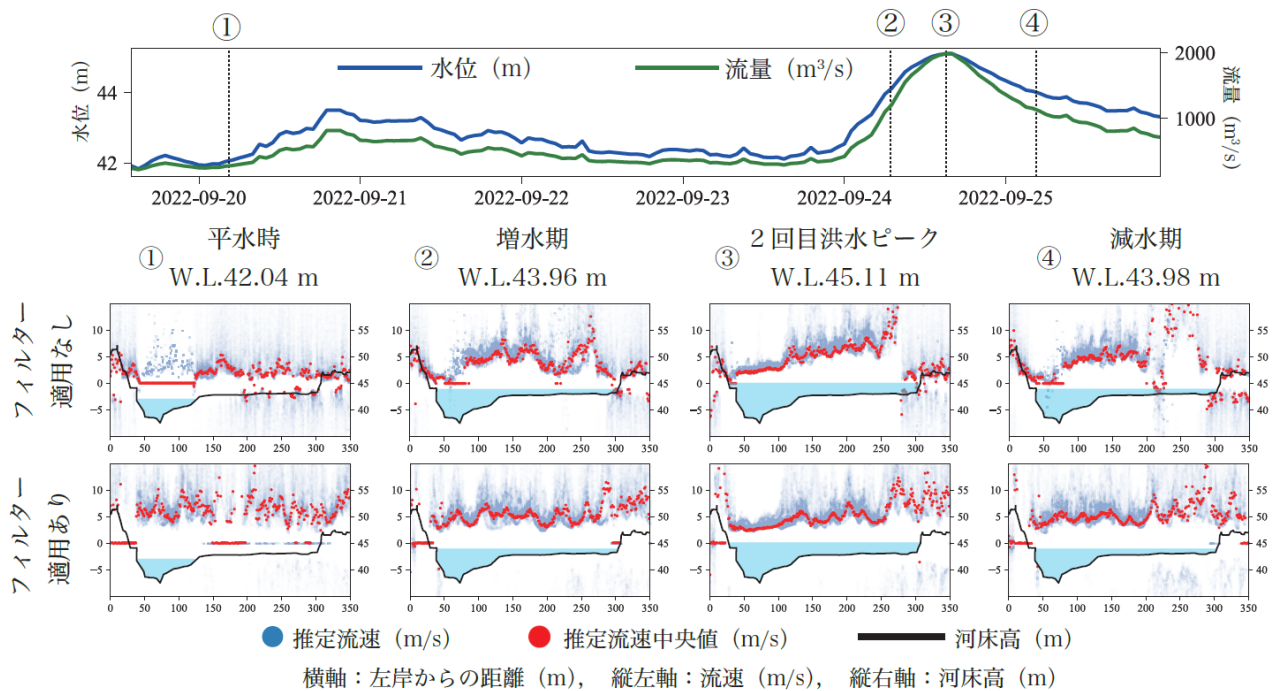


図-3 横断流速分布

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。

b) 洪水時における流量推定結果

図-3③に示す洪水時においては、フィルターの有無によらず流速推定は概ね良好に行えていると言える。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図-3②及び④に示す洪水増水期及び洪水減水期では、フィルターの適用に伴い横断流速分布が似た分布となり、洪水時の流速の推定可能性を示した。

c) フィルター適用の有無による流量推定への影響

フィルター適用により、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。一方で、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では平水時は 4 m/s 程度である。よって、本論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が示された。

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。

4. フィルター適用に伴う推定結果への影響

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。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、本論における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) を示し、縦右軸は河床高 (m) を示し、これらをフィルター適用の有無それぞれの場合で示している。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示しており、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、本論ではこれを、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。

表面流速の推定結果について以下に示す。

a) 平水時における流量推定結果

図-3①に示す平水時において、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 130 m 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。

また、フィルター適用がない場合は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

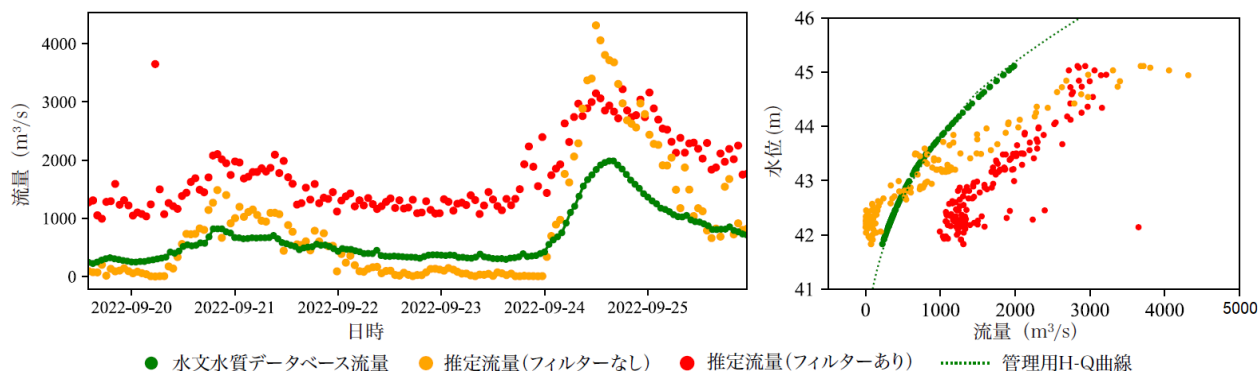


図-4 横断流速分布に基づき推定した流量の時間変化（左図），および水位と流量の関係（H-Q 曲線，右図）

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）を示している。水文水質データベースによる流量を緑線，本論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）で示す。また，推定した流量とその際の水位の関係を表す H-Q 曲線図を図-4 右に示す。図-4右図の横軸は流量，縦軸は水位である。

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 m³/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の値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. おわりに

本論では，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，各々における流速を推定し，流量について水文水質データベースのものと比較した。その結果，平水時と洪水時のどちらも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。

今後は，フィルターを適用したデータに対する精度を向上させるための方法を検討するなど，Xbandレーダを活用した流量観測手法の確立に向けて実証及び検証を進め，流量観測の課題解決に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 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.
- 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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）。
- 6) 国立大学法人 新潟大学，令和6年度Xbandレーダによる水文観測の高度化に関する業務 報告書