

マイクロ波の反射強度を用いた左右岸水位と表面流速の推定

新潟大学大学院自然科学研究科	学生会員	○大原 由暉
新潟大学大学院自然科学研究科	学生会員	茂木 大知
新潟大学理学部理学科	非会員	早坂 圭司
新潟大学工学部工学科	非会員	村松 正吾
新潟大学災害・復興科学研究所	正会員	安田 浩保

1 はじめに

近年、記録的な降水とそれに伴う大規模な洪水が発生している。その被害の特徴として、越流と氾濫の多発が挙げられる。例えば、令和元年台風第19号では、東日本の広い範囲において千曲川をはじめ多くの河川で越流と氾濫が発生した。このような被害が今後も発生する可能性は高く、洪水時の河川の状態を広範囲かつ高密度に把握することが重要となる。しかし、現在の観測体制はそれを達成できる水準にない。

洪水時の河川の状態を把握するため、水位と流速が測定される。現時点の水位計による水位の測定は、縦断方向へ1 kmに1点かつ基本的に片岸のみの測定で縦横断に密度が低い。また、水位計は河道沿いに設置しなければならないため、越流が発生した場合に流失し水位の測定ができなくなる可能性すらある。また、流速の測定は、洪水時では浮子による測定が基本であり、時空間に密度が低い上、有人で実施されるため危険が伴う。ビデオ画像を用いた測定も行われているが、上空からの撮影を行わない限りその範囲は限定的である。

著者らは、地上マイクロ波レーダーによる天候を問わない昼夜連続した実河川の広範囲かつ時空間に高密度な観測の概念を示している¹⁾。しかし、概念の実証に留まり具体的な水理量の推定には至っていない。本研究では、測定された反射強度を用いることにより平常時における左右岸の水位と洪水時における表面流速の推定を試みた。

2 マイクロ波レーダーによる測定データ

2.1 マイクロ波レーダーの概要

本研究に用いたマイクロ波レーダーは、測定点の反射強度とその平面座標を測定する二次元レーダーである。半径1.6 kmの円形の領域内における70万点の測定を2.5秒に一回行うことができる。図-1は測定された反射強度の平面図、図-2は反射強度の測定と同時刻に撮影された画像によるオルソ画像である。両図から、マイクロ波の反射強度が液体と固体で異なる物理的な性質から水面と堤防を明

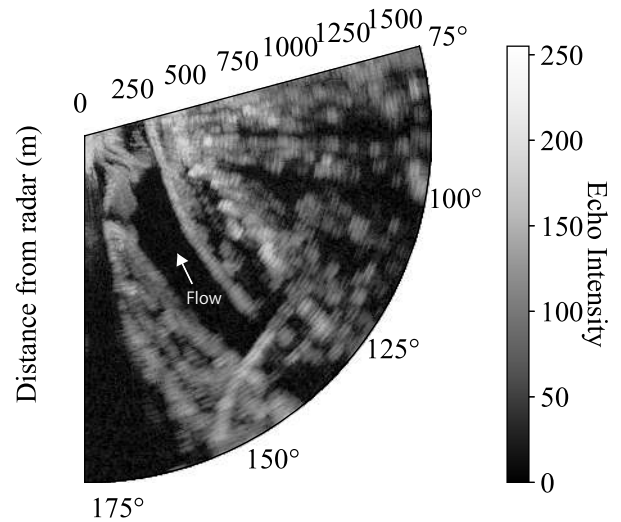


図-1 反射強度の平面図

確に識別できることが見て取れる。

2.2 マイクロ波の距離減衰の補正

マイクロ波は距離の二乗に比例して減衰する。よって、同じ材質で構成された河川の水面においても、レーダー設置箇所の近傍と遠方で測定された反射強度の大きさが異なる。距離減衰の効果は、水位や流速の推定結果に影響を及ぼし、反射強度に対する処理を煩雑にするものである。その影響を取り除き、測定範囲を一様に処理するため、水面の反射強度を基準にして距離減衰を補正する。

まず、測定された反射強度に対して次式でフィッティングを行う。

$$y = \frac{b}{(x-a)^2} + c \quad (1)$$

ここに、 x :レーダーからの距離、 y :反射強度、 a, b, c :定数である。次に、測定された反射強度に対し(1)式が直線となるような調整を行うことで距離減衰を補正する。図-3は、補正前の反射強度、フィッティングした関数、補正後の反射強度を示したものである。縦軸が反射強度、横軸がレーダーからの距離で、水面における1つの側線について示したものである。青線が水面で測定された反射強度、緑破線が(1)式により青線へフィッティングした曲線、赤線が補正後の反射強度である。補正後の反射強度が距離によ

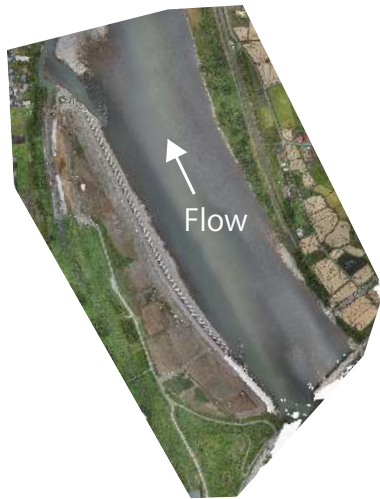


図-2 2021年9月24日の反射強度の測定範囲内におけるオルソ画像

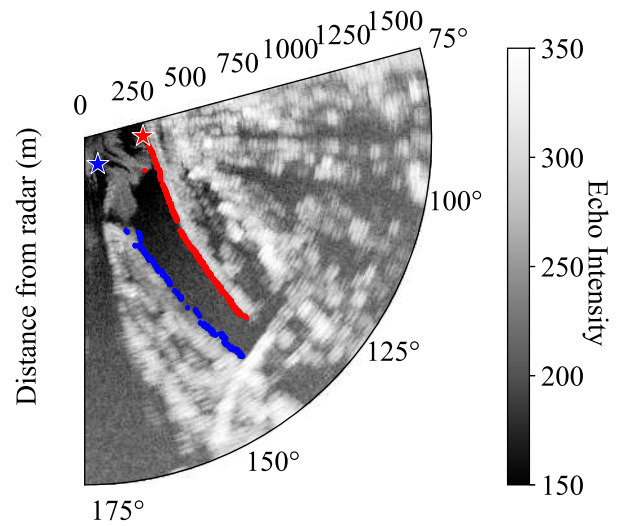


図-4 検出された河川水際

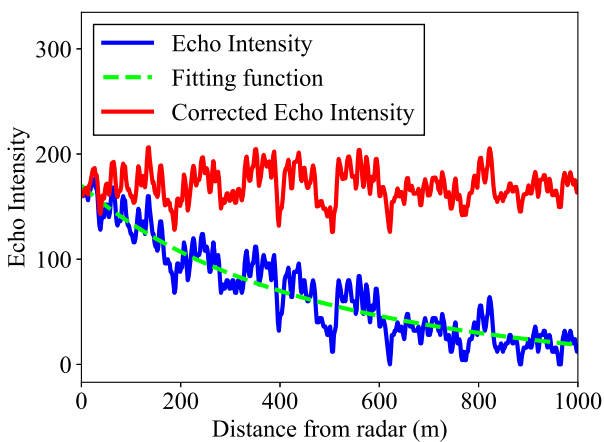


図-3 距離減衰の補正

らず一定であることが確認できる。以降、距離減衰を補正した反射強度を用いる。

3 左右岸水位の推定

測定された反射強度から、左右岸の測定点のみを抜き出す。これにより、左右岸の平面座標が既知となる。その座標へ事前に測定した標高を与えることで左右岸の水位を推定する。

3.1 反射強度の測定日時・条件

反射強度の測定は2021年9月24日15時に行い、天気は曇りであった。レーダー設置箇所の水位観測所で測定された水位は42.23 mで、平常状態であった。

3.2 左右岸における水際の検出

マイクロ波の反射強度は、その物理的な性質から水面と構造物の境界で空間的に急変する。また、マイクロ波は水の流れによる水面のゆらぎで散乱され、時間方向における反射強度の標準偏差が大きくなる。図-4は、前述の性質から左右岸の水際を検出¹⁾し、その測定点を示したものである。赤のポイントで右岸側、青のポイントで左岸側を示

している。検出した測定点の数は右岸側で481点、左岸側で324点であった。右岸、左岸ともに3 mに1点程度の密度で水際を検出した。

3.3 DEMの作成

水位の推定に用いるDEMは写真測量により作成した。図-2が、写真測量を行った区間のオルソ画像である。写真の撮影は水位の推定に用いる反射強度の測定と同じ時刻に行い、点群の生成にはMetashape²⁾を用いた。標定点は24点設置し、そのうち12点を検証点とした。検証点における平均平方二乗誤差は0.023 mであった。

右岸側について、図-2で確認できるように植生が繁茂しており、写真測量における悪条件のため不連続な点群が生成された。しかし、測量を行った区間において、下流側から上流側に向かうにつれて多少の地表面の増加や水深が小さい箇所が現れることで特徴点が増加し、ある程度連続的な点群が生成された。

左岸側では、図-2で確認できるように護岸で構成され植生も存在せず、水面付近を除き良好に点群が生成された。

3.4 水際とDEMによる水位の推定

反射強度に基づき検出された左右岸の水際へ標高を与えるが、一般的に水面とその付近では写真測量による点群の生成は難しい。そこで、左右岸の水際として検出された測定点を中心とした5 m四方の領域に存在する点群の標高の中央値を左右岸の水位とする。

図-5は、水際とDEMにより推定された左右岸の水位を示したものである。縦軸は水位、横軸は、図-4における星型のシンボルから上流側へ向かった距離を示している。赤のポイントで右岸側の水位、青のポイントで左岸側の水位、緑の破線でレーダー設置箇所の水位観測所で測定された水位を示している。

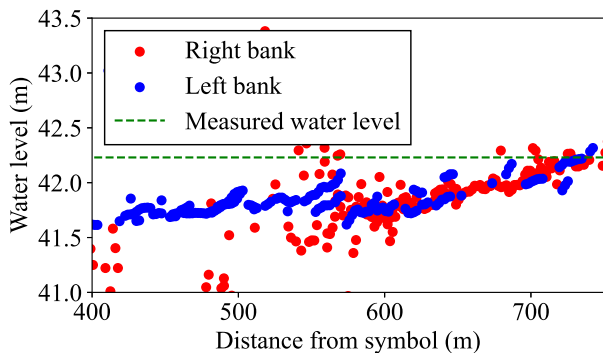


図-5 推定した左右岸の水位

右岸側では、シンボルからの距離が600 mの地点までは推定された水位が著しく不連続となり、明らかに不自然な結果となった。これは、右岸側の植生が繁茂している区間において標高の点群が適正に生成されていないことが原因と考えられる。それ以降の比較的連続的な点群が生成された区間では、推定された水位が一定の傾きで増加しており、良好に水位が推定されたと考えられる。

左岸側では上流側へ向かうにつれて全体的に水位の増加を確認でき、良好に水位が推定されたと考えられる。しかし、水位が不連続となる箇所が多い。これは、レーダーによって設定される測定点が必ずしも左右岸の水際に存在するとは限らないことと、左岸側は護岸で構成され、空間的な標高の変化が大きいことが原因と考えられる。これらから、検出された水際の座標と実際の水際の座標の相違が大きい場合、水位の推定が困難となることが推測される。

推定された左右岸の水位は、水位を推定した区間よりも下流側に設置された水位観測所で測定された水位を下回っている。水位観測所は、河道が流下方向に対して時計回りに変化する湾曲部の左岸側に設置されている。そのため、堰上げの効果により水位が大きくなっている可能性がある。

4 表面流速の推定

マイクロ波レーダーにより測定された反射強度の平面図を時系列順に並べると、水面が移流する様子が確認できる。これは、流れによって水面が乱れることにより変化した反射強度がそのまま移流する様子や、流木などの漂流物が反射強度として測定されていると考えられる。つまり、反射強度の移流する速度は河川の表面流速を表していると推測される。これに対してSTIV³⁾で用いられる手法により、反射強度の時空間画像から主流方向における表面流速を推定する。

4.1 反射強度の測定日時・条件

反射強度の測定は2021年8月15日15時に行い、天気は曇りであった。この日、長野県の広い範囲で大雨となっ

たことで信濃川は増水し、反射強度により確認できる水面の流れが明瞭で、時空間画像の作成に有利な条件であった。レーダー設置箇所の水位観測所で測定された水位は47.09 mで平常時と比べ6 m程度高かった。

4.2 ノイズ除去と画像への変換

測定された反射強度は機材に由来すると考えられるノイズが存在する。縞模様が現れる時空間画像を作成する上で妨げになるため、これを除去する。2.5秒間隔で360回分測定されたデータに対して周波数が0.056 Hzを超える成分を取り除いた。また、時空間画像の作成を簡単にするため反射強度の平面図を1 pixあたり3 mとなる画像へ変換した。

4.3 時空間画像による流速分布の推定

図-6に示す黄破線のような主流方向への検査線を設定し時空間画像を作成する。解析において、時空間画像の輝度勾配の計算には5次精度の中央差分を用い、輝度勾配値の積分領域である検査領域は一辺10 pixの正方領域とした。

図-7の左図は、図-6中の赤線で示したAA'断面のうち1つの検査線で得られた時空間画像と輝度勾配ベクトルを示したものである。縦軸で時間、横軸で空間を示しており、それぞれ単位長さスケールは $S_t = 5.0$ (sec/pix), $S_x = 15.3$ (m/pix)である。時空間画像において右上へ向かう縞模様が確認でき、輝度勾配ベクトルも右上へ向かっているのが確認できる。図-7の右図は、縞模様の強さを示すパラメータのコヒーレンシー C_c の平面図である。コヒーレンシーは、理想的な縞模様の場合で $C_c = 1$ 、縞模様が存在しない場合で $C_c = 0$ となる。右図でコヒーレンシーが0.4程度を超える検査領域では、左図の輝度勾配ベクトルがそれぞれ同じ方向となる傾向が確認できる。

コヒーレンシーが0.4を超える検査領域における縞模様の傾きを用いて反射強度の移流する速度を計算し、それらを平均した結果をその検査線における平均表面流速とした。ここで、1つの検査線において12の検査領域が存在するが、コヒーレンシーが0.4を超える領域が3つ以上存在しない検査線は時空間画像が不適切であるとして除外した。

図-8は、A, B, CからA', B', C'に向かい検査線を1 pixずつ移動させ、それぞれの検査線における平均表面流速を求めたものである。縦軸は流速、横軸はA, B, Cからの距離を示している。赤のポイントでAA'断面の流速分布、青のポイントでBB'断面の流速分布、緑のポイントでCC'断面の流速分布を示している。黄色で示した領域は、マニング式において河床勾配を変化させて計算した流速である。河川整備基本方針・河川整備計画⁴⁾により河

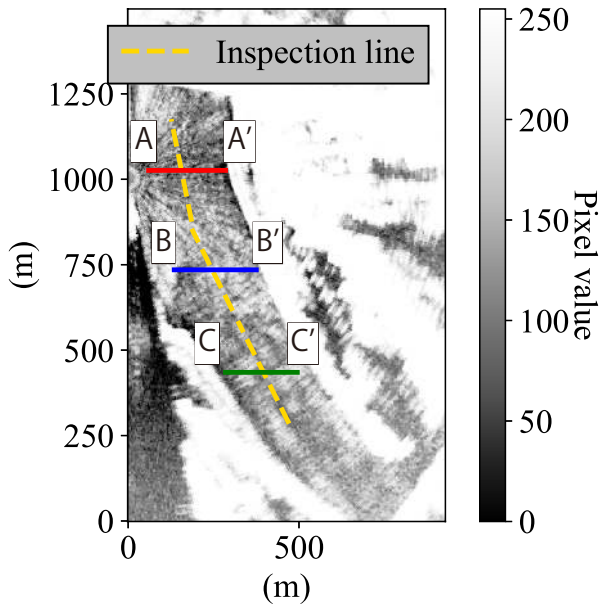


図-6 検査線と流速の推定を行う検査断面

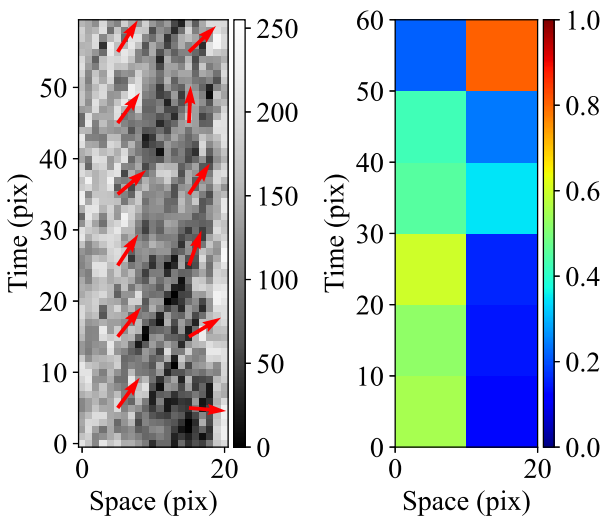


図-7 時空間画像及び輝度勾配ベクトル (左), コヒーレンシーの平面図 (右)

床勾配は 1/700 から 1/1000 の範囲で変化させ、粗度係数は 0.0253 とした。水深は、断面 AA' 付近の定期横断測量データと水位観測所で測定された水位により計算された値の平均とした。

表面流速は、全ての検査断面において断面方向におよそ 3 m に一点の密度で推定され、概ね 3 から 5 m/s に収まっており検査断面ごとに大きな違いはなかった。しかし、マンニング式により計算された流速と比較すると過大評価気味であった。また、右岸側に向かうにつれて流速のばらつきが大きくなる傾向が確認できる。これは、図-9 が示す定期横断測量データのように、左岸側では形成された滞筋により水深が大きいのにに対し、右岸側では水深が小さいため、水深の変化の影響を受けやすいことが原因と考えられる。

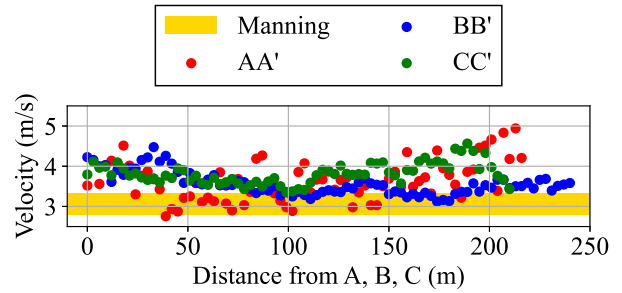


図-8 各断面における平均流速分布

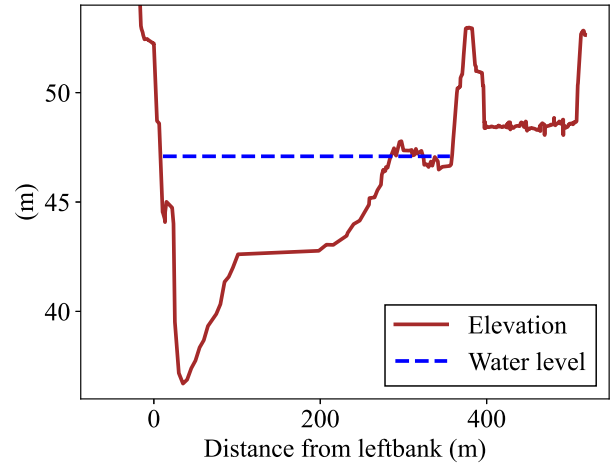


図-9 AA' 断面付近の定期横断測量データと水位

5 終わりに

本研究では、測定されたマイクロ波の反射強度を用いて左右岸の水位と表面流速の推定を試みた。その結果、反射強度に基づき検出された左右岸の水際へ標高を与えることで左右岸の水位を広範囲かつ高密度に推定できる可能性を示した。また、反射強度の時空間画像を用いることで表面流速を広範囲かつ高密度に推定できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 茂木大知, 大原由暉, 安田浩保, 他 6 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, pp.619-624, 2021.
- 2) Agisoft Metashape: <https://oakcorp.net/agisoft/>
- 3) 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, pp.55-60, 2003.
- 4) 国土交通省, 河川整備基本方針・河川整備計画: <https://www.mlit.go.jp/river/>