

河川流が引き起こす振動に基づく流量測定

防災科学技術研究所 ○澤崎 郁 1*
防災科学技術研究所 P.C. Shakti 2**

河川流	河川振動	上流域
地震計ノイズ	Hi-net	水位・流量

研究の目的

下流域における洪水の早期予測のためには、上流域における流況の把握が必要不可欠である。しかし、上流域での流況観測には様々な制約があり、観測体制は下流域と比較すると整備されていない。本研究では、上流域における遠隔からの洪水把握を目的として、河川流が引き起こす振動（以下、「河川振動」）を捉えた地震計記録の利用を提案し、そのために必要な基礎事項の検討を行う。

研究の内容

1. 最上川上流域における計算流量と Hi-net 地震計記録との比較

1. 1 手法

まず、最上川の上流域で発生した 2004 年、2015 年、2019 年の洪水イベントについて、域内に設置されている防災科学技術研究所の Hi-net 地震観測点に最も近い河川上の地点（図 1）における流量を、降雨流出氾濫（RRI）モデルを用いて計算した。次に、地震計記録から地震などによる過渡的な信号を除去した上で、ノイズパワー W_i と最寄り地点上の流量 Q_i^{est} との間に

$$Q_i^{est} = \begin{cases} A(W_i - W_0)^b + Q_0 & (W_i > W_0) \\ Q_0 & (W_i \leq W_0) \end{cases} \quad (1)$$

という関係式を仮定し、 Q_i^{est} が計算流量と合うようにパラメータ A 、 b を最適化した。計算流量の再現性の指標には Nash-Sutcliffe 指標 (NSE) を用いた。

1. 2. 結果

図 2 に、地震計ノイズ記録から推定した最寄り地点での流量（赤）と計算流量（青）の比較を示す。洪水予測において特に重要な流量のピーク値とピークが出現するタイミングが、ノイズ記録から良く再現できている。

最適パラメータの下での NSE 値は、2015 年と 2019 年の洪水時はいずれの地震観測点でも 0.7 以上であった。水文学においては一般に NSE が 0.6 以上であれば流況の再現性が良いとされることから、ノイズ記録が計算流量をよく再現できているとみなせる。2004 年の洪水時は 0.5 程度と再現性がやや低かったものの、最大のピークの値と出現時刻は概ね再現できていた。

各々の洪水時に最適化したパラメータ値を別の洪水時

のノイズ記録に適用した場合でも、N. FGTH 観測点では 2015 年と 2019 年の洪水時に NSE で 0.7 以上の高い再現性を示した。これは、パラメータが大きく時間変化することなく安定しており、過去の洪水時に推定したパラメータを地震計ノイズに用いることで、ほぼリアルタイムでの洪水把握が可能であることを意味する。一方、N. MGMH 観測点では NSE が 0.6 以下の場合が多く、再現性は乏しかった。その理由としては、この観測点近傍で RRI モデルでは反映できない流出過程が起こっていた可能性や、(1) 式のような単純なモデル化ではノイズと流量の関係を表現しきれない可能性などが考えられる。

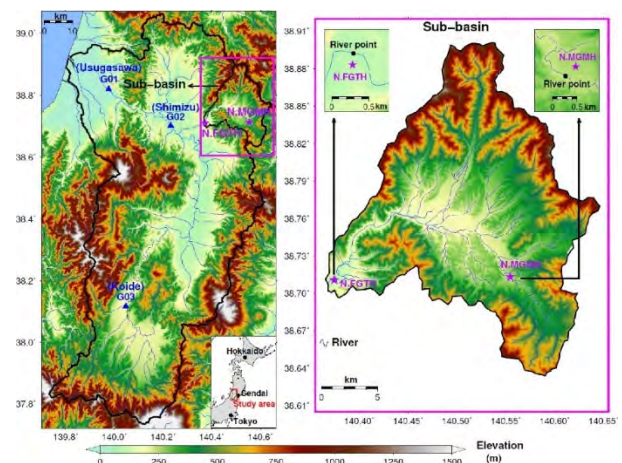


図 1 最上川上流域における Hi-net 地震観測点（紫星印）と、観測点に最も近い河川上の地点（黒丸）。

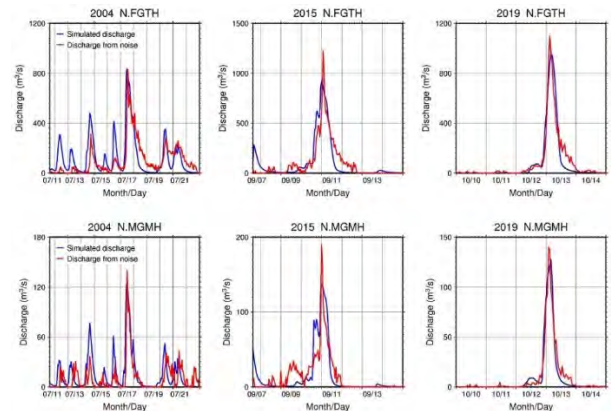


図 2 RRI モデルによる計算流量（青線）と地震計ノイズから推定した流量（赤線）の比較。

2. 令和元年東日本台風時における観測水位と Hi-net 地震計記録との比較

2. 1. 手法

令和元年東日本台風が接近・通過した期間について、同じ流域内にある Hi-net 地震観測点と国土交通省の水位観測点を対象にペアリングを行った。各地震-水位観測点ペアについて、(1)式を用いて地震計ノイズパワーを水位に変換し、NSE を最大化するようにパラメータの最適化を行った。

各々の地震観測点について、NSE が最大となる水位観測点ペアに対する NSE(最大 NSE)を、河川振動の観測されやすさを表す Integrated Energy (IE)と洪水発生前のノイズレベル W_0 の比である IE/W_0 と比較した(図3)。 IE は地震観測点に固有の値であり、河川が地震観測点に近く河床勾配が急峻であるほど大きな値をとる。さらに、最大 NSE が 0.6 以上となる地震観測点を選び、比較する水位観測点までの距離と NSE との関係調べた(図4)。

2. 2 結果

図3からは、 IE/W_0 が大きいほど最大 NSE が 0.6 以上の観測点の割合が増えることが分かる。これは、観測点周囲の河床勾配が強く、かつ社会活動起源の振動が少ないほど、河川振動を観測しやすいことを示唆する。

図4からは、設置地点近傍の河川振動を明瞭に観測できる地震観測点であっても、比較対象の水位観測点が離れるほど、NSE が高い割合が減ることが分かる。このことは、水位変動の空間的相関が距離と共に減少することを意味する。図4の例では相関距離はおおよそ数十 km 程度とみなせる。この相関距離は降水量の空間スケールや地形のスケールと関係し、地震計ノイズがどの範囲の流況を反映するかを間接的に示すものと考えられる。

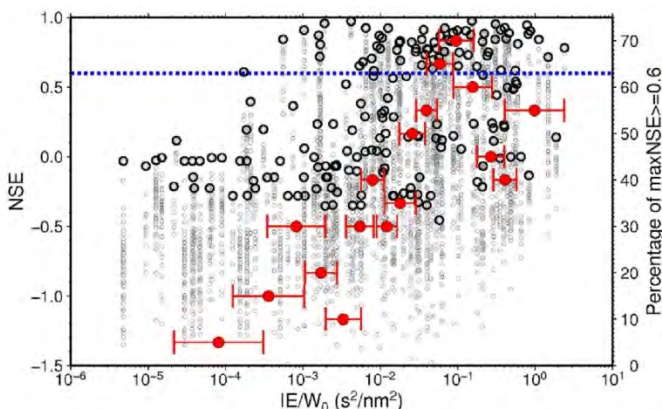


図3 各 Hi-net 観測点における IE/W_0 と最大 NSE (太い黒丸) の関係。赤丸は最大 NSE が 0.6 (青点線) 以上の観測点の割合を示す (右縦軸)。

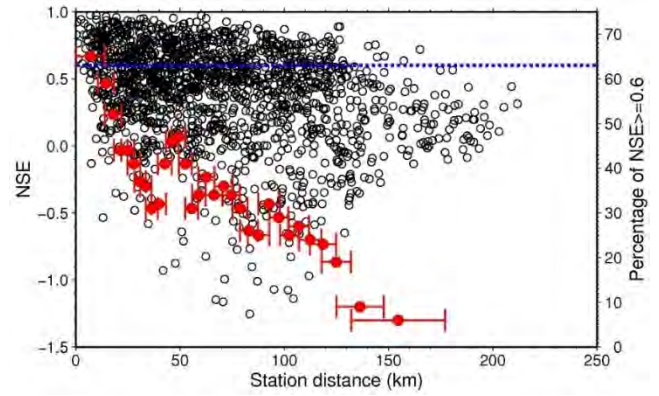


図4 最大 NSE が 0.6 以上の Hi-net 観測点における、NSE と水位観測点までの距離との関係。赤丸は NSE が 0.6 (青点線) 以上の観測点ペアの割合を示す (右縦軸)。

研究の成果、新発見

本研究では、流量シミュレーション、地震計記録、および水位記録の分析を通じて、地震計ノイズを流況の把握・予測に用いる上での基礎的な知見を得ることができた。具体的な知見としては、

- RRI モデルに基づく流量シミュレーションを通じて、河川上の任意地点での流量と地震計記録の比較を行うことができる。
- 上流域においては、河川が急流で河川振動を励起しやすく、社会活動起源の振動も少ないため、地震計により河川振動を検知しやすい。
- 流況は数十 km 程度のスケールで空間相関を持ち、地震計記録は概ね同程度の空間スケールの流況を反映すると思われる。

等が挙げられる。上流域では、河川内に観測機器を設置する従来法に基づく流況観測が困難であるため、上流域ほど河川振動を観測しやすい性質を利用する本手法は、従来法の欠点を補うものになりうると思われる。

今後の予定

今後は、流量シミュレーション法と地震計記録解析手法の高度化を通じて、さらなる流量再現性の向上を図る。また、様々な洪水イベントに対して提案手法を適用して、流量予測性能の時間的な安定性やリアルタイム性の検討、面的な流量把握などの課題にも取り組む予定である。

謝辞

本研究助成により地震学と水文学の融合研究が進み、洪水予測の高度化を目指す上で有益な知見を得ることができました。記して感謝申し上げます。