

ガウス過程回帰を用いた間接的土砂計測のための音響信号解析
Acoustic Signal Analysis Using Gaussian Process Regression for Indirect Bedload Monitoring

○小柴孝太・竹門康弘・Sameh A. KANTOUSH・角哲也

○Takahiro KOSHIBA, Yasuhiro TAKEMON, Sameh A. KANTOUSH, Tetsuya SUMI

Surrogate bedload monitoring system registers acoustic energy produced by bedload impact, and the grain size and sediment transport rate are estimated using the signal. Although many methods have been developed for the analysis, its process is rarely regarded as signal processing, regardless of the existence of many signal processing techniques. In addition, current methods often depend on site-dependent coefficients, and therefore their generality are low. Signal processing generally consists of three steps: denoising, feature extraction, and modelling. The accuracy of the model greatly depends on method selection in each step. In this study, the goal was set to improve model accuracy and generality for modelling. For that, Gaussian Process Regression (GPR) was selected considering its high expressiveness and interpretability. The model tuned with flume experiments provided high accuracy in bedload transport rate estimate for field data using only signals, flow velocity, and water depth.

1. はじめに

山地河川における掃流砂観測手法の一つとして、間接的計測法が幅広く使用されている (Rickenmann, 2018)。例えば、日本で一般的なハイドロフォンによる観測では、内部にマイクロフォンが導入された鋼製パイプを河床に設置し、記録された砂礫のパイプへの衝突が起こす音響信号を手がかりに、流砂量や粒径を解析する。解析法に関しては、様々な手法が提案されているものの、確立されているとは言えず、また、音響信号の解析であるにも関わらず信号処理として明示的に研究されている例は少ない。

信号処理の流れは、一般的にノイズ除去、特徴量抽出、モデリングの三段階から成る。著者らは、それぞれの段階に対して砂礫が生じる音響信号に適した手法の模索を行ってきた。本発表では、特にモデリングに焦点を当て、近年データ解析の分野で注目を浴びているガウス過程回帰 (GPR) を用いた流砂量推定について述べる。

2. ガウス過程回帰

GPR は、ノンパラメトリック回帰モデルで、次の特長がある。

- 非線形で高い表現力
- 背景知識を取り込むことができ、解釈性が高い
- 過学習が起りにくい
- 予測値が確率分布ゆえ、不確実性を評価できる

- 解析的に予測値を計算することができる

間接計測で得られる信号は、水理条件、流砂量、モード (滑動、転動、小躍動)、粒径など多くの要素に依存しており、それら全てのモデル化は難しく、不確実性が高い。一方で、流砂量と信号強度の線形関係など、幾つかの力学的知見は定式化されつつある。そこで、本研究では、これら力学的知見を活用しつつ、不確実性は柔軟な回帰関数で補える GPR を選択した。また、しばしば水路・現地キャリブレーションで得られる回帰関数の、洪水時の流砂信号への適用は外挿となり、予測値が不確実性とともにも与えられることは、治山・防災という観点からも貴重である。なお、GPR の詳細については、小柴ら (2020) にある。

3. 観測装置及び手法

(1) 使用した観測装置

本研究では、インパクトプレート (IP) と呼ばれる間接的観測技術を用いている。これは、長辺 49.2 cm、短辺 35.3 cm、厚さ 1.5 cm の鋼製プレート内に、マイクロフォンを固定した装置で、プレートに礫が衝突した際に発生する音は、マイクロフォンによって拾われ、データロガーを通じてサンプリング周波数 50 kHz で記録される。

(2) 訓練データ

訓練データ収集のために、水路実験を行った。実験水路の下流端に IP を設置し、上流から礫を

投入し流下させることで音響信号を記録した。ここで、流速 $V=2.5\sim 8.7$ m/s、粒径 $D_s=2\sim 100$ mm、質量 $W=40\sim 29,000$ g の範囲で変化させ、約 700 回の実験データを取った。

(2) テストデータ

上記実験データを用いて作成したモデルの検証には、小渋ダム排砂バイパストンネルにおける現地実験データを用いた。当実験では、トンネル内に置土をし、上流から引き込んだ清流により土砂を流下させ、吐口の IP で観測した。ここで、 $V\approx 2.0\sim 4.0$ m/s、 $D_s=5\sim 50$ mm、土砂体積 $V_s=1\sim 9$ m³/s の範囲で変化させ、10 回の実験データを取得した。

(3) 取得した信号の処理

実験で得たデータは、離散ウェーブレット変換によるノイズ除去を施した。その後、信号を絶対値化し、包絡線をとった。この包絡線を 11 レベルの増幅率 ($Amp = 2^0\sim 2^{10}$ 倍) で増幅し、事前に設定された閾値を超えた回数をパルス数 (特徴量) I_{ps} とした。これに水位と流速を加えた 13 変数を入力データの候補とした (小柴ら, 2020)。

4. 流砂量の推定結果

流砂量の推定結果を図-1 に示す。ここに、K1-K10 は、現地実験 (検証データ) を表しており、縦棒が、水路実験データを用いて作成されたモデルを検証データに適用することで得た推定土砂体積の予測幅を示す。それぞれのモデルの詳細な構成方法は、小柴ら (2020) を見て頂きたい。

図-1a は、全ての実験データを滑らかに繋ぐような関数形で表される重回帰に対応する GPR で、外挿の場合は大きな不確実性が生じるナイーブなモデルである。流量が大きく、水深・流速が大きいケースでの過小評価が顕著である。これを、IP を飛び越える粒子の増加に起因する過小評価と考え、水深、流速との線形関係を考慮したモデルを図-1b に示す。流量が大きい実験 K7-K10 における過小評価が大きく改善されていることがわかる。

より陽に跳躍長を加味したものを図-1c に示す。なお、跳躍長は、Auel ら (2017) の式を用いて計算した。過小評価は、さらに改善したが、若干不確実性が大きくなった点が懸念点である。

最終的に、試行錯誤的にモデル構造を探索し、図-1d を得た。ここでは、分散の課題は残るもの

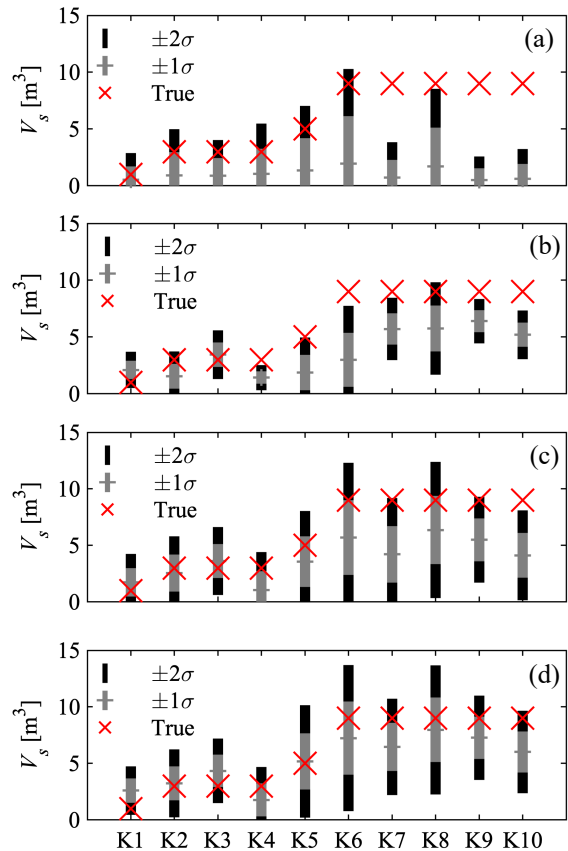


図-1 掃流砂量の推定値と偏差。赤い×印は、真の値

の、ほぼ $\pm 1\sigma$ 内に推定値が収まり、誤差は 10 倍のオーダーを大きく下回っている。これは、従来のモデルが 100 倍以上の誤差を許容していることを踏まえると、大きな精度向上である。

本研究では、モデルの精度及び一般性を高めることを目的とし、GPR を採用した。GPR は、近年の機械学習に期待される高い表現力を保ちつつも、柔軟に背景知識をモデルに反映することを可能とする。不確実性と理論双方を組み込んだモデリングができる GPR は、知見が十分に定式化されていない間接流砂観測データ解析に有用であると考えられる。

参考文献

- D. Rickenmann: Bed-load transport measurements with geophones and other passive acoustic methods *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.143, No.6, 03117004, 2017.
- 小柴孝太, 角哲也: ガウス過程回帰を用いた音響信号に基づく掃流砂量・粒径の推定, 土木学会論文集, B1 (水工学), 2020.
- C. Auel, I. Albayrak, T. Sumi, and R. M. Boes: Sediment transport in high-speed flows over a fixed bed: 1. particle dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.42, No.9, pp.1365-1383, 2017.