

河床表面の圧力変動計測による洪水流・土砂移動の把握

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 濱口遼馬

名古屋大学大学院工学研究科 油治 瑛

名古屋大学大学院工学研究科 正会員 椿 涼太

1. はじめに

河床材料の移動は治水や河川環境に大きな影響を与えるため、河床材料の移動状況を把握することは河川管理の上で大きな意義を持つ。河床材料は河川流により移動し、特に河床近傍の乱流の影響を強く受ける。河床近傍の乱流について河床近傍での圧力変動から観察できることが示唆されている（例えば Amir ら（2013））。本研究では、河床に模擬粗度（河床材料と同じ形状・サイズのコンクリート）を設置し、その表面の三箇所に作用する水圧を長期間にわたって最大 50 Hz で記録可能なシステムを利用して、洪水時の河床近傍の流れと土砂移動を把握することを目指す。提案手法を用いて、北海道・札内川で実施された中規模フラッシュ洪水中に実測された圧力変動データを図-1 に示す。ここで P_1 , P_2 , P_3 はそれぞれ模擬粗度の上流側、水面方向（上面側）、下流側での圧力の 5 分ごとの平均値を示す。①増水期間中（12:30-13:30）、②ピーク水位時（15:00-16:00）、③水位低下時（17:30以降）に区分することができる。図-2 に水位低下時における平均前の圧力変動データを示す。平均前のデータには、赤丸で示した突発的な圧力変動（スパイクノイズ）が生じる。これは土砂がセンサ近傍に衝突することで生じる音圧によるもので、適切な圧力変動の評価が困難となっている。本研究では、2. スパイクノイズ検出法の検討、3. スパイクノイズの検出・除去を行った圧力変動データの分析、4. スパイクノイズの分析を行い、実河川での洪水流と土砂移動の把握を試みる。

2. スパイクノイズの検出

現地観測データには図-2 に示すようなスパイクノイズが多数含まれるため、長時間のデータを分析するためには、機械的なノイズ検出方法・補正を利用する必要がある。Goring and Nikora (2002) は、スパイクノイズの含まれる時系列データについて、圧力の瞬間値 P_i 、時間微分 $\Delta P_i = (P_{i+1} - P_{i-1})/2$ 、時間方向の 2 階微分 $\Delta^2 P_i = (\Delta P_{i+1} - \Delta P_{i-1})/2$ について、平均的な値から逸脱したものをノイズと見なして除去する方法を提案した。すなわち、この 3 指標を 3 軸として各時刻のデータをプロット（図-3）し（森（2014）により公開された MATLAB コードを使用）、データの分散にもとづいて楕円体（図中の黒線）を算出し、その楕円体の外にプロットされたデータ（図中の赤点）をスパイクノイズとして除去し、除去した区間についてはその前後の有効データ（図中の青点）の分布をもとに、3 次方程式で補間するという手法を提案した。この手法は水工分野での実験データのノイズ処理法として広く利用されており、本研究でも利用することとした。

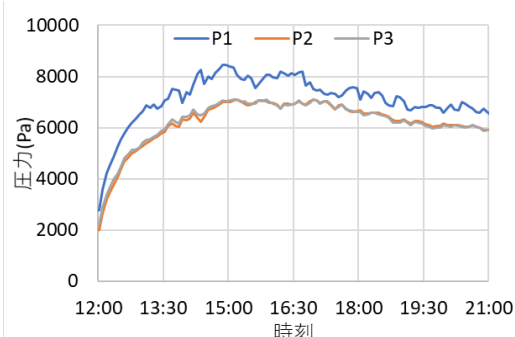


図-1 圧力変動データの 5 分間平均

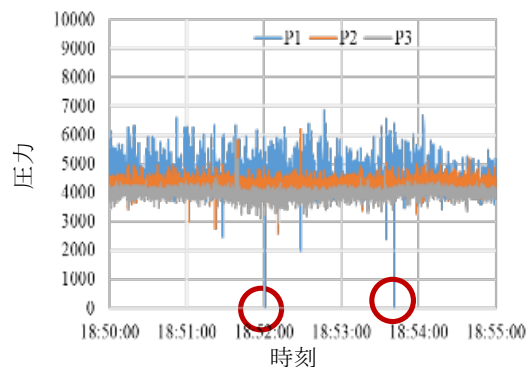


図-2 スパイクノイズを含む圧力変動データ

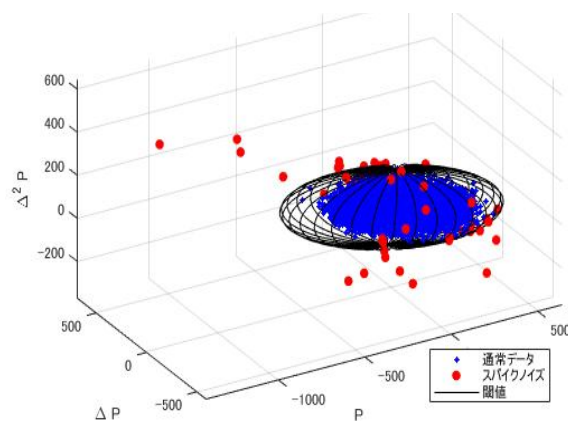


図-3 スパイクノイズ分離の様子

3. スパイクノイズを除去した圧力変動データ

1) 局所的なせん断応力について

局所的な底面せん断応力について、圧力変動の標準偏差（圧力変動強度） σ_P と、底面せん断応力 τ_0 の比が2~3程度の範囲の値をとることが Amir ら（2013）などの研究で報告されている。底面せん断応力 τ_0 の算定方法には分力計を用いるものや、流速分布や乱流特性より算定する方法もあるが、これらの方法は現地で適用することは容易ではなく、本研究では、空間平均的な力のつり合い式 $\tau_0 = \rho g R I$ を用いて計測区間の底面せん断応力を算定した。ここで、 ρ ：密度、 g ：重力加速度、 R ：径深、 I ：河床勾配であり、幅広水路では $R \approx H$ と近似できる。ここに H ：水深である。現地計測結果の上面側センサ P_2 、および上下流の差圧（ $P_1 - P_3$ ）のそれぞれの変動強度 σ_P を算出し、これを、算定した τ_0 で除した値の時系列変化を図-4に示す。上下流の差圧（オレンジ線）は、既往研究（緑色で示す $\sigma_P/\tau_0 = 2.0 \sim 3.4$ の範囲）よりも概ね大きな値を取り、この傾向は複数の計測地点でも同様の傾向であった。上下流の差圧が既往研究よりも大きめの時刻では、別途ハイドロフォンで観測した土砂移動が活発であった時刻と対応していたことから、掃流砂が移動する状況で P_1 の圧力変動強度が増加していたと考えられる。上面側（青線）については、既往研究の範囲に概ね収まっている。このことから、上面側の圧力変動強度より局所的なせん断応力を評価できることが示唆される。逆に、底面せん断応力の増加にともなう圧力変動強度の増加を正規化（無次元化）するために、圧力変動 σ_P を τ_0 で除することが有効であることが分かった。

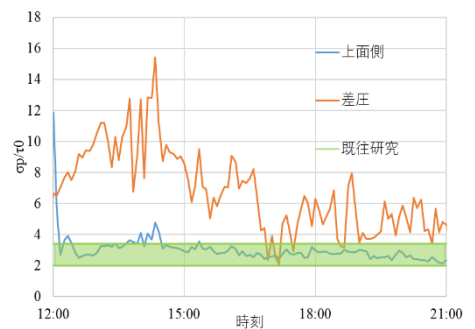


図-4 σ_P / τ_0 の時間変化

2) 圧力変動のピーク周波数の変動

①増水期間中（12:30-13:30）、②ピーク水位時（15:00-16:00）、③水位低下時（17:30-18:30）の3つの時間帯について、底面せん断応力 τ_0 で正規化した上面側の圧力変動データ P_2 について、フーリエ変換および、時系列で周波数分析が可能なウェーブレット変換を行って検討したところ、時間帯①で2~3 Hz、時間帯②で3 Hz、時間帯③で2 Hz程度の周波数帯でピークが見られた。

4. 検出されたスパイクノイズを用いた掃流砂量の推定

礫のセンサ近傍への衝突によって生じる衝突音の振幅は、基本的に衝突礫の質量が増加するに従い大きくなる（坪下ら 2015）という特性を利用し、掃流砂の量の算定を試みた。衝突音は20 kHz程度の圧力変動が0.2秒程度の長さで減衰していく波形をとるが、50 Hz程度の記録では、その減衰過程の一部のみが記録される。また、抽出されたスパイクノイズには、礫衝突起因のもの以外に、乱流成分による圧力変動も混在している。そこで、スパイクノイズを圧力振幅の大きさに着目して、①大きい礫の衝突、②小さい礫の衝突、③乱流成分起因の3つに分類し、土砂の移動量を算定した。また、ハイドロフォンで観測された土砂移動量との比較することで算定された土砂移動量の妥当性を確認した。

5. まとめ

Goring and Nikora のノイズ除去法を用いることで、スパイクノイズを概ね分離できた。ノイズ除去後の、上面側の圧力変動と底面せん断応力の比 σ_P/τ_0 は3と、既往研究の範囲と一致したことから、実河川での底面圧力計測を行うことで局所的底面せん断応力を算定できる可能性がある。洪水波形に応じて、ピーク周波数が変化することが確認できた。分離したスパイクノイズから、土砂移動量が概ね算定できた。

6. 参考文献

- 1) D G. Goring and V I. Nikora (2002): Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data: J. Hydraul. Eng., 128(1): 117-126
- 2) M. Amir, V. I. Nikora and M. T. Stewart (2014): Pressure forces on sediment particles in turbulent open-channel flow: a laboratory study, J. Fluid Mech., vol. 757, pp. 458-497.
- 3) 坪下健太郎・椿涼太・河原能久(2015)：衝突音を利用した礫河川の掃流砂観測手法に関する研究，土木学会論文集，Vol.71，No.4，pp. I823-I828.
- 4) 安達幹治・大本照憲・近藤嘉人(2020)：二次元角柱粗度を伴う粗面乱流において高濃度土砂が大規模渦に与える影響，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol76，No.2，pp.I_1057-1062