

非線形安定解析に基づく砂州波高の長期予測手法の実河川への適用性評価

関 翔平^{1,2)} 安田 浩保³⁾

1)新潟大学大学院 自然科学研究科 2)日本学術振興会 特別研究員DC1 3)東京大学 生産技術研究所



1. 背景・目的

- 気候変動の影響による河川流量の増加は、河道によっては、砂州波高が増大する方向に作用する可能性がある。流量に応じて変動する砂州波高を正確に予測することが一層求められる
- 近年、非線形安定解析に基づく砂州波高の長期予測手法が注目視されている。これは、運動方程式、流体・流砂の連続式を縮約した1本のLandau方程式に基づいて波高を推定するため、数値計算と比較して、計算負荷を大幅に抑えられる
- 一方で、安定解析による推定値と現地での測量値を時系列で比較した例はほとんどなく、妥当性や適用限界は不明
- 定期横断測量による実測値を使用した検証により、手法の適用条件を明らかにする

2. 対象地と使用データ

- 河道形状が直線的で、砂州上の樹林化が進行していない地点
：長岡水位観測所（信濃川），浦佐水位観測所（魚野川）
- 地形データ
：定期横断測量成果（2000年以降）
- 流量データ
：国土交通省 水文水質データベース
- 砂州波高の定義
：横断面における砂州の最頂部と最深部の差

3. 河道の変遷

- 2006年1月-2011年9月: 右岸で約70 mの河岸侵食が進行
- 2011年9月: 右岸で約4 mの河床洗掘が発生
- 2013年-2014年: 右岸に高水敷を造成、左岸の堆積部の掘削
- 2019年12月: 左岸で再堆積

4. 解析方法：砂州の弱非線形安定解析

- Landau 方程式に基づく砂州波高の予測

$$\frac{dH}{dt} = \lambda_0 H + \lambda_1 H^3$$

$$\frac{dH}{dt} = \lambda_0 H \left\{ 1 - \left(\frac{H}{H_e} \right)^2 \right\}$$

$$H_e = \sqrt{-\frac{\lambda_0}{\lambda_1}}$$

H : 砂州波高, t : 時間, λ_0 : 線形増幅率, λ_1 : 第一Landau定数, H_e : 平衡波高

方程式を離散化し、 λ_0, λ_1 を非線形解析により各時刻ごとに算出

$$H^{t+\Delta t} = H^t + (\lambda_0^t H^t + \lambda_1^t (H^t)^3) \Delta t$$

$$\lambda_0^t, \lambda_1^t = f(W, I, d, Q^t), g(W, I, d, Q^t)$$

W : 低水路幅, I : 河床勾配, d : 粒径, Q : 流量

流砂量 q_s : Parker (1978)

$$q_s = 11.2 \frac{(\tau_* - \tau_{*c})^{4.5}}{\tau_*} \sqrt{sgd^3}$$

河床抵抗係数 c_0 : Engelund and Hansen (1967)

$$c_0 = 6 + 2.5 \ln \frac{h_0}{2.5d}$$

τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, s : 砂の水中比重, g : 重力加速度, h_0 : 等流水深

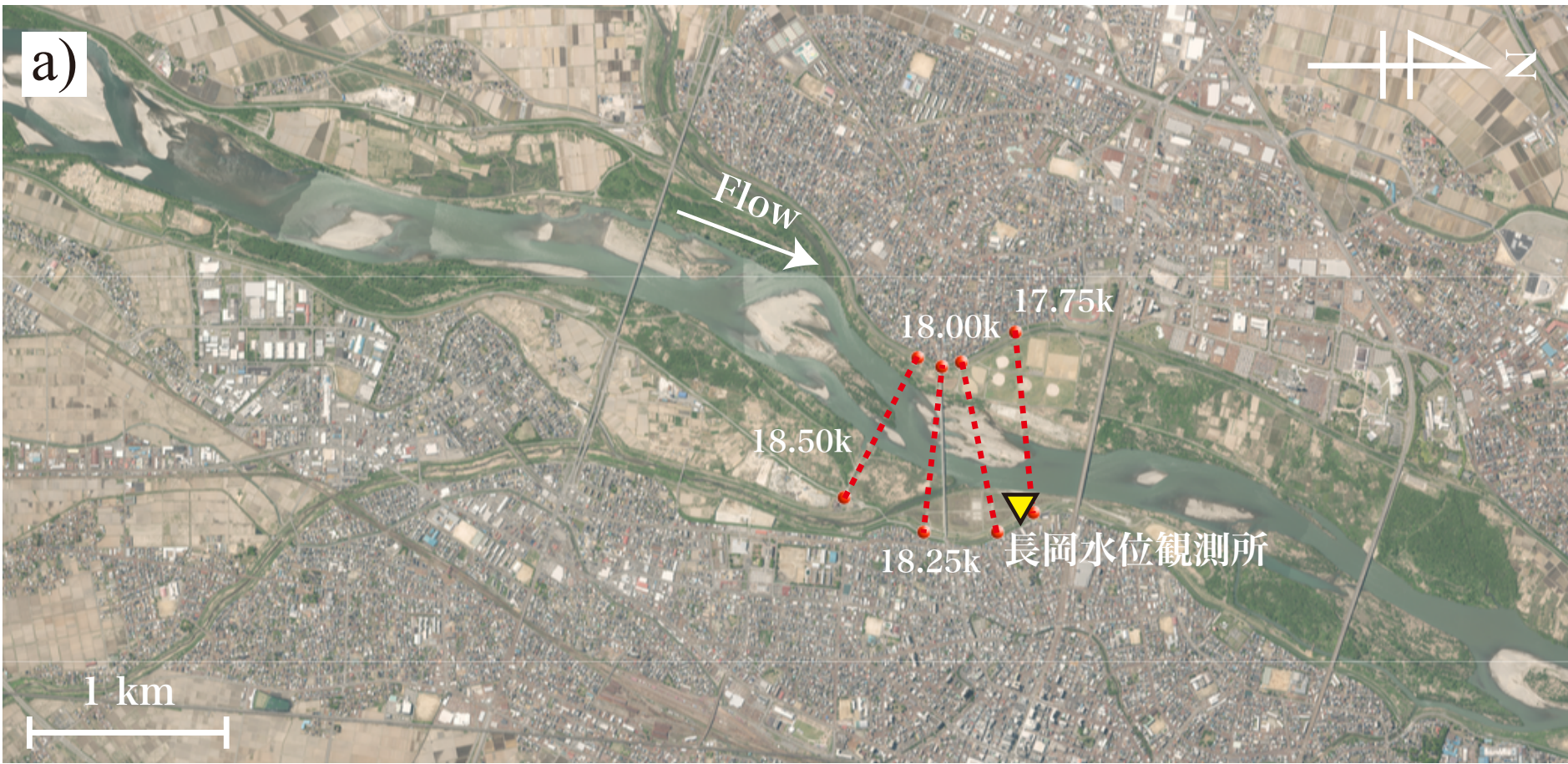


図-1 長岡水位観測所（信濃川）付近のa)航空写真、b)低水路の河道断面形状（18.00k）

表-1 各河川の河道特性

観測所	年代	低水路幅※2 (m)	河床粒径※3 (mm)	河床勾配※4	セグメント
長岡※1	2002–2013	399	47	1/1250	2-1
	2016–	329	44		
浦佐	2002–	91	54	1/297	1

※1 河道掘削が実施されたため、二期間に分けて解析を実施

※2 定期横断測量で得られた値の各年代の平均値

※3 河床材料調査で得られた表層材料の平均粒径の各年代の平均値

※4 河川整備計画における計画河床勾配

- 砂州波高の推定は、流量が土砂輸送発生の臨界流量 Q_i を超える場合に実施

$$Q_i = W c_0 \sqrt{g I} h_i^{3/2}$$

$$h_i = \frac{\tau_{*c} s d}{I}$$

τ_{*c} は岩垣 (1956) の式により推定

- 砂州形成流量 $Q_i < Q < Q_c$
砂州形成臨界流量 Q_c : $\lambda_0 = 0$ となるとき流量例)

$$Q_i < Q < Q_c \text{ かつ } H < H_e$$

→ 波高は増幅

$$Q_c < Q \text{ かつ } H < H_e$$

→ 波高は減衰

5. 流量および砂州波高の観測履歴

- Q_i を上回る洪水の発生は稀、低水路幅が広く、河床勾配が緩いため、河道全体で土砂輸送が発生する頻度が少ない
- 2004年、2006年に砂州形成流量に到達する洪水を経験するも、砂州波高はほぼ変化せず
- 2011年の新潟・福島豪雨は砂州形成流量に到達しており、波高は1.8 mほど増加
- 河道掘削を実施するも、2017年、2019年の二度の台風が砂州形成流量に到達し、波高は再び増加

6. 解析結果

- 図-2a 非線形安定解析による推定値は、実測値の変化と比較してほぼ変化せず、2016年以降にはむしろ減少
▶ λ_0, H_e の推定が実測値を過小評価している
- 簡易な補正パラメータ a, b (時間的に一定) の導入

$$\frac{dH}{dt} = \lambda_0^{\text{re}} H \left\{ 1 - \left(\frac{H}{H_e^{\text{re}}} \right)^2 \right\}$$

$$\lambda_0^{\text{re}} = ab \cdot \lambda_0, \quad H_e^{\text{re}} = \sqrt{b} \cdot \sqrt{-\frac{\lambda_0}{\lambda_1}}$$

- 図-2b 補正後の推定は実測値を良好に再現

- 図-2c 波高推定の精度は、入力とする流砂量式に依存する。感度分析として、MPM式を使用した解析結果と比較

$$q_s = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3}$$

- 補正係数 a はParker式と比較して大幅に小さくなるが(表-2)，時系列ではより早い段階で最大値に近づき、特に2006年から2009年にかけて、実測値を過大に評価

7. 考察

- 図-3b,d H_e は流砂量式にほぼ依存しない
- 図-3a,c λ_0 は流砂量式によってオーダーと流量応答が変化する。MPM式を使用した場合、 λ_0 は流量に対して緩やかに増加する一方、Parker式を使用した場合、 λ_0 は流量に対して急激に増加。2011年新潟・福島豪雨に対する砂州の応答と整合
- 砂州波高の長期予測には、砂州形成流量帯における増幅率の流量依存性を適切に表現できる流砂量式の選択が重要

8. 課題と河川管理への活用方法

- 河道ごとの補正值 a, b や流砂量式は、測量した砂州波高から決定し、将来予測に適用。一方、補正值の物理的意味の明確化が課題。補正值には実河川の複雑な特性（河道形状、砂州形状、混合砂の分級、河床応答の遅れ、湾曲部の二次流など）が内在
▶ 洪水時の流況・河床変動の詳細な観測等により河道の特性を把握し、それを仮定に組み込む安定解析の拡張が有効
- 理論的に求めた砂州形成流量に達する洪水の発生頻度と砂州波高の応答を予測することで、気候変動を考慮した河道計画、河道掘削後の再堆積評価、維持管理の実施頻度を検討する際の判断材料を提供

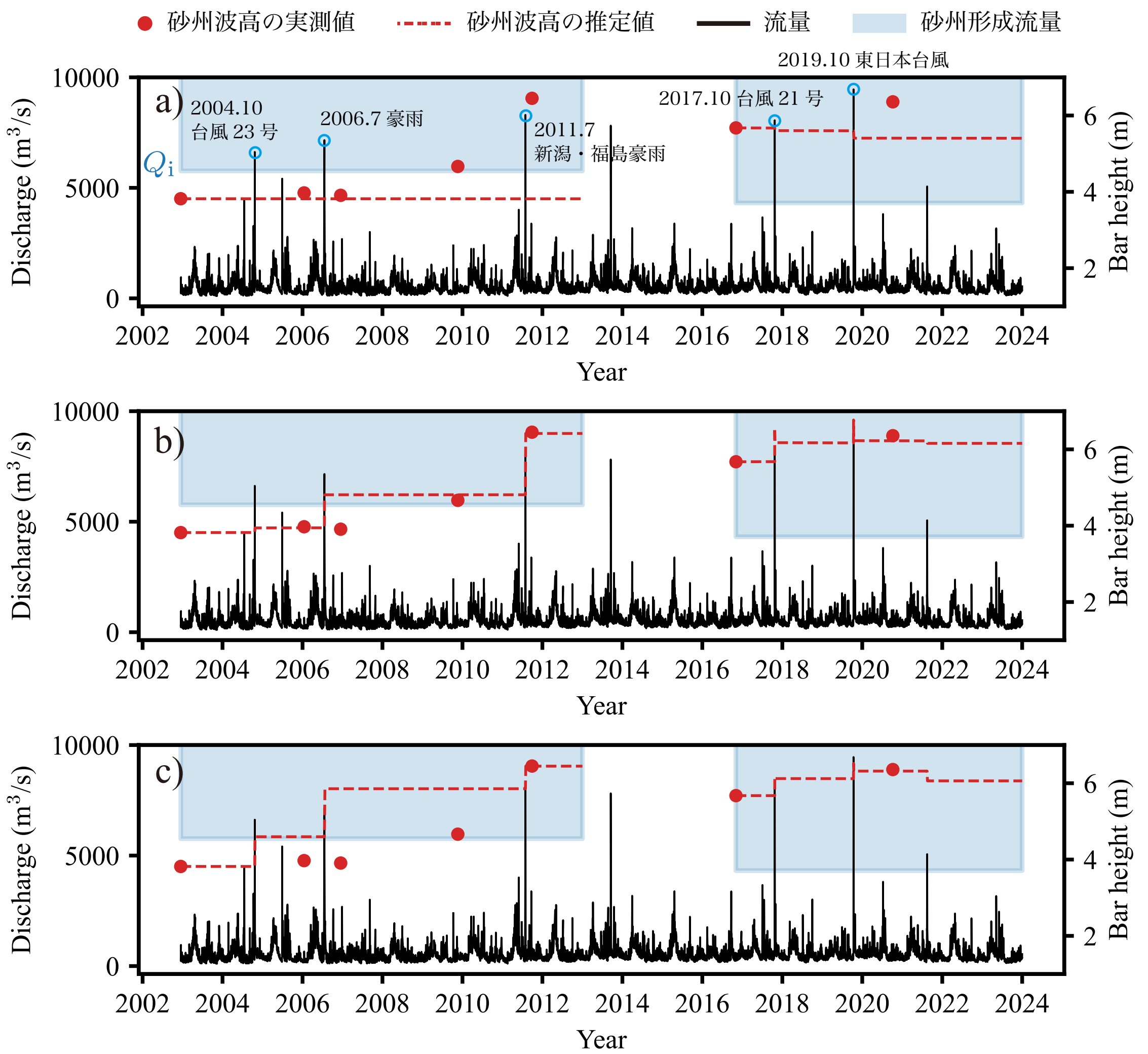


図-2 a)長岡水位観測所における流量と砂州波高の実測値と推定値の関係、流砂量式にParker式を使用。b)補正係数導入後の推定結果。c)流砂量式にMPM式を使用し、補正係数を導入した結果

表-2 長岡の補正係数

	a	b
Parker式	300	5.1
MPM式	2.1	5.02

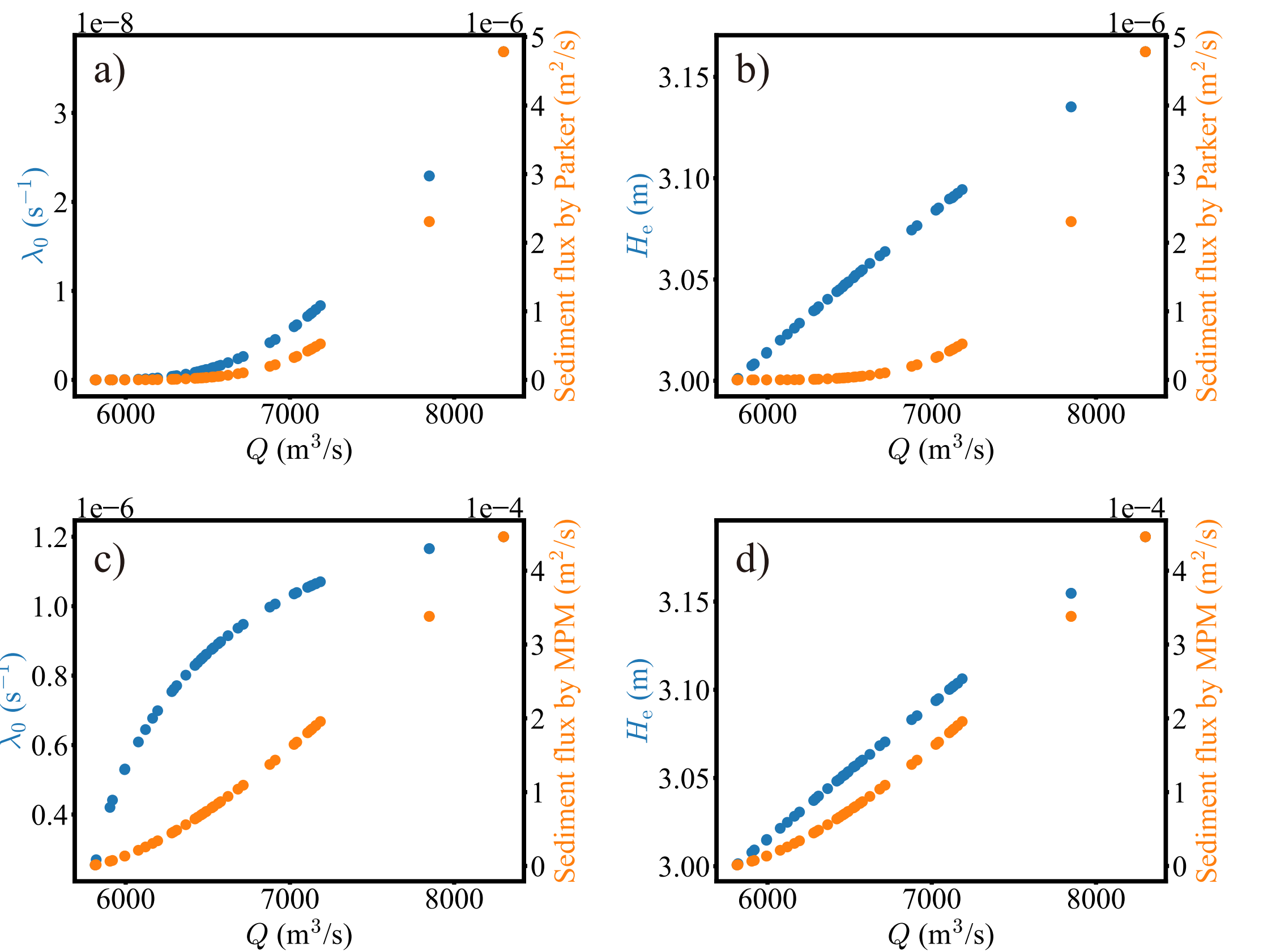


図-3 長岡で発生した流量に対応する非線形安定解析の推定係数（左縦軸、青）および流砂量式（右縦軸、オレンジ）。a),c)線形増幅率 λ_0 , b),d)平衡波高 H_e , a),b)Parker式, c),d)MPM式