

流砂関数を用いた不等流におけるエネルギー勾配の推定 Estimation of energy gradient in the non-uniform flow using the Mayer-Peter-Muller formula

黛由季 (新潟大・工) 安田浩保 (新潟大・工)

Yuki MAYUZUMI, Niigata University

Hiroyasu YASUDA, Niigata University

FAX:+81-25-262-7050, E-mail:hiro@gs.niigata-u.ac.jp

Energy gradient of open channel flow has been generally estimated with the Manning's formula for uniform flow. Therefore, almost natural river form non-uniform flow, it is unclear whether energy gradient of uniform flow can be applied non-uniform flow. We calculated the energy gradient of non-uniform flow using the Mayer-Peter-Muller formula. We showed that the difference between energy gradient in non-uniform flow and in uniform flow with roughness coefficient as constant is more than 50%.

1. はじめに

様々な流砂についての流砂関数は数多く提案され、これらの良否がしばしば議論される。いずれの流砂関数も主要な支配物理量は無次元掃流力 τ_* とし、その支配変数は摩擦速度 u_* である。 u_* は $\sqrt{gh i_e}$ として算定される。ここに、 g は重力加速度、 h は水深、 i_e はエネルギー勾配である。このうち、 i_e の算定には Manning などの等流公式が頻用される。 i_e の算定に Manning の式を用いる場合、粗度係数 n の選定が必要となり、 n は底面の材料毎に規定されると考えて定数とすることが一般的である。Manning の式が等流公式であることに立ち返ると、 n を定数として扱うことは当然の帰結である。一方で、定常流かつ同一の底面材料であっても、流速 v と水深 h の様々な組合せがあり得る不等流では、 n が定数となることの実証はされていないが、その組合せに応じて n も空間の関数となると考える方が自然である。不等流のエネルギー勾配 i_{eN} は、 v と h の組合せ毎に決定される n が反映された上での算定が合理的であり、 n を定数とした等流の思想のエネルギー勾配 i_{eU} がどの程度代用できるかの検証が必要である。様々な流砂関数の良否の議論は i_{eN} と i_{eU} との差異を明確にした上で行われるべきであろう。

本研究では、様々な不等流が期待できる交互砂州を発達させる模型実験を行い、その実験から得られた測定値を流砂関数に与えることで不等流における i_{eN} の算定を試み、等流の思想のエネルギー勾配 i_{eU} との差異を調べた。

2. 模型実験

本研究の実験では、全長 12 m、流路幅 0.45 m、水路勾配 1/120 の直線の矩形断面水路を用いた。その底面に平均粒径 0.76 mm の 4 号珪砂を厚さ 5 cm に敷設し、これを初期底面とした。また、水路の下流端には水路から排出される掃流砂量 q_B の横断分布を計測するため、収集箱を横断方向に 14 個並べ、20 分間隔で計測した。

水理条件は、交互砂州を発生させるため、黒木・岸²⁾の領域区分図を参考にして川幅水深比 $BI_0^{0.2}/h$ を交互砂州の発生領域に位置する 14.5 とした。ここで、 B は水路幅、 I_0 は水路勾配である。この時の流量は 1.7 L/s、無次元掃流力は 0.079 である。給砂条件は無給砂で、通水は砂州が十分に発達した 240 分までとした。その間、通水を継続したまま水面と底面を同時に計測が可能な Stream Tomography (以下、ST)¹⁾を用い、5 分間隔の計測を行った。後述する水理計算に用いた h は水面位と底面位の差し引きから得た。

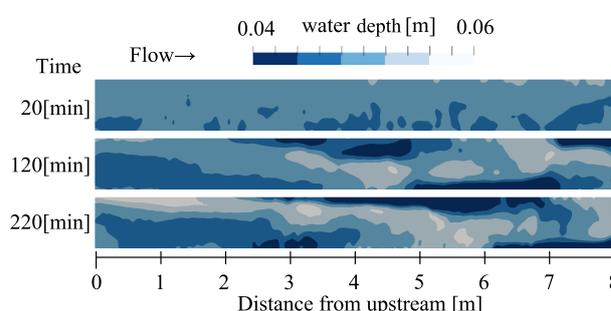


Fig. 1: Plane figures of water depth

3. 実験結果

3.1 底面起伏と水深の空間分布

本研究では ST を用いて通水を継続したまま 5 分ごとに水面と底面の形状を計測した。Fig.1 に初期の平坦床と、砂州の発生と発達それぞれの過程における水深の空間分布を示した。同図から、通水開始から 20 分が経過した段階ではほぼ平坦床、その後、通水開始から 120 分が経過すると明瞭な交互砂州が形成され、220 分が経過すると洗掘域と堆積域の標高差の拡大が確認できる。

3.2 下流端の流砂量と等流のエネルギー勾配との対応関係

本節では、等流と不等流の各々の i_e の差異の把握を目的として、実測された q_B と i_{eU} を用いて算定した掃流力とを比較した。

掃流砂を計測した全 12 時刻分の結果のうち、平坦床とみなせる 20 分と、交互砂州が発達した 220 分の二つの時刻における下流端の底面位と水面位の実測値、 q_B の実測値、 τ_*/τ_{*c} の計算値を Fig.2 の a) から c) に示した。同図は図面左が右岸、右が左岸である。同図 c) の掃流力は、iRIC³⁾ に同梱される Nays2D を用い、 n は定数とし、ST で実測した底面形状における固定床の水理計算から求めた。ただし、各時刻の n は異なる。その理由は、実測の h と水理計算の h の差異が最小となるように決定したためである。

底面形状がまだ平坦床でほぼ等流状態であることが推測される通水開始から 20 分における q_B と掃流力の対応関係は以下の通りである。Fig.2 の a) に示した実測の水深はほぼ一様、b) に示した横断方向の q_B は $\pm 50\%$ 程度の範囲で一様だった。同図 c) に示した水理解析から求められた掃流力の横断方向の分布も $\pm 50\%$ 程度の分布であった。

明瞭な交互砂州が形成された通水開始から 220 分後にお

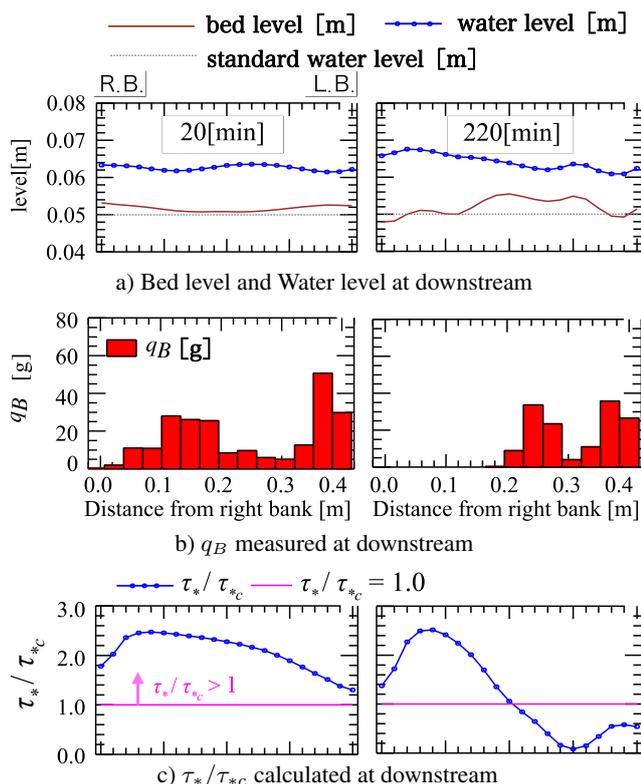


Fig. 2: Measured and Calculated values at a model experiment (Left:20[min], Right:220[min])

ける q_B と掃流力の対応関係は以下の通りである。Fig.2 a) より水深は横断方向に分布し、Fig.1 も併用すると、縦断方向と横断方向のどちらにも水深分布を有する不等流であることが推測される。b) に示した横断方向の q_B は図中の流心から水路左岸の範囲に偏在していた。また、同図 c) に示した掃流力の横断方向の分布は同図 b) の q_B とは逆に右岸の範囲に偏在していた。

上記から、通水開始から 20 分後の等流と推測される時刻では、流砂関数の数理構造である q_B と τ_* との比例関係が認められる。一方で、220 分のような明瞭な不等流が形成される時刻では q_B と τ_* との比例関係は認められない。前述したとおり、 τ_* は ST による実測の h と定数の n を用いて算定した。つまり、 n を定数とした等流の思想により、不等流における i_e の算定が困難であることが推測される。

4. 流砂関数を用いた不等流におけるエネルギー勾配の推定

4.1 不等流におけるエネルギー勾配の算定方法

本章では、 h と v が空間で変化する不等流における i_{eN} と、そこでの n を定数とした i_{eU} とがどれほど異なるかを調べた。前述のとおり、ST による h と、水路下流端における q_B の横断方向の分布を計測している。本節では、これらの計測値を流砂関数に与え、特定が不可能な n を介在せずに i_{eN} を算定した。この算定のための流砂関数は Mayer-Peter-Muller の式⁴⁾を用いることとし、 i_{eN} を

$$i_{eN} = \frac{sd}{\sqrt{64sgd^3h}} (q_B^{2/3} + \tau_{*c} \sqrt{64sgd^3}) \quad (1)$$

と算定した。ここで、 d は河床材料の粒径、 s は河床材料の水中比重である。 i_{eN} の算定に式 (1) を用いた理由は、式 (1) と、それと同様に常用される芦田・道上式⁵⁾の両者は、

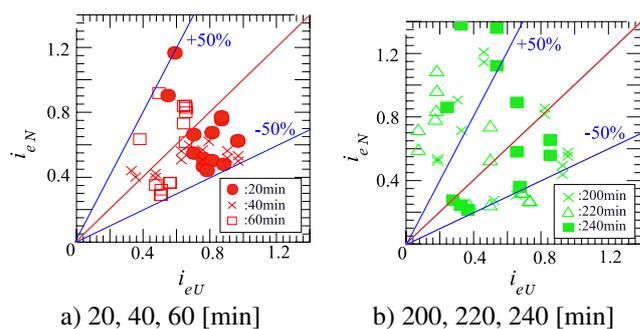


Fig. 3: Relationships between i_{eU} and i_{eN}

実河川などに頻出する τ_* における q_B の算定値の差異が小さく、式 (1) の固有性の影響が少ない i_{eN} を得られると考えたためである。

4.2 等流と不等流のエネルギー勾配の比較

Fig.3 の二つの図はどちらも横軸が n を定数とする等流の思想の i_{eU} 、縦軸がその時刻における実測の h と q_B を式 (1) に与えて求めた不等流における i_{eN} である。通水開始から間もなく底面の起伏が小さく流れの状態は等流と推測される通水開始から 20 分、40 分、60 分の 3 つの時刻と、明瞭な交互砂州が形成された流れの状態は不等流と推測される通水開始から 200 分、220 分、240 分の 3 つの時刻の i_{eU} と i_{eN} を示した。いずれの時刻ともに q_B の計測数である 14 個の値を明示している。

まず、Fig.3 a) に示した等流と推測される通水開始から間もない 3 時刻の結果を見ると、赤線で示した一对の対応関係の線付近に i_{eU} と i_{eN} の値が位置し、両者の差異は最大でも $\pm 50\%$ 程度であった。一方で、同図 b) に示した明瞭な不等流が形成された 3 時刻では、両者の差異は $\pm 50\%$ を越える結果となった。これらのことから、 n を定数とする等流の思想の i_{eU} により不等流が顕著となる流れにおける i_e の算定は困難であることが示唆される。

5. おわりに

本研究では、1) 不等流におけるエネルギー勾配を実測の水深と掃流砂量 q_B を流砂関数に与え、 n を介在せずに算定し、2) それと粗度係数を定数とする等流の思想のエネルギー勾配を比較したところ両者の差異は $\pm 50\%$ 以上に達することが分かり、3) 等流の思想のエネルギー勾配により、交互砂州上などの 2 次元的不等流におけるエネルギー勾配の正確な算定が困難であることが示唆された。

参考文献

- 1) 星野 剛, 安田 浩保, 倉橋 将幸: 交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発, 土木学会論文集 A2 (応用力学), vol.74, 1, pp.63-74, 2018.
- 2) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, No. 342, pp.87-96, 1984.
- 3) 北海道河川財団, <http://i-ric.org>.
- 4) Mayer-Peter E., Muller: Formulas of bed-load transport, Proc.2nd IAHR Congress, pp.39-64, 1948.
- 5) 芦田 和男, 道上 正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, vol.1972, 206, pp.59-69, 1972.