

分散関係式から推定した流況と水面形状の妥当性検証

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○田所 祐輝
新潟大学 BDA 研究センター 正会員 茂木 大知
新潟大学 災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 はじめに

砂礫で構成される河床には、河床波と称された異なるスケールを持つ周期的な起伏形状が自発的に形成される。これらの河床波は、スケールが小さい順に砂漣、砂堆、砂州に区分され、その発生・発達機構が理論的・実験的研究から明確にされてきている。しかし、これらの河床波の発生・発達機構は、理論的見解とは異なる観測事実が種々の研究から¹⁾²⁾指摘されているため、解明に至っていない。

三種の河床波の発生・発達機構を解明するには、これらの発生と発達の過程において時事刻々と変化していく河床形状の区分を正確に判別し、その上での分析が求められる。しかし、上記の三種の河床波を区分する支配物理量はそれぞれ異なり、河床波の発生・発達機構の解明に適した河床波の統一的区分指標は筆者の知る限りはなかった。

著者らは、砂州上と砂堆・砂漣上の鉛直方向流速分布の卓越度合いが異なるものと仮定し、微小振幅波理論から得られる分散関係式において鉛直方向流速分布の卓越度合いを表す水深波長比を用いることで、河床波上の流況の変化から河床波を区分³⁾できることを示している。この研究を通し、**図-1**に示すように、分散関係式から得た水深波長比と河床勾配を2軸とする平面上においては、三種の河床波の種別を統一的に識別できることが明らかとなった。また、砂州上の流れは鉛直方向流速が流下方向流速に比べて無視できるほど小さい浅水流、砂堆・砂漣上の流れは鉛直方向流速が流下方向流速に比べて無視できない非浅水流であることを示唆する結果も得た。この他、分散関係式は波形形状の存在による流線の湾曲が水面付近まで到達するかを算定できることから、水深波長比に基づき河床形状が水面に投影され得るかどうかを推定できる可能性を示す結果も得ている。ただし、分散関係式から推定した流れや水面形は、水面は平坦であることを仮定し、粘性や非静水圧性の効果は無視するため、その妥当性についての検証は必要である。そこで、本研究では、粘性と非静水圧の効果を考慮した水深方向の流速分布を算定できる流れの解析法を用い、分散関係式により鉛直方向流速分布と水面波形の卓越度合いの変化をどれほど推定できるかを調べた。

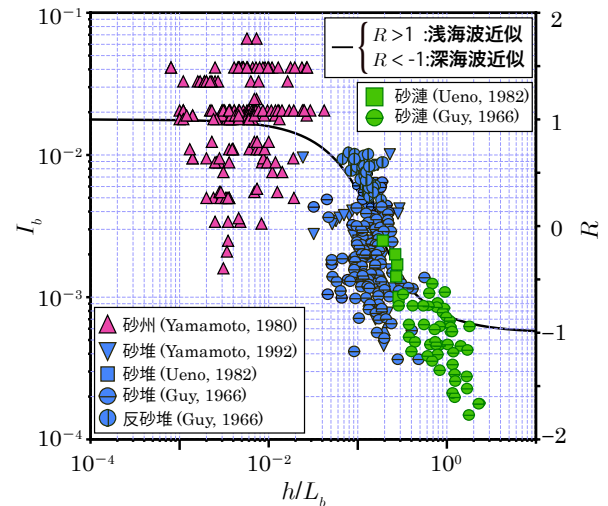


図-1: 水深波長比に基づく統一的な河床波の区分

2 解析手法

本研究では Delft 3D-FLOW⁴⁾ と称されるナビエ・ストークス方程式を支配方程式とした3次元流れ解析手法を用いた。水深波長比の違いによる流況の変化を考察するため、各河床波の水深波長比に該当するように、波長のみを変数とした以下の計算条件を設定した。川幅は5 mで、底面には河床波をsin波で模擬した起伏形状が5つ存在するように河道形状を設定した。この起伏形状の波高は初期の水深に対して、20%となる河床波の波高を設定した。格子分割数は、縦断方向は一波長を30分割、横断方向には川幅を10分割、鉛直方向は水深を100分割する大きさに設定した。波形形状の存在区間の前後には助走区間を設定しており、縦断方向に10 mでその格子は20分割している。境界条件として、等流水深が0.3 mの常流となるように、計算領域の上流端の断面から流量0.6 m³/sを均一に与え、粗度係数は Manning-Strickler 式から0.02とした。

以上の条件を与え、流れが定常となる時点までの計算をした。数値解析から算定された流況の評価は、水路中央部且つ上流から3番目に位置する河床波形でその高さが極大値となる地点において、流下方向流速の平均値と鉛直方向流速と流下方向流速の比の平均値を算定した。数値解析か

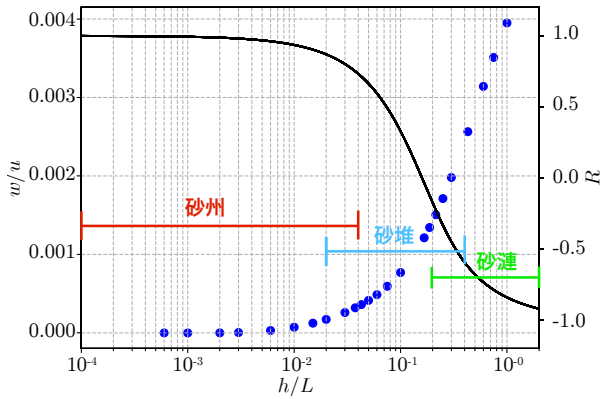


図-2: 鉛直方向 w と流下方向 u の流速比と水深波長比 h/L および分散関係 R との対応関係

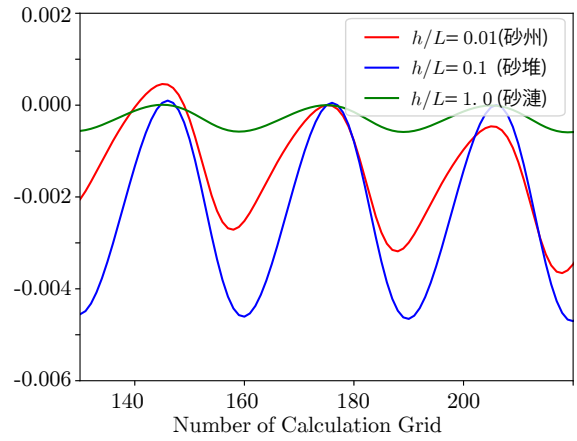


図-3: 各水深波長比の条件での水面形状

ら算定された流況は以下に示す分散関係式と比較した。

$$R = \tanh [2\pi h/L] \left(\frac{1}{2\pi h/L} - 1 \right) \quad (1)$$

式中の R は波形の存在による水粒子の運動が極浅海波領域寄りか深海波領域寄りかを判別する指標であり, h は水深, L は河床波の波長である。

3 結果

3.1 鉛直方向流速

図-2 に算定された鉛直方向平均流速と流下方向平均流速の比の平均値を各水深波長比毎に示した。同図より, 水深波長比が 10^{-2} から 10^{-1} の砂州と砂堆の遷移領域において, 鉛直方向流速が指数関数的に卓越するようになることがわかる。また, 水深波長比が 10^{-2} から 10^{-1} の範囲における分散関係式から得られる R は 1 から -1 へと指数関数的な減少を始める。つまり, 数値解析で得た結果と分散関係で得た R を照らし合わせると, 水深波長比を指標とし, 河床波上の流れが浅水流と非浅水流のどちらとなるかの判断ができることが示唆される。ただし, 本研究で設定した波形形状と水深波高比は実際の河床波を理想化してものであることと, 今回の計算では河床高さの極大値から極小値にかけて発生することが知られている複雑な渦構造は確認されておらず, 今回の結果の扱いには留意が必要である。

3.2 水面形状

図-3 に算定された水面高を各水深波長比毎に示す。横軸は上流端からの格子番号を示しており, 河床高さの極大値と極小値が存在する格子番号は全ての条件で一致している。赤線が砂州存在領域, 青線が砂堆存在領域, 緑線が砂漣存在領域に該当する水深波長比を示す。水面波形の波長は水深波長比に依らず河床波の波長と概ね一致することが示された。水面波形の波高は, 水深波長比毎に大きく異なり, 砂堆, 砂州, 砂漣の順に小さくなることが示された。

今回の計算条件は, 実現象で生じうる各河床波の波高水深比が完全に考慮したものではないが, 砂州・砂堆領域の河床波形が砂漣領域に比べて明瞭に水面波形に表出する傾向は模型実験や実河川で実測された結果と一致する。一方で, 分散関係式から推定する水面波形の波高は, 水深波長比が大きくなるにつれて小さくなることを示し, 今回の数値解析の結果とは反するものとなる。両者の差異の理由として最も大きなものとしては, 分散関係式を導出する微小振幅波理論では静水圧は仮定することが考えられ, このために数値解析の結果と分散関係式から予想される結果は反する水面波形となったものと推測される。

4 おわりに

本研究は, 水理解析を用い, 分散関係式から推定された河床波上の流れをどの程度近似できるかを調べた。その結果, 1) 水深波長比が 10^{-2} から 10^{-1} の領域において鉛直方向流速が指数関数的に卓越するようになり, これは分散関係式の推定と一致することと, 2) 砂州・砂堆領域の河床波形は砂漣領域に比べて水面へ投影される傾向を確認した。ただし, 分散関係式と数値解析の結果のうち水面波形と水深波長比の関係性は矛盾したものとなり, その要因としては微小振幅波理論の近似が低いことが考えられる。

参考文献

- 1) S. Seki, D. Moteki, H. Yasuda: Novel hypothesis on the occurrence of sandbars, Phys. Fluids, 35, 2023
- 2) On the Occurrence of Sandbars, D. Moteki, S. Seki, S. Muramatsu, K. Hayasaka, H. Yasuda, Phys. Fluids 35(1), doi.org/10.1063/5.0128760, Jan, 2023.
- 3) 小関博司, 安田浩保, 水深波長比を用いた河床波の統一的区分とその支配水理量, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号 2021
- 4) Deltares (2024) Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual, Version 4.05 (12 October 2024). Deltares, The Netherlands