

砂河川斐伊川における多重構造を有する河床波の 洪水中の移動・変形の実態分析

Analysis of migration and deformation of multi-scale sand waves in the sandy Hii River due to flood flows based on the ALB data

22D3104014L 三好 凌真 (河川工学研究室)
Ryoma MIYOSHI / River Engineering Lab.

Key Words : the Hii River, sand waves, braided river, airborne LiDAR bathymetry, multi-scale sand waves

1. 序論

砂河川斐伊川の下流部は、写真-1のような網状砂州が形成されている。河床材料が1~2mmの様な砂で構成されているため、平水時においても水流のある滞筋部で土砂移動が生じている。斐伊川では、これまで上野ら²⁾³⁾が音響測深機を十字浮体やラジコンボートに取り付け、洪水時の河床形状の変化を精力的に調べ、網状砂州（中規模河床形態）の上に砂堆（小規模河床形態）が形成され、多重構造を有する河床波が形成されていることを明らかにしている。発生頻度の高い小規模出水や、平水時には、滞筋付近で土砂移動が生じ、小規模河床形態である砂堆が形成される。一方、洪水時には河道全体で土砂移動が生じるにより、中規模河床形態である網状砂州が形成される。このため、流量規模や河道特性に応じて、どのような規模の河床波が形成されるのかを明らかにすることは河道施設の管理上重要である。

近年、ALB測量行われるようにより洪水前後の広い範囲で高密度な河床の3次元データを取得することが可能になってきた。洪水流量規模に応じた斐伊川の河床波の構造の変化を明らかにするためには、まずはALBデータを用いて斐伊川の多重スケール構造を有する河床波の分析法を構築し、それに基づき洪水時の河床波の移動・変形について考察する必要がある。

本研究では、洪水前後の詳細なALBデータを用いた波数スペクトル解析に加え、ALBデータから平滑化地形高データを差し引くことで各規模の河床波を分離する方法を提案し、洪水による各規模の河床波の形状および平面分布の変化を明らかにする。

2. ALBデータに基づく多重構造を有する河床波の洪水中の移動・変形の実態分析

(1) 対象区間、対象洪水および河床波の移動・変形の概要

本研究の検討区間は、網状砂州の形成が顕著である河口から約11~12km（河床勾配：約1/600）であり、河床材料は平均粒径約1mmの様な粒径の砂である。対象とした令和3年7月洪水は大津地点においてピーク流量は約1,100m³/sであり、上野らが計測を実施してきた洪水とほぼ同程度である。図-1は大津地点における水位



写真-1 斐伊川の網状砂州

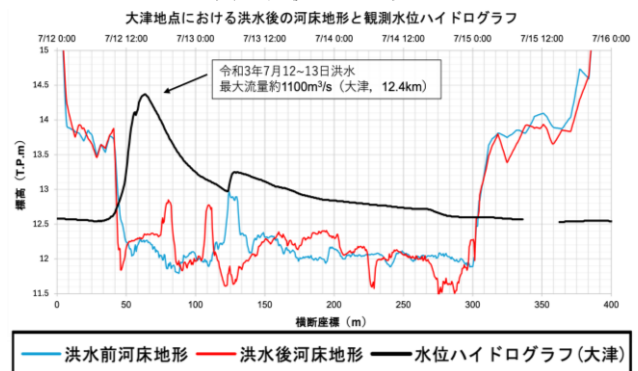


図-1 大津地点（12.4km）における R3 年 7 月洪水の水位ハイドログラフと洪水前後の河床横断面地形

ハイドログラフと洪水前後の横断面図を示す。図から、洪水は高水敷への冠水を伴う規模であったことがわかる。また、洪水減水期においても河床波が冠水する水位が長時間継続しており、約1mmの河床材料は、減水期においても砂州上の土砂が多く移動する限界掃流力を超える流れの条件であった。

図-2は、検討区間のALBデータから作成した洪水前後の河床高コンター図を示す。ここで、ALB測量（airbone LiDAR bathymetry）は、航空レーザ測深技術の一つであり、グリーンレーザ光を用いることで、陸部のみならず川底の面的な地形データも計測可能な技術である。本研究で用いた点群標高データのうち、樹木や構造物の影響を取り除いたグラウンドデータの点群密度は、砂州を含む陸部で約25点/m²、滞筋のような水部では約4点/m²であった。コンターは、砂州の形状を明瞭に表すため、洪水前の低水路平均河床からの相対高さを示している。図より、河道全域に網状砂州が形

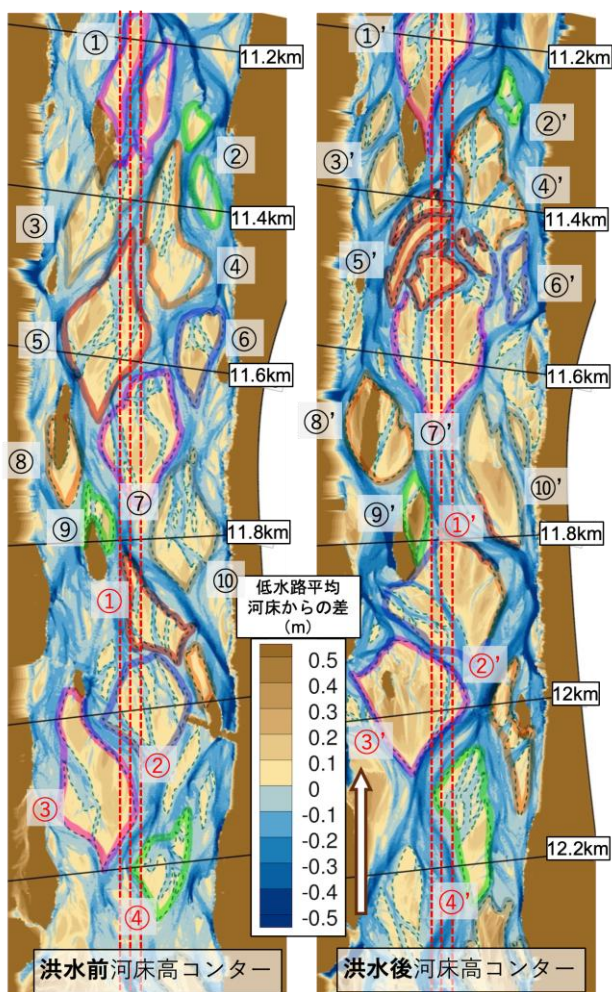


図-2 ALBデータによる河床地形コンター図

成されており、平均波長170m程度の網状砂州（図中色枠）が見られ、この砂州の内部には波長30m～100m程度の砂州も確認できる。本研究ではこれらの砂州を中規模砂州、小規模砂州とそれぞれ定義し、これらの分類と妥当性とその変化について以降で分析を行った。

図-2や洪水前後の航空写真等を用いて行なった中規模砂州の移動・変形の分析結果を示す。図-2内の黒番号（①～⑩）や赤番号（①～④）を付した中規模砂州に一つ一つについて分析を行なった。その主な特徴は以下の通りである。洪水前の波長の約60%に相当する90～120m程度移動し、波高は約40cmから約75cmに発達した。波長については、11.5km付近では約10%減少し、12km付近は約10%増加した。砂州の横断幅は、11.5km付近で約10%、12km付近で約25%増加した。二つの区間の波長や砂州の横断幅の変化の違いは、200～260mの範囲で縦断的に変化する低水路幅の影響によるものと考えられる。

(2) 波数スペクトル解析による河床の多重構造的な変形の分析

図-2で分析した中規模砂州、小規模砂州と、これまで指摘されている砂州上に形成される砂堆^{2,3)}という、異なるスケールが重なって形成される河床波の構造を

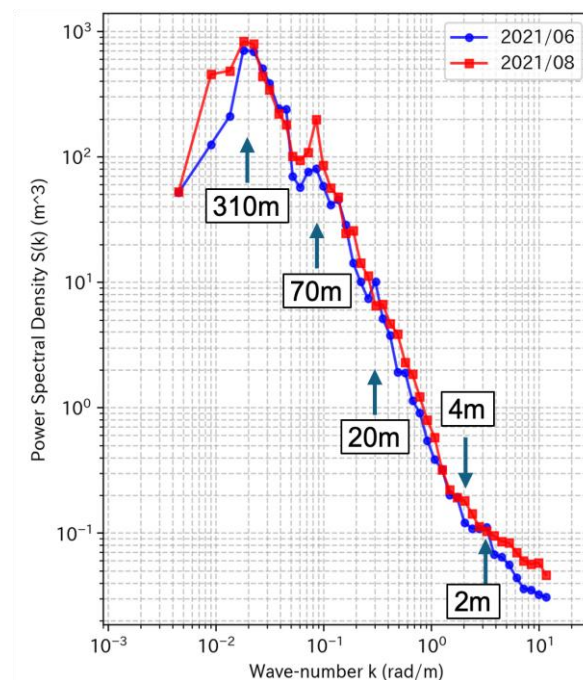


図-3 スペクトル解析結果

分析するため、河床波の卓越波長の分析に広く用いられている波数スペクトル解析^{4,5)}を、ALBデータを用い分析を行なった。

データセット作成にあたり、格子間隔0.25mの格子を作成し、各格子点に3次元点群データの最近傍点を代入することで河床高の面的連続データを作成した。ここで、水部における平均データ間隔は約0.5mと作成した格子間隔より粗いが、このデータ間隔によって表現可能な最小の波長はナイキスト波数（6.28rad/m）から約1.0mであるため、本研究の分析対象となる河床波の波長に対して十分な解像力を有している。

図-3はスペクトル解析結果を示す。結果は、図-2に示す河床高コンター図の赤点線で示した複数の縦断測線におけるパワースペクトル密度の平均値を示している。図から、洪水後のパワースペクトルは、ほぼ全波数帯域にわたり増加しており、図-2に示したように洪水により河床波の波高が発達したことが分かる。高波数域においては、スペクトルのピーク位置に洪水前後で変化が見られた。すなわち、波数 $k \approx 3.3\text{rad/m}$ （波長約2m）のピークが 1.7rad/m （波長約4m）へと低波数側に移動している。これらの成分は砂堆を示すものと考えられ、洪水により砂堆が発達したことが推察できる。また、低波数域においてはそれぞれ波数 $k \approx 0.02, 0.09, 0.30\text{rad/m}$ に洪水前後共に明瞭なピークが認められ、波長約310, 70, 20mに対応する。このうち、波長70m成分は前述の小規模砂州の平均的な波長に、波長20mの成分は小規模砂州の最小スケールに相当するものと考えられる。さらに、波長310mの成分については、コンター図上の測線や断面図において、中規模砂州二つ分を縦貫する長さに対応しており、より大きなスケールに対

応している可能性があるが、これについては今後の検討課題である。砂州は平面分布を持つため縦断測線の取り方によって卓越波長がややばらつきを有するが、ALBデータを用いた波数スペクトル解析の結果から、対象区間の河床波は4つの卓越波長から成る多重スケール構造を有していることが示された。

(3) 小規模砂州および砂堆の変形の考察

網状砂州の多重構造を議論するためには、平面的に大きな波長成分とそれよりも小さな波長成分を分離させる必要がある。そのため、ALBデータから作成した詳細なDEMデータに対し、平滑化したDEMデータを作成しそれらの差分を取ることで、平滑化地形データでは解像されない波長成分の河床波のみを抽出し、面的な分布特性を分析する。具体的には、まず、先述と同様に作成した0.25mDEM（以降原河床、図-5）に対し、周囲4～64メッシュ（0.5m～16m相当）の地盤高を段階的に平均化操作を施し、平滑化河床高DEMを作成した。図-4は、例として原河床と周囲16メッシュで平滑化した1m平滑化河床を示した模式図である。各格子内部の地形高は線形補完により与え、原河床高との差分を取ることで、平滑化地形で解像される規模の河床波よりも小さい波長成分の河床波を抽出する。

図-6(a)は、波長約170mの中規模砂州の概形が解像出

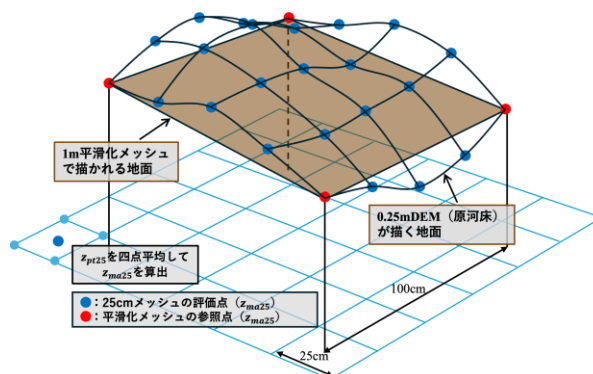


図-4 平滑化操作の考え方, 1m平滑化の例

来る16m格子を用いて平滑化した河床高コンター図である。これと原河床高と差分を取ることで、中規模砂州内に形成されている小規模砂州を抽出・分析を行う。図-7は洪水前後の原河床高（図-5）から16m平滑化河床高（図-6(a)）を差し引いたコンター図であり、小規模砂州やそれらを分割する溝筋が明瞭に確認できる。小規模砂州の波長は洪水前後共に約40～100m、波高は約30cmと大きな変化は見られなかった。しかし、洪水後は洪水前に比べ分裂数が少なくなっており、洪水中に小規模砂州が合体しながら流下したことが考えられる。

次に小規模砂州上に形成された砂堆について、同様に分析を行う。図-6(b)は、波長約30m～100mの小規模砂州の概形が解像出来る2m格子を用いて平滑化した河

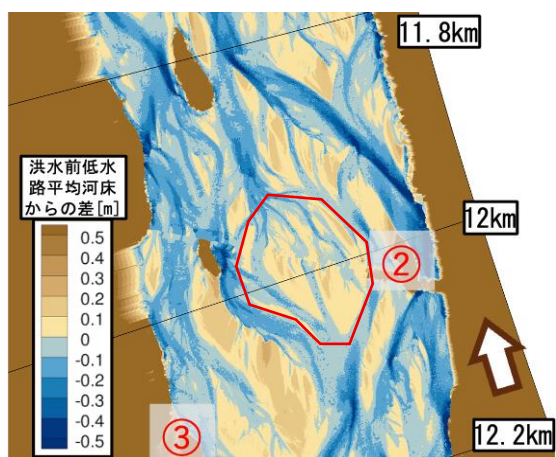


図-5(a) 原河床コンター図（洪水前）

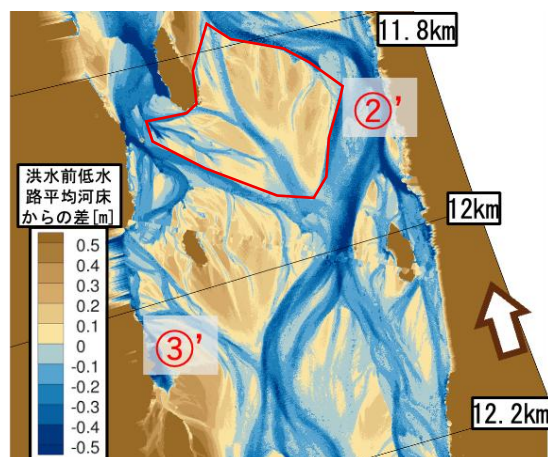


図-5(b) 原河床コンター図（洪水後）

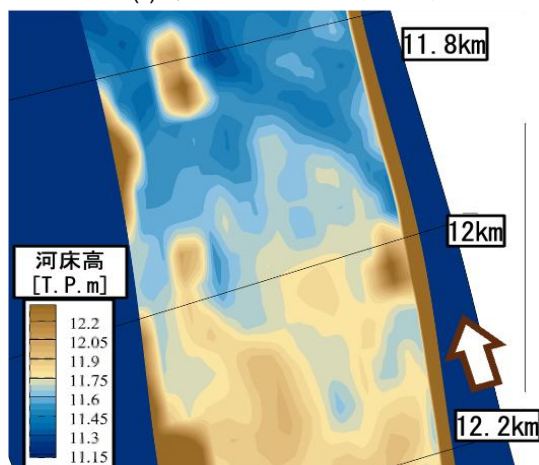


図-6(a) 16m平滑化河床（洪水前）

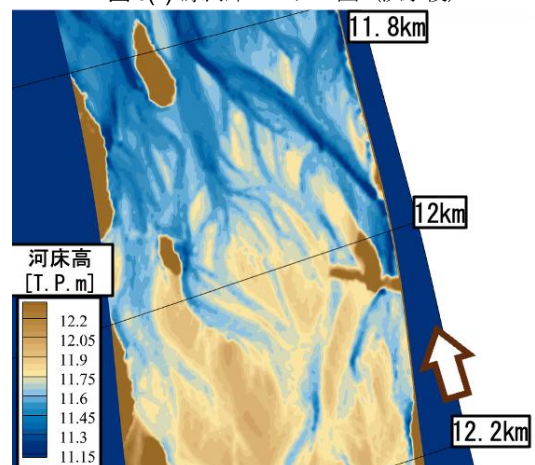


図-6(b) 2m平滑化河床（洪水前）

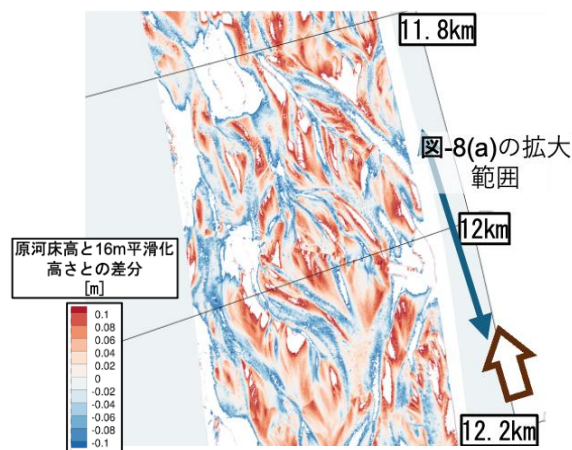


図-7(a) 小規模砂州の平面分布 (洪水前)

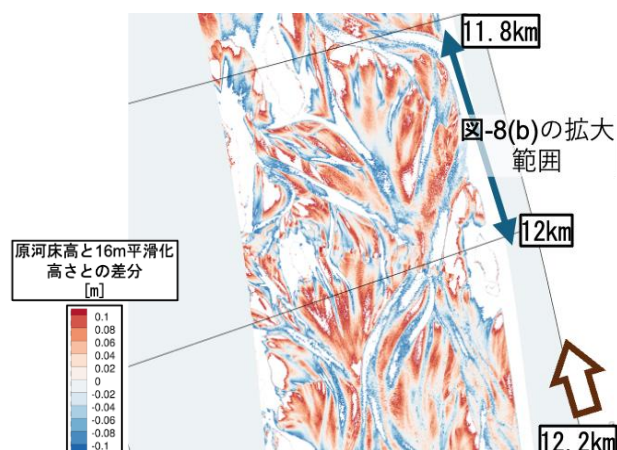


図-7(b) 小規模砂州の平面分布 (洪水後)

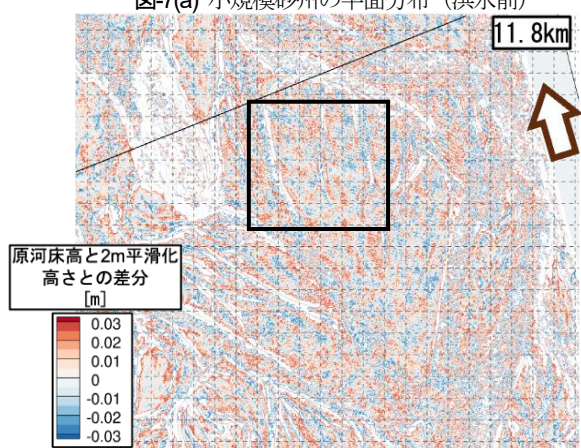


図-8 砂堆の平面分布 (洪水後)

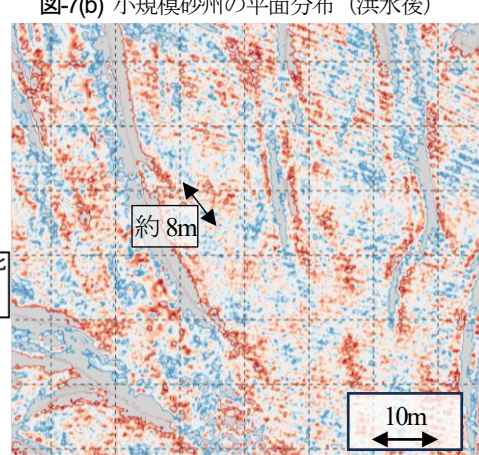


図-9 砂堆の平面分布の拡大図 (洪水後)

床高コンター図である。図-8は、原河床高から2m平滑化河床高(図-6(b))を差し引いたコンター図であり、図-5内赤枠で示した中規模砂州(図-2内赤番号②)上に形成された砂堆の洪水後の平面分布を示す。図-9には図-8黒枠の拡大図を示し、砂堆の規模を把握するため、10m間隔のグリッド描いている。図から、砂堆の波長は約5~10mであり、洪水前後で分析すると、洪水後は砂州上の砂堆の分布が明瞭化しており、波長も大きくなっていることを確認し、洪水時に砂州上の砂堆が発達したことがわかった。

3. まとめと今後の課題

以下に得られた主な結論を示す。

- 1) 斐伊川には3, 4の異なるスケールの河床波が重なって形成されていることを示し、そのうち中規模の砂州の変形特性には縦断的な低水路幅の変動が寄与していると推定された。
- 2) ALBデータから着目したい波長成分のみを抽出する手法を構築した。小規模の砂州は洪水前後で形状特性こそ変化させないが、洪水中に合体しながら流下することで分裂数が増えている可能性を示した。砂州上の砂堆については洪水により発達していることを示したが、本手法により可視化される波高は約5~10cmと現地と比べ小さい結果であり、今後詳細に検討する必要がある。

スペクトル解析については、砂州が平面的に分布しているため縦断測線の取り方によって卓越波長にばらつきが生じる。今後二次元スペクトル解析等を実施し評価の改良を図る。また、同様の手法を異なる低水路幅・低水路線形の区間や、異なる流量規模の他年度の洪水に対し適用し、比較検討を行うことで河床波のスケール規定要因を明らかにしたい。さらに、洪水流・河床変動解析を行い、実測データと解析結果を比較し、解析モデルを改良するとともに、解析を通じ洪水時の各段階においてどのような河床波が卓越するのか、洪水流にどのように影響を及ぼすのかについて検討を行う。

参考文献

- 1) 福岡捷二：雑誌河川, 72(10), 82-87, 2016.
- 2) 上野ら：京都大学防災研究所年報, B-2, 32, 527-541, 1996.
- 3) 宇民ら：水工学論文集, 42, 1099-1104, 1998.
- 4) 芦田ら：京都大学防災研究所年報, B, 10, 121-132, 19, 1967.
- 5) Mikio Hino : Journal of Fluid Mechanics, 34, 3, 565-573, 1968.