

UAV画像の標準偏差を用いた広域での 表層粒度把握手法の実河川への適用

APPLICATION OF A LARGE-SCALE SURFACE GRAIN SIZE ESTIMATION
METHOD USING THE STANDARD DEVIATION OF UAV IMAGERY TO THE
KOSHIBU RIVER

氷見啓樹¹・溝口敦子^{2, 3}・平生昭二⁴・荒木孝之⁵・平野和希¹

Hiroki HIMI, Atsuko MIZOGUCHI, Syoji HIRAO, Takayuki ARAKI and Kazuki HIRANO

¹非会員 工修 (株)建設技術研究所 中部支社河川部 (〒460-0003 名古屋市中区錦1-5-13)

²正会員 博 (工) 名城大学教授 理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

³東北大学クロスアポイントメント教授 災害科学国際研究所

⁴正会員 工修 (株)建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2丁目4-12)

⁵正会員 工修 (株)建設技術研究所 中部支社河川部 (〒460-0003 名古屋市中区錦1-5-13)

河床の表層粒度は洪水時の河床変動や多様な環境形成等の評価・予測に重要な現地条件であるが、セグメント2-1～M区間等の広域な河道内では粒度構成の場所的なばらつきが大きく、調査密度も低いため十分な精度で把握することが困難である。

本報告では、名城大学で開発中である、UAV空中写真の標準偏差をもとに広域かつ面的な河床材料の粒度情報を把握する手法を実河川へ適用し、環境評価や数値解析への適用可能性を示した。

Key Words: grain size of the riverbed surface, UAV images, standard deviation, environmental evaluation

1. はじめに

河床の表層粒度は、洪水時に生じる河床変動の把握や予測、さらには多様な河川環境の形成過程を評価する上で重要な現地情報である。砂礫堆を形成するセグメント2-1～M区間等の広域な河道内では、砂礫～石が幅広く分布し、粒度構成の場所的なばらつきも大きい。そのため、約1～2kmピッチの調査地点で採取・計測が行われる従来手法では、粒度の面的な分布特性を十分に把握することが困難である。

また、近年整備が進められている土砂バイパスや土砂還元等の影響評価においても河床材料調査が実施されているが、定点調査のみでは粒度の空間的なばらつきを捉えきれない場合が多い。この結果、土砂供給に伴う河床材料の変化や影響範囲を必ずしも的確に把握できないという課題がある。

そこで本研究では、名城大学で開発中である、解像度の高いUAV空中写真を活用し、広域かつ面的に河床材料の粒度情報を把握する手法（以下、表層粒度把握手法という）を実河川に適用した。そして、表層粒度情報を

広域で把握することにより、河川環境の評価や各種解析への適用可能性を示すことを目的とした。

UAV等の空中写真を用いて表層粒度を把握する研究としては、①粒径に起因する画像テクスチャを用いた手法¹⁾、②BASEGRAIN等による粒子検出に基づく手法²⁾、③機械学習を用いた手法、④SfM等により作成した3次元データを活用した礫径把握手法³⁾などが挙げられる。テクスチャを用いた手法では、画像の輝度情報から粒度を推定する方法を中心に、これまでに多くの検討が行われている。BASEGRAINは、粒度解析に特化したソフトウェアであり、調査の省力化が可能である一方、目視による修正が必要で、広範囲への適用には課題がある。機械学習や3次元データを用いる手法は広域の粒度把握が可能であるが、教師データの作成や3次元データの取得が課題となる。本検討で使用した表層粒度把握手法は、①のテクスチャを活用した手法であり、画像の解像度を変化させ、解像度と輝度標準偏差との関係から粒度を把握する方法である。

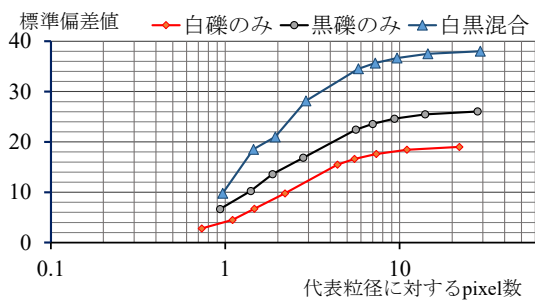


図-1 一様粒径における輝度標準偏差—解像度関係

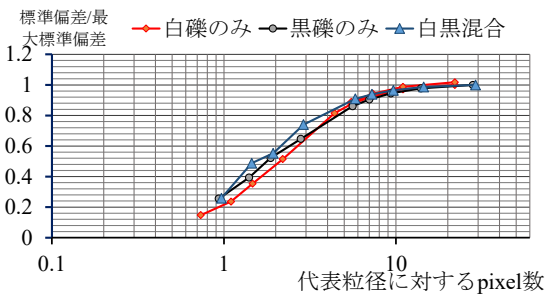


図-2 無次元輝度標準偏差—解像度関係

2. 輝度標準偏差を用いた表層粒度情報把握手法と適用方法

(1) 輝度標準偏差と解像度との関係性の検討と解析手法

著者の一人は、以前から河床材料の画像の輝度標準偏差を利用した広域での粒度情報の抽出方法を検討しており、未だ課題が残るものの、以下を含むいくつかの検討によって、(2)の手順で粒度情報の一部を得ることに成功した。本稿は、そのなかの特定粒度以下の地被領域を把握する方法を用いて現地への適用可能性を示すことを目的とする。そのため、ここでは関連部分の概要を抽出して説明し、手法詳細は別報にて報告する。

本手法ではまず、一様粒径の白黒礫の画像をそれぞれモノクロ化等前処理する。処理後の画像の解像度を粗くしていき、解像度ごとに一定領域での輝度標準偏差を算出した。その結果、図-1に示すように、一様粒径条件では、代表粒径を約10分割する解像度において輝度標準偏差が頭打ちとなることが確認された。その最大値で無次元化した無次元輝度標準偏差を出すと、図-2に示すように解像度が粗くなれば標準偏差は収束に向かうこと、粒径相当のピクセル解像度において最大標準偏差20%相当で収束することを見出した。なお、本検討では、無次元輝度標準偏差が収束し、ピクセル解像度 $\approx$ 粒径となる際、その値を収束閾値と定義する。

その他の検討によって、標準偏差を算出する領域は、粒径の10倍程度以上が必要であること、混合粒径においては、標準偏差の収束が最大粒径程度で起こることなどを確認している。

(2) 輝度標準偏差を用いた粒度情報把握抽出方法

前節の検討を受けて決定した、画像解析手順を示す。

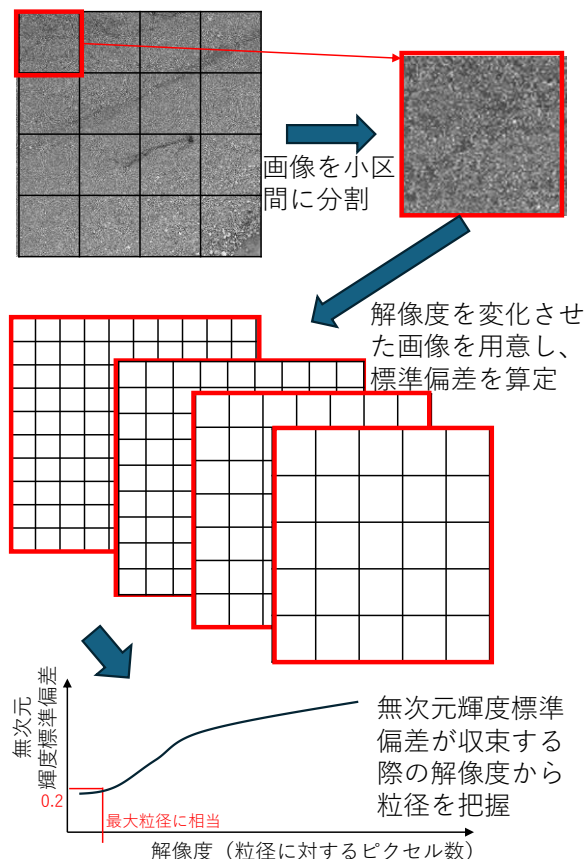


図-3 本手法による面的な粒度把握のイメージ

- ①画像を8bitモノクロ化、バンドパスフィルター処理等の前処理を行う。
- ②前処理後の画像を用いて、解像度を粗くした画像を作成する。
- ③初期解像度の画像のうち、画像上粒子として認識できない細粒分の占有領域を標準偏差の基準値を設けて算出する。前節の検討における目安となる標準偏差は5～10程度であるが、取得画像によって多少の変化するため目視によって調整して決定する。
- ④各解像度の画像を用いて輝度標準偏差を算定し、最大値で無次元化した無次元輝度標準偏差が収束する解像度から解析領域の最大粒径を算出する。

(3) 輝度標準偏差を用いた粒度情報把握方法の小渋川への適用

本検討では、小渋川の空中写真をもとに、(2)の手法を行い、河床材料の粒度情報の把握を行った。検討の際には、図-3のように空中写真を区間ごとに細分化したうえで、無次元輝度標準偏差—解像度関係を算出し、河床材料の最大粒径の空間的な傾向把握を試みる。

ここで、無次元輝度標準偏差の収束閾値は、輝度標準偏差の幅に左右されるため、元画像の解像度や礫の色、解析範囲によって異なる。本検討では、次項で詳述した粒度の算定精度を確認したうえで収束閾値を無次元輝度標準偏差0.5以下とした。



図-4 小渋川の状態（小渋ダム直下地点）

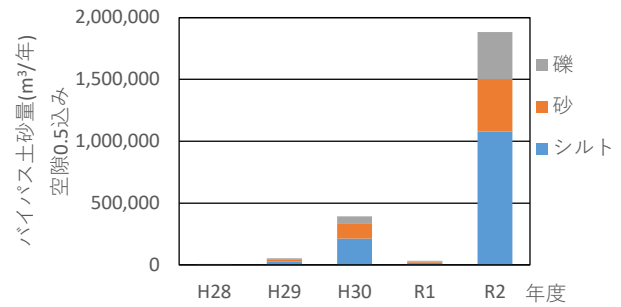


図-5 粒径別のバイパス土砂量



図-6 小渋ダム下流河道における河床材料調査実施地点位置図

3. 小渋ダム土砂バイパス事業の概要

(1) 小渋ダム土砂バイパス事業について

小渋ダムは昭和44年に完成したアーチ式コンクリートダムであり、洪水調節、農業用水の供給および発電を目的として運用されている。小渋ダム上流域では土砂生産が活発であり、令和5年度末時点における計画堆砂量に対する堆砂率は118.8%に達している。このため、貯水容量の減少に伴うダム機能への影響が懸念されている。一方、ダム下流の河道においては、ダム建設以降、供給土砂量の減少に起因する河床材料の粗粒化が進行している（図-4）。

これらの課題に対応するため、小渋ダムでは土砂バイパストンネルが整備され、平成28年度より運用が開始されている。小渋川へ排砂される土砂の粒径組成は、図-5に示すとおり、主としてシルトおよび砂から構成されている。運用開始初期の平成28～29年度の排砂量は比較的

少なかったが、平成30年度には約39.2万 m^3 の土砂が小渋川へ排砂されている。さらに、令和2年度には過去最大となる約188万 m^3 の土砂が排砂されている。

(2) 土砂バイパスに伴う小渋川への影響について

本検討で対象とする小渋川は、小渋ダムから天竜川合流点までの区間を流れる延長約4.6kmの河川である。土砂バイパスからの土砂供給に伴い、下流河道へ供給される土砂量が大きく変化するため、小渋川の物理環境、生物環境への影響が想定される。平成28年からは、小渋ダム土砂バイパストンネルモニタリング委員会を設置し、バイパス土砂量の把握や、下流河道への影響把握のためのモニタリング調査を実施している。小渋川の河床材料は、図-6に示す地点において定点での面格子法による河床材料調査を実施しており、排砂による粒度変化を確認している。本論文では、提案手法を用いてバイパス運用による影響を調べる。

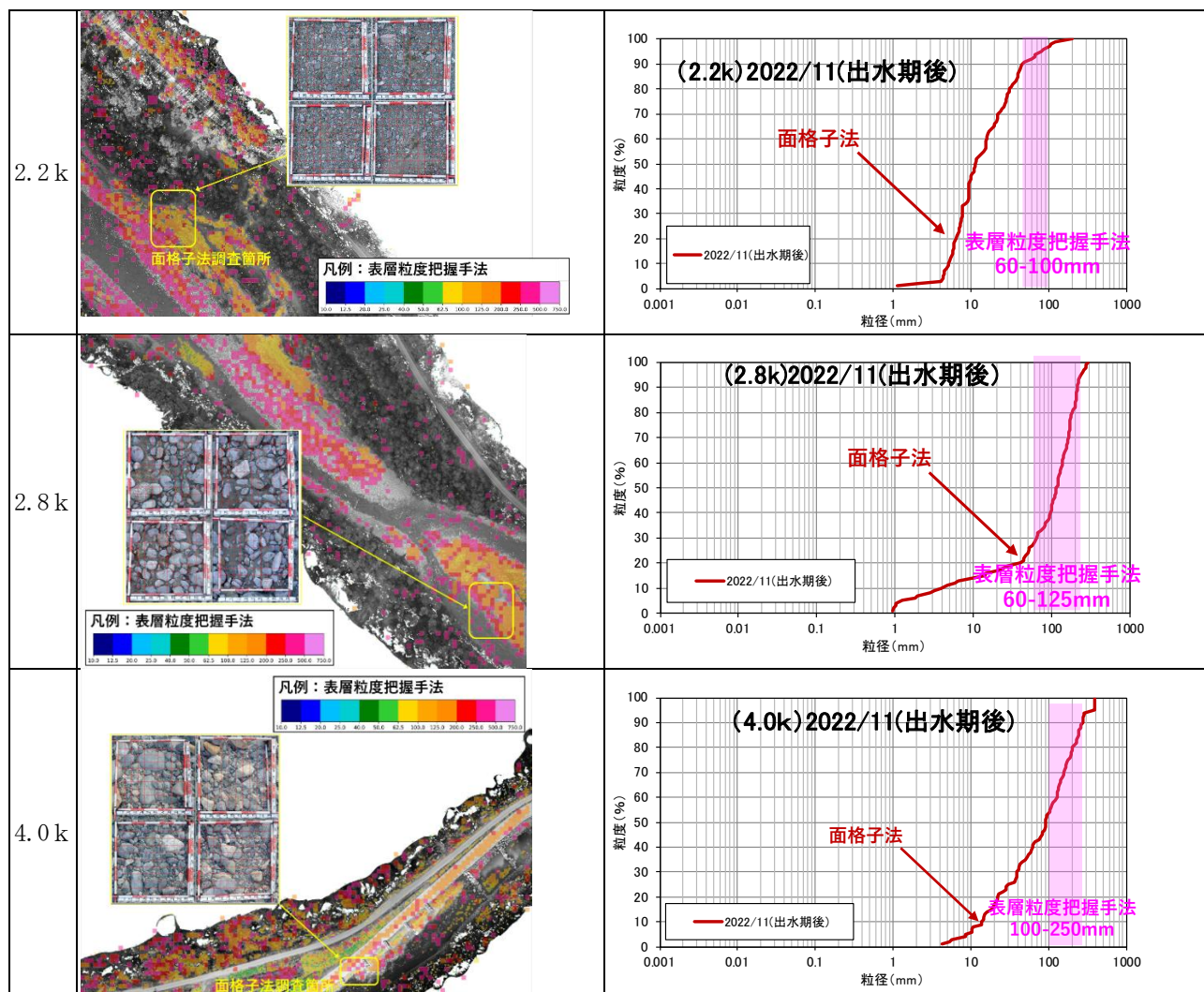


図-7 面格子法と表層粒度把握手法との比較

表-1 精度検証に用いたデータ

項目	調査方法
河床材料調査	R4. 11面格子法 (2m×2m)
UAV画像 表層粒度把握手法	R4. 11 UAV空中写真 解像度10mm/px

4. 表層粒度把握手法の精度検証

表層粒度把握手法の精度を検証するため、表-1に示す面格子法による河床材料調査結果との比較・検証を行った。なお、比較に用いた調査データは、河床材料調査とUAV画像の取得が同一期間に実施されている令和4年11月の調査結果であり、両者の時間的な整合性は確保されている。

図-7に示すように面格子法による調査結果において、表層粒度把握手法による解析結果は、面格子法による粒度分布のD60～D90に相当する粒径を示している。このことから、溝口らによる一様粒径条件下の実験結果と同様に、本手法により、一定範囲の最大粒径を概ね良好な

精度で評価できていると考えられる。

一方、対象区間は、2.2kの面格子法の結果より、10mm程度の粒径も確認されている区間であるものの、表層粒度把握手法で得られた粒径の範囲は60～250mmの範囲である。今回の精度検証に用いた空中写真の解像度は10 mm/pxであることから、解像度の限界に近い粒径条件では、粒度情報の抽出が困難となり、検出精度が低下する可能性があることが示唆される。なお、一様粒径を用いた実験より、輝度標準偏差の最大値を十分に算出するには、把握対象粒径に対して約20倍程度の解像度が必要である。本研究で用いた空中写真の解像度は10 mm/pxであり、小渋川の代表粒径50～100 mmに対しては2～5 mm/px程度が目安となる。この解像度の制約により、輝度標準偏差の最大値が過小となる可能性を考慮し、本研究では無次元輝度標準偏差の収束閾値を0.2ではなく0.5に設定した。このように、解像度等の条件次第で、2

(1)の実験で示した収束閾値の理論値0.2に達しない場合が想定される。その際には、河床材料調査との比較に基づき、ピクセル解像度が粒径相当となる無次元輝度標準偏差を特定することが求められる。

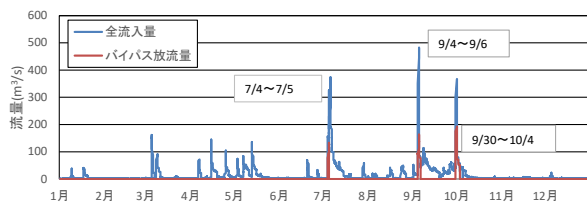


図-8 平成30年の土砂バイパストンネル運用状況

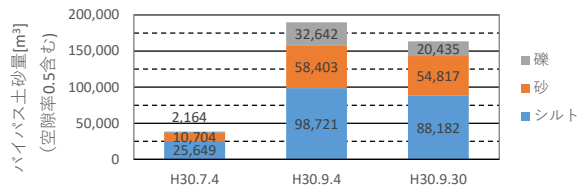


図-9 平成30年のバイパス通過土砂量（計算値）

5. 小渋川における土砂バイパス運用後の表層粒度変化の把握

(1) 平成30年の土砂バイパス運用の概要

土砂バイパストンネルからの排砂に伴い、小渋川において表層粒度の細粒化が確認された平成30年の出水前後を対象として、表層粒度把握手法による広域的な粒度変化の評価を行った。平成30年は、図-8に示すように計3回のバイパス運用を通じて合計39.2万m³の土砂を小渋川へ供給しており、小渋ダム完成以降において初めて実施された本格的な土砂供給事例である。

平成30年に供給されたバイパス土砂の内訳は、図-9に示すようにシルトが約21万m³、砂が約12万m³、礫が約6万m³となっている。これらのバイパス土砂量は、分派堰上流区間を対象とした平面二次元河床変動モデルにより算出している。モデル上流端からは実績堆砂量から作成したLQ式をもとに、粒径別の流入土砂量を供給しており、その際、計算上の空隙率はダム堆積土砂の調査結果をもとに0.5としている。

また、図-10に示す小渋川における面格子法による河床材料調査結果から、平成30年の土砂バイパス運用後には石分（75mm以上）が減少し、中礫（4.75～19mm）および粗礫（19～75mm）の割合が増加しており、河床表層粒度が全体として細粒化していることが確認される。これは、バイパスにより供給された土砂のうちシルト・砂等の細粒分が河道内に滞留せず流下する一方、中礫以上の粒径が河道に残存したことによるものと考えられる。この傾向は、特に1.0kおよび1.3kに位置する第一床固上流区間で顕著である。1.6k付近は川幅が広く掃流力が相対的に小さいため、洪水時に再配分された供給土砂のうち細粒分が堆積しやすく、表層粒度の細粒化として現れた可能性が高い。以上より、平成30年は土砂バイパス運用に伴う粒度変化を検討する上で代表性が高く、本検討の評価対象年として妥当である。

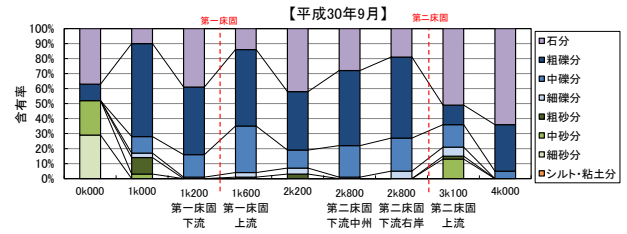
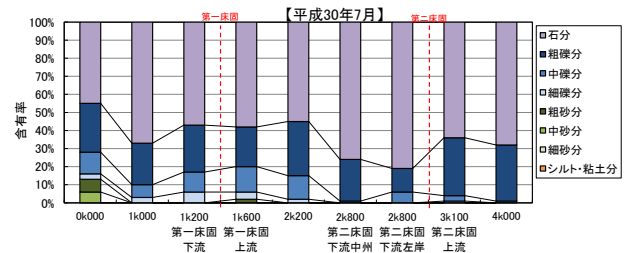


図-10 平成30年バイパス運用前後の表層河床材料の変化（面格子法）

表-2 平成30年のバイパス運用に係るUAV空中写真

撮影日	解像度
H30. 7. 23 (7/4のバイパス運用後)	12.5mm/px
H30. 10. 10 (9/4, 9/30のバイパス運用後)	

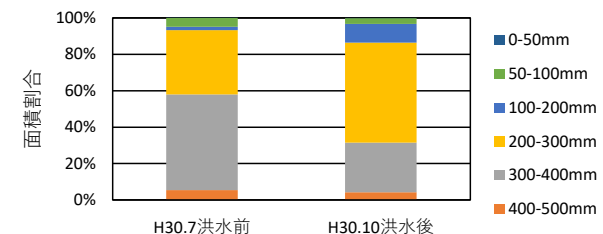


図-11 土砂バイパス運用前後の粒径別面積割合の評価

(2) 表層粒度把握手法による環境評価

表-2に示す平成30年7月（洪水前）と平成30年10月（洪水後）のUAV空中写真を用いて、土砂バイパス運用による表層粒度の変化状況の評価した。なお、使用した空中写真の解像度は12.5 mm/pxである。

図-12に示すように、洪水前後の表層粒度を評価した結果、河道全体が細粒化していることが確認される。これは、局所的な河床材料調査の傾向と同様である。図-11は小渋川のバイパス運用前後の空中写真をもとに、本手法により小メッシュごとに粒径を算定し、粒度別に集計したものである。これより、300mm未満の面積が26%増加した。さらに、1.2～1.6kの第1床固上流部において広範囲に細粒化が確認され、川幅が拡大する区間における土砂の堆積に伴う細粒化傾向を捉えられていると考えられる。

以上より、本手法は河道への土砂供給に伴う表層粒度の変化を面的に把握でき、河床環境の変化を広域かつ連続的に評価するうえで有用であると考えられる。一方で、面格子法のように、細粒分も含めた粒径比率までは把握することはできず、あくまでも最大粒径の面的な変化傾向の把握に留まる。

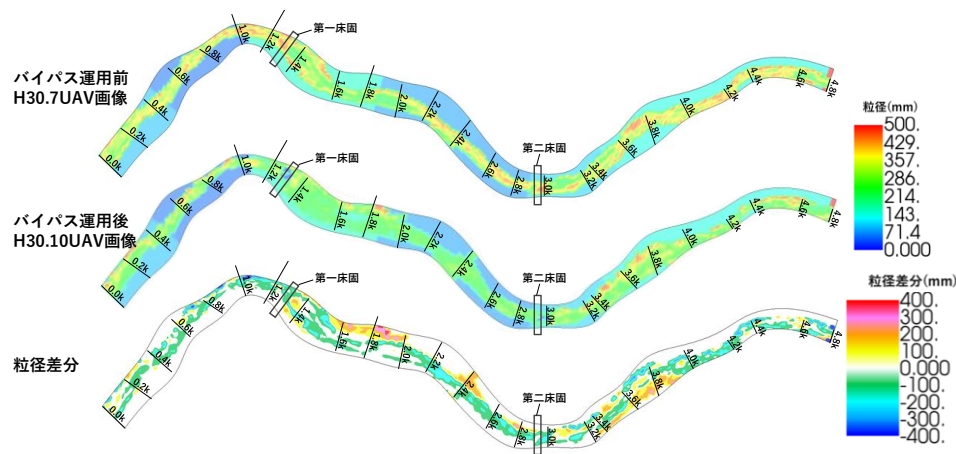


図-12 洪水前後の小渋川の表層粒度の評価結果

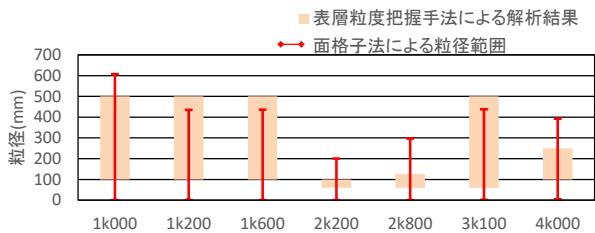


図-13 同一範囲内における表層粒度把握手法と面格子法による粒度範囲の比較

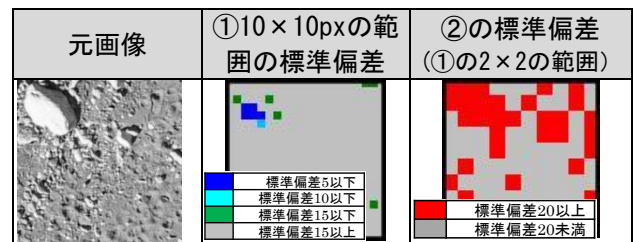


図-14 巨石部の判別方法

(3) 表層粒度把握手法の適用範囲の考察

本検討で用いた表層粒度把握手法の適用範囲について考察した。図-13は、面格子法の調査範囲において、面積格子法と本手法により確認された粒度範囲を比較したものである。これより、本手法により最大粒径を概ね評価できているが、把握できる最小値は解像度の5倍程度(50mm)が限界となっており、評価できる粒径の最小値は解像度に依存するといえる。また、水域や植生に覆われるなど、河床表層の画像情報が得られない箇所には本手法を適用できない。一方、日照条件による影や礫の湿潤状態に伴う色調変化については、輝度標準偏差を最大値で正規化した無次元指標を用いることで、その影響を一定程度低減した評価が可能であると考えられる。ただし、現地条件に即した検証は今後も継続する必要がある。さらに、本手法では、細粒分主体の箇所に加え、表面色が一樣な巨石においても輝度標準偏差が小さく算出され、細粒分主体として誤検出される可能性がある。図-14に示すように、写真左上に巨石を含む空中写真を対象として、10×10pxの局所範囲で輝度標準偏差を算定した結果、巨石部においても標準偏差が小さくなり、ばらつきの小さい細粒部と同様の挙動を示すことが確認された(図-14中央)。一方で、前段で算定した輝度標準偏差を基に、岩の輪郭部を含むより広い範囲で再度輝度標準偏差を算定することで、輪郭を含む領域では標準偏差が大きくなり、巨石として識別できる可能性が示唆された。このような手順により、細粒分と巨石の判別精度を向上させ、巨石を解析対象から除外できる可能性がある。

6. おわりに

本検討では、名城大学で開発中の空中写真から表層粒度把握手法を、小渋川へ適用し土砂バイパスの運用による表層粒度の変化を評価した。面格子法による調査結果との比較により、本手法の解析精度を確認した結果、面格子法による調査の最大粒径を概ね評価することができた。

また、平成30年の土砂バイパス運用前後の空中写真より、300mm未満の面積が26%増加し、バイパス後に河道全体が細粒化した傾向を捉えることができた。本手法は、土砂還元による影響評価の他、河床変動計算における条件設定等に応用できる可能性がある。

謝辞：本研究の実施にあたり、中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所には、貴重な資料の提供・調査に対する多大なご協力を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福島雅紀, 中村賢人, 諏訪義雄, 秋田麗子, 長岐瑠里子, 炭田英俊: UAV空中写真の河床材料調査への適用性に関する検討, 河川技術論文集, 第24巻, pp.1-6, 2018
- 2) 山本亮介, 鈴木準平: 3DスキャナやUAV-SfMで取得した3次元形状データ解析による河床表層材料の粒度分布調査, 河川技術論文集, 第29巻, pp.25-30, 2023
- 3) 平生昭二, 阿佐美敏和, 吉村真, 西口祐輝, 河合彩里伊: UAV撮影画像処理による河床表層粒度分布把握に関する基礎的研究, 河川技術論文集, 第24巻, pp.443-448, 2018