河川技術論文集，第24巻，2018年6月

UAV空中写真の河床材料調査への適用性に関する検討

AN STUDY OF APPLICABILITY OF UAV TO RIVERBED MATERIAL SURVEY

福島雅紀[1]・中村賢人[2]・諏訪義雄[3]・秋田麗子[4]・長岐瑠里子[5]・炭田英俊[6]
Masaki FUKUSHIMA, Kento NAKAMURA, Yoshio SUWA, Reiko AKITA, Ruriko NAGAKI and Hidetoshi SUMITA

[1]正会員　工博　国土技術政策総合研究所　河川研究部　河川研究室　主任研究官
（〒305-0804 茨城県つくば市旭１番地）
[2]正会員　元国土技術政策総合研究所　河川研究部　河川研究室
（関東地方整備局下館河川事務所調査課（〒308-0841　茨城県筑西市二木成1753））
[3]正会員　国土技術政策総合研究所　河川研究部　河川研究室　室長（同上）
4正会員　日本工営株式会社　河川部　課長
（〒102-0073　東京都千代田区九段北1-14-6）
5正会員　工修　日本工営株式会社　河川部　技師（同上）
6正会員　日本工営株式会社　河川部　事業部長（同上）

Recently UAV has been expanding its application to river surveys. In this report, we examined the applicability of UAV to riverbed material survey, which is important as channel characteristics. As a result, with regard to riverbed materials with a particle size of 4 mm - 8 mm or more, it is possible to grasp the particle size distribution with the same degree of accuracy as the field survey by reading the gravel diameter using an aerial photograph taken from an altitude of about 5 m. For riverbed materials with particle sizes of 4 mm to 8 mm or less, we could predict the average particle diameter with double half precision by using the correlation formula between standard deviation of luminance of image and average particle size. By combining the two, it was possible to create a particle diameter curve with image accuracy equal to that of field survey from image analysis.

Key Words: *Unmanned aerial vehicle, Aerial photo, Riverbed material, Bed material survey*

１．はじめに

河川の表層河床材料は，河床変動や植生消長に与える影響が大きく，河道を管理する上で把握すべき重要な河道特性の一つである．近年，UAVの普及が急激に進み，高解像度の空中写真を簡易に取得でき，画像解析によって表層河床材料の粒径を定量的に把握できるようになってきた．画像解析では，写真上で個々の粒子の輪郭を抽出し，その大きさを計測することで粒径を把握するのが一般的であるが，空中写真の解像度の制約から粒径25㎜程度が判読の最小値とされる[1)]．これは，3ピクセルの画素が入る粒径を判読限界としたものである．UAVの飛行高度を低くすれば，その限界は自ずと向上すると考えられるが，脚立等を用いて地上2mから撮影した場合でも精度良く判読できるのは粒径50㎜程度であるとの指摘もある[2)]．そこで，飛行高度30m程度から撮影した画像を用いて分析することを想定し，粒径18㎜以上の礫については粒径を画像から判読，それ以下の砂礫については航空写真から河床材料の粒径を推定したのと同様に[3)]，画像の輝度を統計処理することによって平均粒径を推定する手法を適用することとした．

本報告では，UAVの飛行高度を変えて撮影した河床の空中写真を用いて，河床表層を主に粒径18㎜以下の河床材料が覆う場（以下，「砂卓越場」）への上記の平均粒径推定式の適用性を確認した．また，河床表層を主に粒径18㎜以上の河床材料が覆う場（以下，「礫卓越場」）については，現地で直接計測する通常の面積格子法と比較するため，判読可能な粒径やその作業時間を確認した．さらに，砂卓越場と礫卓越場が混在する場（以下，「砂礫場」）については，砂卓越場と礫卓越場で示した両方の方法を適用して粒径加積曲線を作成し，現地調査結果

と比較することで，その適用性を確認した．

２．現地調査

(1) 調査実施箇所

調査員の立ち入りが困難なダム上流域での河床材料調査にUAVの活用が期待される．そこで，天竜川上流に位置する松川ダム及び小渋ダムを調査実施箇所として選定した．両ダムとも排砂バイパス水路が設置されており，土砂管理の観点からもダムに流入する河床材料の粒度分布を定期的に把握することが重要である．

図-1及び**図-2**はそれぞれ，松川ダム及び小渋ダムの調査実施箇所の空中写真である．松川ダムでは，貯砂ダム下流の延長150m程度の区間を調査対象範囲とした．小渋ダムでは，貯水地末端部上流の桶谷橋上流の河道区間の延長200m程度の区間を調査対象範囲とした．**図-1**に示すM1～M12地点，**図-2**に示すK1～K10地点で以下に示す調査を実施した．

(2) UAVによる空中写真の撮影

撮影は，以下の手順で実施した．**表-1**には，撮影高度に応じて想定された解像度と画角を示す．

① 調査地点を俯瞰する写真を撮影する．

② 各調査地点において，調査枠を設置し，飛行高度を5m→30m→60mと変化させ，撮影を行った．ここで，調査地点の最大粒径が500mm以下であったことから，調査枠は1m×1mを基本とした．

③ UAVの飛行高度が60mに達した時点で調査枠を撤去し，降下しながら60m→30m→5mで撮影した．

④ 河岸際の河床など，河床が横断方向に傾斜している場所（以下，傾斜地）については，UAVの姿勢を垂直に保ったままの撮影（以下，「垂直撮影」）とは別に，UAVの姿勢を河床にほぼ平行にした撮影（以下，「平行撮影」）を行った．

⑤ 河床材料の色，UAV撮影時の照度，日照角度，水分状況，日陰の有無を確認した．

(3) 河床材料調査

図-1及び**図-2**に示す調査地点において，河床材料調査を実施した．**図-3**及び**図-4**は，各調査地点を高度5mから撮影した空中写真である．河床表層の砂礫の卓越状況，河床の傾きを合わせて示す．ここで，河床の傾きとは，河岸際等の横断方向に傾斜している箇所には「傾斜」，横断方向にほとんど傾きのない箇所では平坦と記載した．また，河床材料調査法としては，砂卓越場では直接採取法，礫卓越場及び砂礫場では面積格子法を用いた．

３．調査結果

表-1 UAVの撮影高度に応じた写真の解像度及び画角

高度(m)	解像度(mm/pixel)	画角(m)
150	21.0	153.85×102.85
60	8.4	61.54×41.14
30	4.2	30.77×20.57
5	0.7	5.13×3.43

図-1 調査実施箇所（松川ダム貯砂ダム下流）

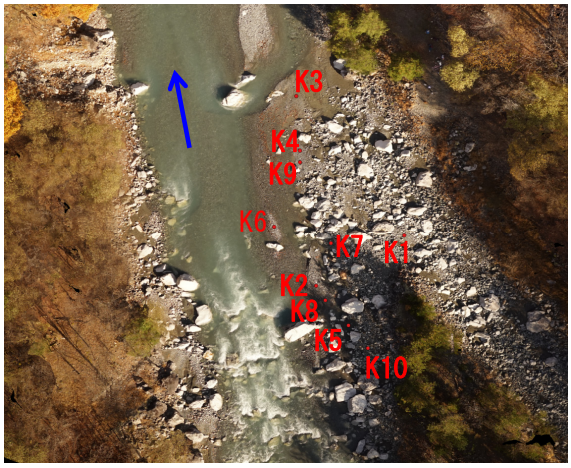


図-2 調査実施個所（小渋ダム貯水地末端部上流河川）

(1) 砂卓越場

図-3及び**図-4**の中の砂卓越場で調査した粒径加積曲線を**図-5**に示す．粒径0.1mm～32mmの細砂～中礫が広く分布する中で，粒径0.5mm～1mmの粗砂と粒径8mm～16mmの中礫が卓越している．**図-6**は，粒径8mm～16mmの中礫が卓越するK3地点と粗砂が卓越するK5地点について，飛行高度別の撮影画像とその画像の輝度分布を示す．撮影画像から，飛行高度による解像度の違いを確認でき，解像度が低くなるに従って，個々の粒子の輪郭が不明瞭になる．また，輝度の分布を見ると，解像度の低下に伴い輝度のバラつきが小さくなる．

砂卓越場の平均粒径を推定するにあたって，室内実験

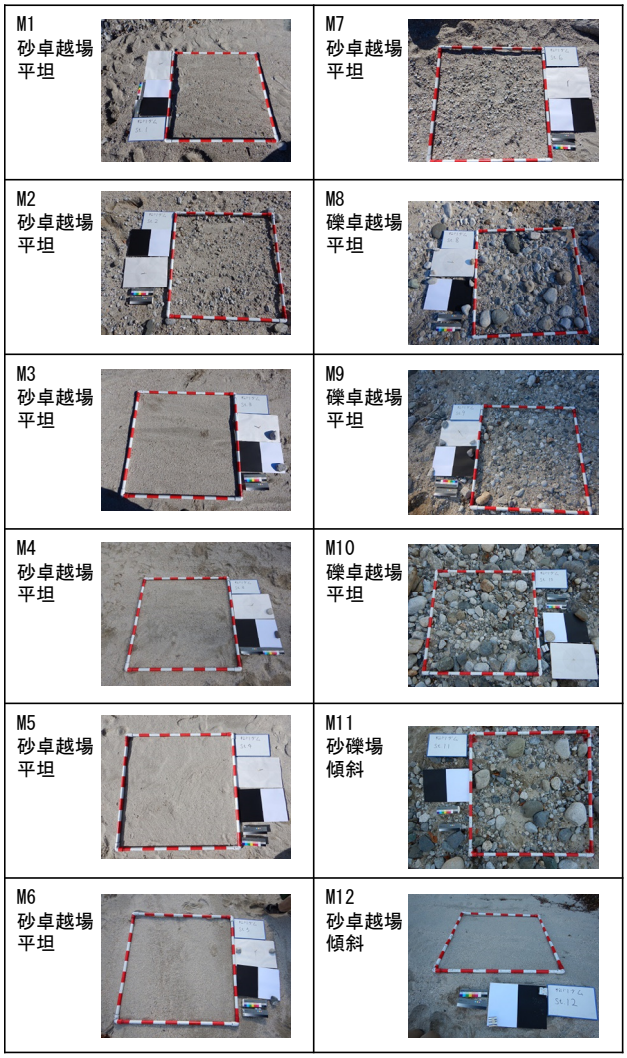


図-3　松川ダム調査地点における河床の状況

を行った．室内実験では，粒径18mm以下の単一粒径の河床材料を対象とし，照明の照度や角度，水分条件，撮影画像の解像度を変えて，粒径や色調の異なる河床材料の写真撮影を行った．なお，室内実験の結果については，別途，秋田ら[4]が行う．

空中写真の輝度の統計量と砂の平均粒径の相関を調べたところ，輝度の標準偏差，変動係数，90%範囲が砂の平均粒径と相関が高いことが確認された．ここで，90%範囲とは輝度の最小値から大きい方に5%，最大値から小さい方に5%を除く，輝度の値の範囲である．また，上記に加え，以下のことが確認された．

- 輝度の分布は色調により大きく異なる．そのため，黒灰色と白色の両者を合わせた統一的な推定式を作成すると，粒径の推定精度が低下した．
- 粒径8mm～16mmと粒径0.5mm～8mmの粒径では，輝度の統計量に対する相関の傾向が異なる．
- 水に濡れた箇所が写真の一部に含まれていると，粒径の推定精度が低下する．
- 照明の角度によって輝度の分布は異なるが，照度が輝度の分布に与える影響は小さい．

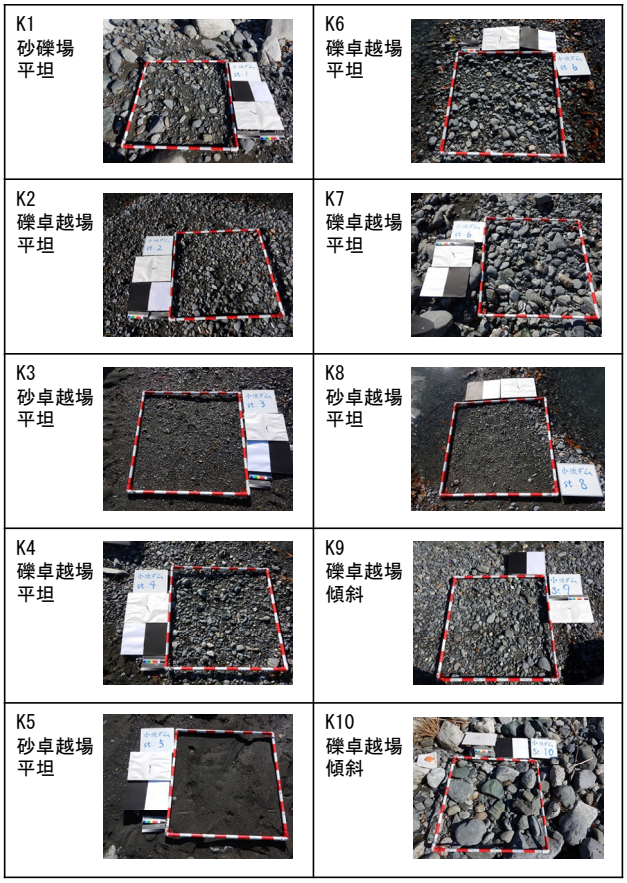


図-4　小渋ダム調査地点における河床の状況

これらの結果を踏まえ，粒径8mm以下の黒灰色系の河床材料を対象とした推定式を用いることとした．これは，できるだけ小さい粒径の推定精度を上げることを意図したものである．また，水際の濡れた箇所での調査は実施しなかった．

式(1)～(3)は，室内実験結果[4]から作成した平均粒径推定式である．平均粒径との相関が高かった輝度の標準偏差，変動係数，90%範囲にそれぞれ対応した式である．室内実験においても飛行高度を変えて推定式を作成したが，平均粒径との相関が高くなる解像度5mm/pixelの場合の推定式である．

$$D=0.0054X^2+0.1099X \quad (1)$$

$$D=36.7938Y^2+24.6024Y \quad (2)$$

$$D=0.0005Z^2+0.0291Z \quad (3)$$

ここで，X，Y，Zはそれぞれ輝度の標準偏差，変動係数，90%範囲であり，Dは平均粒径（単位：mm）の推定値である．

図-7は，式(2)の推定式を用いて算定した平均粒径と直接採取法で採取した河床材料の粒径加積曲線から得た平均粒径の比較図である．室内実験の結果，変動係数をによる推定値が，標準偏差や90%範囲による推定値に比べ，推定精度がやや高かったことから，**図-7**には変動係数による推定値との比較を示した．また，図中の緑の実線は撮影画像の解像度であり，図中の点線は実測値の倍

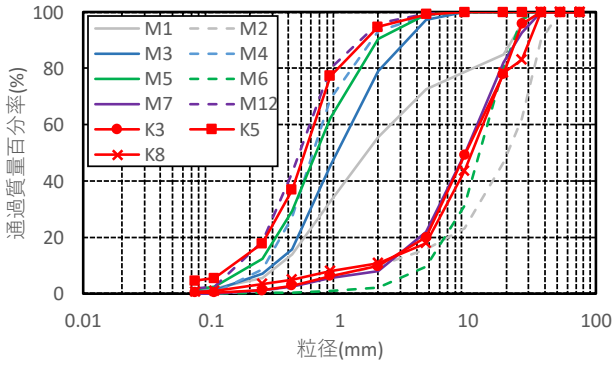


図-5　直接採取法による河床材料調査結果

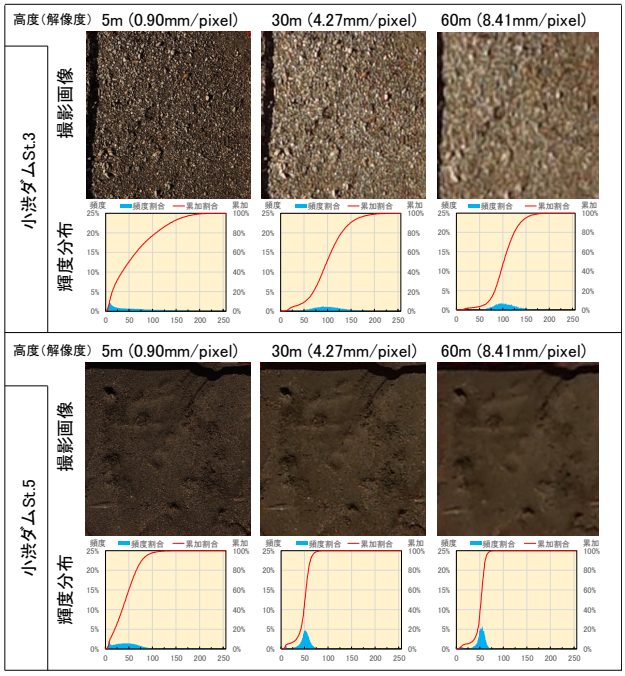


図-6　飛行高度（画像解像度）別の撮影画像及びその輝度分布

半分の値である．

飛行高度30mで撮影した画像（解像度5mm程度/pixel）の場合の推定精度が高いことが分かる．高度5mの場合には，0.7mm/pixelと高い解像度の写真を用いているにもかかわらず，礫に含まれる砂の結晶，色の混じった砂礫，砂礫表面の窪み等の影響によって，輝度のバラつきが大きくなり，その結果として粒径を大きめに推定していると考えられた．また，高度60mの精度が悪い理由については確認できていない．

(2) 礫卓越場

CADのソフトウェアを用いて撮影画像（1m四方）を目視で確認し，10cm間隔の格子の交点にある河床材料の粒径をコンピュータ画面上（以下，「PC上」）で読み取った．この結果を現地で面積格子法によって調査するのと同様な方法で，粒度分布を作成した．PC上では，上空から見えるのは２径のみであることから，現地で調査した結果についても２径のみを用いて比較した．

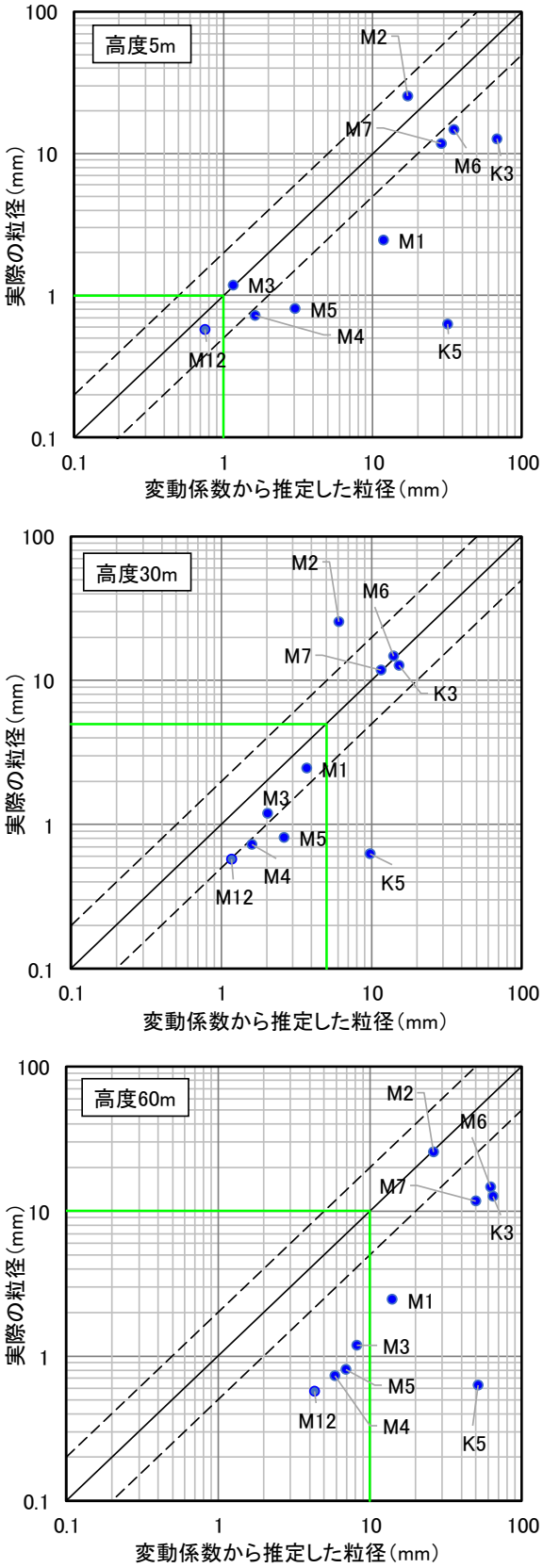


図-7　平均粒径の推定値と実測値との比較

代表地点として，M8地点及びK10地点を選定した．M8地点は最大粒径が100mm程度で粒径8mm～16mmの中礫を多く含む箇所である．一方，K10地点は粒径64mm以上の大

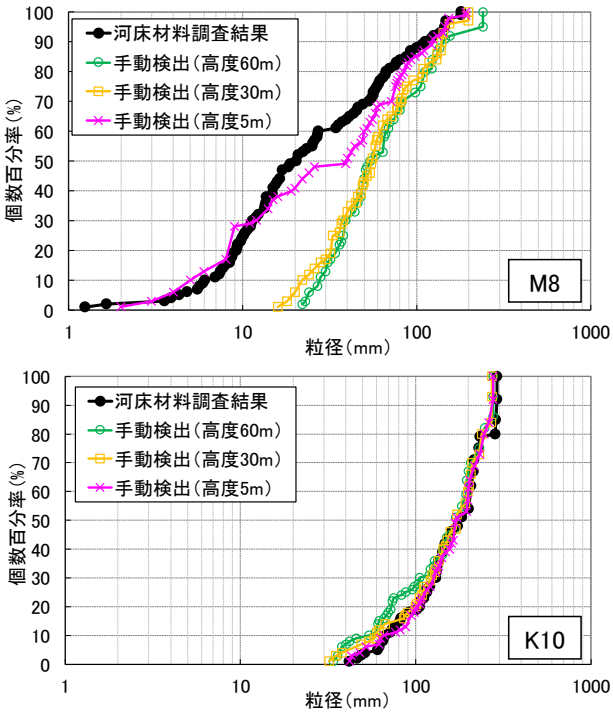
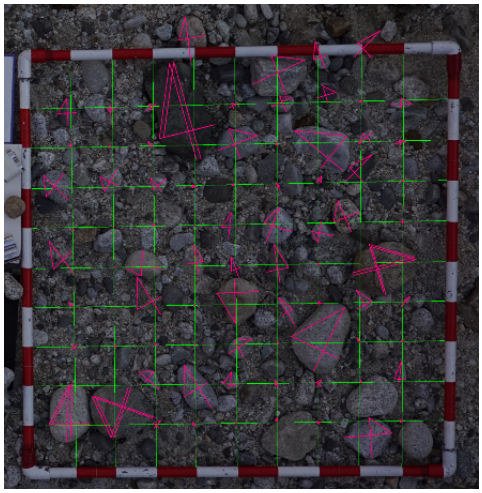
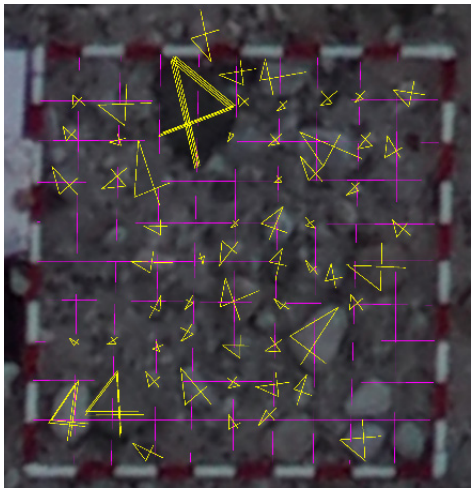


図-8　M8及びK10の粒度分布



(a) 高度5mからの撮影画像



(b) 高度60mからの撮影画像

図-9　目視による判読結果の高度による比較

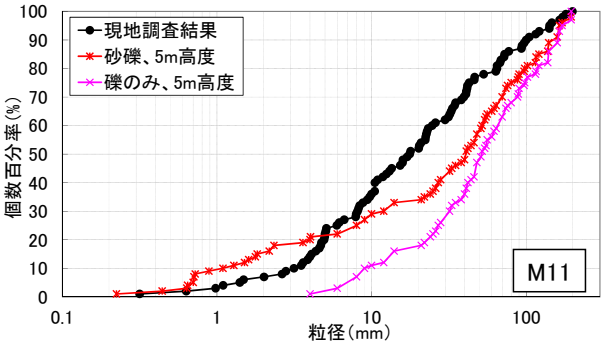


図-10　砂礫場における粒径判読工夫の効果

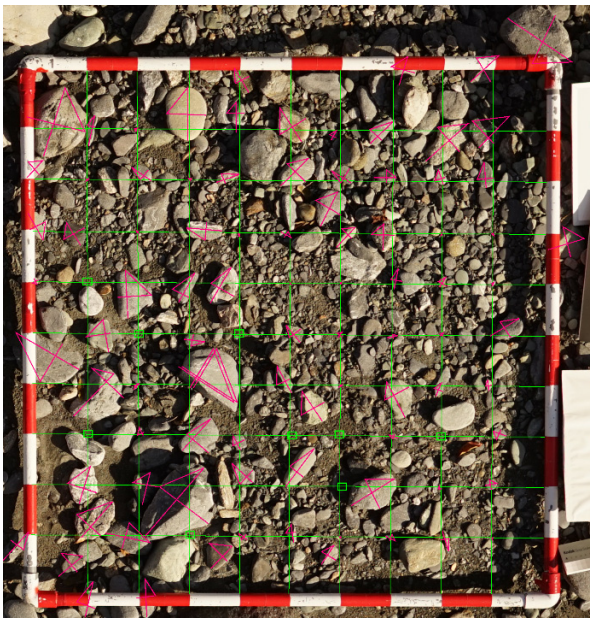


図-11　砂礫場での礫・砂の判読結果（M11）

礫が多数を占める箇所である．図-8は，M8地点及びK10地点の粒度分布であり，図-9は撮影画像から個々の礫の大きさを読み取った結果を示す．図-9の４の字マーク（逆向きもある）は，礫の長径と中径を読み取った結果であり，複数重なった礫は重なった数の面積格子の格子点で重なった回数だけカウントされたことを示す．K10地点の結果を見ると，飛行高度に依らず，現地での調査結果と同等の粒度分布が得られている．M8地点の結果を見ると，飛行高度5mの撮影画像からは現地調査と同等の結果が得られたものの，高度30m及び60mでは粒径16mm程度以下の河床材料を判読できていない．また，粒径16mm程度以上の河床材料の輪郭が不明瞭となり，粒径を大きめに計測する場合があった．

(3) 砂礫場

図-10は，図-11に示すように格子点上の河床材料を目視によって，一つの礫として扱う箇所（ピンク色４の字）と砂の平均粒径推定式を適用する箇所（緑色四角形）に分け，各箇所の粒径を判読もしくは推定すること

で作成した粒度分布である．前項で示したように，礫卓越場として扱うと，緑色四角の箇所は判読できず，粒径20mm以下の河床材料が極端に小さくなる（礫のみ，5m高度）．こうした格子点の画像を用いて，平均粒径推定式を適用することで，「礫のみ，高度5m」を補正したのが「砂礫，5m高度」である．こうした工夫によって，細砂～中礫が河床表面を覆う場においてもUAVの空中写真を用いて粒径加積曲線を作成することが可能となる．

４．おわりに

(1) 現地調査と撮影画像を用いた分析結果との比較から分かったこと

① 粒径0.5mm～16mmの河床材料が表層を覆う砂卓越場では，空中写真の輝度の標準偏差，変動係数，90％範囲を用いた相関式で倍半部程度の精度で平均粒径を推定できた．

② 粒径16mm以上の河床材料が表層を覆う礫卓越場において，これらの礫径をCADソフトウェア等を用いてPC上で判読するためには，高度5mから撮影した，0.7mm/pixel程度の解像度を持った画像が必要である．高度30m程度になると，シャッタースピードを速くしても画像が暗くなったり，ピントが十分に合っていなかったりと，粒径の輪郭を判読することが難しくなった．

(2) 今後に向けた改善の提案

① (1)①について，粒径0.5mm～16mmの平均粒径推定式については，解像度5mm/pixelの撮影画像を使い，比較的肌理の揃った河床材料を用いた室内実験によって得られた推定式である．(1)②で述べたように，礫の粒径の判読には高度5mの空中写真が必要であることを考えると，現地の河床材料を用いて，河川ごとに粒径0.5mm～16mm用の平均粒径推定式を作成しておくことが有効である．

② 粒径16mm以上の礫が河床表層を覆う礫卓越場の粒度分析には，高度5mの撮影画像が必要であった．高度5mから撮影した画像（解像度0.7mm/pixel）を用いた場合，5mm程度の粒径まで判読可能であった．一方，室内実験では粒径10mm以上の河床材料とそれ以下の粒径の河床材を個別に扱って平均粒径推定式を作成した方が，推定誤差が小さくなることが確認されている[4]．このことを考えると，礫を個別に判読するのは粒径5mm程度までとして，それ以下の河床材料については高度5mから撮影した画像を用いて平均粒径推定式を作成しておくのが合理的である．また，画像解析によって粒度分布を作成するのに掛かった時間は，**図-10**の砂礫場でも40分程度であった．これは，現地での直接計測を行う作業と同程度である．

最後に，UAVを用いることで機動的に河床材料調査を実施でき，面積格子法と同程度の精度で粒径加積曲線を作成できるようになることから，以下のような活用が期待される．

- ダム上流域や中山間地上流の河川区間など，調査員の立入が困難な場所での河床材料調査
- 出水が連続して発生する場合など，出水の合間に短時間で実施する多地点の河床材料調査

謝辞：調査箇所の選定にあたっては，長野県飯田建設事務所松川ダム管理事務所の成澤悟史主査，中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所の石田勝志専門官に現地の案内をしていただいた．ここに記して，謝意を表します．

参考文献

1) 原田守啓：UAVによる河川地形・河床材料モニタリング手法の検討，インフラ・イノベーション研究会，第31回講演会発表資料，2016.
2) 谷上実，畠山正則：河床材料調査における写真画像粒度解析手法の適用について，技術ｅ-フォーラム，論文No.58，2009.
3) 佐野滝雄，沼田洋一，大野勝正，福島雅紀：航空写真データの解析による河床材料区分の試行，応用生態工学会，第10回研究発表会講演集，pp.261-262，2006.
4) 秋田麗子，長岐瑠里子，炭田英俊，福島雅紀，中村賢人，諏訪義雄：垂直写真の画像解析から砂の平均粒径を推定する手法の検討，河川技術論文集，第24巻，2018（印刷中）．

(2018.4.3受付)