

# 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

## STUDIES ON METHODS FOR ESTIMATING MEAN PARTICLE SIZE OF SAND FROM IMAGE ANALYSES OF VERTICAL PHOTOGRAPHS

秋田麗子<sup>1</sup>・長岐瑠里子<sup>1</sup>・炭田英俊<sup>1</sup>・福島雅紀<sup>2</sup>・中村賢人<sup>2</sup>・諏訪義雄<sup>2</sup>

Reiko AKITA, Ruriko NAGAKI, Hidetoshi SUMITA, Masaki FUKUSHIMA,  
Kento NAKAMURA and Yoshio SUWA

<sup>1</sup>正会員 日本工営株式会社 河川部 (〒102-8539 東京都千代田区九段北1丁目14番6号)

<sup>2</sup>正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 (〒305-0804 つくば市旭1番地)

To estimate particle size of sand from luminance distribution of sand images, laboratory experiments were conducted. In the experiments, we used four kinds of single particle which was under about 10 mm diameter, which could not recognize contour of sand from sand images, and took pictures in various lightning conditions and display resolutions. The results of the experiments were that the smaller particle size of sand was, the thinner the peak of luminance distribution was, and the larger particle size of sand was, the flatter the peak of luminance distribution was. Based on the above results, we proposed an equation to estimate particle size of sand from the coefficient of variation, 90th percentile, and standard deviation of the luminance distribution. The equation can be adopted to estimate approximate particle size of sand using sand images taken by UAV(Unmanned Aerial Vehicle). However, to estimate particle size of sand more accurately, we need to consider the factor of illumination angle and color tone of sand.

**Key Words :** *sediment distribution pattern survey, particle size of sand, image analyses, UAV, laboratory experiments*

### 1. はじめに

河川の表層河床材料は、空間的なばらつきを持ち、時間的にも変化しながら、河床変動や植生消長に影響を及ぼすため、“表層河床材料の面的分布の時間変化”を把握することは、河道管理上の取組み課題の一つである。これに応えるものとして、筆者らは、UAV空中写真から、画像解析によって粒径を把握する技術に注目した。

汎用性の高い技術とする上で、現地河川に多く存在する“砂から礫まで”を扱う必要がある。礫については、これまでに画像から輪郭を抽出してスケールを読み取る手法が確立されている<sup>(例えば[1]~[8])</sup>。一方、数mmの砂の粒径を同じ手法で把握するには、高度1~2mで撮影した高解像度画像が必要となり、非常に効率が悪い。

ここで、単一粒径を想定すると、粒径が大きいほど陰影のばらつきが大きく、粒径が小さいほど陰影のばらつきが小さいため(図-1参照)、陰影すなわち“輝度”から代表粒径を把握する手法が有効ではないかと考えた。輝

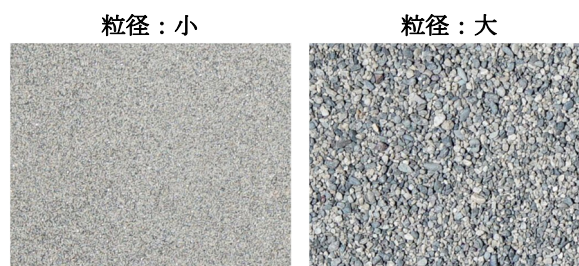


図-1 粒径に応じた陰影の変化

度に着目した手法は、これまでも報告があるが<sup>[9][10]</sup>、実証事例は少なく、代表粒径の相対的な大小は把握できても、絶対値への換算が可能な段階ではない。さらに、現地の河床材料は、流域の鉱物組成によって色調が異なり、水分量や天候、撮影時刻等によっても変化すると想定され、このような条件による影響も不明である。

以上を踏まえ、本稿では、一定条件のもとで室内実験を行い、そこから得た“砂の代表粒径を画像の輝度から推定する手法”を具体的に報告する。なお、提案した推定式を用いて、天竜川上流において現地実証試験を行った結果については、別途、福島ら<sup>[11]</sup>が報告を行う。

## 2. 室内実験

### (1) 実験手法

30cm×30cm×厚さ10cmの木枠内に、単一粒径の河床材料を充填させた実験サンプルを製作した。これを図-2のように室内床面に配置し、天井部に設置したカメラから垂直に写真撮影を行った。実験サンプルの種別（12通り）、カメラの設定条件（4通り）、照明の条件（6通り）等を変えて計360通りの撮影を実施した（表-1）。

### (2) 実験サンプル

#### a) 粒径

河床材料には、天竜川から採取された砂利を購入して用いた。これをふるい分けして、粒径0.5～1mmを粗砂（平均粒径0.85mm）、1～2mmを極粗砂（1.425mm）、2～4mmを細礫（3.25mm）、4～8mmを中礫（7.125mm）の4通りに分類した（図-3左段）。

#### b) 色調

天竜川上流の砂利購入材は黒灰色であるため、比較のため、白玉砂利の購入材も用意し、黒灰色と同様に、粒径に応じて4通りに分類した（図-3右段）。

### (3) 撮影条件

#### a) 撮影機器

撮影には、天竜川におけるUAV現地実験で用いるものと性能が同程度のデジタル一眼レフカメラ（α7R II、SONY製、約4240万画素）を使用した。

#### b) 撮影画像の解像度

画像の解像度は、天竜川におけるUAV現地実験の撮影高度を想定し、0.4mm/pix（高度約2mに該当）、1mm/pix（高度約5m）、5mm/pix（高度約30m）、10mm/pix（高度約60m）、20mm/pix（高度約120m）の5通りとした。室内実験における解像度は、カメラの撮影画素設定により調整した。20mm/pixについては10mm/pixの画像を机上で後処理して作成した。

### (4) 照明条件

#### a) 照明機器

室内実験に用いる照明機器は、太陽光と同様の色温度を再現可能で、照明角度及び照度を段階的に調整可能なLEDライト（Astra 1x1 Bi-Color, Litepanels製）を使用した。

#### b) 照明条件

撮影時の照明角度は、斜めから照射する場合（角度60度）を基本とし、比較のため、真上から照射する場合（角度90度）の2通りとした。照度は、照明器具の出力を100%とした状態（照度2,000 lux程度）を基本とし、比較のため出力60%、出力30%に低減させた場合の3通りとした。

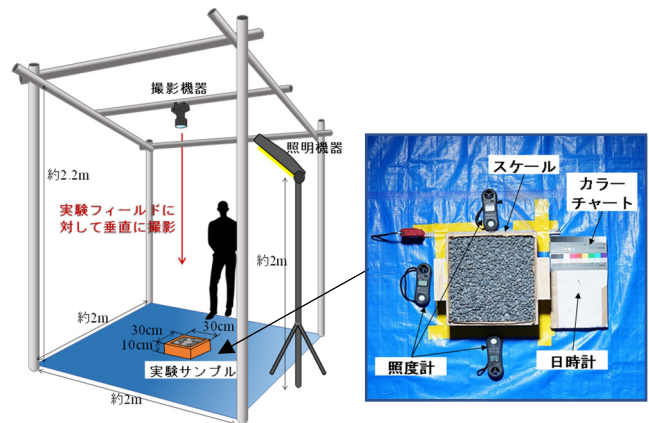


図-2 室内実験の実施状況

表-1 実験ケース

| 実験サンプル     |        |            | 撮影条件                   | 照明条件       |      |
|------------|--------|------------|------------------------|------------|------|
| 色調         | 粒径     | 水分         | 解像度                    | 角度         | 照度   |
| 黒灰色<br>白 色 | d1:粗砂  | 乾燥<br>(湿潤) | 0.4mm/pix              | 60度<br>90度 | 100% |
|            | d2:極粗砂 |            | 1mm/pix                |            | 60%  |
|            | d3:細礫  |            | 5mm/pix                |            | 30%  |
|            | d4:中礫  |            | 10mm/pix<br>(20mm/pix) |            |      |
| 2通り        | 4通り    | 1~2通り      | 5通り                    | 2通り        | 3通り  |
| 12通り       |        |            |                        | 6通り        |      |
| 計 360通り    |        |            |                        |            |      |

太字：基本ケース

(湿潤) は一部ケースのみ実施, (20mm/pix) は後処理により作成

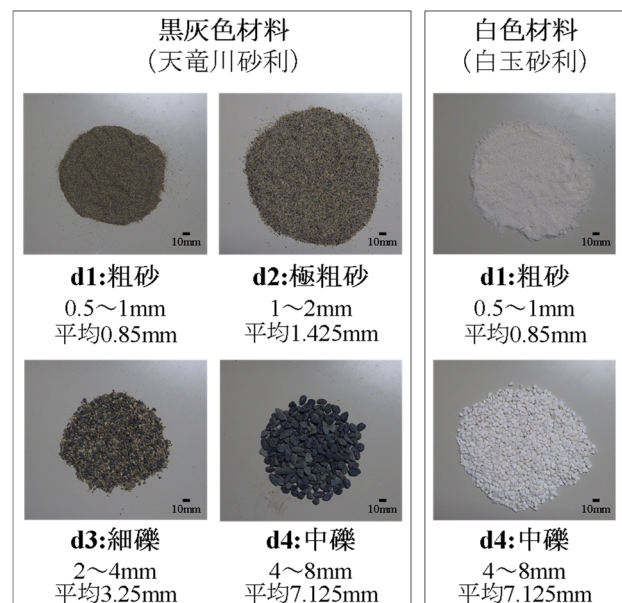


図-3 実験サンプルに用いた購入材料

### (5) その他条件

実験サンプルは乾燥した状態を基本とし、参考として、実験サンプルを一度浸水させて引き上げた直後の湿潤状態の場合も一部で設定した。

### 3. 画像解析

#### (1) 解析画像の作成

室内実験で得た撮影画像から、実験サンプルの中央部分(22cm×22cm範囲)を切り出し、解析画像を作成した(表-2、表-3の上段参照)。

#### (2) 輝度分布の傾向把握

解析画像の輝度別画素数の頻度分布(以降、輝度分布)を表-2、表-3の下段に示し、以下に傾向を整理した。

##### a) 粒径との関係性

粒径が小さいほど輝度分布が先鋭な形状となり、粒径が大きいくほど輝度全体が0(黒色)の方にシフトし、扁平な形状となる。この傾向は、どの照明条件、材料の色調においても共通して得られ、砂の輪郭の捉えられない粗い画像からも細粗の判別が可能であることを把握した。

##### b) 解像度との関係性

高解像度画像では、輝度分布が扁平な形状となり、低解像度となるほど先鋭な形状となる。また、高解像度の場合は粒径による相違が小さいが、低解像度の場合は粒径による相違が際立つ。これより、粒径の数倍程度の粗い解像度の画像を用いた方が、砂の粒径を把握する上では適切であることを把握した。

##### c) 材料の色調との関係性

白色の材料は、黒灰色の材料とは輝度分布の絶対値や形状が全く異なり、輝度は材料の色調に大きく依存する。

##### d) 照明条件との関係性

図-4より、照明角度による輝度への影響は大きい、照度による影響は比較的小さい。

##### e) 湿潤状態による影響

図-5より、湿潤状態となることで材料の色が黒っぽくなるため、輝度分布の絶対値や形状が変化し、水分条件によって影響を受ける。

### 4. 統計処理

#### (1) 統計データの算出

輝度分布データより、一般的な統計指標を算出した。以降は、安定的に粒径との関係性が確認された標準偏差、変動係数(=標準偏差/平均値)、90%範囲(最大・最小の5%を除いた範囲)の3つについて示す。

#### (2) 統計指標と粒径との関係性

横軸に輝度に関する3つの統計指標を、縦軸に粒径をプロットした結果を表-4に示す。これより、どの画像解像度、材料の色調においても、粒径が大きいくほどこれら3つの統計指標の値が大きくなる関係性を得た。

画像解像度による影響として、高解像度となるほど、

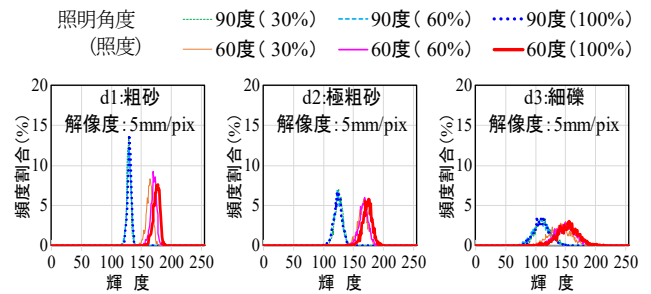


図-4 照明条件による輝度分布への影響(黒灰色材料)

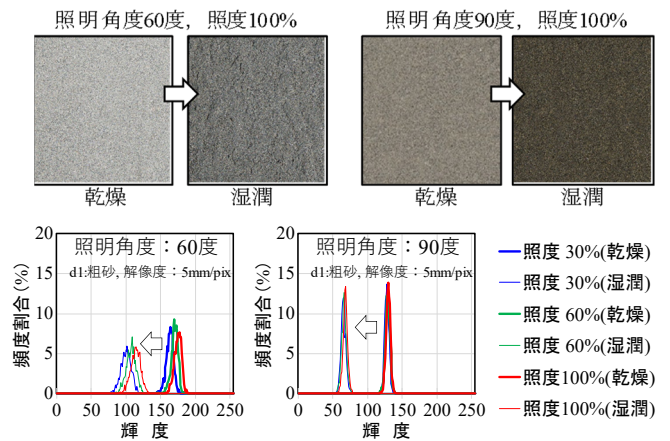


図-5 湿潤による画像及び輝度分布への影響(黒灰色材料)

統計指標～粒径の傾きが小さく、粒径による相違が把握しやすい一方で、誤差は大きい。低解像度では、ばらつきは小さいものの、統計指標～粒径の傾きが大きく、わずかな指標値の相違で粒径が変化することとなる。

色調による影響として、白色材料は、黒灰色の材料とは統計指標～粒径の関係性が全く異なり、色調による影響を除くことはできない。

照明角度による影響は、材料の色調による影響ほど大きくない。

### 5. 輝度からの砂の粒径推定式

#### (1) 推定式の設定

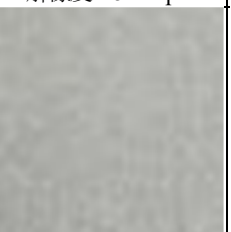
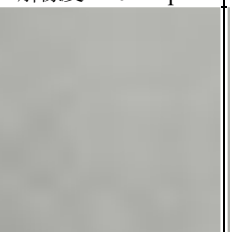
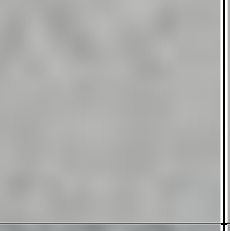
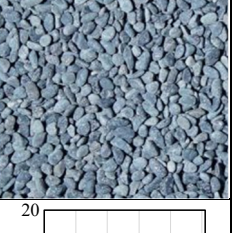
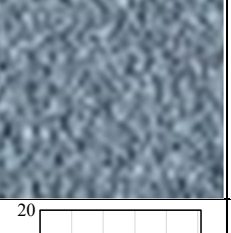
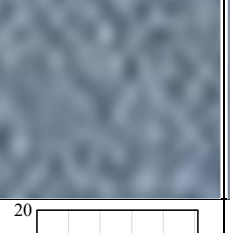
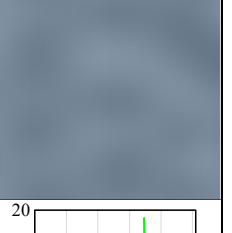
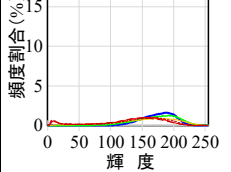
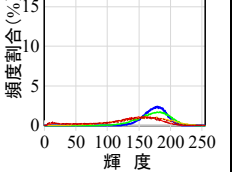
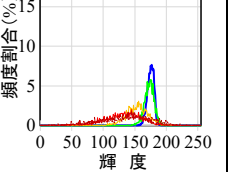
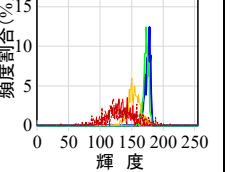
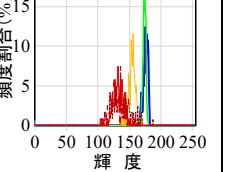
統計指標と粒径との関係性から近似式を作成した。近似手法は、上に凸、下に凸の両者の関係性を表現することのできる多項目近似曲線(次数2、切片0)を採用した。

ここで、3つの統計指標は、粒径のみでなく、材料の色調(実験では2通り)、画像の解像度(5通り)、照明角度(2通り)によっても変化するが、これらをパラメータとして取り込むには実験ケースが不足するため、これら条件の組合せにより計20パターンに分けて近似式を作成した。なお、照度(3通り)による輝度分布への影響は小さいため、場合分けを行わなかった。

表-4に、黒灰色材料、照明角度60度の場合の粒径推定式(5パターン)を示した。



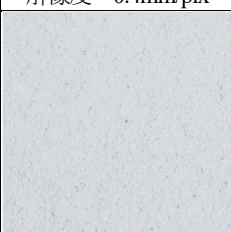
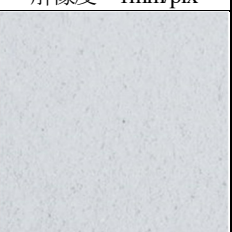
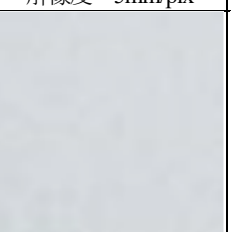
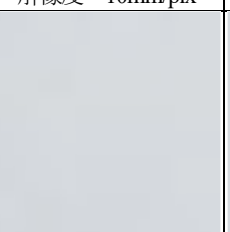
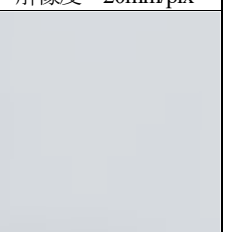
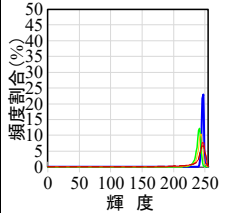
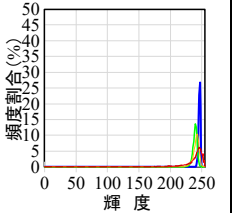
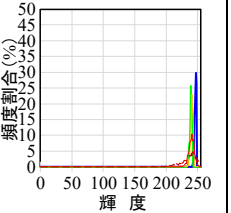
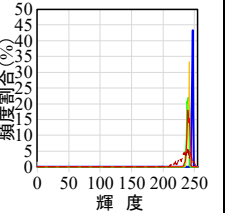
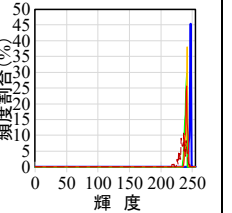
表-2 黒灰色材料の解析画像及び輝度の頻度分布（照明条件：角度60度，照度100%）

|                  |           | 解像度 0.4mm/pix                                                                       | 解像度 1mm/pix                                                                         | 解像度 5mm/pix                                                                         | 解像度 10mm/pix                                                                         | 解像度 20mm/pix                                                                          |
|------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 解<br>析<br>画<br>像 | d1<br>粗砂  |    |    |    |    |    |
|                  | d2<br>極粗砂 |    |    |    |    |    |
|                  | d3<br>細礫  |    |    |    |    |    |
|                  | d4<br>中礫  |   |   |   |   |   |
| 輝度の<br>頻度分布      |           |  |  |  |  |  |

輝度分布は各輝度のピクセル数を全ピクセル数で除した頻度割合で示したもの

— d1:粗砂 — d2:極粗砂 — d3:細礫 — d4:中礫

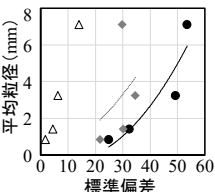
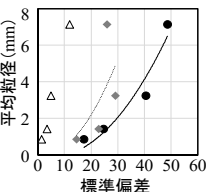
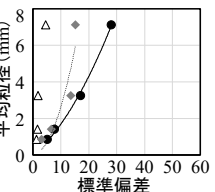
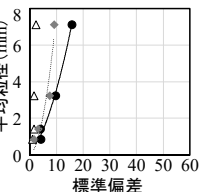
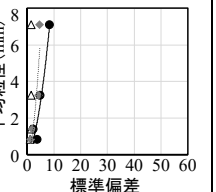
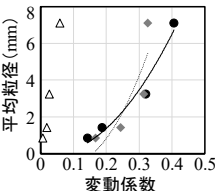
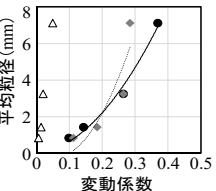
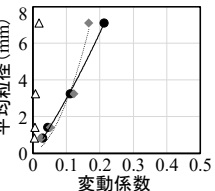
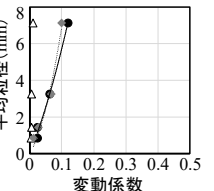
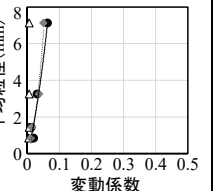
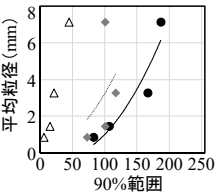
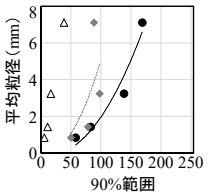
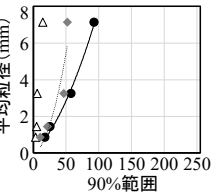
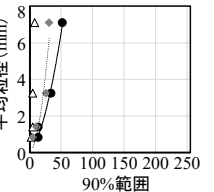
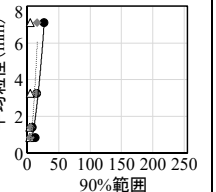
表-3 白色材料の解析画像の例及び輝度の頻度分布（照明条件：角度60度，照度100%）

|                  |  | 解像度 0.4mm/pix                                                                       | 解像度 1mm/pix                                                                         | 解像度 5mm/pix                                                                         | 解像度 10mm/pix                                                                         | 解像度 20mm/pix                                                                          |
|------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 解析画像<br>d3<br>細礫 |  |  |  |  |  |  |
| 輝度の<br>頻度分布      |  |  |  |  |  |  |

輝度分布は各輝度のピクセル数を全ピクセル数で除した頻度割合で示したもの

— d1:粗砂 — d2:極粗砂 — d3:細礫 — d4:中礫

表-4 輝度分布の統計指標と粒径との関係性

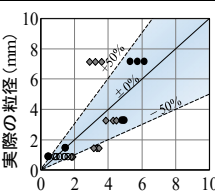
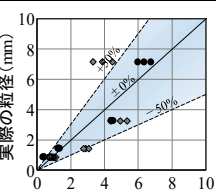
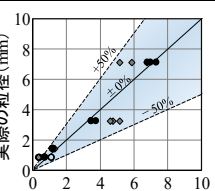
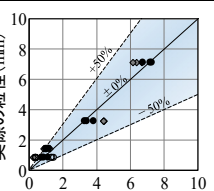
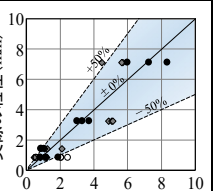
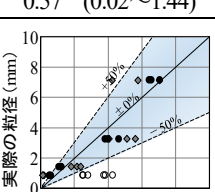
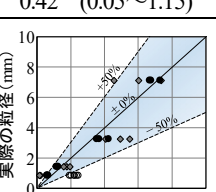
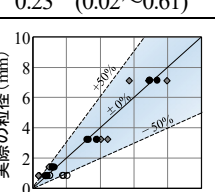
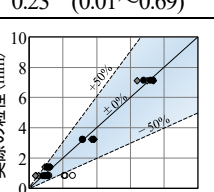
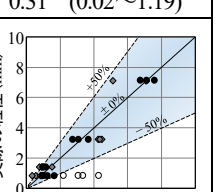
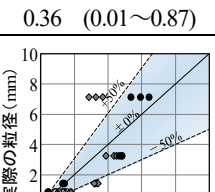
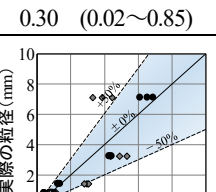
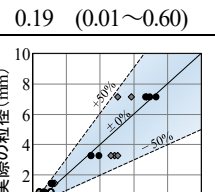
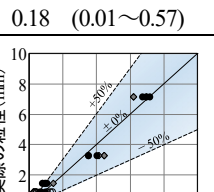
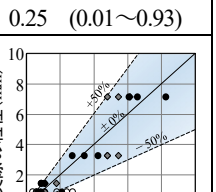
|       | 解像度 0.4mm/pix                                                                                            | 解像度 1mm/pix                                                                                              | 解像度 5mm/pix                                                                                               | 解像度 10mm/pix                                                                                                | 解像度 20mm/pix                                                                                                 |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 標準偏差  |  $d=45.9605x^2-2.8242x$ |  $d=0.0037x^2-0.0400x$  |  $d=0.0054x^2+0.1099x$   |  $d=0.0166x^2+0.1929x$    |  $d=0.1023x^2+0.1258x$    |
| 変動係数  |  $d=45.9605y^2-2.8242y$ |  $d=44.9051y^2+1.4102y$ |  $d=36.7938y^2+24.6024y$ |  $d=114.7669y^2+43.1940y$ |  $d=963.1235y^2+57.7041y$ |
| 90%範囲 |  $d=0.0003z^2-0.0166z$  |  $d=0.0003z^2-0.0104z$  |  $d=0.0005z^2+0.0291z$   |  $d=0.0016z^2+0.0481z$    |  $d=0.0103z^2+0.0269z$    |

プロットは、材料の黒灰色材料8通り、白色材料4通りの結果、照度は100%。

近似式は、黒灰色材料の照明角度60度の場合、 $d$ :推定粒径 (mm) ,  $x$ : 標準偏差,  
 $y$ : 変動係数 (=標準偏差/平均値) ,  $z$ : 90%範囲 (=95%値-5%値)

- 黒灰色材料(照明角度60度、照度100%)
- ◆ 黒灰色材料(照明角度90度、照度100%)
- △ 白色材料 (照明角度60度、照度100%)

表-5 輝度分布の統計指標からの推定粒径と実粒径との比較 (黒灰色材料の場合)

|       | 解像度 0.4mm/pix                                                                                            | 解像度 1mm/pix                                                                                             | 解像度 5mm/pix                                                                                             | 解像度 10mm/pix                                                                                             | 解像度 20mm/pix                                                                                              |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 標準偏差  | <br>0.57 (0.02~1.44)  | <br>0.42 (0.05~1.15) | <br>0.23 (0.02~0.61) | <br>0.23 (0.01~0.69) | <br>0.31 (0.02~1.19) |
| 変動係数  | <br>0.36 (0.01~0.87)  | <br>0.30 (0.02~0.85) | <br>0.19 (0.01~0.60) | <br>0.18 (0.01~0.57) | <br>0.25 (0.01~0.93) |
| 90%範囲 | <br>0.55 (0.010~1.39) | <br>0.41 (0.04~1.13) | <br>0.24 (0.03~0.57) | <br>0.25 (0.01~0.69) | <br>0.30 (0.04~1.46) |

プロットは、乾燥状態24通り、湿潤状態6通りの結果、黒灰色材料のみ。

数値は、湿潤状態を除く各24通りにおける推定誤差率；平均値 (下限値~上限値) ,  
推定誤差率= |推定粒径-実粒径| ÷ 実粒径

- 黒灰色材料(照明角度60度)
- ◆ 黒灰色材料(照明角度90度)
- 黒灰色材料(湿潤状態)

## (2) 適合度の確認

黒灰色材料について、輝度からの推定粒径と実際の粒径の比較プロット、推定誤差率（＝推定粒径－実粒径）÷実粒径）の算出結果を表-5に示す。なお、河床材料粒径の分類と呼称（細区分）<sup>12)</sup>を言い当てる上で、推定誤差率50%以内を目安とした。

表-5のプロット図より、粒径の小さい粗砂（d1）の場合、0.4～1mm/pixの高解像度の場合、湿潤状態の場合を除くと、実粒径に対して±50%以内の精度で粒径を推定でき、河床材料の細区分が可能であることを確認した。

表-5の推定誤差率より、どの統計指標を用いた場合でも、解像度5～10mm/pixの推定誤差が最も小さい。これより、数mmの砂の粒径を把握する上での最適な画像解像度は5～10mm/pix程度といえる。

また、3つの統計指標の中では、変動係数による推定精度が最も良い。これは、標準偏差には輝度の絶対値による影響が含まれるが、変動係数を用いて無次元化することで“ばらつき”が適切に表されるためと考える。

変動係数を用いた場合の推定誤差率を図-6に整理した。これより、解像度5～10mm/pixの場合、平均的に実粒径±20%の精度で推定でき、最大でも実粒径±50%程度である。なお、湿潤状態の場合は大幅に精度が低下するため、本推定式の適用は乾燥の場合に限った方がよい。

## 6. おわりに

画像から輪郭を抽出できない数mmの砂を対象に、撮影画像の輝度の頻度分布から粒径を推定する手法について、室内実験を用いて検討した。

- 室内実験では、粒径の異なる単一粒径のサンプルを用意し、材料の色調、画像の解像度、照明条件、湿潤状態等を変えて撮影を行った。
- 粒径が小さいほど輝度の頻度分布が先鋭となり、粒径が大きいほど扁平となる関係性を得た。
- これを代表する指標として、標準偏差、変動係数、90%範囲から粒径を推定する式を提案した。
- 粒径の推定精度は、解像度5～10mm/pix（撮影高度30～60m程度）で、平均的に実粒径±20%の精度（d=2mmの場合に1.8～2.4mmと推定）であり、本推定手法を用いることで、UAV撮影画像からも効率的に砂の粒径を把握できる。
- 輝度は材料の色調、照明角度、湿潤条件によっても変化するため、式の適用範囲は限られる。

今後は、室内実験、光学シミュレーション等を活用し、色調や照明条件、水分条件等の組合せによる様々な条件下での輝度と粒径との関係性を把握し、混合粒径の場合や水中下の場合も視野に、推定式の精度向上、適用範囲の拡大に向けて取り組む所存である。

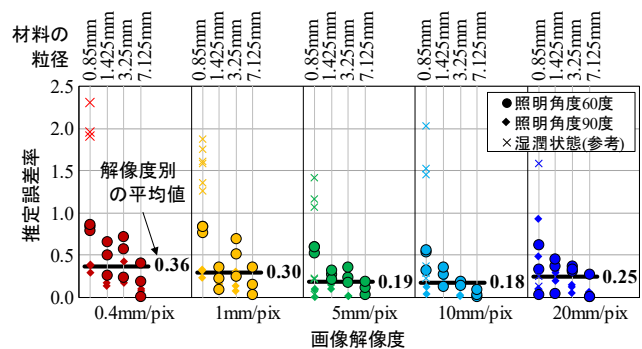


図-6 粒径の推定誤差率（変動係数から推定した場合）

謝辞：室内実験結果の考察に際し、山口大学の神野有生准教授に指導を賜りました。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，2016.6.16.
- 2) 寺田康人，藤田一郎，浅見佳世，渡辺 豊：UAVによる撮影画像を用いた洪水前後の砂州上粒度分布の計測，土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, p.I\_919-I\_924, 2015.
- 3) 傳田正利，天野邦彦，時岡利和：デジタル低高度空中写真を用いた表層土壌材料の面的変化特性把握手法の開発，水工学論文集，第52巻，p.907-912, 2008.2.
- 4) 梅津健一ほか：低高度空中写真による河床礫調査法の精度検証と実用性について，砂防学会誌，Vol.60, No.1, p.19-28, 2007.
- 5) 安田真悟，大橋慶介，伊原一樹：河床粒度分布調査における斜め画像の処理に伴う石礫輪郭の歪み補正，土木学会論文集B1(水工学) Vol.67, No.4, p.I\_1159-I\_1164, 2011.
- 6) 大橋慶介，伊原一樹，安田真悟：画像処理による河床粒度分布情報の高空間解像度化，土木学会論文集F3(土木情報学) Vol.67, No.2, p.I\_111-I\_118, 2011.
- 7) 谷上実，畠山正則：河床材料調査における画像粒度解析の適用について，全地連「技術e-フォーラム2009」，2009.
- 8) 内尾政人，中川一，沢田豊明，横山康二，上杉満昭，福田義徳：画像処理方式による礫河川の粒度分布測定装置の開発，砂防学会誌，Vol.58, No.2, p.26-31, 2005.
- 9) 金宗煥，沼田洋一，服部聡子，川崎正文：河床表層材料の粒径推定におけるUAVの活用事例，第58回（平成27年度春季）学術講演会，2015.6.
- 10) 廣瀬葉子，大谷徹，今井靖晃，野口明義：航空レーザとデジタル航空画像を用いた河川解析図の作成，土木学会第63回年次学術講演会 発表資料，p.273-274, 2008.9.
- 11) 福島雅紀，中村賢人，諏訪義雄，秋田麗子，長岐留里子，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，2018（印刷中）.
- 12) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準（調査編），平成26年4月改定版，p.第4章第2節－11.

（2018. 4. 3受付）