

斜め画像を使った河床粒度分布調査における 撮影俯角推定技術と精度検証

ESTIMATING PHOTOGRAPHY ANGLE AND ITS ACCURACY IN GRAIN SIZING
BY IMAGE PROCESSING WITH INCLINED PHOTOGRAPHY

大橋慶介¹・安田真悟²・伊原一樹²

Keisuke OHASHI, Shingo YASUDA and Kazuki IHARA

¹ 正会員 博士(工学) 岐阜大学工学部社会基盤工学科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

² 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

New grain sizing, image processing method with digital photography, is modern analysis by using computer, and has ever been improved to keep the result accurate in any conditions of river bed. Because it is the characteristic of image processing method not to take time for the analysis, the observation to take photos requires effort the most.

For the purpose of improving efficiency, we suggest two techniques. One is estimating photography angle from shape of a quadrate frame in an inclined image and the other is calibration of distortion with optical theorem, which supposes that grain is hemisphere body. In the result, the error of estimated angle is less than 1.5 degrees in any cases, and distortion calibrating shows the better fix than the traditional method, sieve analysis test.

Key Words: Manual Grain Sizing (MGS), Image processing, Grain size distribution, OpenCV

1. はじめに

一般に、河床材料の粒度分布の取得には、石礫抽出・運搬・粒度分析の各工程において時間と労力がかかることから、それを改善する方法として河床のデジタル画像とコンピュータ処理を用いた粒度分布調査が提案されている¹⁾。この画像処理法と呼ばれる粒度分布調査は、コンピュータが石礫形状を自動認識する AGS(Automated Grain Sizing)²⁾と、人間がモニタ上で石礫形状を判別する方法³⁾である MGS(Manual Grain Sizing)の2つに大別することができる。AGSでは、最新の画像処理技術を応用して、石礫認識精度の向上が図られているものの、今なお技術的な課題が多く、実用段階に至っていないのが現状である。一方、MGSには石礫輪郭を計測する方法⁴⁾や石礫の長軸と短軸を計測する方法⁵⁾など若干の手法の違いは存在するが、基本的に人間による操作を必要とするため、AGSと比較して分析時間が増加する。それでも、1つの調査領域に対して数時間もあれば分析を完了することができる。その上、石礫の誤検出は AGS と比較すると非常に少ないことから、現段階での画像処理法は MGS に優位性があると言える。このように、粒度分析作業に関しては、従来法のふるい分け試験と比較して、非常に高い効率を有する MGS であるが、相対的に調査時の撮影効率の低さを改善する必要性が高まってきている。調査撮影には、画像内の位置によって石礫の縮尺が変化することを避けるために、特別な撮影装置を使って河床に正対する鉛直撮

影を実施するのが通常であり、この鉛直撮影が調査効率を悪化させている原因であった。これまでも、調査撮影の効率改善を目的として、斜めに撮影された画像(斜め画像)の透視投影変換による疑似正対画像を用いた画像処理法⁶⁾の提案と、透視投影変換によって発生する歪みを補正する試み⁴⁾がなされ、球体を用いた室内実験では良い補正結果が得られたものの、石礫を用いた現地実験では過大に補正されるという結果が報告されている。本研究では、透視投影変換で発生する歪みを補正する際に必要であった撮影俯角 θ を画像中のコドラート形状から推定することを試みた。さらに、斜め画像を透視投影変換する際に発生する歪みを補正するために、半球石礫モデルを提案し、その補正精度を検証した。加えて、画像から石礫粒径を推定するという画像処理法そのものが持つ原理的な問題に起因した計測誤差を得るため、10mm以上の石礫に対して全表面抽出法を実施して、個別粒子の質量計測、ふるい分け試験、画像処理法のそれぞれの比較を行った。なお、これらの画像処理には全て OpenCV のライブラリを使用している。

2. 撮影および画像処理の方法

(1) 河床画像の撮影方法

任意の撮影俯角と撮影距離を保持するために、図-1に示す撮影装置を用いた。俯角はカメラ横に設置され

表-1 カメラおよびレンズの仕様

機器	仕様
カメラ：PENTAX K20D	サイズ：H4672 × W3104 ピクセル フォーマット：JPG, 外部ストロボ：使用
レンズ：DA15mm F4 ED AL	カメラ内部パラメタ 焦点距離 $f(=F \cdot s)$ ： $f_x = 3.17734 \times 10^3$, $f_y = 3.18166 \times 10^3$ 半径方向歪み係数： $k_1 = -4.01073 \times 10^{-2}$, $k_2 = 1.29611 \times 10^{-2}$ 円周方向歪み係数： $p_1 = 1.61473 \times 10^{-4}$, $p_2 = 2.22709 \times 10^{-5}$

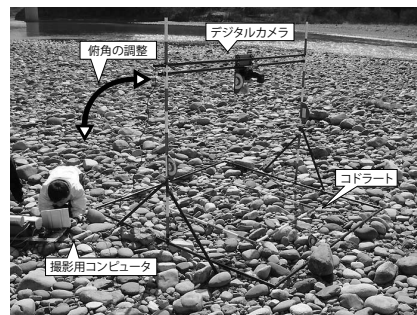


図-1 河床撮影の様子

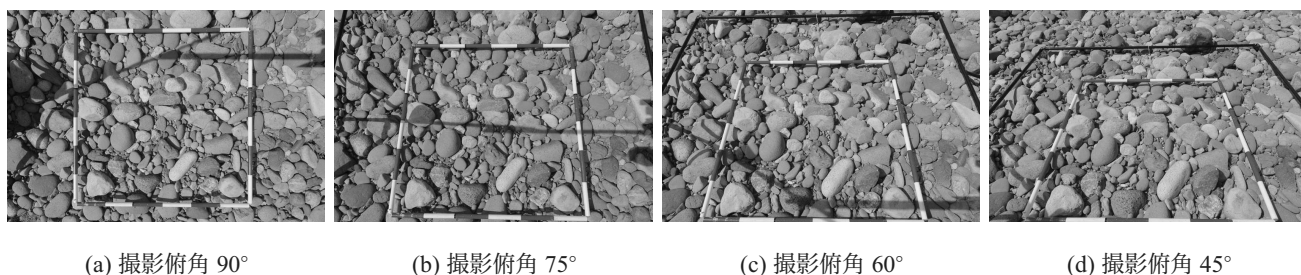
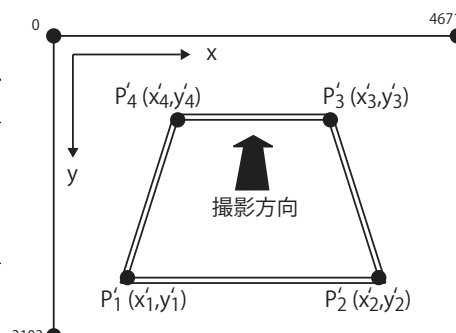


図-2 河床の斜め画像

表-2 コドラート頂点座標（画像平面座標系，単位：ピクセル）

歪み除去	設定俯角	x'_1, y'_1	x'_2, y'_2	x'_3, y'_3	x'_4, y'_4
無し	90	1052, 2793	3525, 2811	3530, 332	1056, 350
	75	881, 2944	3660, 2994	3429, 559	1192, 563
	60	665, 3004	3796, 3045	3319, 786	1257, 795
	45	602, 3007	4107, 3037	3336, 1049	1392, 350
有り	90	1039, 2807	3540, 2826	3545, 317	1043, 337
	75	864, 2964	3678, 3010	3438, 549	1183, 551
	60	636, 3026	3818, 3069	3324, 781	1252, 792
	45	581, 3024	4136, 3061	3344, 1045	1387, 1060



コドラートの頂点とその番号

た水平器によって計測され、シャッター操作にはカメラ付属のソフトウェアを用いている。カメラおよびレンズの仕様を表-1に示す。ここでのレンズパラメータはOpenCVのcvCalibrateCamera2関数を用いて、予備実験から求めたものである。俯角を変えた4ケースの撮影（90°，75°，60°，45°）で得られた河床の斜め画像を図-2に示す。

(2) 画像処理の方法

本研究では画像処理ライブラリOpenCV2.1を用いている。俯角推定の検討においては、レンズ歪みを除去するためにcvUndistort2関数を使用した。斜め画像から疑似正対画像への透視投影変換には、cvGetPerspectiveTransform関数、cvWarpPerspective関数を使用した。MGSを実施するために、モニターを見ながら石礫輪郭をマウスクリックし、その輪郭座標を出力するプログラムを作

成した。このとき、石礫の輪郭は画像に写ったままの輪郭をトレースし、他の石礫によって遮蔽されている場合であっても経験的な石礫形状の推定はしていない。石礫輪郭は、コドラート領域が1.2 m × 1.2 mであることからピクセル比によって縮尺を決定し、物理空間での長さに変換している。

3. 画像内のコドラート形状に基づく俯角推定

撮影俯角の推定には、画像中のコドラートの4つの頂点座標を利用する。ここでは、斜め撮影により台形に写っているコドラートの上底の長さ U と下底の長さ L との比 U/L を撮影された画像から求め、その値に最も近くなる光学理論式による U/L を試行的に計算し、そのときの俯角を推定俯角とした。このとき、 $U = x_3 - x_4$ ， $L = x_2 - x_1$ であり、画面座標系における横軸 x_{screen} 座

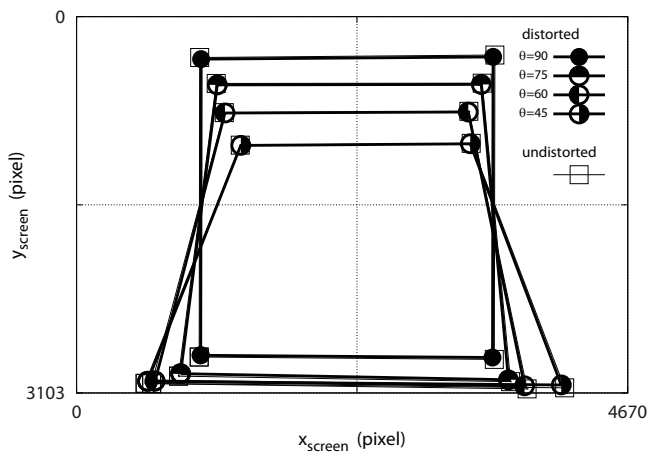


図-3 撮影俯角によるコドラート頂点座標の変化

標は光学的に、

$$x_{screen_i} = f_x \frac{x_i}{z_i \cos \theta + dz} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 f_x は表-1に示される内部カメラパラメタにおける焦点距離(pixel)であり、物理レンズの焦点距離(mm)とイメージセンサーサイズ(pixel/mm)の積で表わされる、 dz は物理空間での z 方向への平行移動距離、ここでは、撮影距離1920mmである。 x_i 、 z_i はそれぞれ物理空間座標系におけるコドラート頂点 P_i に対応する x 座標、 z 座標である。物理空間におけるコドラート頂点の座標 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ はそれぞれ $P_1 = (-500, 0, 500)$ 、 $P_2 = (500, 0, 500)$ 、 $P_3 = (500, 0, -500)$ 、 $P_4 = (-500, 0, -500)$ で与えられる。 U/L の計算に用いた x_i 、 y_i の値を表-2に示す。これらの座標は、各画像のコドラート枠の矩形領域をマウスカーソルで指定して得られたものである。これらの頂点座標を撮影俯角毎に重ねたものを図-3に示す。さらに、光学理論式による U/L 値と、画像から読み取った U/L 値を比較したものを図-4に示す。この図では、レンズ歪みの有無が俯角の推定結果に及ぼす度合いを比較しているが、予想に反して、レンズ歪み有りのケースが理論値に近い結果となっている。次いで、撮影俯角に対する推定俯角の誤差を図-5に示す。ここでもレンズ歪み有りのケースの方が推定誤差が小さい結果になっている。しかし、歪み有り・無しでの推定誤差の違いは 0.5° 程度であり、十分小さい。もともと歪み発生が少ないレンズを使用していることもあり、画面上のマウスクリックによる人為的誤差がより大きく影響しているものと考えられる。俯角 60° では、レンズ歪み有り・無しのいずれにおいても、計測誤差が大きくなっているが、このことは、俯角 60° のコドラートの形状がやや左下方向に傾いて撮影されたことが原因であると予想される。以上のことから、俯角 $90^\circ \sim 45^\circ$ の範囲の斜め撮影において、コドラート形状から撮影俯角を 1° 程度の誤差で推定が可能であり、実用上十分な精度が確保できることが示された。

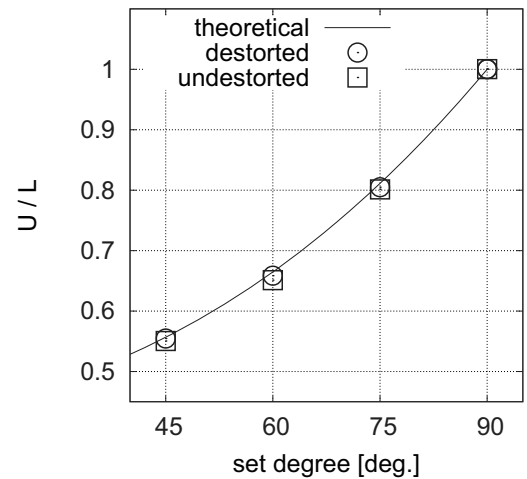


図-4 上底下底長比 U/L と推定俯角との関係

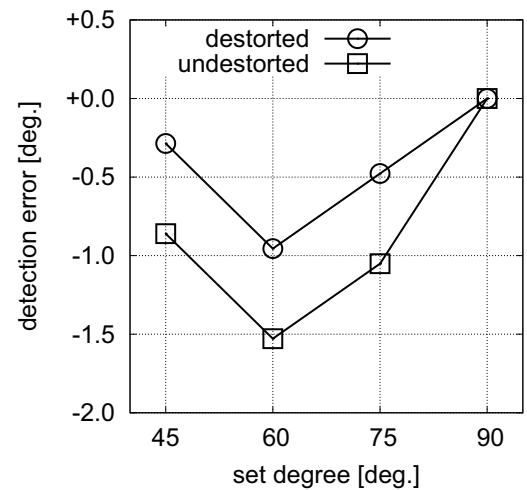


図-5 推定俯角と撮影俯角との誤差

4. 表面石礫抽出による全石礫質量計測、ふるい分け試験およびMGSとの比較

画像処理法は、河床表面に露出した石礫をサンプリングするという意味において、表面法的一种として位置づけることができる。表面に露出した石礫の面積を画像から読み取り、石の密度($\sigma = 2650 \text{ kg/m}^3$)から球換算質量および球換算径を求め、粒径加積曲線を作成するという間接的な計測方法である。実際には鉛直方向の石礫形状が不明であることや、他の石礫に埋没して水平方向の石礫形状の情報が不完全であることがしばしば発生し、それに起因する直接計測との誤差が生じる。この石礫を球体と仮定することと、画像から得られる石礫形状が不完全であることに由来する誤差を知るために、調査領域内に露出している10mm以上の全石礫を採取する表面サンプリングを実施し、ふるい分け試験、全石礫質量計測、および、画像処理法(MGS)による結果の違いを比較した。石礫の表面採取をするために、まずコドラート領域内に白色塗料をスプレー塗布して、表面に露出している石礫を特定した。次いで、事前に撮影

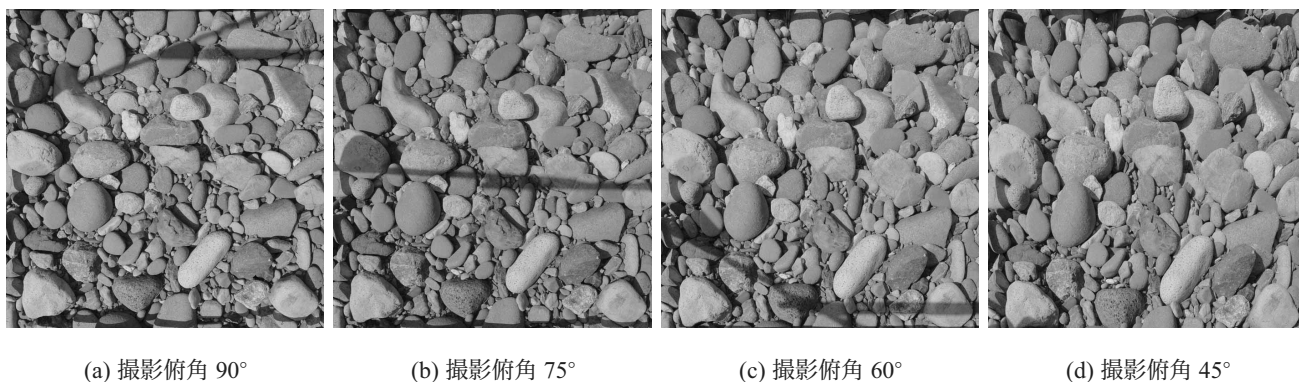


図-6 MGS に利用した透視投影変換画像（レンズ歪みは除去されている）

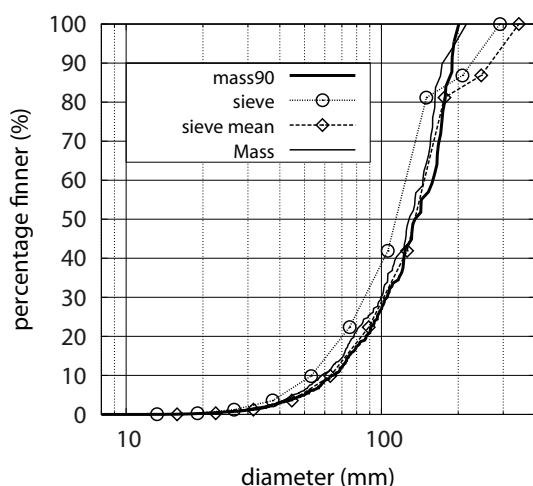


図-7 MGS とふるい分け試験との比較

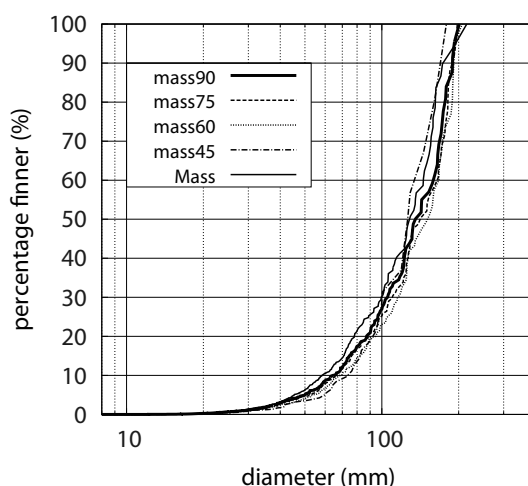


図-8 斜め撮影 MGS の結果

表-3 それぞれの方法による d_{50} の比較

調査方法	d_{50} (mm)
画像処理 MGS (撮影俯角 90°)	135.39
(撮影俯角 75°)	141.21
(撮影俯角 60°)	150.92
(撮影俯角 45°)	126.14
個別粒子質量計測	128.34
ふるい分け試験 (通過ふるい目)	115.07
(平均ふるい目)	136.51

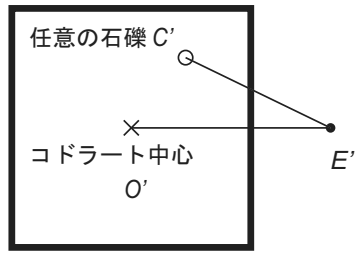
された画像を参照しながら白く塗られた石礫を抽出し、実際の石礫と画像中の石礫に通番を付与し実験室に持ち帰った。そして、486 個の石礫に対して、それぞれの質量を計測した後、ふるい分け試験を実施した。全石礫の質量計測、ふるい分け試験、MGS(俯角 90°) で得られた粒度分布の結果の違いを図-7 に示す。ふるい分け試験については、石礫が通過したふるい目のサイズでプロットすることが一般的であるが、ここでは正確に粒径を評価するために、石礫が捕捉されたふるい目サイズと通過したふるい目サイズの平均値 $d_{mean} = (d_{i-1} \times d_i)^{0.5}$ での検討を追加した。

それぞれの粒径加積曲線の曲線形を比較すると、真値である全石礫質量計測の結果に、MGS での結果が最も近かった。MGS では粒径 50 mm 付近で真値と比較して、質量百分率が過小評価になっているが、90 % 粒径付近で MGS での質量百分率が過大評価になるまでは、ほぼ真値と同じ傾向で推移していることがわかる。一方、ふるい分け試験の結果では、通過ふるい目サイズでの評価より、平均ふるい目サイズでの評価がより現実 に即していることがわかる。そして、ふるい分け試験は通過ふるい目、平均ふるい目ともに 80% 粒径から質量百分率が著しく過小評価になっていることがわかる。このことは、縦軸の質量通過百分率に強く寄与する大粒径において、ふるい目の分解能が不足していることが原因である。

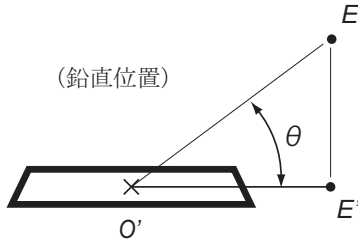
続いて、撮影俯角を 90°～45° の画像を用いた MGS による粒径加積曲線を図-8 に示す。透視投影変換で発生する歪みが残った状態での MGS であるため、俯角 90° が最も真値である質量計測の値に近く、俯角が小さくなるにつれて画像中の石礫が過大に歪み、粒度分布は大粒径方向にシフトしている。しかし、俯角 45° においては、撮影角度が浅いため、大礫に遮られて小礫が見えなくなるケースが顕著になる。それによって、検出する小礫の存在割合が相対的に小さくなっている。大

コドラート領域と石礫の位置関係

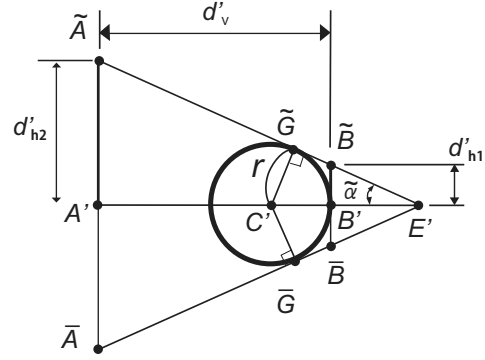
(平面位置)



(鉛直位置)



横歪みモデル



縦歪みモデル

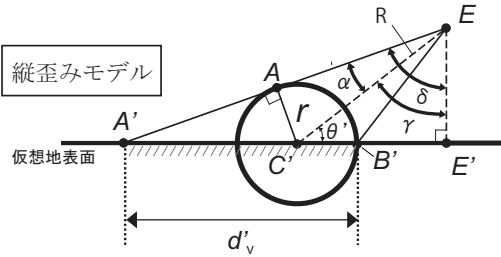


図-9 透視投影変換による歪みのモデル化

粒径でも同様のことが起きて、他の石礫に遮蔽される確率が高まるため、結果として最大粒径は各撮影俯角の中で最小の値を示している。

これらの調査から求められた d_{50} の値を表-3 に示す。俯角 45° の結果は前述の遮蔽の影響が大きいため除外すると、真値である全石礫質量計測の結果に最も近いのは、誤差+7.0mm の MGS 90° である。次いで、+8.61 mm の平均ふり目サイズによるふり分け試験、+12.9 mm の MGS 75° である。この実験においては、MGS 90° であれば、ひとつずつ質量を実際に計測した結果に対して、誤差約 5% の d_{50} を得ることができ、一般的なふり分け試験と同等以上の結果が得られることがわかった。

5. 透視投影変換による歪みのモデル化とその除去

(1) 透視投影変換による歪みモデル

図-9 は、平面上に石礫を模した半径 r の半球を配置し、視点 E から球を俯角 θ' で見下ろして撮影している様子をモデル化したものである。河床の斜め画像の透視投影変換では、画面奥行き方向への縦歪みと、画面横方向への横歪みが発生する。透視投影変換では、水平に広がる仮想地表面と石礫輪郭に接する接線との交点に石礫が投影されるため、高さが大きい物体ほど、また、俯角が小さいほど、実際の大きさより過大に歪むことになる。

つまり、画像中で直径 $d(=2r)$ の球である石礫は、長さ d'_v の縦歪みが発生する。このときの縦歪み率 $C_{d'_v}$ を本来の直径 d との比 d'/d として表わす。横歪みも同様

に、画像中で直径 $d(=2r)$ の球であった石礫が、台形 $\tilde{B}\tilde{B}'\tilde{A}\tilde{A}'$ に内接する円が歪んだ図形として変換される。このときの横歪みは $d'_h = d'_{h1} + d'_{h2}$ であり、縦横の歪みを考慮した面積歪み率は $C_{d''} = d'_v d'_h / d^2$ として表わされる。歪みを求めるために必要な情報は、カメラ E から石礫接地点 C' への俯角 $\angle EC'E' (= \theta')$ と撮影距離 $EC' (= R)$ 、および、石礫の半径 r である。このときの θ', R は、石礫接地点～カメラ平面位置距離 $C'E'$ 、撮影高さ EE' から求めることも可能である。これらを用いて、以下の手順でそれぞれの辺長、角度を求める。

$$R = \sqrt{((C'E')^2 + (EE')^2)}$$

$$\theta' = \text{atan}(EE'/C'E')$$

$$\alpha = \arcsin(r/R)$$

$$\gamma = \pi - \theta'$$

$$\delta = \gamma + \alpha$$

縦歪み d'_v は、

$$\begin{aligned} d'_v &= A'E' - C'E' + C'B' \\ &= R \sin \theta' \tan \delta - R \cos \theta' + r \end{aligned} \quad (2)$$

となる。横歪み d'_h は $\tilde{\alpha} = \arctan(r / \sqrt{(R \cos \theta')^2 - r^2})$ を用いて、

$$\begin{aligned} d'_h &= d'_{h1} + d'_{h2} \\ &= \tilde{B}B' + \tilde{A}A' \\ &= R \sin \theta' \tan \tilde{\alpha} + R \sin \theta' \tan \delta \tan \tilde{\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

となり、縦横方向の歪みを考慮した石礫歪み面積 $d'' (=$

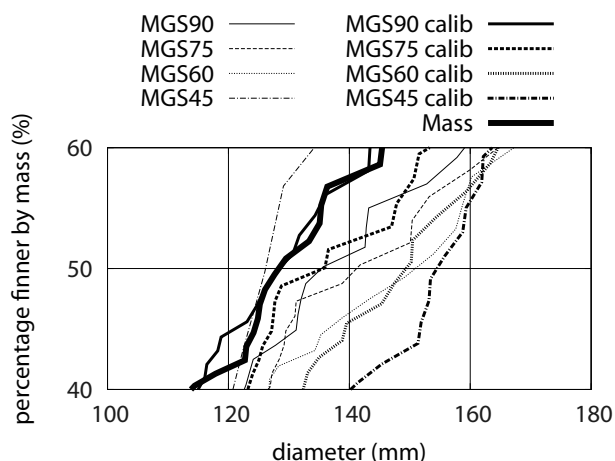


図-10 透視投影変換歪みの補正有無による d_{50} 付近の粒度分布の違い

表-4 透視投影変換歪み補正後の d_{50} の比較

調査方法	俯角	d_{50} (mm)	誤差 (%)
MGS 歪み補正 なし	90°	135.39	5.49
	75°	141.21	10.03
	60°	150.92	17.59
	45°	126.14	-1.71
MGS 歪み補正 あり	90°	128.40	0.05
	75°	135.65	5.70
	60°	149.36	16.38
	45°	154.48	20.37
個別粒子質量計測	-	128.34	0.00

$d_v \cdot d_h$ が求まり、面積歪み率は $C_{d''} = d''/d^2$ として表わすことができる。

(2) 透視投影変換による歪みを除去した結果

俯角 90°～45° で撮影された斜め画像を透視投影変換し、それらから MGS によって粒子の輪郭が得られる。その輪郭座標から幾何計算によって水平面での石礫形状の重心座標 x_{gi}, y_{gi} と球換算径 d が求まる。この重心座標 x_{gi}, y_{gi} と球換算径 d_i および俯角 θ 、撮影距離 $dz = O'E = 1920$ mm を使って得られる各石礫の歪み率で補正された粒度分布を図-10 に示す。45° を除いて、大粒径側にシフトしていた補正前の結果が、全て真値である全石礫質量計測の結果に近づいている。特に、MGS90° の補正結果は真値によく一致している。また、このときの補正された d_{50} の値と真値に対する誤差を表-4 に示す。MGS90° では誤差は 0.05% とほぼ真値と一致し、MGS75° においても誤差が半減している。MGS60° では補正前後で d_{50} の値は殆ど改善しなかった。

6. おわりに

本研究で明らかになったことを以下に示す。

- 画像中のコドラート形状から誤差 1.5° の精度で撮影俯角を推定することができた。今回の撮影条件では、レンズ歪みによる撮影俯角の推定精度への影響は小さかった。
- 全表面採取した石礫に対し、ふるい分け試験、個別石礫質量計測、および、手動による画像処理法 MGS でそれぞれ粒度分布の違いを比較した結果、俯角 90° の MGS では、真値である質量計測に近い結果が得られ、本実験では従来法のふるい分け試験の平均ふるい目サイズによる分析よりも良い結果が得られた。
- 半球モデルによる透視投影変換の歪み補正では、俯角が大きいほど補正効果が高く、特に俯角 90° では 0.05% の誤差という極めて良好な結果が得られた。
- これらの検討により、鉛直撮影された画像を利用した場合と、同等の結果が、斜め撮影によって得ることが示され、カメラの手持ちの撮影による調査効率の改善が期待される。

謝辞

この研究は科学研究費補助金 若手研究 (B) 「土砂流出ポテンシャルパワーを用いた小規模流域における土砂流出特性の評価」(研究課題番号：21760384) の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表わす。

参考文献

- 1) 内尾政人, 中川一, 澤田豊明, 横山康二, 上杉満昭, 福田義徳: 画像処理方式による礫床河川の粒度分布測定装置の開発, 砂防学会誌, Vol. 58, No. 2, pp. 26-31, 2005.
- 2) 大橋慶介, 安田真悟, 伊原一樹: OpenCV を用いた画像処理による河床粒度分布調査および石礫検出精度について, 土木情報利用技術論文集, Vol. 19, pp.115-124, 2010.
- 3) 岡田拓也, 小林範之, 小久保英博, 華房康憲, 國友優, 安部剛, 吉田健志: 画像解析による河床材料調査の可能性, 河川技術に関する論文集, 第 6 巻, pp. 351-356, 2000.
- 4) 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, 水工学論文集, 第 56 巻, pp.S1159-S1164, 2011.
- 5) 山 憲人, 寺沢直樹, 福岡捷二: 巨石を含む広い礫径分布を有する礫床河川における粒度分布調査手法, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp. 141-146, 2007.
- 6) 安田真悟, 大橋慶介, 伊原一樹: 河床粒度分布調査への画像処理技術の応用, H21 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 2010.

(2011.5.19 受付)