

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340001

研究課題名(和文) 地上型レーザスキャニングによる山地河川の河床地形計測手法の確立

研究課題名(英文) The establishment of acquisition protocol of Terrestrial Laser Scanning for underwater topography in a steep mountain channel

研究代表者

三浦 直子 (Miura, Naoko)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・助教

研究者番号：30647491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：山地河川で地上型レーザスキャニングを用いて河床地形計測をするには、レーザの水面下への入射角を最大にしてより多くの計測点数を確保するためセンサを可能な限り対象地の近くで高く設置すること、点密度を10 mで5 mm間隔となるように設定して計測時間の短縮とデータ処理の効率化を図ること、複数方向から計測して物の影による影響を除くことがデータの精度を向上させる上で重要であることを明らかにした。更に、既存の水面下データの屈折補正方法に改良を加え、複雑な水面勾配をもつ部分に適用できる補正方法を開発した。本研究により、複雑な微地形を有する山地河川において地上型レーザによる包括的な河床地形計測方法を確立した。

研究成果の概要(英文)：As the effective acquisition protocol of Terrestrial Laser Scanning (TLS) for underwater topography in a steep mountain channel, it was found that the scanner should be set at the highest position possible to provide the maximum incident angle as well as being positioned close to the area of interest for securing maximum returned laser points. It was also suggested that the TLS data be measured with a minimum point spacing of 5mm at 10m from multiple directions to acquire occlusion-free data, that is the data without shadow effect, while optimizing the time required for data acquisition. We also developed a method to correct water-refracted TLS data acquired over mountain channel with complex water-surface slope. This would enable us to quantitatively measure whole units of complex mountain channels using TLS, and help us to understand water dynamics better in the area.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：地上型レーザスキャニング TLS 山地河川 河床地形 計測

1. 研究開始当初の背景

近年の気候変動により日本では大規模な降雨の増加による土砂災害および洪水の頻度や規模が拡大することが懸念されている。日本の国土の60%以上は山地や森林に覆われており、山地河道でどのように水や土砂が流れるかを理解し、予測することは災害対策において極めて重要である。河川における水の流れや流れに対する抵抗は、主に河川の勾配や形状、河床の礫の大きさなどに左右されることが報告されており、山地河道の河床地形を詳細かつ定量的に計測することが求められている。しかしながら、山地河道は急こう配かつ複雑な河床形状を有していることが多く、調査には多大な人的労力を必要とする上に、降雨時には流れが急激に変化するなどアクセスや安全上の問題もあり、下流域の河川に比べて定量的な観測が難しく実態が十分理解されていない現状であった。

地上型レーザスキャニング (Terrestrial Laser Scanning; TLS, 写真1) は主に測量分野でミリ単位の高精度な三次元情報を高速に計測し提供する技術として発展してきた。近年では技術発展に伴い従来の測量分野以外にもその応用範囲を広げており、河川環境での TLS 計測の事例も数少ないながら報告されているが、これらの計測では TLS に一般的な近赤外の波長域のレーザが使用されていたため、水域での波長の吸収により水面下のデータが取得できないことが問題であった。これに対して、国外では Smith et al. (2012; Smith and Vericat 2013) が水に吸収されにくい緑の波長域の TLS を用いた実験および河川環境で水面下のデータ取得に成功しており、国内では申請者である Miura and Asano (2013) により同じく緑の波長域の TLS を用いて初めて山地河道での河床計測が行われ、TLS の水面下河床地形データ取得における可能性が示された。これにより、これまで実現不可能であった山地河道の河床地形を詳細に定量評価する手法開発へ道が開かれた。



写真1 河岸に設置された TLS

2. 研究の目的

本研究では、この予備的計測と検証の結果を

受けて、取得データの精度を向上し得る TLS 計測およびデータ処理方法を確立する。また、データ精度および TLS 計測の限界を見極めながら、得られた河床の三次元情報の利用方法および研究分担者である浅野による研究で取得している水位、流速や流量などの河川観測データの情報との融合方法を検討し、山地河道の水理特性の解明における高精度河床地形データの応用可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) TLS による山地河道の水面下河床地形データ取得方法の確立

レーザデータ精度検証

山地河道において水量の異なる2時期に TLS 計測をそれぞれ1回ずつ行い、水面下データ取得における水深、流速、計測センサからの距離および角度の影響を検証する。検証用データとして、TLS 計測と同時に GPS 計測や測量を含む現地調査を行う。計測された水面下データは水による屈折があるため、これを補正した後、河道のどのような個所 (例えば水深の深い場所、白波の立っている個所など) でデータ欠損が起こるのか特定し、TLS 計測の限界を見極める。申請者らによる予備的計測結果から、一方向からの計測では包括的にデータ取得ができないことが判明したため、一個所につき複数方向から計測を行い、それらのデータを統合した場合の精度検証を行う。また、計測された水面下データには、地上で計測されたデータと同様に多様な理由で「ノイズ」と呼ばれるエラーデータが含まれることも確認されたため、これらのノイズを取り除きデータ精度を向上させるデータ処理手法を確立する。

データ欠損個所の補完方法

平成26年度で特定されたデータ欠損個所に対して、TLS 計測以外の手法 (例えば、測量や手計測) で補完が可能であるか、可能であればその精度も検証する。前年度の結果と合わせて、山地河道における包括的な河床地形データ取得の方法を確立する。

(2) 得られた河床地形データの、山地河道における利用・応用方法の提示

2 時期のデータを利用した河床変化量の推定水面下を含む河床地形を定量的に評価することが可能となれば、その変化量も評価可能となる。本研究では、平成27および28年度に計測予定の2時期の TLS 取得データを用いて、河床変化量、つまり土砂や河床堆積物の移動量を推定できるか、定量的な評価手法を検討する。

高精度河床地形モデルの利用方法検討

研究分担者である浅野の研究で取得されて

いる水位、流速や流量などの河川観測データと、本研究で得られる三次元の高精度河床地形モデルの融合方法を検討し、山地河道の水理特性の解明に向けた高精度河床地形モデルの応用可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) TLS による効率的な山地河道の水面下河床地形データ取得方法

異なる計測方法が取得データに与える影響を見るため、階段状河川の pool 部に 1.2×4.2 m のプロットを設立し (写真 2 左), 糸を用いて等間隔に 75 地点の検証地点を設け、河床から糸までの高さを計測して、これを真値とし、異なる計測方法で取得されたレーザデータから算出された河床から糸までの高さと比較した。また、cascade 部に 3 つのライントランセクト (S1, S2 と S3) を設置して合計 89 地点の検証地点を設け (写真 2 右), 3 方向 (上流、下流および左岸) から計測した。



写真 2 Pool 部のプロット (左) と cascade 部のライントランセクト (右)

① 計測するセンサの位置

計測するセンサの地上からの高さを 50 cm, 100 cm, 150 cm と変えて計測した結果, 50 cm 高くなるにつれて計測点数は, 262,599 から 340,828 へ, さらに 416,858 へと増加し, レーザデータから得られた河床から糸までの高さを真値と比較したところ, 相関決定係数はセンサ位置が高くなるほど高くなった ($R^2=0.87, 0.91, 0.92$)。このことは, センサの計測位置を高くすることで水面下への入射角を大きくし, より多くの計測点を取得することで結果的に Digital Terrain Model (DTM) の精度を高めたと考えられる。従って, 山地河川においてレーザ計測を行う場合は, レーザの水面下への入射角を最大にしてより多くの計測点数を確保するためにセンサを可能な限り対象地の近くで高く設置することが重要であることが明らかになった (Miura and Asano 2016)。

② 計測点密度

計測点密度を 10 m で 1 mm 間隔 (PD1) と 5 mm

間隔 (PD5) に設定して計測し比較した結果, 計測点数は PD1 データで 824,019 と PD5 データ (451,2347) の約 2 倍となったが, 河床から糸までの高さの比較では相関決定係数は 0.92 で同じであった。このことから, 計測点密度の間隔を 1 mm に狭めても取得データの精度を高めることはできず, かえって取得データを増加させ計測や処理時間を長くするだけであり, 河床計測には 10 m で 5 mm 間隔の計測で十分であることが示唆された (Miura and Asano 2016)。

③ 単一方向のみの計測データと複数方向からの計測データの合成

単一方向のみの計測データと複数方向からの計測データの合成の比較では (図 1), 河床から糸までの高さにおける真値との相関決定係数が単一方向のみの計測データでは 0.93 であるのに対して, 複数方向からの計測データの合成で 0.98 となり, 真値に対する平均二乗誤差においても 3.7 cm から 2.0 cm に向上した。これは, 単一方向のみの計測では大きな岩の影などでデータが十分に取得できない部分があり, 結果的に DTM の精度が下がっているのに対して, 複数方向からの計測データの合成ではそれぞれの方向から計測することでデータを補完し合っ影の影響を除いていると言える。複数方向から計測して物の影による影響を除くことがデータの精度を向上させる上で重要であることが明らかになった (Miura and Asano 2016)。

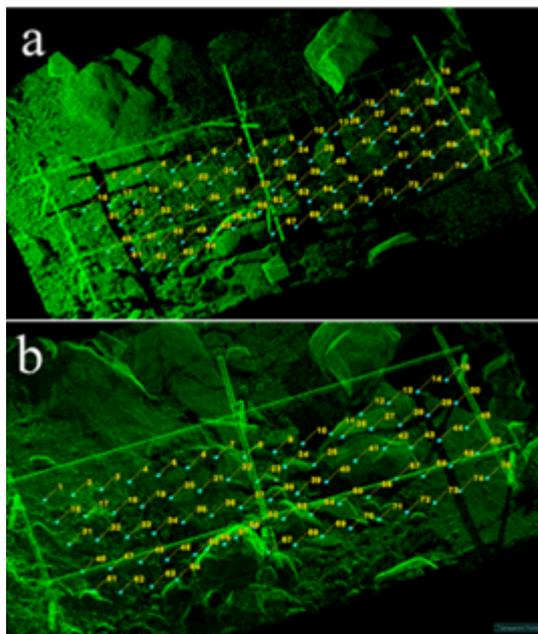


図 1 単一方向 (a) と複数方向 (b) から計測されたレーザデータ

④ データ欠損が起こる箇所と補完方法

Cascade 部でのレーザ計測データで水面下の屈折補正を行ったデータと行わないデータから DTM を作成し、真値とレーザデータ計測（水面下補正と水面下補正なし）による河床から糸までの高さを比較した結果（図 2）、レーザデータ計測では真値より著しく過小評価している検証地点があり、作成された DTM に精度の違いはほぼ見受けられなかった。これらは、白く泡立って水が流れている部分ではレーザが表面で反射して河床までほとんど届かないこと、大きな岩の隙間などはレーザが行き届いていないこと、cascade 部では水面の高さが複雑に変化しているため現行の水面下補正処理方法に限界があることが原因と考えられた。

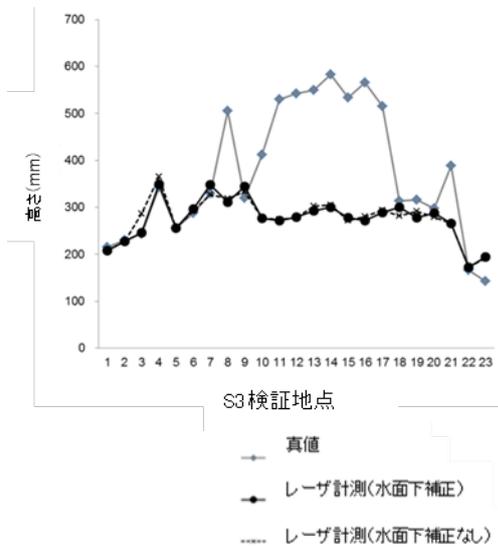


図 2 ライトランセクトでの河床から糸までの高さの比較

精度の良くない部分のレーザデータの補完方法としては、レーザ計測と同時に撮影する写真の RGB 情報をレーザ点群に付与して白く泡立っている部分の点群を特定して除去すること、除去した部分や岩の隙間などは従来の測量によって補完することでデータの精度を上げることができると考えられた (Miura and Asano 2016)。

⑤ 複雑な水面勾配をもつ山地河川における水面下データの屈折補正方法

現行の水面下レーザデータの屈折補正処理方法は河道の Pool 部には適用できるものの、水面の高さが複雑に変わる部分には適用できないことが判明したため、京都大学防災研究所流域災害研究センター穂高砂防観測所内のヒル谷試験流域内の試験堰堤直下の長さ約 13.5 m の範囲を新たにレーザ計測し、水面下データ補正方法に改良を加えた。複雑な水面勾配に対応するため、計測範囲のレーザデータは写真を参照しながら大まかに同じ水面の高さをもつブロックに 9 分割した。地理座標に変換し水平にスライスした点

群を参照しながら、ブロック境界を調整した。各ブロックは座標と水深情報をもつ 3 点以上の観測点を含むため、任意の 3 点を結び三角形を作成し水面を特定した (図 3a)。また、観測点の情報から水の流れる方向を特定した。次に水面上に直方体モデルを作成した (図 3b)。この時、長辺は水の流れと並行になるようにし、底面の長辺を X' 軸、短辺を Y' 軸、水面に垂直な方向を Z' 軸と定義する。レーザデータはセンサ位置を原点とするセンサ座標に戻し、直方体モデルの X' 軸、Y' 軸および Z' 軸に合わせて原点を基点として回転した。これにより、レーザデータに相対的に水平な水面をもつデータセットができるので、センサ原点から水面までの高さを算出し、レーザデータに既存の補正方法である Smith et al (2012) の補正式を適用した。補正後のデータは元の X, Y, Z 軸となるように回転を戻し、地理座標へ変換する。

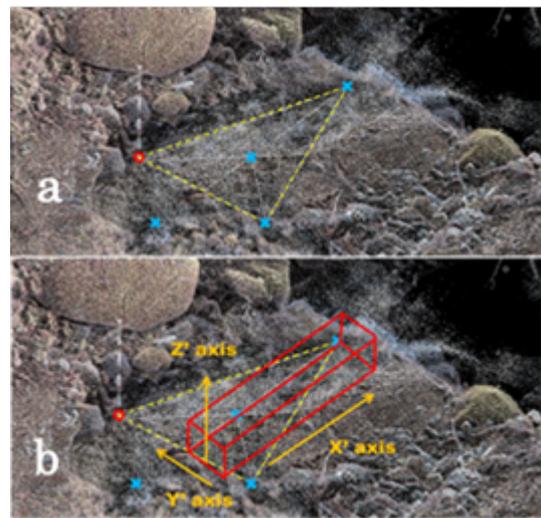


図 3 (a) 三角形による水面の特定 (b) 直方体モデル

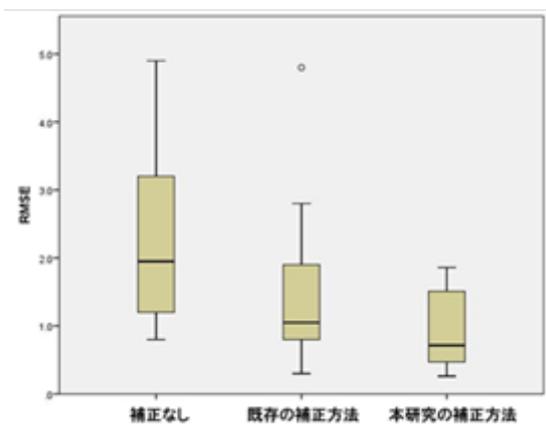


図 4 補正の有無、方法の違いによる測量ポールの河床から頂点までの高さにおける誤差の比較

本研究による水面下データ補正方法の妥当性を検証するため、手計測による測量ポール

の高さを正とし、補正なしの点群データ、既存の補正方法および本研究の補正を適用した点群データからサーフェスマodelの TIN を作成し、測量ポールの座標を用いて算出した測量ポールの河床から頂点までの高さと比較した結果、RMSE の値は本研究の補正方法で最も小さく (< 2 cm)、補正なしおよび既存の補正方法では RMSE の値とばらつきがともに大きくなった。このことは、補正なしでは屈折の影響がそのまま残り、既存の補正方法では水面を水平と仮定して、一律的に屈折補正を行ったために水面勾配の影響を受け過少および過剰に補正された部分があったと考えられる。一方、本研究の補正方法では複雑な水面勾配を考慮してレーザデータの屈折を適正に補正できたとと言える (Miura et al. 2016; 三浦直子 et al. 2017)。

⑥ ノイズ除去方法

計測されたレーザデータのうち、空中に出現するノイズの除去には、Terra Solid 社のソフトウェア、TerraScan のツールである「Classify Air Point」を、レーザ点群より下部に出現するノイズの除去には、「Classify Low Point」を使用し、下記のパラメータが最適であることが分かった (表 1)。

表 1 ノイズ除去のパラメータ

Classify Air Point	
Search radius	0.05 m
Require	5 points
Limit	2 *std deviation
Classify Low Point	
Search	Groups of points
Max count	30
Classify if	
More than	0.02 m lower than others
Within	0.01 m

さらに、レーザデータの表面に浮遊するノイズを除去するために、Hodge et al. (2009) の「Corn filter」と「Local high point filter」を用いた。処理には Visual basic を用いてプログラムを作成した。しかし、既存のパラメータでは河床の岩の側面データまで除去されてしまうことが判明したため、本研究データに適したパラメータを検証したところ、「Corn filter」の Filter radius を 5 mm から 0.0025 mm に、Filter angle を 10° から 5° に変更し、「Local high point filter」の Filter radius を 10 mm から 0.005 mm に、Height of point above average elevation を 7 mm から 0.0035 mm に変更したところ、適切にノイズを除去できた。

(2) 得られた河床地形データの、山地河道における利用・応用方法の提示

① 水文観測データとの融合

TLS により得られた詳細かつ面的な地形データは、水文観測データとともに活用することで山地河川の水利特性を明らかにする一助と成り得る。

静岡県伊豆町青野に位置する樹芸研究所青野研究林内の山地河川を対象に、本研究で取得された地形情報から主流路に沿った河床と水面の縦横断面図を作成し、同範囲で観測している圧力式水位計による水位と電波流速計による表面流速、同流域内の上流に設置された量水堰から概算された流量および研究林内の気象観測結果からの雨量を用いて、河道地形と洪水時の水の流動様式の関係性を調べた結果 (図 5)、平水時には巨礫やステップの配置に支配されていた水面勾配が、流量が増えるとカスケードとプール部を含むより長い河道区間の勾配に支配されるようになる様子がわかった (笠原琢志 et al. 2015)。

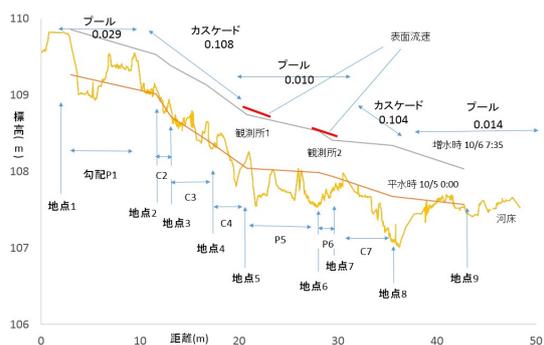


図 5 調査河道の縦断面図と水位・面勾配、表流速観測地点

< 引用文献 >

Hodge, R., Brasington, J., & Richards, K. (2009). In situ characterization of grain-scale fluvial morphology using Terrestrial Laser Scanning. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 954-968

Miura, N., & Asano, Y. (2013). Green-wavelength terrestrial laser scanning of mountain channel. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W2, 187-192

Miura, N., & Asano, Y. (2016). Effective Acquisition Protocol of Terrestrial Laser Scanning for Underwater Topography in a Steep Mountain Channel. *River Research and Applications*, 32, 1621-1631

Miura, N., Asano, Y., & Moribe, Y. (2016). IMPROVED CORRECTION METHOD FOR WATER-REFRACTED TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA ACQUIRED IN THE MOUNTAIN

CHANNEL. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B8, 349-352

Smith, M., Vericat, D., & Gibbins, C. (2012). Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 411-421

Smith, M.W., & Vericat, D. (2013). EVALUATING SHALLOW-WATER BATHYMETRY FROM THROUGH-WATER TERRESTRIAL LASER SCANNING UNDER A RANGE OF HYDRAULIC AND PHYSICAL WATER QUALITY CONDITIONS. *River Research and Applications*, 30, 905-924

笠原琢志, 浅野友子, & 三浦直子 (2015). 階段状河川における水位と流速の変動. In, 平成 27 年度砂防学会 栃木大会. 宇都宮

三浦直子, 浅野友子, & 森部義規 (2017). 地上型レーザーによる河床地形計測—複雑な水面勾配をもつ山地河川における水面下データ補正方法. In, 平成 29 年度砂防学会 奈良大会. 奈良

5. 主な発表論文等 (研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Miura, N., Asano, Y., Moribe, Y., 2016. IMPROVED CORRECTION METHOD FOR WATER-REFRACTED TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA ACQUIRED IN THE MOUNTAIN CHANNEL. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLI-B8, 349-352. 査読有

DOI:10.5194/isprs-archives-XLI-B8-349-2016

② Miura, N., Asano, Y., 2016. Effective Acquisition Protocol of Terrestrial Laser Scanning for Underwater Topography in a Steep Mountain Channel. *River Research and Applications*, 32(7), 1621-1631. 査読有
DOI: 10.1002/rra.2986

[学会発表] (計 7 件)

① 三浦直子, 浅野友子, 2016. 山地河川における地上型グリーンレーザーを用いた効率的な水面下河床地形計測方法, 平成 28 年度砂防学会 富山大会, 富山

② 浅野友子, 三浦直子, 内田太郎, 西口幸希, 2016. 大雨時の山地河川での表面流速と水深の観測, 平成 28 年度砂防学会 富山大会, 富山.

③ 宮田秀介, 長谷川祐治, 堤大三, 今泉文寿, 権田豊, 三浦直子, 浅野友子, 山野井一輝, 2016. 山地溪流における河川地形変動・流砂観測手法の比較検討に向けて—現地

給砂実験での同時計測—, 平成 28 年度砂防学会 富山大会, 富山.

④ 三浦直子, 浅野友子, 2015. 地上型グリーンレーザーによる山地河川の河床地形計測, 平成 27 年度砂防学会 栃木大会, 宇都宮.

⑤ 笠原琢志, 浅野友子, 三浦直子, 2015. 階段状河川における水位と流速の変動, 平成 27 年度砂防学会 栃木大会, 宇都宮.

⑥ Miura, N., Asano, Y., 2015. Is green-wavelength Terrestrial Laser Scanning capable of capturing reliable underwater data in the cascade unit of a mountain channel?, European Geosciences Union General Assembly 2015, Vienna.

⑦ Miura, N., Asano, Y., 2014. Acquisition of underwater topography in a mountain channel using terrestrial laser scanning, in: Neale, C.M.U., Maltese, A. (Eds.), Proc. SPIE 9239, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI, Amsterdam, pp. 92391D-92391D-92399.

[その他]

ホームページ等

http://www.uf.a.u-tokyo.ac.jp/member/forest_and_water_resources_management/miura.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦直子 (MIURA, Naoko)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教

研究者番号: 30647491

(2) 研究分担者

浅野友子 (ASANO, Yuko)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・講師

研究者番号: 80376566