

地上型レーザスキャナを用いた 河川物理環境計測法の開発

MEASUREMENT OF ELEVATION AND PROPERTIES OF RIVER BED
USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

押田さやか¹・河原能久²・久野伊津佳³・椿 涼太⁴・森山 学⁵

Sayaka OSHIDA, Yoshihisa KAWAHARA, Itsuka KUNO,
Ryota TSUBAKI and Manabu MORIYAMA

¹正会員 富山県 (〒930-8501 富山県富山市新総曲輪1-7)

²フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 国土交通省近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 (〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142)

⁴正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁵非会員 復建調査設計株式会社 空間情報システム部 (〒732-0052 広島県広島市東区光町2-10-11)

The measurement of land-cover classification, vegetation height, bed elevation and size of bed material in the Minochi River is conducted using a terrestrial 3D laser scanner that gives three dimensional coordinates, RGB and reflected intensity from the surface. A series of procedure to produce digital elevation from original laser scanner data is developed. The procedure consists of algorithms to get rid of virtual image data due to reflection at water surface, to classify land-cover into water, vegetation and cobble areas, to interpolate the land cover and bed elevation where the laser light does not reach, and to estimate vegetation height and bed material size. Resultant DEM, vegetation height and size of bed material show good agreement with those measured by conventional surveying.

Key Words : *terrestrial 3D laser scanner, land-cover classification, water surface, virtual image data, grain size distribution*

1. はじめに

地盤高, 植生高, 河床材料などの河川の物理環境情報は, 適切な河川管理や正確な洪水解析を行うための重要な基礎情報である。航空レーザ測量技術は, 広範囲にわたる詳細な河川物理環境情報を計測する方法として一級河川を中心に広く利用されつつある。しかし, 規模が小さく変化に富む中小河川への適用には課題が残されており, より効率的な物理環境情報の取得方法の開発が求められている。

地上レーザ測量は, 航空レーザ測量と比べて, コストや機動性に優れるとともに, より高精度, 高密度の計測が可能であり, 中小河川の河川物理環境情報の取得に好適な特徴を持つ。その一方で, 地上レーザ測量は, 浅いレーザ照射角度に起因する, 水面反射による虚像データの発生や遮蔽物の背後のデータ欠損という特有の問題を有している。Litchi¹⁾は, 地上型レーザ測量の特徴や問

題点を整理している。また, 松本²⁾は, 地上レーザ測量を用いた河川の物理環境の調査法について地表面被覆別に測定データの特性を調べ, 簡易的な被覆の識別アルゴリズムを作成している。松本³⁾は, 俯角の上昇時にレーザの照査距離が増加することはないとして, 水面下の虚像データを除去している。しかし, この方法では, 水面の虚像データだけではなく, 河岸のオーバーハングや, 植生から反射するデータ等も除去されるという課題を有している。内田⁴⁾らは, 土地被覆分類の結果から水面形を算出し, 標高値が水面以下のデータを除去するという方法を提案している。

本研究では地上型レーザ測量の課題の処理法を開発し, 計測データから河川物理環境情報を抽出する一連のデータ処理方法を確立することを目的とする。研究の内容は2つに大別される。図-1 に示すサンプル区間のデータに対して, データ処理方法の開発を行う。次に, その処理方法を水内川の約3kmの区間でデータに適用し, 本手法の実用性を検討する。

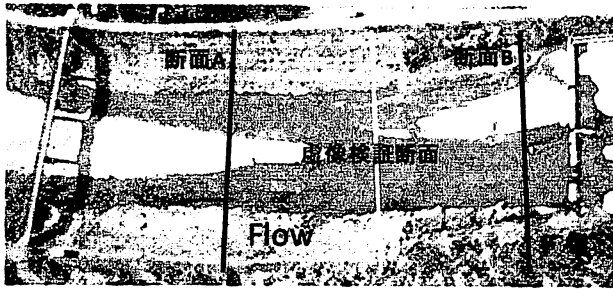


図-1 サンプル区間

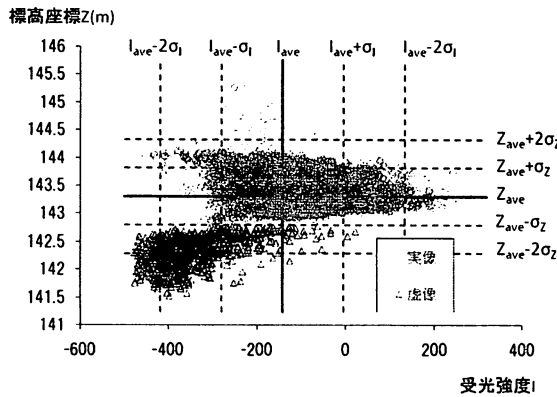
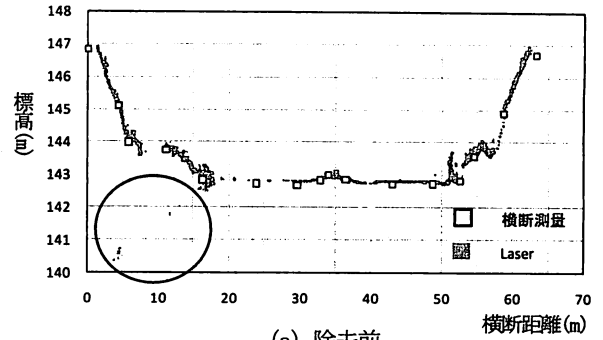
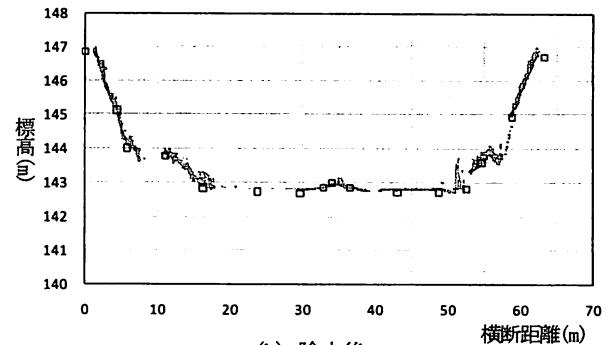


図-2 受光強度と標高の関係



(a) 除去前



(b) 除去後

図-3 虚像データ除去前と除去後の断面

2. 現地観測の概要

広島県を流れる太田川水系水内川の約3kmの区間を対象に地上レーザ測量を実施するとともに、トータルステーション (TS) を用いた横断測量、植生高および粒径分布の計測を行った。計測は平成19年6月と11月に実施したが、その後の河川改修工事により地形が変化した区間については再度平成20年6月、9月、11月に計測を行った。

地上レーザ測量にはScanStation 2 (Leica社製) を用いた。計測では3次元座標、受光強度、RGB値のデータを同時に取得した。横断測量では、GPSで計測した地点を基準点とし、TSを用いて横断形状を5~10m間隔で、地形の変曲点を取得するように計測した。また、測量地点に植生が繁茂している場合には植生高さを、水域では水深の計測も行った。礫径調査は①直接計測と②写真を用いた計測の2種類を行った。①直接計測では、調査領域を最大粒径程度のグリッドに区切るように糸を張り、糸が交差する点の真下の礫を測定対象の礫として、その長径、短径、鉛直高さを測定した。②写真の撮影は、脚立を用いてなるべく高い位置から調査領域の撮影を行った。撮影した写真は画像処理ソフトを用いてオルソ画像に加工した。直接計測の結果と加工した写真から算出した計測値に、面積格子法を用いて中央粒径を算出した。

3. 前処理

まず、対象区間に存在する橋桁のデータの除去、虚像データの除去および計測領域の決定を行う。ここでは主に、虚像データの除去について述べる。

レーザが浅い角度で水面に入射すると水面で反射し、対象物を捉える。これにより、水面下にデータがあると計測装置が誤認識するため虚像データが発生する。虚像データは河道の地盤高算出に影響を及ぼすため、精度よく地盤高を算出するためにはそれを除去する必要がある。水面での反射光は対象物を直接捉える場合よりも受光強度が小さくなる。しかし、植生が繁茂する地盤付近でもレーザが地盤を捉えにくくなり受光強度が小さくなることもある。このため、単純に受光強度のみを除去条件として用いるのは困難である。そこで本手法では、受光強度だけでなく標高データも考慮して虚像データの除去方法を検討した。

虚像データ発生する植生域のデータを抽出し、高さ Z と受光強度 I の関係を図-2 に示す。ここで Z_{ave} は2mメッシュ内の標高座標の平均値、 I_{ave} はメッシュ内の受光強度の平均値、 σ_z 、 σ_I はそれぞれの標高座標と受光強度のメッシュ内の標準偏差を示す。虚像データでは標高座標も受光強度も小さく、グラフの左下に偏る傾向がみられる。このことから、以下を虚像除去の条件とする。

$\sigma_z < 1.6$ の時

$$I \leq I_{ave} \quad \text{かつ} \quad Z \leq Z_{ave} - \sigma_z \quad (1)$$

$\sigma_z \geq 1.6$ の時

$$I \leq I_{ave} + 0.8 \times \sigma_I \quad \text{かつ} \quad Z \leq Z_{ave} - 0.5 \sigma_z \quad (2)$$

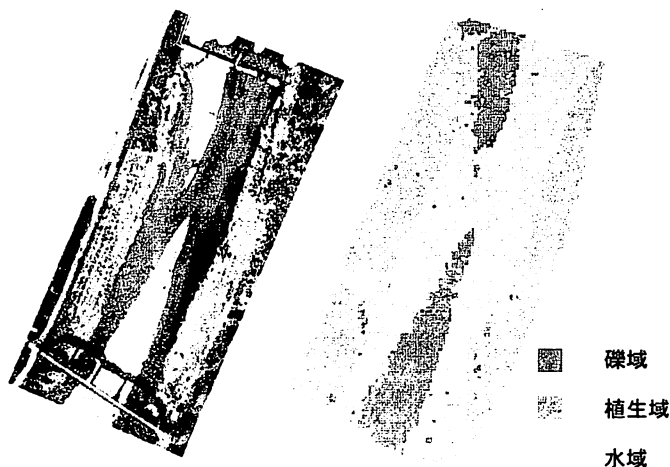


図-4 土地被覆分類の結果の比較

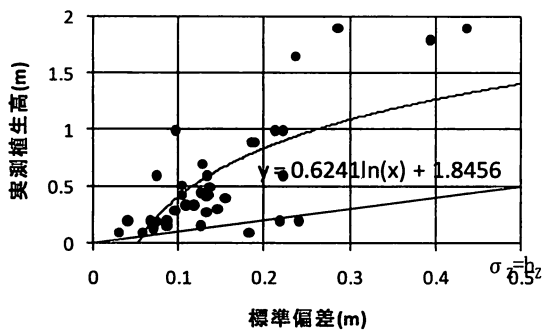


図-5 実測植生高と標準偏差の関係

検証断面 (図-1 参照) における虚像除去の処理前と処理後の断面を図-3 に示す。虚像データが除去できていることがわかる。この条件を各断面に適用した結果、検証した断面において虚像データはすべて除去された。なお、この処理により実像データ数の約9割が残った。

4. 地表面被覆分類

河道の地覆を植生域・礫域・水域の3種類に分類する方法を検討する。地覆分類は河川物理量を算出する基礎データであると同時に、植生高や礫径の算出に必要なデータである。データは前節で前処理を行ったデータを用いる。基本的な考え方は次のようである。

- ① 受光強度, RGB, 器械設置点から対象物までの距離の5つを変数として1m×1mのメッシュ内の各計測点で土地被覆の判別を行い、メッシュ内で最も多い分類をそのメッシュの分類結果とする。データが存在しない領域は未分類メッシュとする。
- ② 水域は孤立して1メッシュでは存在しないと仮定した。水域と判定されたメッシュの周囲8つのメッシュの分類に水域が存在しないものを孤立水域とし、判別を水域から未分類メッシュに分類を変更する。

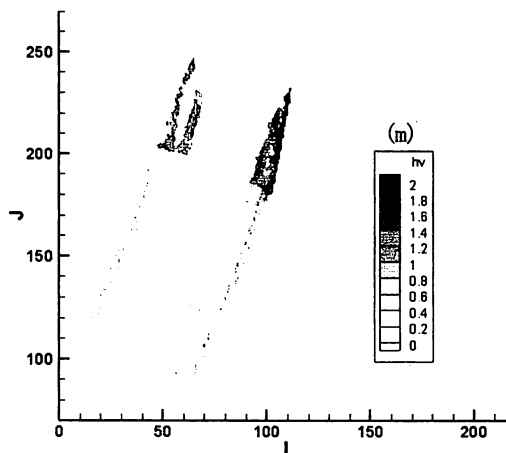


図-6 植生高コンター

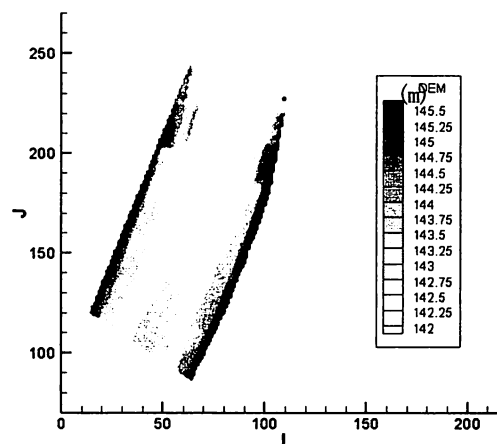


図-7 地盤高コンター

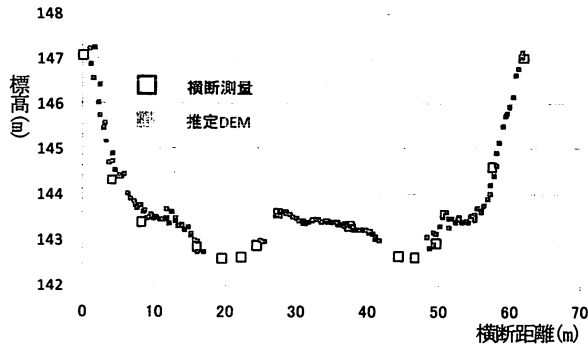
- ③ 標高の変化は植生域では大きく、礫域・水域では小さい。これより、礫域、水域と判定されているメッシュであっても標高の標準偏差が0.2より大きいメッシュは植生域へと分類を変更する。
- ④ 被覆分類が決定していない領域では欠損領域の分類と同様に、水域、植生域、その他の順で、未決定領域に隣接する分類に変更する。

以上の方法で分類された結果を図-4 に示す。概ね、現地の土地被覆を再現することができた。しかし、兩岸の植生域に水域と判定されている領域が数か所存在した。これについては後で修正を行う。

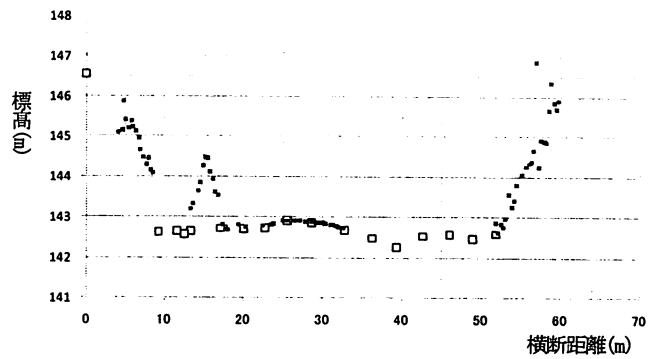
5. 地盤高の算出

植生域では、レーザ計測データの多くは植生頂部の高さを捉える。そのため地盤高を得るためには、植生を取り除き地盤高を算出する必要がある。航空レーザ測量はレーザが上から照射されるため、レーザは植生の間をすり抜けて地盤を捉え易い。しかし、地上型レーザ測量はレーザが横から照射されるため、植生が繁茂している領域では、必ずしも地盤を捉えるとは限らない。

実測植生高と1m×1mのメッシュ内の標準偏差の関係

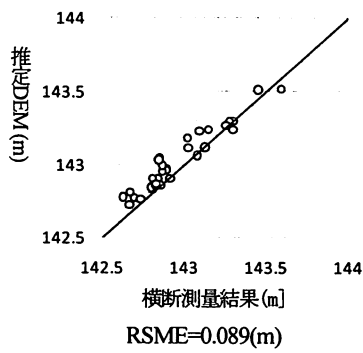


(a) 図-1中の断面 A

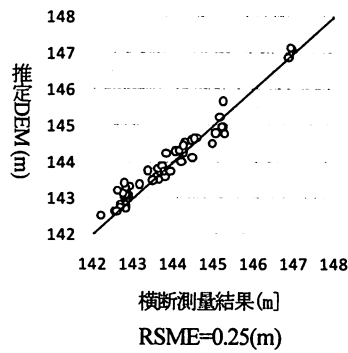


(b) 図-1中の断面 B

図-8 DEMと横断測量結果の比較



(a) 礫域



(b) 植生域

図-9 DEMと横断測量結果の比較

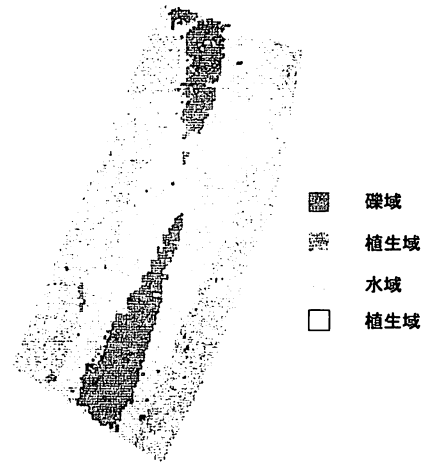


図-10 最終の地表面被覆分類

を図-5 に示す。航空レーザ測量での植生高の推定式の一つ⁵⁾を参考に、式(3)で植生高を推定することにする。

$$h_v = 0.6241 \times \ln(\sigma_z) + 1.8456 \quad (3)$$

図-6 に式(3)を用いて算出した植生高の結果を示す。サンプル区間では、下流堰周辺の両岸の高い植生と上流側の両岸に繁茂する低い植生の繁茂状況を抽出できていることがわかる。植生域での地盤高は算出された植生高を用いて推定を行う。植生域については式(4)に示すように、メッシュ平均高さから植生高の半分を引いたものと定義する。

$$DEM_v = Z_{ave} - \frac{h_v}{2} \quad (4)$$

また、礫域の地盤高は式(5)に示すようにメッシュの平均高さとする。

$$DEM_g = Z_{ave} \quad (5)$$

水域の地盤高は横断測量結果から補間したものを地盤高として与える。これによって算出されたDEMのコンターを図-7 に、横断測量と比較した結果を図-8 に示す。

推定したDEMと横断測量の比較を、図-9 に礫域と植生域の推定DEMと横断測量の比較を示す。礫域においては精度高く地盤高が算出されているが、植生域では、植生高から地盤高を算出するため精度が礫域より低下している。断面Aは比較的両岸に低い植生が繁茂している

断面である。推定したDEMと横断測量の結果は良好に一致している。断面Bは下流側の高い植生が繁茂している断面であり、右岸側は樹木が切り立っている。礫域は特に精度よく地盤高を算出できていることがわかる。

次に、得られたDEMを用いてデータ欠損メッシュの補間を行う。その後、横断方向に見て、標高座標が高い位置に存在する水域メッシュを植生域に変更する。これを地表面被覆分類の最終結果とし、図-10 に示す。先ほど、植生域にあった水域が植生域に修正されていることが確認できる。以上の分類結果を現地の地表面被覆と比較すると、正判別率は、植生域で97%、礫域で86%、水域で84%と良好な結果が得られた。

6. 河床面の粒度分布の算出

河床材料の粒径分布は流送土砂量の評価や河川管理のための基礎的情報として重要である。現在行われている河床材料調査は直接粒径を測定する方法が大半であり、時間と人力を要する。地上型レーザ測量は、航空レーザ測量より高密度、高精度のデータ取得が可能であるため、粒度分布の計測がより有効に行える可能性がある。

図-11 に平成19年11月と平成20年9月の直接計測から算出した礫径の鉛直方向と垂直方向の長さの関係を記す。両者の結果に多少のずれはあるが、概ね比率は1.8程度である。内田ら⁴⁾の河床面での粒径の推定法を本研究で

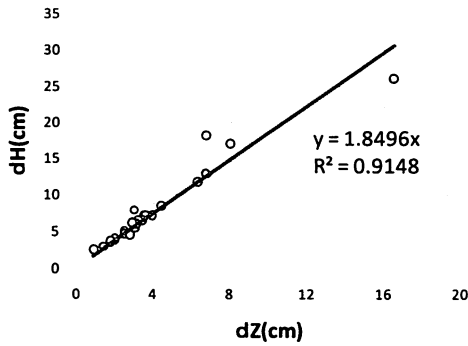


図-11 礫の鉛直方向と水平方向の長さの関係

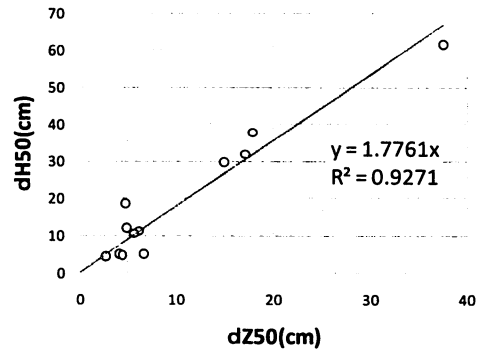


図-13 本手法から推定した d_{Z50} と写真測量 d_{H50} の関係

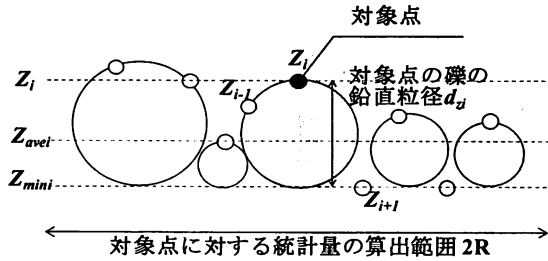


図-12 礫の鉛直方向と水平方向の長さの関係

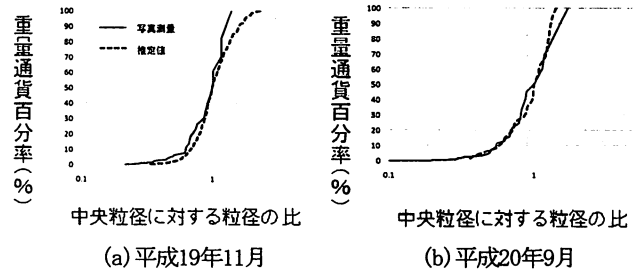


図-14 無次元粒度分布の推定結果と写真測量結果の比較

も使用した。図-12 に鉛直方向の高さの偏差を用いた表面粒径の推定法の概念を示す。計測点からの高さからその粒径を求めるためには、検査領域での最小地盤高さ Z_{mini} を知る必要がある。対象点の半径 R 内の最小値高さ Z_{mini} は半径 R 内の Z の分散 σ_z を使って式 (6) で推定する。

$$Z_{mni} = Z_{avei} - 3\sigma_z \quad (6)$$

ここに、 i : 検査領域における計測点番号、 Z_{avei} : 対象とする計測点 i に対して半径 R の範囲の計測点の平均高さ、 d_{zi} : Z_{avei} からの偏差とする。河道には勾配があるため、平均面の算出は対象データから半径 R 以内に存在するデータを用いて算出する。半径 R は検査領域の最大礫径程度であり、現地観測時に検査領域内で一番大きい粒径程度とする。計測点の礫の鉛直方向の礫径高さは式 (7) で与える。

$$d_{zi} = Z_i - Z_{mini} = (Z_i - Z_{avei}) + 3\sigma_z \quad (7)$$

図-13 は検査領域において、式 (7) で計算された鉛直方向の礫高さから粒径加積曲線を作成し算出した中央粒径高さ d_{Z50} と写真計測した水平方向長さ d_{H50} の関係である。ばらつきはあるが、両者は線形関係にあり、またその比は図-11 で示した値と同程度であることがわかる。図-14 は式 (7) で計算される無次元粒度分布（中央粒径 d_{Z50} に対する礫径の比）と写真計測結果を比較した結果と、各検査領域でのレーザ計測点密度を示す。写真計測結果に比べて、本推定法は礫径が大きいものを多く、礫径が小さいものを少なく見積る傾向がみられるが、写真計測の結果を概ね再現している。以上より、礫径の河床表面の粒度分布はレーザ計測結果による河床面の凹凸を用いて簡易的に算出可能であることがわかった。

7. 水内川全区間への適用

図-15 は推定したDEMと横断測量の結果である。断面Cは左岸側の植生高が低く、右岸側は樹木が繁茂している。礫域は精度良く地盤高が推定されている。また、断面Dにおいては、左岸側に植生が繁茂しており、推定した地盤高と多少ずれが生じている。土地被覆分類の結果と平成19年1月に撮影された航空写真を図-16 に示す。領域Aでは、上流の左岸側に水域と植生域が混じっているが、砂州の位置は再現されていることがわかる。領域Bは、写真下流右岸側にある砂州が地上型レーザ測量時にはなかったため、分類結果は概ね正しいことがわかる。しかし右岸側の数箇所 (*) で、本来は水域である所が植生域に分類が変更されている。これは、この領域の地盤高が比較的高いためであると考えられる。

8. 結論

本研究では地上型レーザ計測データから河川物理環境データを算出するまでの一連のデータ処理方法を開発した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 虚像データの受光強度と鉛直方向の特性を用いて効率的な除去方法を提案し、虚像データを効果的に除去 (95%) できることを示した。この除去方法によって実像データの約90%を残すことができ、地盤高データは保存することができた。

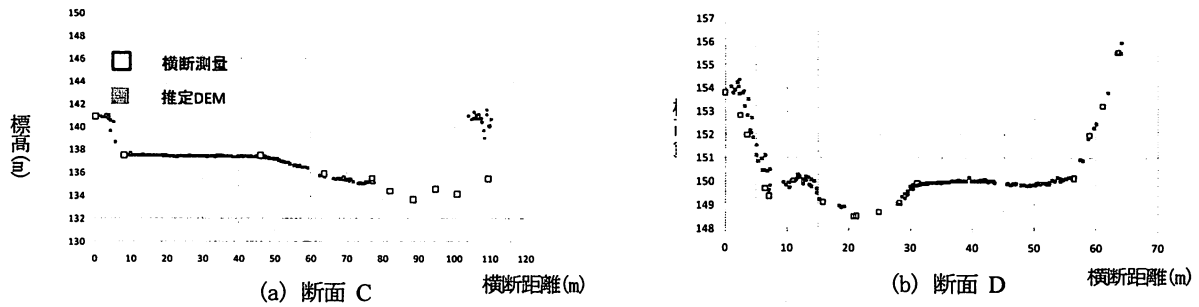


図-15 DEMと横断測量結果の比較

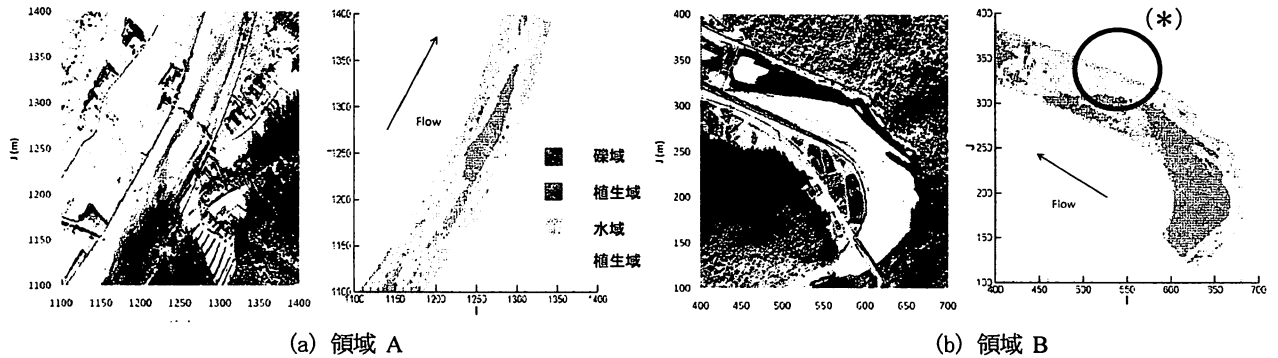


図-16 土地被覆分類と航空写真の比較

- (2) レーザ計測データの受光強度、RGB値、器械点からの距離を用いて、地表面被覆を礫域、植生域、水域の3つに分類し、現地の被覆状況をおおむね再現(89%)することを示した。
- (3) 実測植生高とレーザ計測データの鉛直方向の標準偏差を用い、植生高の推定法を提案し、植生域において算出した植生高を用いてDEMを推定した。また、植生、DEMの精度検証を行った。DEMの精度は、礫域で二乗平均誤差が0.089m、水域では0.25mであった。
- (4) 河床表面の礫径の平均粒径と粒度分布を河床高の鉛直方向の標準偏差を用いて算出できることを示した。

謝辞：本研究の一部は、平成20年度科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号：19560513、代表：河原能久)の支援によって行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) Litchi, D., Pfeifer, N. and Maas, H. : Terrestrial laser scanning,

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.63, pp.1-3, 2008.

- 2) 松本健作, 名倉裕, 玉置晴朗, 小葉竹重機, 清水義彦, 秋山圭史郎: 3Dレーザスキャナによる河道内地形測定における測定対象の識別に関する研究, 河川技術論文集, 第10巻, pp.279-284, 2004.
- 3) 松本健作, 名倉裕, 玉置晴朗, 小葉竹重機, 清水義彦, 秋山圭史郎. 3次元河道内地形測定における水域データの取り扱いに関する研究, 水工学論文集, 第48巻, pp.727-732, 2003.
- 4) 内田龍彦, 河原能久, 押田さやか, 一宮梢, 森山学, 木村成弘: 地上レーザ計測による河川物理環境データの取得. 河川技術論文集, 第14巻, pp.301-306, 2008.
- 5) Cobby, D. M., Mason, D. C. and Davenport, I. J. : Image processing of airborne laser altimetry data for improve river flood modeling, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.56, pp.202-212, 2001.

(2009. 4. 9受付)