

地上レーザ計測による 河川の物理環境データの取得

MEASUREMENT OF PHYSICAL ENVIRONMENTS OF RIVER WITH TERRESTRIAL LASER SCANNING SURVEY

内田龍彦¹・河原能久²・押田さやか³・一宮 梢⁴・森山 学⁵・木村成弘⁶
Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA, Sayaka OSHIDA,
Manabu MORIYAMA and Naruhiro KIMURA

¹正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

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学生会員 広島大学大学院博士前期課程工学研究科 (同上)

⁴正会員 東京都 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

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ニ丁目10-11)

⁶非会員 広島県土木局土木整備部河川課 (〒730-8511 広島市中区基町10番52号)

Several algorithms are developed for terrestrial 3D laser scanner system coupled with digital photogrammetry to be applicable for the measurement of river physical environment. The data by terrestrial laser surveying is compared with those by ground surveying in the Minochi River. It is shown that high Green value identifies vegetation areas and low value of reflected light intensity identifies water surface areas, which yields an effective algorithm for land-cover classification in rivers. To remove virtual image data on water surface, which is peculiar to terrestrial laser surveying, a robust algorithm is developed with an estimation method of water surface profiles. And a new estimation method that relates the deviation of ground level to the surface grain size is also devised.

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

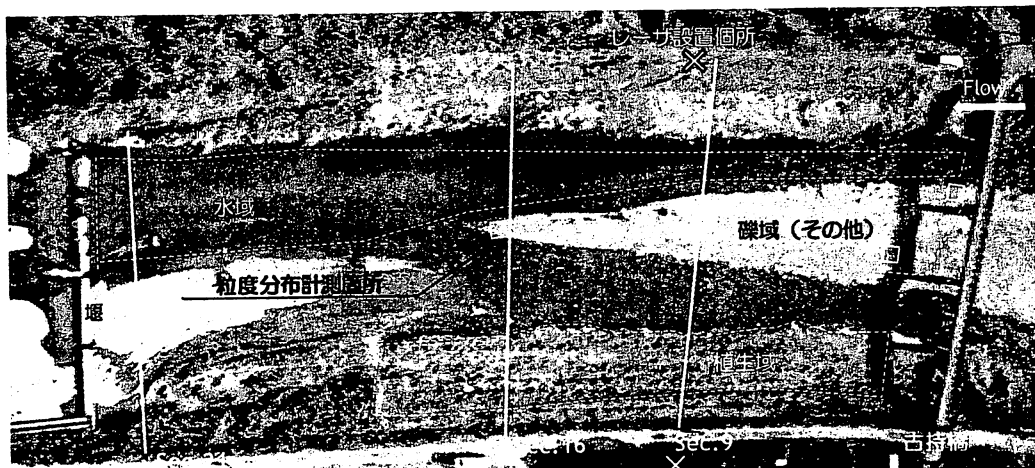
1. 序論

レーザ計測技術は三次元座標を一定の品質で短時間に多量に取得できるという技術的な特徴から多方面で実用化されつつある。水工学の分野においては、地表面の三次元座標を上空から多量に取得するために、IMUとGPSと合わせてレーザスキャナを航空機に搭載した航空レーザ測量^{1),2)}が行われている。近年、津波、高潮、洪水氾濫流や河川洪水流等の広域の解析データの整備には、プラットフォームとして飛行機を用いたレーザ測量データが広く活用されるようになってきた^{3),4)}。また、著者ら⁵⁾は、比較的狭域の範囲で高精度データを取得することを目的として、プラットフォームに低空を飛行できる小型有人ヘリコプタを用いた河川の物理環境の計測技術を検討している。

一方で、これらの航空レーザ測量では、運用コストが高いことや、上空から計測するために気象条件によっては計測が困難となる問題を有している。また、航空レーザ測量は原理的に高度が高くなるほど計測誤差が大きく、飛行速度が速くなるほど計測点密度が小さくなる。このため、緊急性が求められる河川の洪水災害調査や、局所的かつ詳細なデータを

必要とする河床材料や植生等の河川環境調査への適用には限界がある。これに対し、地上レーザ測量は、機器の持ち運びが容易で局所的な地表面データを高精度かつ高密度に取得可能なため、緊急性や局所性を要する河川調査に適していると考えられる。しかし、地上レーザ測量による河川の物理環境の調査法については、著者らの知る限り松本ら^{6),7)}によって検討されているのみであり、現在までに広く活用されているとは言い難い。これは、以下に示すように地上レーザ測量の特有の課題があるためと考えられる。

河川レーザ測量では、一般に土地被覆の自動分類技術と植生が繁茂する状況での地盤高の取得技術の開発が主要な課題である。さらに水域においては、レーザの安全規格の面からレーザ光の強度が制限されることと、水表面での反射及び屈折により、データ取得が困難であることが指摘されており、RGB値の変化を用いた水面下河床データの補間法⁸⁾や水面形を用いた河床高の力学的内挿補間法⁹⁾などが試みられている。地上レーザ測量では、上述の問題に加え、地表面の照射角度が小さいために、植生域等において地盤を取得しにくいこと、水面での反射による虚像が取得される⁶⁾こと、植生が密に繁茂してい



×

図-1 測量対象区間と測量箇所の概略

る領域などでは影となってデータが取得できない箇所が存在すること⁷⁾などの特有の課題を持っていることが指摘されている。

そこで、本研究では地上レーザ測量による河川の物理環境調査法の検討に先立ち、河川における地上レーザ測量データの特徴を航空レーザ測量との対比により論じ、その課題を明らかにする。次いで受光強度とRGBデータを用いた自動被覆分類法と地盤高の取得技術を開発し、トータルステーションによる地上測量結果と比較する。本手法では、水面形の取得法とそれを用いた効率的な被覆修正と虚像データの除去法に特徴がある。さらに、礫域の河床の凹凸と粒径の関係を調査し、地盤高データの統計的性質から河床材料の粒度分布特性を取得する手法を検討する。

2. 現地観測方法

本研究では、平成17年、18年と連続して洪水被害を受けた太田川水系水内川を対象とし、レーザ測量は、平成19年5月～6月に水内川下流域全域、11月に図-1、2に示す古持橋から下流約150mの堰までの区間で行っている。本論文では詳細な地上測量と合わせて行われた11月の測量結果を用いて検討する。なお、図-1の写真は12月に撮影されたものである。図-1に示す通り、植生が左右岸に繁茂し、水域が上流、下流で中州により二つに分離されるなど、異なる被覆状況が複雑に分布している箇所を選んでいる。

レーザ計測器には、スキャンステーション (Leica Geosystems社製) を用い、ファーストパルスから三次元座標値と反射受光強度、およびRGBデータを取得している。11月測量では、図-1、2に示す3点よりデータを取得している。地上測量では、図-1に示す下流端の堰形状を計測するための2断面を含む、計26断面で、トータルステーションを用いて横断測量を行っている。横断測量では、水際点の計測と、水域では水深、植生が繁茂している箇所では植生高を計測している。また、上流側の礫域においては、図-1に四角で囲んだ箇所において、表面礫の粒径調査

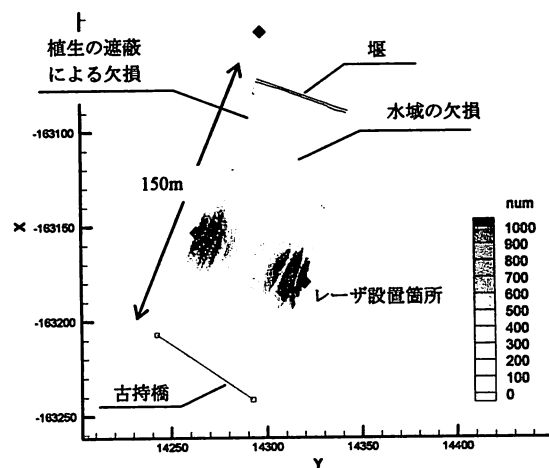


図-2 地上レーザ測量の取得点密度の分布

を行っている。粒径調査では、表面礫の形状、写真測量を行っている。より広範囲の粒径も検討するため、検討区間の下流の粒径が大きい箇所においても、レーザ測量と合わせて粒径調査を行っている。

3. 地上レーザ計測データの特徴

(1) 地上レーザ測量の課題の整理

地上レーザ測量による河川の物理環境データの取得法の検討に先立ち、地上レーザ測量データの特徴を航空レーザ測量との対比により検討する。

図-2は地上レーザによる取得点密度(1m²当たりの計測点数)の分布である。地上レーザ測量では、計測距離によって計測点密度が大きくばらつくことが確認される。水域では、他のレーザ測量結果^{5),6)}と同様にデータがほとんど取得されていない箇所が多いが、計測点からの距離が近い箇所ではデータが取得されている。また、水域以外では、ほぼ全域で高密度にデータが取得されているが、植生等の遮蔽によりデータ密度が小さい、もしくは欠損している箇所が見られる。遮蔽による水域以外のデータの欠損は、上空から計測する航空レーザ測量には無い、地上レーザ測量特有の問題であり、地上レーザ測量においてはデータの欠損領域の取り扱いが課題である

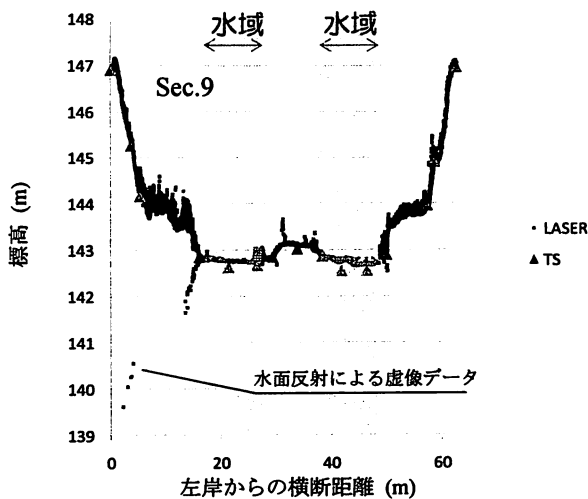


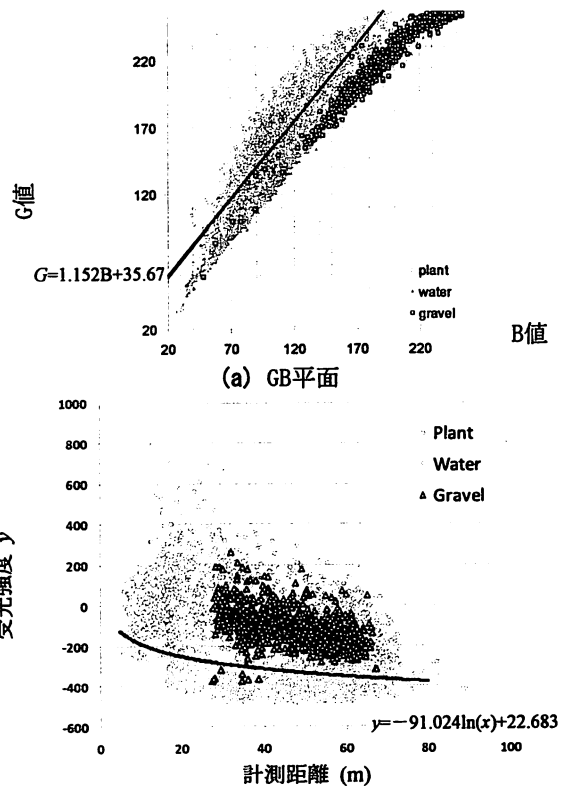
図-3 地上レーザ測量結果と横断測量結果の比較(Sec.9)

と言える。また、航空レーザ測量の場合に提案されているデータ欠損領域を水域とする手法⁷⁾は、そのまま地上レーザ測量に適用することはできないことが分かる。

図-3はレーザ測量結果と横断測量結果の比較である。地上レーザ測量の計測精度は、航空レーザ測量のようにGPSやIMUによるレーザ計測機の位置や傾きの補正を必要としないため、植生のない陸域のデータは正確に計測されることが確認できる。また、水域において取得されるデータは水面下の河床ではなく、水面で反射したデータであることが分かる。植生域においては、前述したように、地表面の照射角度が小さいために地盤を取得しにくいことが懸念されたが、今回の計測では、データ密度が多い箇所では地盤高をほぼ捉えている。むしろ地表面の照射角度が小さい問題は、前述したような水域以外のデータの欠損と、図-3で確認されるように水面反射による虚像データを取得することであろう。水面の虚像データの存在とその除去方法については、既に松本ら⁹⁾によって報告されている。松本ら⁹⁾は、俯角の上昇時にレーザの照射距離が増加することは無いとして、水面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なく、彼らも指摘している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課題を有している。本研究では、4(3)で述べるように河道の物理環境調査においては水面の虚像データのみを効率的に削除するアルゴリズムを提案する。

(2) 被覆分類ごとのRGBと受光強度特性

河道の被覆を植生域、水域、それ以外(本対象範囲では多くは砂礫域である)の3種類に分類するための指標を検討する。ここでは、植生は他の波長帯に比べ緑色帯の波長をもつ電磁波をよく反射することからRGB値の比による分類(ここでは、より植生を識別すると考えられるGB値を用いる)、水域は光を吸収し反射しにくいことから受光強度による分類を試みる。なお、植生域、水域、それ以外(サンプル



(b) 受光強度と計測距離の関係
図-4 土地被覆分類ごとのデータ特性

では礫域としている)のサンプルデータはそれぞれを多く含む図-1に破線で示す領域から取得する。

図-4(a)はGB値平面における被覆分類ごとの取得データの分布特性である。G/Bの値は植生、水域、それ以外の順に大きく、特に植生域はその他の領域に比べて大きいことが確認できる。本観測が11月に行われたことを考慮すると、G/Bの値による植生分類は有効であると言えよう。植生域以外の領域を分離する判定式を図-4(a)に示す。図-4(b)は受光強度とレーザ計測距離の関係である。受光強度は計測距離によって減衰するが、水域の受光強度は他の領域に比べて特に小さいことが分かる。図-4(b)に、距離による受光強度の減衰を考慮した水域以外の領域を除去する判定式を示す。図-4に示す判定式は対象とする領域以外のデータのほとんどを排除するものであるが、一部排除できないデータが存在している。また、逆に対象とする領域データの一部も排除されている。このことは、一点の計測データが何を示すかを明確にすることが困難であり、ある領域の被覆分類を行うためには、一定数以上のデータが必要であることを示している。

4. 河川の物理環境データの取得法の開発

(1) 自動被覆分類手法

地表面の被覆分類は、河川の物理量を算出するための基礎データとなるだけでなく、(2)に述べる水面の虚像データの除去にも必要である。ここでは、前述の判定式に基づいて、自動被覆分類法を提案する。本分類法は、土地被覆を3種類の領域に分類す

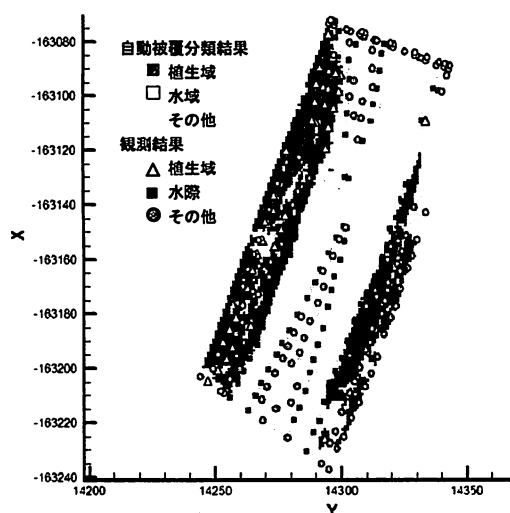


図-5 自動被覆分類結果と観測結果の比較

る場合、少なくとも異なる2種類の領域以外を排除もしくは異なる2種類の領域を抽出する判定式が必要であり、適切な判定式の数が多いほど分類精度は向上する。

図-4に示したように、判定式は対象とする領域以外のデータを完全に排除するものではない。そこで、ここでは河道幅に比べて十分小さい領域、1m×1mメッシュにおける支配的な要素を抽出する。

① 各メッシュにおいて判定式による排除率 E を調べ、 $E < E_{min}$ であれば「対象とする領域」、 $E > E_{max}$ であれば「対象とする領域ではない」と判定する。最低データ数以下のメッシュについては欠損領域と扱えば、地表面を3種類に分類する場合、未確定が4種類あるため、メッシュは8種類に区分される。ここでは二つの判定式において同一の閾値、 $E_{min}=0.4$ 、 $E_{max}=0.8$ を用いている。

② 欠損領域を分類する。欠損領域は、水域もしくは植生等の凹凸の影によって生じる。水域は他の領域よりも高さが低いことから、欠損領域の被覆種類は水域、植生域の順で可能性が高いと言える。そこで、水域、植生域、その他の順で、欠損領域を隣接する被覆種類にする。

③ 被覆種類が決定していない領域を分類する。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被覆種類にする。ただし、未決定領域でもある領域である可能性が少ないメッシュ(植生域か礫域等)については、その領域(水域等)にはならないようにしている。これにより、極一部のメッシュでは土地被覆種類が決定されないこともあるため、未決定領域を不明とし、同様の手順で再度分類することにより最終的に3種類の土地被覆分類図を得る。

図-5に、地上測量による観測結果と本自動分類法の結果の比較を示す。中央に砂州が存在するなど複雑な形状をしている水域と陸域について本分類法は良好に一致している。植生域については、特に右岸側の陸域において観測結果と分類結果の相違が見られるが、これはこの付近は判定式から明確な土地被覆分類が困難であること、また現地の状態も、植生

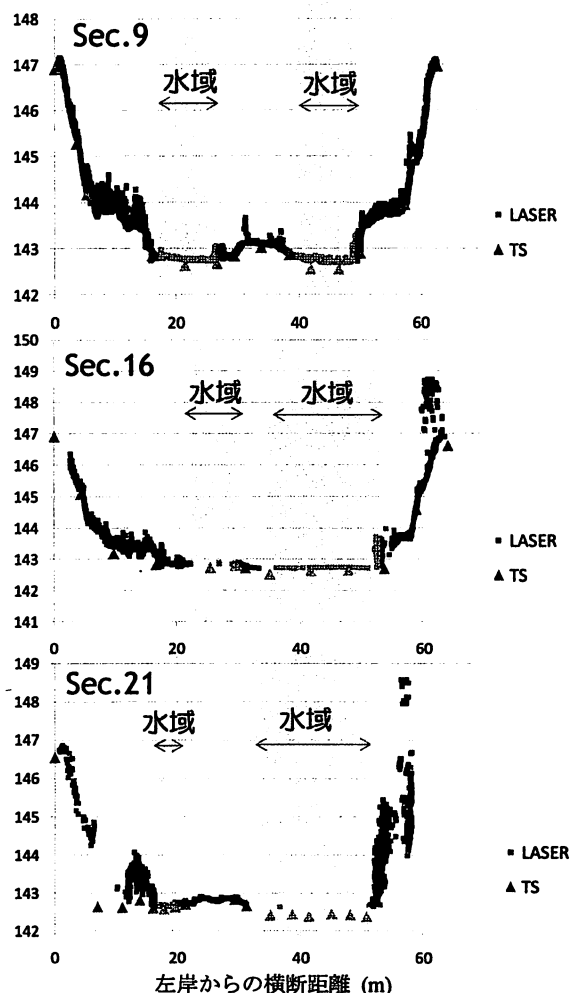


図-6 水面反射による虚像データ除去後のレーザデータと横断測量結果の比較

が低いもしくは密集していない場合が多いためである。図-1に示した上空写真と合わせて比較すると、本分類法による植生の繁茂状況は概ね現地の状況を捉えていることが分かる。

(2) 水面形の取得と水面反射による虚像データの自動除去法

著者らが既に報告したように、水域と陸域の境界が適切に評価されれば、水際水位はレーザ計測結果から精度よく算出できる⁹⁾。ここでは水際水面形の推定を用いた、水面反射による虚像データの自動除去アルゴリズムを提案する。

④ 水際水面形を推定するため、水際の水位データを抽出する。陸域メッシュが隣接する水域メッシュを水際メッシュとし、水際の位置は水際メッシュの中央、水位はそのメッシュにある全データの平均高さとする。ただし、水際メッシュに十分なデータが存在しない場合、水位は隣接する陸域メッシュの平均高さとする。この方法で抽出された水位には、真の水位よりも高い地盤データや真の水位よりも低い水面の虚像データを含む。

⑤ 水際の水位データの補正と補間を行う。まず、水際水位データと水域と陸域の境界面で水位勾配をゼロとする境界条件のもと、水域の水位をラプラス

方程式で解く。次に水域と陸域境界面の水位を境界条件として陸域水位を同様に解く。水際水位データが周囲の補間された水位よりも閾値 dH_{min} 以上高い場合は、真の水位よりも高い地盤データもしくは水域と誤認識された陸域データを抽出していると判断し、この点を水際データから除去する。逆に、水際水位データが周囲の補間された水位よりも閾値 dH_{min} 以上低い場合は、水面の虚像データと判断し、除去する。

⑥ 補間された陸域水位よりも閾値 dG_{min} 以上低いデータを削除する。これは、水面の虚像データは原理的に反射した水面よりも低い高さを持ち、さらに図-3に示したようにレーザ測量では水面下の河床を計測することができないことから、水面高より低いデータは水面の虚像データと見なせるためである。

ここで、虚像データ点における補間された陸域水位と反射した水面の高さは等しくは無いが、レーザ計測機は高い位置に設置されるため、水面反射角度は水面勾配に比べて遥かに大きく、この誤差は問題とならない。また、上述の水面の虚像データの削除の考え方から、本来閾値は $dG_{min}=0$ と設定すべきであるが、この場合多くの水面データが削除される。また、 dG_{min} を水位の推定誤差以下とすると低い陸域のデータも削除される問題が生ずる。そこで、本研究では問題となる虚像データのみを削除するために $dG_{min}=0.2\text{m}$ とする。なお、水面形は、判定式や排除率の不具合による水域、陸域の誤判定の修正にも有効であるが、本論文においては水域、陸域判定に大きな誤りはなく水面形による土地被覆分類の修正は結果的にされていない。

以上のアルゴリズムを行った後のレーザデータと横断測量結果の比較を図-6に示す。問題となる虚像データは完全に削除されていると言える。このため、①~⑥のアルゴリズムで生成されたデータ群を用いて、以下に示すような物理環境データの取得が可能となる。

(3) 地盤高と植生高の算出法

植生等が繁茂する領域においてレーザ計測データの多くは植生を捉えることになるため、効率的に地盤を抽出するフィルタリング手法が必要となる。

⑦ 各メッシュで平均高さ Z_{ave} の平面を定義し、その面からの差の最大値 dZ_{max} と最小値 dZ_{min} を抽出する。平均高さの平面は、前報⁵⁾と同様に平均値 Z_{ave} をメッシュ中央に配置し、メッシュを4分割した領域において接する2つのメッシュと自身のメッシュの平均値を結ぶものとする。欠損領域においてはこれらの量は周囲から補間して求める。

⑧ 各メッシュの仮地盤高 Z_i を $Z_i = Z_{ave} + dZ_{min}$ 、植生表面高 Z_v を $Z_v = Z_{ave} - dZ_{min}$ とする。

⑨ 植生等が繁茂する領域においては、仮地盤高 Z_i が真の地盤高よりも高くなると考えられるため、地盤高が取得されにくいメッシュにおいては、全ての方向に極大値とならないように補正したものをメッシュの修正地盤高 Z_b として算出する。ここで、地盤

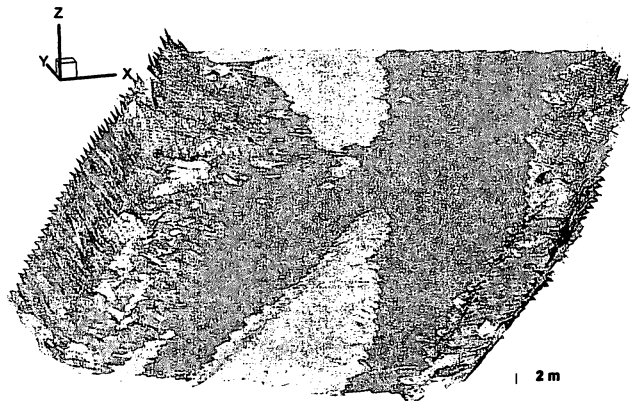


図-7 本フィルタリング手法によるDEMと植生高
(鉛直方向は2倍引き延ばしている)

高が取得されにくいメッシュの判定は、メッシュに含まれるデータの凹凸の最大スケールとメッシュスケールの関係、 $dZ_{max} - dZ_{min} > (dxdy)^{1/2}$ を満たすものとする。また、植生高 h は $h = Z_v - Z_b$ で計算できる。

以上のフィルタリング処理により求めた修正地盤高と植生高を図-7に示す。フィルタリング処理により滑らかな地盤高が生成され、下流側の高い植生の繁茂状況が抽出できていることが分かる。

(4) 粒度分布の算出法

著者らは高密度かつ高精度のレーザデータを用いれば地盤高の偏差から表面礫径の推定が可能であることを示している⁵⁾。この方法では、対象とする礫径に比べ、フットプリント径が小さいことが望ましい⁵⁾ことから、航空レーザ測量に比べて計測距離が短い地上レーザ測量が有効である。ここでは、地上レーザ測量データを用いた河床材料の粒度分布特性を取得する手法を検討する。

3次元形状をもつ礫の粒径を鉛直方向の長さから推定することは、平面情報から検討できる写真測量の場合に比べて原理的には精度が低下する。図-8は検査領域における礫の平面方向の長さの平均値と鉛直方向長さの平均値の関係である。両者の比 $\overline{d_h}/\overline{d_z}$ には多少のばらつきは見られるが、粒径に寄らずほぼ一定であり、鉛直方向の長さは水平方向の長さに比べて小さいことが分かる。

図-9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。計測点の高さからその粒径を求めるためには、礫底の高さ Z_{mini} を知る必要がある。礫底の高さ Z_{mini} は式(1)で定義する。

$$Z_{mini} = Z_{avei} - \alpha \sqrt{dZ_i^2} \quad (1)$$

ここに、 i : 検査領域における計測点番号であり、総和規約に従う。 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、 dZ_i : Z_{avei} からの偏差である。また、 α は標準偏差に対する最小偏差 dZ_{min} の比であり、ここでは $\alpha=3$ を用いる。計測点の礫の鉛直方向の粒径は式(2)で与える。

$$d_z = dZ_i + \alpha \sqrt{dZ_i^2} \quad (2)$$

図-10は検査領域において、式(2)で計算される中央

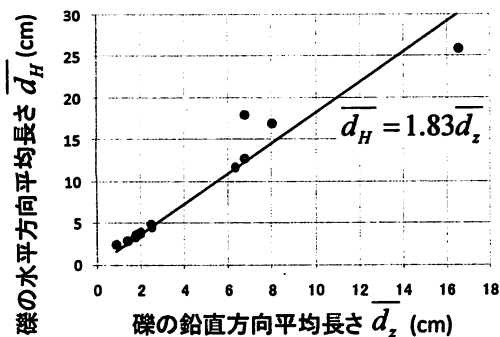


図-8 礫の鉛直方向の長さと鉛直方向の高さの関係

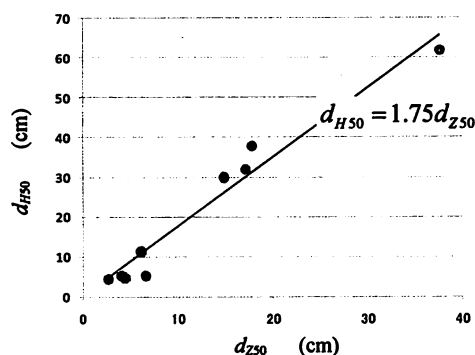


図-10 鉛直方向偏差と写真測量による中央粒径の比較

粒径 d_{z50} と写真測量結果 d_{H50} の比較である。 d_z/d_H がばらつく分、多少ばらついているが、両者は線形関係にあることが確認できる。また、その比は図-8に示した値と同程度であることが分かる。図-11は、式(2)で計算される無次元粒度分布（中央粒径 d_{50} に対する粒径の比）と写真測量結果の比較の例である。写真測量結果に比べて、本推定手法は粒径が大きいものを多く、粒径が小さいものを少なめに見積もる傾向が見られるが、写真測量結果を概ね再現していると言える。

以上より、礫域の河床表面の粒度分布はレーザ計測結果による河床の凹凸を用いて簡易に算出できることから、本手法は広範囲の表面粒度分布を検討するために有用であると言える。

5. 結論

受光強度とRGBデータを用いた自動被覆分類法と水面形取得手法を用いた水面虚像データの除去法と被覆分類の自動修正法を提案した。横断測量結果との比較により、本手法の妥当性を明らかにした。さらに、レーザ測量データを用いた河床面粒度分布の新しい測定法を提案し、平均粒径や粒度分布を簡易に見積もることができることを示した。

謝辞：本研究の一部は、平成19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）及び財団法人中国電力技術研究財団（代表：内田龍彦）の支援によって行われた。ここに記して謝意を表する。

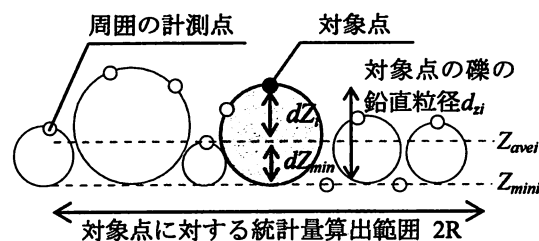


図-9 鉛直方向の高さの偏差を用いた表面粒径の推定法の概念

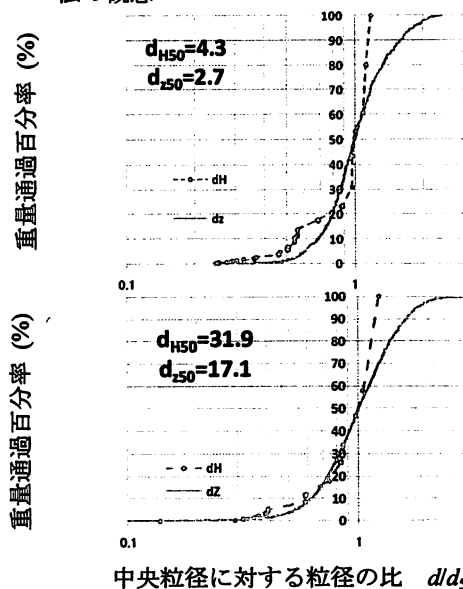


図-11 無次元粒度分布の推定結果と写真測量結果の比較の例

参考文献

- 1) 航空レーザ測量ハンドブック, (財)日本測量調査技術協会, 2004.
- 2) 国土交通省国土地理院：航空レーザ測量による数値標高モデル (DEM) 作成マニュアル (案), 2006
- 3) 川本一善, 館健一郎, 武富一秀, 金木誠：レーザースキャナデータを用いた中小河川河道モデルの作成手法に関する研究, 河川技術論文集, 第8巻, 2002.
- 4) 山本一浩, 小林一郎, 上野幹夫, 橋本淳也：自動属性判別によるレーザ計測データの有効活用について, 土木情報利用技術論文集, Vol.14, pp.79-86, 2005.
- 5) 内田龍彦, 河原能久, 山水綾, 渡辺豊, 森山学：ヘリコプタに搭載した高精度3Dレーザスキャナによる河川の物理環境の計測, 河川技術論文集, Vol. 13, 243-248, 2007.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 傳田正利, 時岡利和, 天野邦彦：レーザプロファイル及び空中写真を用いた河川中流域の河床高推定手法の開発, 河川技術論文集, 第12巻, pp.145-150, 2006.
- 9) 内田龍彦, 河原能久, 吉田晋, 森山学：河川レーザ測量のための水面下河床高の力学的内挿補間法, 水工学論文集, 第52巻, pp.1057-1062, 2008.

(2008. 4. 3受付)