

高解像度3Dレーザー計測を用いた 河川の物理環境計測技術の開発



所属名：広島大学大学院
工学研究科
発表者：河原 能久

1. 序論

河道の物理環境（地盤高、植生の繁茂状況、河床材料の粒径等）は洪水流の挙動を支配する境界条件であり、河川の整備や維持管理に不可欠な基礎情報である。現在、コンピュータ技術や数値解析技術の進展により、洪水流の2次元不定流解析が行われている。しかし、解析に使用する物理環境データの質・量がともに不十分であることが大きな障害となっている。例えば、河道の地盤高データは一定間隔で測量された横断測量結果を内挿して作成されるため、測量断面以外の地盤高の精度は十分ではない。特に、中小河川においては定期横断測量が行われていない河川が多く、洪水被害の危険性が高い河川であっても洪水流の特性を把握することが極めて困難な状況にある。

大量の3次元座標を迅速かつ高品質で取得できるという特徴を有するため、レーザスキャナを航空機（セスナ）に搭載した航空レーザ測量が多方面で実施されつつある^{1),2)}。しかし、航空レーザ測量を河川の物理環境の計測に適用するためには種々の課題がある。例えば、運用コストが高いこと、気象条件に左右されること、レーザ光のフットプリントが大きいため計測誤差が小さくないこと、飛行速度が速いと計測点密度が低下すること、植生が繁茂する状況での地盤高の取得技術を開発することが必要であること等が挙げられる。これらのため、航空機利用のレーザ測量を緊急性が求められる河川の洪水災害調査や高い空間分解能を必要とする河川環境調査への適用には限界がある。

本研究の目的は、低空を飛行できる小型有人ヘリコプタに搭載した高精度の3Dレーザスキャナを河川の物理環境計測に応用するために必要な技術を開発することである。具体的には、レーザスキャナによる計測データから、地表面被覆の分類、地盤高や水際線の位置、植生高の推定、表面の河床材料の平均粒径の推定を行うアルゴリズムを開発し、それらの精度を太田川において検証する。

2. 有人ヘリコプタを用いたレーザ測量と現地での横断測量

本研究では、写真-1に示すように、小型有人ヘリコプタにレーザスキャナ（デベロソリューションズ、Geo Scanner LISA）を搭載した。レーザの安全規格はClass 1であるため低い高度での河川測量が可能である。また、レーザビームの広がり角が0.25mradと小さいため、高度300mからの計測において地上でのフットプリントの大きさは75mm径と小さい。ここではラストパルスより3次元座標と反射受光強度を取得したが、植生が密生していなければ幹や葉の間を通過し、地盤高を検出する可能性がある。

観測区間は写真-2に示す太田川安佐大橋の下流約1kmの区間である。この区間の低水路には植生が繁茂しており、右岸側には礫河原が広がっ



写真-1 底部に機器を搭載した小型有人ヘリコプタ



写真-2 対象区間と横断測量を行った断面（平成21年）

ている。また、高水敷は駐車場や草地、グラウンドとなっている。レーザ測量は2時期（平成18年10月28日と平成21年1月16日）に高度300mで行われた。

一方、レーザ測量データの精度検証のために、レーザ測量時の水位の縦断分布の計測、GPSとトータルステーションを用いた地盤高と植生高の計測、礫域での平均粒径の測定を行った。

3. 3次元計測データ、オリジナルデータ、メッシュデータの精度の検討

まず、ノイズ等のエラーを削除した3次元計測データの精度検証を調整用基準点4点に対して行った。詳細は略すが、2時期の測定におけるRMS誤差はそれぞれ2.5cmと7.6cmと十分に小さいことを確認し、3次元計測データをそのままオリジナルデータとした。

次に、オリジナルデータの精度検証を、アスファルト、礫河原、植生を含む断面、植生が繁茂する断面にて行った。ここでは、礫河原と植生が繁茂する断面での結果を説明する。

礫河原における平成21年のオリジナルデータとGPS測定値の比較を図-1に示す。礫河原では周囲で最も高い礫の標高値と最も低い標高値を計測している。オリジナルデータがこの最高値と最低値の間に分布していることが確認される。

植生の繁茂した断面として左岸側の距離標11.8K断面を選び、オリジナルデータの精度検証を行った。結果を図-2に示す。植生が多く繁茂している断面であるため、植物で反射し地盤高データを取得していないデータが多数あることがわかる。したがって、植生が繁茂している箇所では適切なフィルタリングを行い正確な地盤高データを求めること（グラウンドデータの作成）が必要である。

グラウンドデータをメッシュ単位に整備（メッシュデータを作成）する手法として、メッシュ内の最低地盤高をつなぐ簡易なフィルタリング方法と地盤高が傾斜していることを考慮したフィルタリング方法を開発し、得られたメッシュデータの精度を検討した。後者のフィルタリングは、メッシュが植生域であり、隣り合うメッシュの最低地盤高が30°以上であるときに適用するものである。ここでは、前者、後者のフィルタリングによって得られたメッシュデータをそれぞれ簡易DEM、新DEMと略記する。平成18年の11.6K断面での結果（2m×2mのメッシュデータ）を図-3に示す。植生が繁茂しているにもかかわらず、簡易DEMも地盤高をかなり良好に捉える。しかし、横断方向距離が10m～15mの植生が密に繁茂している場所では新DEMの方が良好に地盤高を表現する。

4. 地表面被覆分類法の開発

地表面被覆別に2m×2mのメッシュデータの標高標、受光強度、データ取得点密度にみられる特徴を整理し、それらに

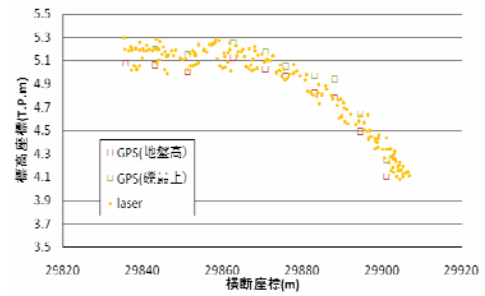


図-1 礫河原での精度検証

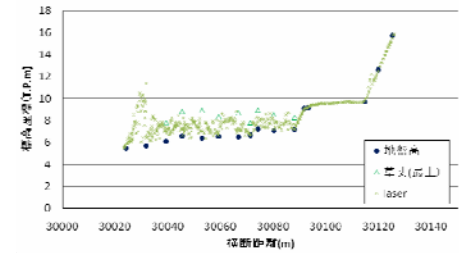


図-2 11.8K断面での精度検証

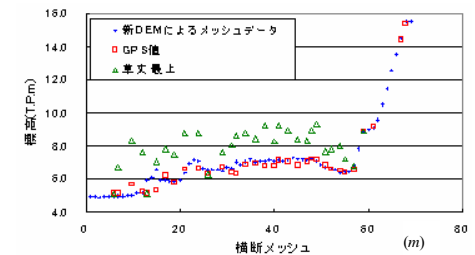
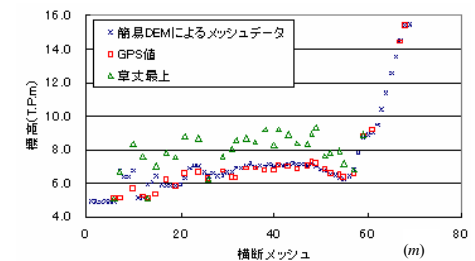


図-3 11.6K断面での2種類のメッシュデータの精度検証

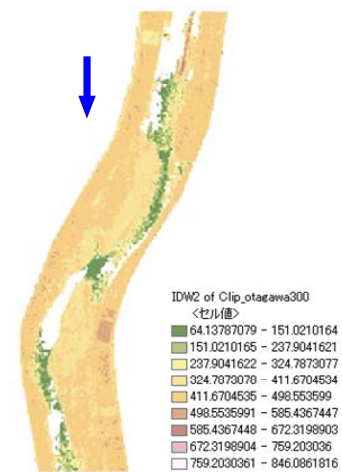


図-4 水域での受光強度の分布

基づいた地表面被覆分類を開発した。地表面被覆分類は水域、植生域、礫域、地表（その他）の4つとした。受光強度は天候や距離によって値が変化するため、本分類法ではメッシュ内の偏差の分散や相関を指標としている点に特徴がある。

各被覆の特徴を整理した。まず、水域の特徴はデータ取得点密度と受光強度にみられる。図4に対象区間における受光強度の分布を示す。本来、滑らかな水域では反射光が得られないが、瀬などで波立っている箇所では強い反射光を返す（図中の緑色）場合がある。水域では、受光強度の分散が極めて大きいか、反対に小さい値をとる。

植生域は受光強度と標高座標の相関に特徴を有している。図-5は地盤高と受光強度の偏差の相関を面的に示した結果である。両者には強い負の相関関係があることが確認される。相関係数が-0.4以下の場合には植生域と判断する。

礫域では地盤高と受光強度の分散は小さい。また、地盤高と受光強度の偏差は弱い正の相関を示す。

以上の地表面被覆の特徴を考慮して対象区間全域の被覆分類を2m×2mのメッシュで行う。被覆分類のフローチャートを図-6に示す。被覆の判定条件は以下のようなものである。

- 1) 水域：メッシュ内の取得点数が5未満。標高座標の分散が0.2未満かつ受光強度の分散が20,000以上。標高座標の分散が0.1未満かつ受光強度の分散が10,000以上である。
- 2) 植生域：標高座標の分散が0.2以上。受光強度の分散が20,000未満かつ、標高座標の分散が0.1以上。相関係数が-0.4未満。
- 3) 礫域：受光強度の分散が1,000以上10,000未満。標高座標の偏差の最大値と最小値の差が10cm以上。水面から標高座標が2.5m以上には存在しないとする。
- 4) 地表（その他）：上記の被覆分類条件を満たさない場合。アスファルト、裸地、密度の低い草地等を含む。

2時期の地表被覆分類を図-7に示す。空中写真と比較すると被覆状況をほぼ表していることが知られる。しかし、礫域と地表の識別、水域に誤分類が認められる。今後、水位の情報を利用するなどして水域の精度向上を図る予定である。2時期の間で大きな出水がなかったため、下流の礫域には植生が広がりつつある。また、図の中央の左岸側に道ができて見えるように見えるが、これは人為的に植生の伐採が行われ、地面が露出しているためである。

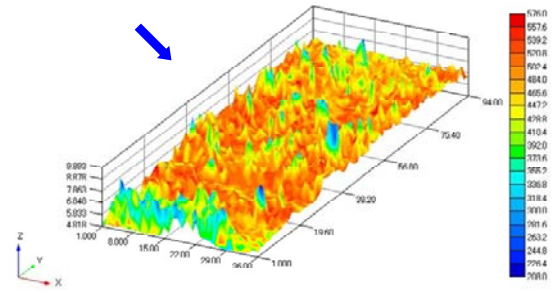


図-5 植生域の地盤高と受光強度の相関

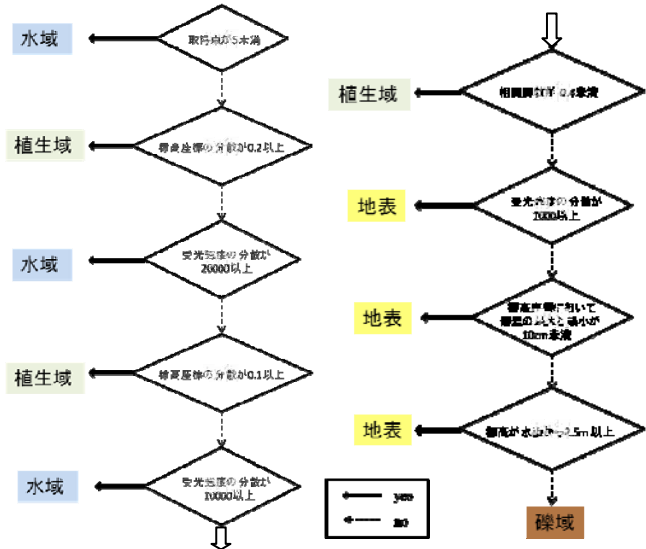
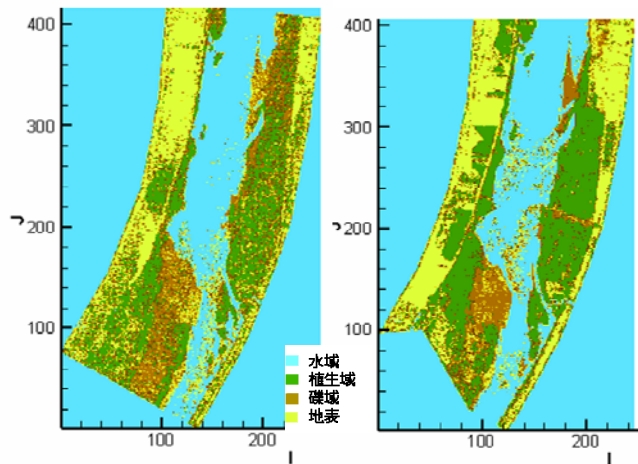


図-6 被覆分類のフローチャート



(a) 平成 18年 (b) 平成 21年

図-7 地表面被覆分類とその変化

5. レーザ測量による物理環境の計測

得られたメッシュデータをもとに、河川水位、植生高、礫径の推定がどこまで可能か、また、異なる2 時期のデータの比較から植生や地盤高に変化が発生したのかを検討した。

まず、水位の縦断分布の算出を試みた。水面では、波立つような箇所を除けば、基本的にはデータを取得できない。そこで、水際線のメッシュデータの地盤高を水位とすると仮定して、データ取得点密度が急変するという特徴を利用して水際線を抽出した。ただし、メッシュの推定水位が上流側のメッシュ内の推定水位より高い場合には水位として採用しないこととした。右岸沿いの河川水位の推定結果を図-8 に示す。水位の変化を良好に捉えることができている。推定誤差の最大値は7.5cm であり、0~2.5cm、2.5~5cm の間に多く分布することが確認された。

メッシュ内のオリジナルデータの標高の平均と地盤高の推定値を用いて植生高を推定した。横断測量において植生高を計測した距離標 11.8K 断面での結果を一例として図-9 に示す。正確な植生高を定義することは容易でないが、図中の実測最上とはその付近で一番高い植生を計測した結果であり、実測左とは計測したときのスタッフの左岸側の位置する植生の高さである。全体的に推定結果は実測の植生高より小さな値を示すことが知られた。実測左と推定結果を比較すると近い値をとる地点も多い。

次に、礫域でのオリジナルデータを用いて礫径の推定を行い、写真を用いた面積格子法によって求めた礫径と比較した。礫径の推定を行うにあたって、礫域の特徴である標準偏差を用いて、容易に礫径が推定できる方法として式(1)を用いて推定を行う。

$$d_{50} = \alpha \sqrt{\sigma^2} \quad (1)$$

ここで、 d_{50} : 平均粒径、 σ^2 : 地盤高の分散、 α : 定数である。礫径の推定は2 ステップで行った。まず、礫河原の上流側の断面の3 箇所において、平均粒径 d_{50} を写真から面積格子法によって求め式(1)の定数 α を算出した。その結果、定数 α の値を348 と同定した。次に、礫河原の下流側の断面の3 地点において、面積格子法によって得られた平均粒径と式(1)によって算出された d_{50} を比較し、式(1)を用いて平均粒径を推定した。その結果、平均粒径15.2~20.0cm に対して推定誤差は0.8~1.9cm と小さく、礫の形状が類似している限り、平均粒径の推定が可能であると判断された。

レーザ測量が行われた2 時期の間に大きな出水は発生しなかったが、図-7 に示されるように、河川環境には変化が発生している可能性がある。そこで、植生域や植生高、地盤高にみられる変化を調べた。植生を含む断面である第一見通し線での結果を図-10 に示す。平成18年には植生は高水敷側から全

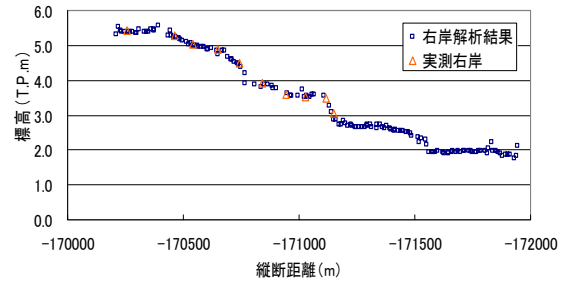


図-8 右岸の水際線における水位の推定

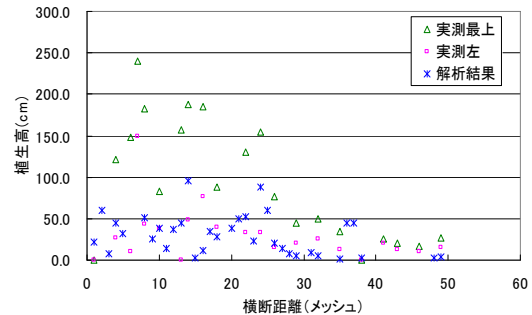


図-9 11.8K 断面での植生高の推定

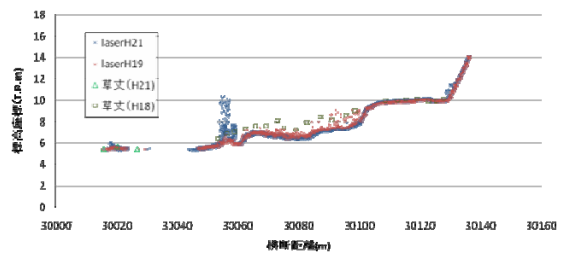


図-10 第一見通し線での植生域の変化

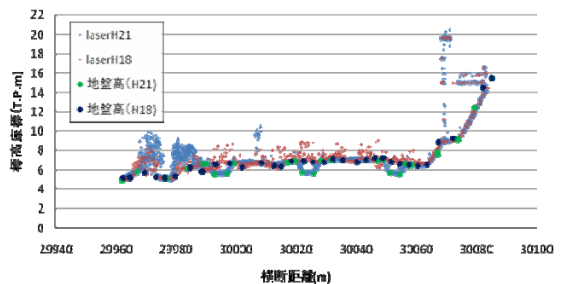


図-11 11.6K 断面での地盤高の変化

に植生が繁茂しているが、平成 21 年は水際側には約 4m の植生が存在している。実際、平成 21 年には、人為的な刈り取りや冬という季節もあり植生は水際付近を除いて少なくなっていた。

図-11 に示すように、距離標 11.6K 断面では平成 18 年、平成 21 年で植生高だけでなく地盤高にも変化がみられた。平成 21 年では、繁茂していた植生はなく、3 箇所約 6m 四方の凹みが人為的に掘られてあった。レーザ測量はこれらの変化を明瞭に捉えている。

6. 結論

有人ヘリコプタを用いたレーザ測量によって得られた河道内の 3 次元計測データをもとに、地表面被覆の分類を行い、メッシュデータを作成するまでの一連の方法を開発した。また、レーザ測量データを利用して、河川の物理環境を計測する方法とその可能性を示した。主要な知見は以下のようである。

- 1) 遮蔽物の少ない場所においてグラウンドデータを実測値と比較し、グラウンドデータが高精度で得られていることを確認した。
- 2) 地表面被覆の状況によってメッシュデータの精度が異なるため、被覆状況に応じたフィルタリング方法が必要であるが、地表面被覆別の地盤高や受光強度、データ取得点密度にみられる特徴を反映した地表面被覆分類法を開発した。
- 3) 植生域に適用するフィルタリング方法を改良し、得られたメッシュデータが実測地盤高を精度良く捉えることを示した。
- 4) 水際のメッシュデータから河川水位の推定法を提案し、高精度で縦断水面形が得られることを示した。
- 5) 礫の平均粒径が地盤高の標準偏差と線形関係にあることを確認し、容易に算出できる式を得た。
- 6) 2 時期のレーザ測量から得られメッシュデータから、植生域や植生高、地盤高の変化といった環境の変化を検出できることを示した。

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) 岡田拓也, 小林範之, 小久保英博, 華房康憲, 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, 2000.