

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

MEASUREMENT OF PHYSICAL SURROUNDINGS OF RIVER WITH A
HELICOPTER-MOUNTED 3D LASER SCANNER SYSTEM OF HIGH PRECISION

内田龍彦¹・河原能久²・山水 綾³・渡辺 豊⁴・森山 学⁵

Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA, Ryo YAMAMIZU,
Yutaka WATANABE and Manabu MORIYAMA

¹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)

²フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (同上)

³正会員 いであ株式会社 (〒105-0004 東京都港区新橋6-17-19 新御成門ビル)

⁴正会員 株式会社ECR (〒733-0031 広島県広島市西区観音町6番7号)

⁵正会員 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二丁目10-11)

A 3D laser scanner system of high precision installed on a helicopter is applied to measure the physical environment of Ohta River that has different land covers. At the same time VRS-RTK-GPS surveying and measurement of vegetation height and bed material size are carried out to check the accuracy of the data. First, the laser scanner system is confirmed to yield accurate DSM as far as the data obtained at 300m and 600m altitude are concerned. Second, a filtering method is proposed that considers the characteristics of land covers such as water, vegetation, gravel and the others and is found to be effective to obtain reliable DEM. Third, it is shown that the longitudinal profile of water level is well estimated by detecting the land-water border. Last, the average size of river bed materials is also reasonably estimated by using the standard deviation of ground level in a mesh of 2m×2m.

Key Words : *laser scanner system, helicopter, DSM, DEM, bed elevation, vegetation, river bed material, filtering, land cover*

1. 序論

河道の物理環境(地盤高, 植生の繁茂状況, 河床材料など)は洪水流の挙動を支配する境界条件であり, 河川整備に必要な基礎情報である。

現在, コンピュータ技術の進展により, 洪水流の二次元不定流解析は実務レベルでも可能となっている。しかし, 解析に必要なデータが質・量ともに不十分であることが数値解析上の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。このため, 場所的, 時間的に変化する河道特性のデータを整備することが急務である。

三次元座標を経済的かつ一定の品質で大量に取得でき

という技術的な特徴から, 航空レーザ測量が多方面で実用化されつつある^{1,2)}。この技術は河川の物理環境データを生成できる可能性があり, 近年注目されている。例えば, 川本ら³⁾は航空レーザ測量データを用いて, 河道横断面形状データの作成法を検討し, 作成された断面データについて幾何学的な検証に加え, 洪水流解析における適用性を検討している。しかし一方で, 飛行機を利用する航空レーザ測量には, 運用コストが高いこと, 高度が高いために計測誤差が小さくないこと, 植生が繁茂する状況での地盤高の取得技術が確立されていないこと等の課題が残されている。

本研究では, 河川の物理環境の計測に関する課題を軽減すべく, 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(LISA)に着目した。そして, 様々な地覆状況を有する太田川11K~12Kにおいてレーザ測量を行い, 本レーザ計測技術の河道測量への適用性を検証することを目的としている。

表-1 レーザ計測システムの性能

レーザー部	レーザクラス	Class 1
	計測距離	1000m(反射率>80%) 350m(反射率>10%)
	精度	±10mm
	レート	8000
	波長	近赤外線
	ビーム広がり角	0.25mrad
	ローリング(deg)	0.01
IMU精度	ピッチング(deg)	0.01
	ヘディング(deg)	0.01
	速度(m/s)	0.005
	レート	200Hz

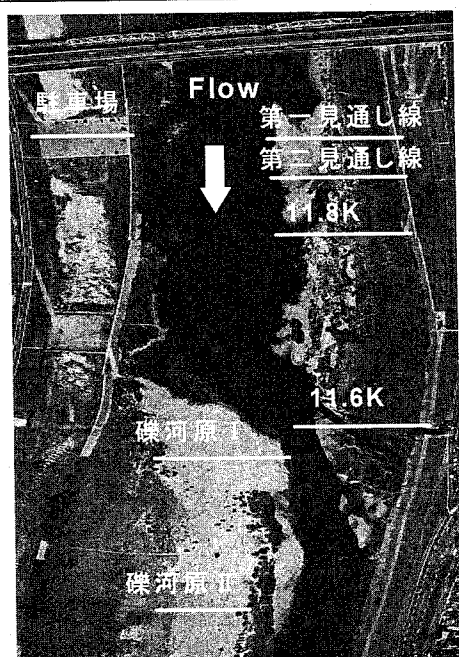


図-1 観測区間における横断測量断面の位置

2. 現地観測と計測データの精度検証

(1) レーザスキャナの性能

小型有人ヘリコプタに計測システムLISA（レーザースキャナ、GPS、IMU）を搭載した。その性能を表-1に示す。レーザースキャナには精度が±10mmの高精度のものを使用しており、1秒当たり8000点の計測が可能である。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り、ビーム広がり角が0.25mradと小さいため、点に近い計測が可能である（高度300mからの計測で地上でのフットプリントの大きさは75mm径）。植生や樹木等の計測箇所の凹凸が大きい箇所でも精度良く計測でき、また地表面を捉えやすいため、河川の物理環境計測に適していると考えられる。

(2) 対象区間と現地観測

調査対象として様々な地覆状況を有する太田川11K～12K区間を選定した。レーザ計測の精度を検証するために、特徴的な地覆状況を有する断面（図-1の流量観測第

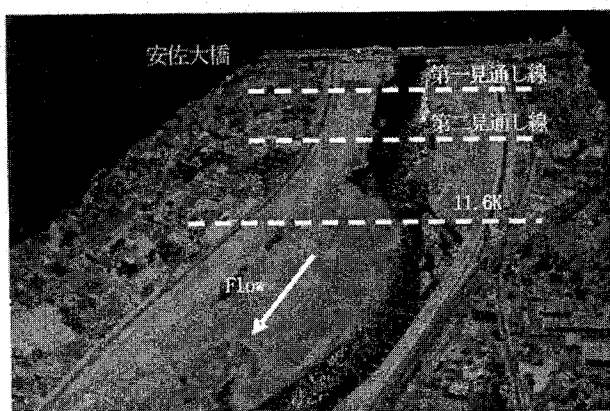


図-2 レーザ測量による三次元計測データ

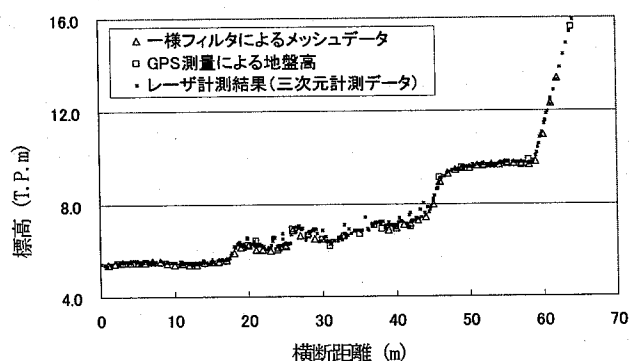


図-3 第二見通し線における精度の検証

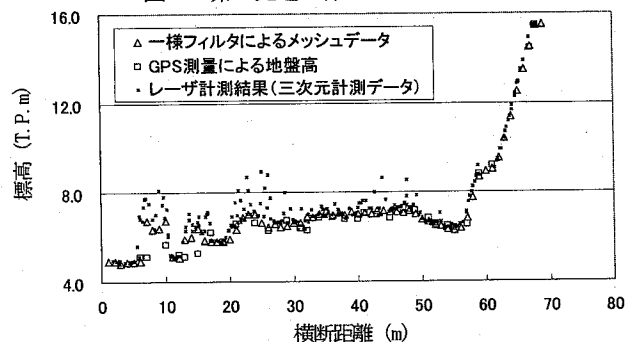


図-4 11.6K断面における精度の検証

一見通し線・第二見通し線、距離標11.8K・11.6K断面、駐車場、礫河原I・II)において横断測量を行った。図-1に横断測量断面の位置を示す。地盤高の計測にはVRS-RTK-GPSを、植生高の計測にはスタッフを使用した。また、右岸・左岸の水際付近において水位縦断測量を実施した。レーザ計測では、高度300mにおいて左岸側、次に右岸側のデータを取得した後、精度を比較するために、高度を600mに上げて河道全幅を計測した。ただし、本研究の解析には高度300mのものをを用いている。今回の計測ではラストパルスから三次元座標値と受光強度を取得した。なお、全レーザ測量に要した時間は約5分である。また、礫河原I・IIにおいて、各3箇所で見上から撮影し、その画像を用いて粒度分布を求めた。

(3) 三次元計測データの精度検証

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²⁾に従い、レーザ計測結果の精度を検証した。

メッシュデータ作成までの手順は次の通りである。

- ①レーザ計測によって得られたデータ（三次元計測データ）と調整用基準点の標高を比較し、オリジナルデータを作成する。
- ②検査断面においてオリジナルデータを実測値の標高値と比較し、点検を行う。
- ③オリジナルデータより、植生等の遮蔽物を除去するフィルタリング処理を行い、メッシュデータを作成し、実測地盤高と比較する。

調整用基準点を4箇所設けて較差を点検したところ、RMS誤差は高度300mのデータについて2.5cm、高度600mのデータについて3.9cmであった。この値は一般の許容RMS誤差 25cm^2 に比べて小さいため、オリジナルデータ作成にあたって計測結果を補正しないこととした²⁾。図-2にレーザ測量によって得られた三次元計測データを示す。陸域におけるデータ密度の平均値は、高度300mで $1.7\text{点}/\text{m}^2$ 、高度600mで $0.4\text{点}/\text{m}^2$ であった。また、後述する2mメッシュにおいて、データ密度のばらつきは、高度300mにおいて最大 $2.75\text{点}/\text{m}^2$ 、最小 $0.75\text{点}/\text{m}^2$ と小さい。

植生の繁茂状況が異なる第二見通し線と11.6K断面における実測値とオリジナルデータをそれぞれ図-3、図-4に示す。植生が粗な地点での地盤高は高精度に取得できているが、図-4の10~30mのように、植生が密に繁茂する箇所では、地盤高でなく植生が計測されていることが分かる。

2mメッシュにおいてメッシュ内の最低地盤高を内挿するフィルタリング処理（以下、一様フィルタとよぶ）を行い、メッシュデータを作成した。第二見通し線、11.6K断面におけるメッシュデータと実測値の比較をそれぞれ図-3、図-4に示す。このような簡易なフィルタリング処理においても、図-3から分かるように高精度かつ高分解能のメッシュデータが作成できる。しかし、植生が密に繁茂する11.6K断面においては、実測値との誤差が大きい箇所がある。これは、データ密度に対して、メッシュが小さいことによって、該当メッシュ内で地盤を捉えたデータが無いことが原因である。このように、一様フィルタによって得られるメッシュデータの精度は地覆状況によって異なるため、三次元計測データからメッシュデータを高精度に算出するためには、地覆状況を考慮したフィルタリング処理が必要である。

3. 土地被覆別の新しいフィルタリング方法

(1) 土地被覆別のデータの特徴

土地被覆別を考慮したフィルタリング方法の構築に先立ち、土地被覆のデータの特徴を調べ、土地被覆分類方法を検討した。本研究では、河道の土地被覆を「水面」、
「植生」、
「礫」、
「その他」に分類した。

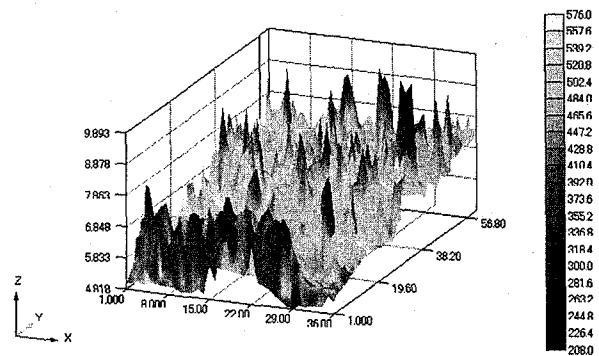


図-5 植生が密に繁茂する断面における受光強度

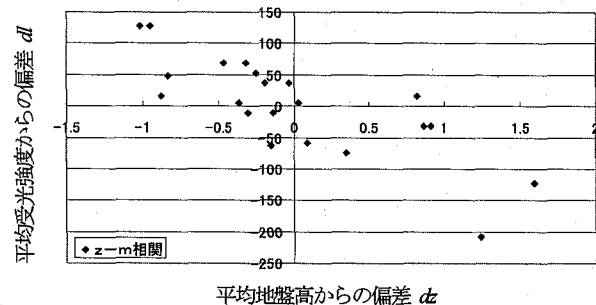


図-6 受光強度と地盤高の相関

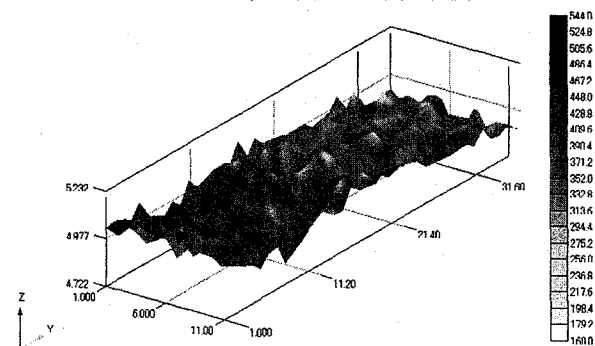


図-7 礫河原における受光強度

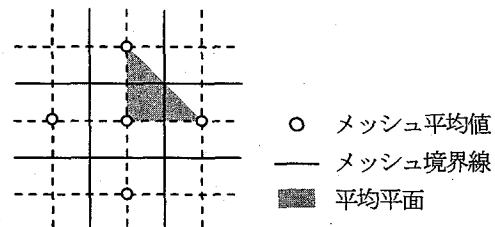


図-8 各メッシュの平均平面の算出方法

(a) 水面

図-2で示した通り、水域は基本的にデータが存在しないため、データ密度によって把握できる。水際近傍の水深が極浅い箇所ではデータは存在するが、この場合、受光強度が他に比べて極端に小さい値を示す。しかし、図-2において明らかに水域である箇所においても、水面が波立っているなどの理由からデータを取得している。この場合には逆に受光強度が大きい値を示す。

(b) 植生

図-5に植生が密に繁茂している区画において測定された高さを受光強度の分布を示す。また、図-6に植生が密

表-2 地被分類

分類	条件	取得点数 N (2m×2mメッシュ)	受光強度 I	高さの標準偏差 RMS (m)	dz と dl の相関係数 C
水域	肯定条件	$N=0$	-	-	-
	否定条件	$4 \leq N$	$220 \leq I \leq 600$	-	-
植生域	否定条件	-	-	$RMS < 0.05$	$0.4 < C$
礫域	否定条件	-	-	$RMS < 0.01$	-
その他	-	上記以外			

に繁茂している場所における受光強度と地盤高の相関を示す。横軸は2mメッシュにおける平均地盤高からの偏差 dz 、縦軸は平均受光強度からの偏差 dl である。地盤高の高い点ほど、受光強度が小さい値であり、地盤高と受光強度には強い負の相関関係がある。

(c) 礫

図-7に礫河原における高さと受光強度の分布を示す。植生のない礫河原では、凹凸の激しい地形は形成されず、 z 方向のバラツキが小さい。地盤高が高い点程、受光強度が大きくなる傾向があるが、必ずしも正の相関を示すことはなく、分類に用いる明確な指標にはならない。また、礫河原では受光強度は全体的に小さい値をとる。

(2) 各メッシュの統計量の算出方法

以上の土地被覆の特徴を考慮した上で、新しいフィルタリング方法を構築する。フィルタリングを行う上で、各メッシュの重要な統計量は平均値の他に分散・標準偏差である。しかし、単純にメッシュ内の分散では、土地被覆とは直接関係の無い大きなスケールの変化を含む。そこで、本解析ではメッシュスケールの変化からの偏差の2乗平均値とその平方根 (RMS) を改めて分散・標準偏差と定義する。ここでは、偏差は図-8に示す方法で平均面を算出し、その面からの差で定義する。平均平面は各メッシュにおいて、平均値を中央に配置し、メッシュを4分割し、4分割された領域において接する二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。

(3) 土地被覆分類方法

これらの基本的な解析手法を用いて土地被覆の特徴を考慮したフィルタリング方法を構築する。被覆分類は表-2に示す条件に基づいて行われる。取得点密度 N 、受光強度 I 、高さの標準偏差 RMS 、及び高さと受光強度の相関係数 C を用いる。ここで、肯定条件を満たせばその分類が確定し、否定条件のいずれかを満たせばその分類でないことが確定する。分類表は特徴が明確であったものほど上を書いており、複数種の分類に該当する場合は表の上の分類としている。

本研究では、メッシュの大きさを2mとして解析を行った。解析区間全体では、縦断方向に871、横断方向に383のメッシュが存在している。構築したフィルタリング方法によって得られた土地被覆分類を図-9に示す。

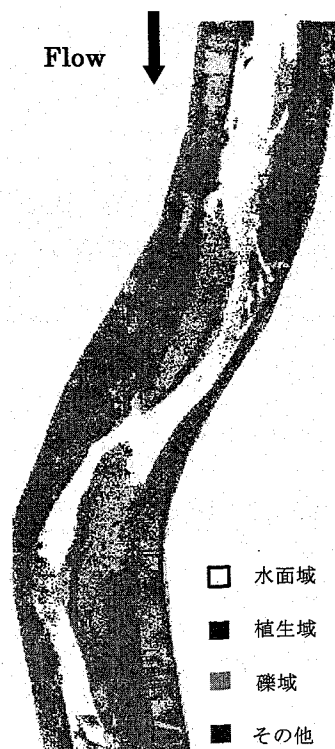


図-9 分類された土地被覆

図-1と比較すると、水域においても水域と判定されていないメッシュが残っていること、全体的に植生メッシュが多いこと、礫域の特定が困難であるため高水敷において礫域として分類しているメッシュが存在すること等、未だいくつかの問題点が残されている。また、地被分類表に用いた閾値は本計測データに基づいて定められているため、未だ一般的な分類法とは言えず、検証データを増やし、検討する必要がある。しかし、本計測区間においては全体的に河川の地覆状況を表していると言える。

(4) 地覆別のフィルタリング方法

植生が繁茂する状況では地盤高が取得できない問題に対応するために、以下に示すように、地盤高を内挿する。植生が繁茂している箇所では、周囲のメッシュ情報も用いる必要があるため、メッシュを拡大し、地盤高を内挿することにより精度向上を図る。まず、この方法を用いる時の前提条件を以下に示す。

- ・ 植生メッシュであること。また、そのメッシュにおいて、メッシュ内で内挿した最低地盤高点 ($\min z(j)$) と次のメッシュの最低地盤高点 ($\min z(j+1)$) の変化角度が 30° 以上であることを条

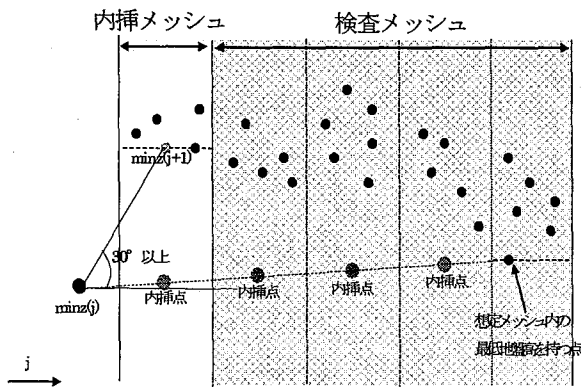


図-10 地盤高の一次直線内挿法

件とする。これは、砂の安息角 30° であることを考慮している。

植生域における地盤高の内挿法を以下に説明する。

- ・地盤高を取得していると予測できるメッシュまでメッシュの大きさを広げ、このメッシュを検査メッシュとする。
- ・想定メッシュ内で植生以外のメッシュが無ければ、そのメッシュ内で地盤高の一番低い点を探す。
- ・この点を地盤高データであると仮定し、この点と $\text{minz}(j)$ を結ぶ直線を作成する。この直線より、各メッシュの最低地盤高を持つ点を内挿する。

また、検査メッシュ内に地盤高データを含むメッシュ（礫域もしくはその他の分類）が存在した場合には、そのメッシュ内の最低地盤高の一次直線により植生メッシュに最低地盤高を内挿する。この方法では、検査メッシュの大きさはデータ密度×メッシュの大きさを基に決めなくてはならない。本計測では、2mメッシュを用いた場合、後述する実測値の比較から、地盤高を捉えるためには最低4メッシュ必要であった。なお、地盤高データを含むメッシュ（礫域またはその他の分類）では、地盤高データの平均値をメッシュデータとしている。

4. 河川の物理環境データの推定と検証

被覆分類を考慮した新しいフィルタリング方法によって、メッシュデータの他に水面データ、植生データ、礫データを得ることが可能である。ここでは、得られたメッシュデータの検証と、得られたメッシュデータを用いた河川水位と礫径の推定法の検討を行う。

(1) 地盤高

図-11、図-12に前章の地被分類に基づくフィルタリング処理により得られたメッシュデータと測量データの比較を示す。図-3、図-4に示した一様フィルタにより得られるメッシュデータと比較すると、植生域であっても2mメッシュ内に地盤高データを含む場合（図-10）には結果に変化はない。しかし、図-11において、2mメッシュでは地盤が捉えられていない植生が密な箇所では、

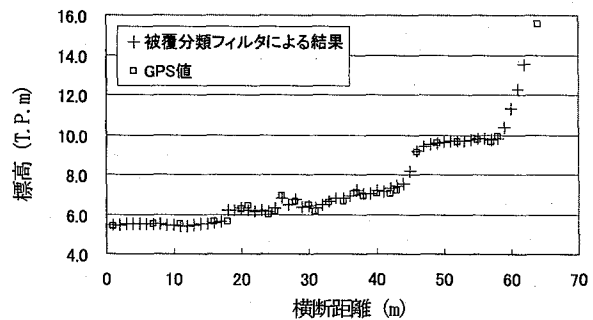


図-11 第二見通し線におけるメッシュデータの精度検証

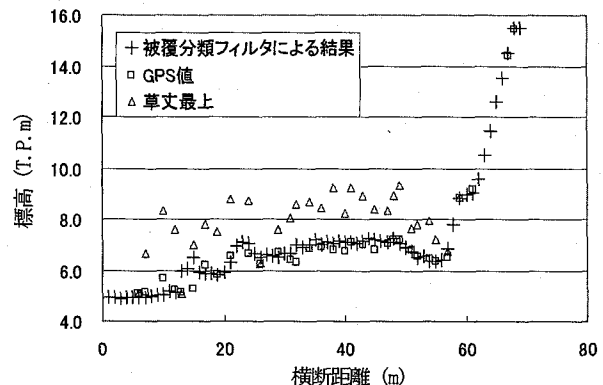


図-12 11.6K断面におけるメッシュデータの精度検証

図-4の一樣フィルタに比べて改善されていることが確認できる。

(2) 河川水位

先に述べたように、本レーザ計測では水域ではデータが取得できないが、河床高は緩やかに変化することから、水際近傍のデータは水際水位データと見なせる。以下に、河川水位の推定法を述べる。

- ・各メッシュにおいて、取得点密度を計算する。それらの取得点密度の横断方向の勾配を計算する。
- ・密度勾配が急であるメッシュを水際メッシュとする。水際メッシュ内の点に対して、縦断的なメッシュ（本解析では20mメッシュ）で区切り、そのメッシュ内で一番低い点を縦断メッシュ内の推定水位とする。

図-13に(a)左岸、(b)右岸の水際における縦断水位の実測値と推定値の比較を示す。全体的に推定値は実測値の水面形を表している。図-14に、両岸における実測値と解析結果の誤差を示す。誤差では10cm未満であり、0～2.5cm、2.5～5cmの間に多く分布している。両計測とも数cmのGPSの計測誤差を含むこと、誤差が正負均等に生じていることから、提案する方法によって河川水位は高精度で算出可能と言える。

(3) 礫径

前述のように、本計測法では点に近い計測が可能であり、高精度かつ高密度の三次元データが得られることから、メッシュ内の小スケールの変動が捉えられる。ここでは、これを応用し、礫径の推定法を検討する。

フットプリント径に比べ礫径が大きい場合、小スケール

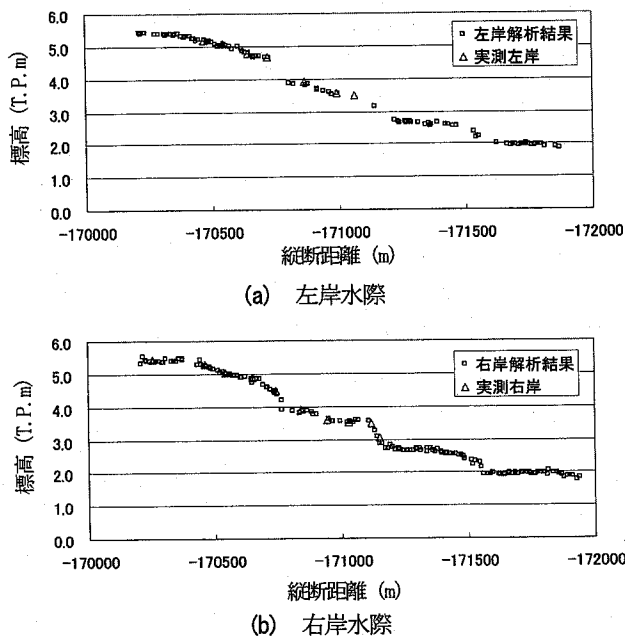


図-13 実測水位と推定水位の比較

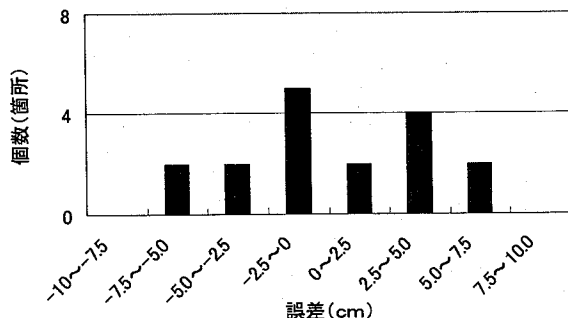


図-14 実測水位と推定水位の誤差分布

ルの変動は礫の高さによって生ずる。このため、礫域の地盤高の標準偏差 RMS は礫径の代表値に関連深いと考えられる。図-15は図-1に示す礫河原I, IIの断面において写真測量により計測された礫域の中央粒径 d_{50} とその箇所の地盤高の標準偏差 Z_{RMS} の関係である。 d_{50} は RMS に強く関係しており、本計測の範囲において両者は式(1)の線形関係にあることが分かる。

$$d_{50} = \alpha \cdot Z_{RMS} \quad (1)$$

$\alpha=3.5$ とすると、本研究では Z_{RMS} から推定される d_{50} の誤差は10%未満であることが分かった。礫の安定上、鉛直方向の長さは水平方向の長さ比べて小さいことから、 $\alpha=3.5$ はある程度妥当な値と考えられる。このことから、本計測法は、礫床河川における平均粒径の空間分布の算定に応用できると考えられる。以下に適用範囲を考察する。まず、ラストパルスを使用する場合、フットプリント径よりも小さい礫は計測されないため、小さな粒径に対しては高度を低くする等してフットプリント径を小さくする必要がある。また、この方法では一方向の長さから体積を推測することになるため、礫の形が変化すると α の値は変化する。統計量の違いから、粒度分布によ

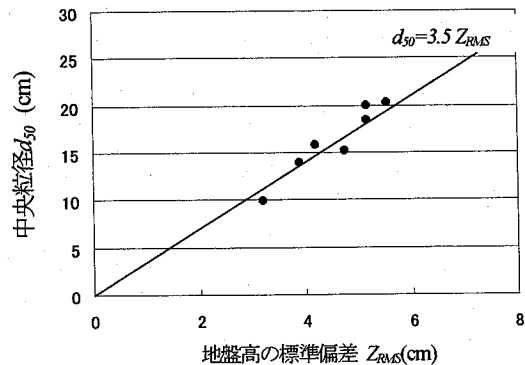


図-15 地盤高の標準偏差 Z_{RMS} と中央粒径 d_{50} の関係

ても α の値は変化することが予想されるため、適用の際には代表地点において α のキャリブレーションが必要であろう。

5. 結論

本研究で得られた主要な知見を以下に示す。

- ・ 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。
- ・ 土地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。
- ・ 土地被覆別に特徴を調べ、これ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は実測地盤高を精度良く捉えることを示した。
- ・ 水際データから河川水位推定法を提案し、高精度で縦断水面形が得られることを示した。
- ・ 礫の平均粒径は地盤高の標準偏差と線形関係にあることから、容易に算出できることを示した。

6. 今後の課題

本レーザ測量では、ラストパルスから三次元座標値・受光強度を取得しているが、植生高を精度良く得るためにはファーストパルスの取得が必要である。また、洪水流解析への適用を考慮すると、三次元計測データから洪水流解析までの一連の手続きを実行する処理プログラムの整備を進める必要がある。そのためには、水面下の河床状況の推定を行うことも重要となる。

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.

(2007.4.5受付)