

◆ 報 文 ◆

レーザープロファイラ及び空中写真による河川中流域の
河床標高推定手法の開発

傳田正利* 時岡利和** 天野邦彦***

1. はじめに

通常の河川計画や維持管理では、河川の水深測量は縦断方向に数百m間隔で横断測量が行われている。これは、河川計画、水理計算等を行う場合には十分な精度である。

しかし、河川環境保全や河川生態系を構成する生物に配慮した河川事業を行う場合には、現行より詳細な物理環境情報の取得が望ましい場合もある。それは、河川をはじめ、あらゆる生態系を構成する生物の生態は微細な空間的不均質性に大きく影響を受けるためである。河川に生息する生物も例外ではなく、河川の物理環境の空間的不均質性から大きく影響を受けて生息している¹⁾。その中でも水深分布、言い換えれば河床標高の面的変化は重要な物理環境情報である。河川生態系を特徴づける水の流れは、河床標高により大きく影響を受け平面流況を特徴付ける。また、瀬、淵等の流れの構造的な要素を特徴づける上で河床標高は重要な要素となるし、魚類をはじめとする水生生物の生息状況に大きな影響を与える。以上のような理由から、河川環境保全の際には高精度かつ面的に河床標高を把握する必要がある。

しかし、現行の測量技術で高精度かつ面的な河床標高を把握するには、多くの労力と多大なコストが必要となる。このため、高精度、面的取得可能かつ低コストな河床標高推定手法を開発する必要がある。既往研究でも河川内の河床標高を推定する方法の開発が積極的に行われてきた。その代表的なものは、3ラインセンサー（3つのライン式CCDを備え三方向の画像を同時に取得可能な光学センサ）等で河川内を計測し河床標高を推定する方法で、その有効性は実証されてきた。また、他の測量技術も河床標高推定の可能性を大きく広げている^{2), 3), 4), 5)}。

特に、レーザープロファイラ（種々の名称がある

が以下、プロファイラとする）及び高解像度デジタル空中写真（以下、空中写真）は大きな可能性を秘めている。プロファイラは、レーザを連続照射し、対象物に反射して戻ってくるまでの時間と照射角度から地形や構造物の形状を広い範囲で面的に計測する装置で、現行の測量技術、空中写真よりもより詳細な地形情報を取得できるのが特徴である。プロファイラ及び空中写真による詳細な地形測量データは水際部までの高精度地形計測を可能にし、公共測量技術として認可され全国的な普及及びそのデータの活用が予想されている⁶⁾。

プロファイラ及び空中写真を用いて河床標高を推定しようとする場合、現状の技術だけでは河床標高は把握できず何らかの技術開発が必要である。その解決法として、河床標高は陸上地形と無関係ではない点に着目した。河川微地形の形成には、出水が大きく影響しており、平水時に干出している水際地形との関係が強い、すなわち、河床標高は河床波の低地部が水没しているもので河道内の陸上地形と関係性が深いと考えられる。このため、プロファイラの陸上部の地形を用いれば陸上地形と連続する河床波の概略を補間することが出来ると考えられる。また、空中写真は水深分布を色の濃淡として映し出している。そこで、この2つの情報を組み合わせることにより河床標高の推定が出来ると考えた。

このような背景から本報告では、リモートセンシング技術の一つとして普及が進むプロファイラ及び空中写真を用いて河川内の河床標高を推定する手法を開発し、その実用性・発展性を議論することを目的とする。

2. 研究の方法

2.1 調査地の概要

調査は2005年3月に信濃川水系千曲川で行った。本河川は流域面積7163km²、流路延長214kmの大河川であり甲武信ヶ岳（標高2475m）から長野盆地を流下し新潟県境に入り信濃川と名前を変える。調査地は千曲川の中流部に位置する鼠橋付近（長

Development of an Estimation Method of the River Bed Elevation Using Laser Profiler and Digital Aerial Photograph Using Laser Profiler and Digital Aerial Photograph

野県埴科郡坂城町、東経138° 12' 46"、北緯36° 25' 14.4"、以下、調査地とする)で行った。調査地の河床は、主に礫で構成され河床波形態は複列砂州である。調査地内の河道には瀬淵構造が発達し多様な河床標高になっている。水深は最深部で約2m程度である。比高の高い中州や、高水敷上にはハリエンジュ、ヤナギ等の植生群落が発達している。

2.2 プロファイラ、空中写真撮影の概要

2005年2月15日に調査地でプロファイラデータの取得及び空中写真の撮影を行った。プロファイラデータ(Digital Elevation Model、以下、DEM)の取得にはLeica社ALS50、空中写真を撮影にはLeica社DSSを用いた。プロファイラデータの取得及び空中写真撮影は、撮影(対地)高度1,200m、コース間隔、300mで行った。飛行コース、撮影計画、計測パラメータ等の航空測量の諸元は、プロファイラの最終測量成果が1mグリッドのDEMデータ、空中写真の地上解像度が0.2m以下になるように設定し航空測量を行った。

2.3 現地調査

プロファイラ及び空中写真を用いた河床標高推定結果を検証するため、水深測量及び河床標高測

定を行った。現地測量地点及び河床標高検証断面を図-1及び2に示す。

2005年3月7日に調査区域1で行った水深測量は測量用スタッフを用い実測した。航空測量日と水深測量日の流量はほぼ同一で、調査地内の水深に大きな差はないと考えられた。水深をスタッフで3回計測した平均値を水深とし計測地点の位置座標をDGPSで計測した。

河床標高測定は、2005年2月22~25日に図-1に示す調査区域2で行った。瀬回し工(瀬の上流部に盛土を設置し流量を減少させる工事)を行い、調査区域2内の瀬淵構造内及び周辺部の地形測量を行った。測量は、トータルステーションを用いて行った。2005年2~3月にかけて調査地内には大規模な出水がなく大きな地形変化はないため、プロファイラ及び空中写真を用いた河床標高推定結果と地形を比較することが可能であった。

2.4 プロファイラ及び空中写真を用いた河床標高推定方法

2.4.1 空中写真のRGB値を用いた水深分布推定手法

取得した空中写真から、ESRI社ERDAS IMAGINE Ver8.7(以下、画像解析ソフト)を用いて以下の手順で水深分布を推定する計算を行った。

- ①空中写真のピクセル値の平滑化：空中写真の画像の各ピクセルは場所によりノイズが生じているため、画像フィルタを用い平滑化した。
- ②空中写真のRGB値と水深実測値の重回帰式の作成：平滑化した空中写真の各ピクセルの中央点のRGB値と水深データの重回帰式を作成した。重回帰式は、明瞭な瀬淵構造を有する調査区間2を対象に作成した。この重回帰式を用いて得られたRGB値に基づく水深分布推定図を作成した。

2.4.2 空中写真のRGB値及びDEMを用いた河床標高推定手法

2.4.1-②で作成した水深分布推定図では各ピクセルのRGB値が急激に変動し水深分布推定図をそのまま河床標高推定に用いると不自然な河床標高推定を行う可能性が高い。このため、水深分布推定図と河道周辺のDEMを併用してスプライン補間により内挿する以下の方法を開発した。

- ①水深分布推定図からの河床標高補間計算用ポイント(補間点)の抽出：水深分布推定図から河床標高推定に利用できるピクセルを抽出するため、以下の処理を行った。水深分布推定図を構

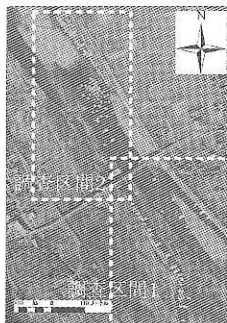


図-1 調査地の概要と調査区間

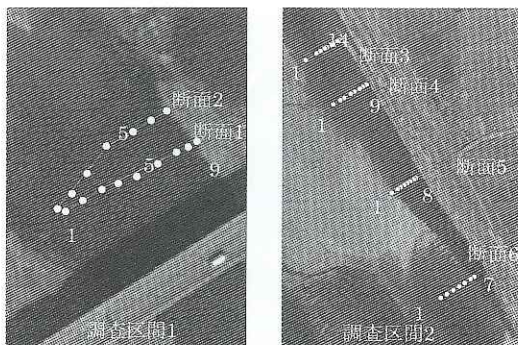


図-2 調査区間ごとの断面及び測点番号

成する各ピクセル（以下、対象ピクセル）から半径10ピクセル（以下、対象範囲内）の近傍検索を行った。対象ピクセルが他のピクセルと比較して著しく異なる水深をとらない場合には、対象範囲で最も水深が深いピクセル（以下、比較ピクセル）を抽出した。対象ピクセルと比較ピクセルの値を比較し対象ピクセルの水深が深い場合、対象ピクセルを河床標高の補間点として採用した。この処理を水深分布推定図内の全ピクセルの水深データを対象に実施した。この処理により水深分布図内にあるノイズを除去し水深分布図内の極値点を採用することが可能となった。

②水面標高の作成：GIS（ESRI社、ArcGIS Ver9.0）を用い、水域周辺のDEMデータをTIN（Triangle Irregular Network）解析し水面の標高値（以下、水面標高）を算出した。

③②で作成した水面標高値から①で抽出した補間点の水深を引き補間点の河床面高を抽出した。

2.4.3 データ解析

推定した河床標高データと現地測量した水深データを比較し、河床標高推定精度を検証した。以下、プロファイル及び空中写真を用いた上記のアルゴリズムによる河床標高推定手法を本手法と記述する。

2.5 プロファイル及び空中写真を用いた河床標高推定結果の検証

検証については、現地調査地点の実測値と本手法による推定値の差（以下、誤差とする）の記述統計（平均値、標準偏差、中央値、最頻値、最大値、最小値）による検証を行った。また、誤差が大きい地点の特徴、誤差が小さい箇所の特徴を空中写真と重ねあわせ分析した。

さらに、瀬淵の断面形状の推定結果を検証する目的で、推定した瀬淵の断面形状と瀬回し工事により実測した瀬淵の断面形状を比較した。比較は瀬淵内の任意の横断面形状をGIS（ESRI社、ArcGIS Ver9.0）を用いて比較した。

3. 結果

3.1 空中写真のRGB値のみによる水深推定結果

RGB値から水深を推定する重回帰式を作成した結果、式（1）が得られた。図-4に重回帰式と水深データの相関図を示す。

重回帰式と水深データは良好な相関関係を示した。水深約1.2mまでは式（1）による推定と実測

データは良好な相関関係を示す。しかし、水深約1.2m以上では式（1）は実際の水深に対して浅く推定する傾向があった。

$$D = -0.062 \times R + 0.094 \times G - 0.342 \times B \quad (1)$$

D:水深(m), R:赤バンド, G:緑バンド, B:青バンド

RGB値からの水深分布を推定した結果を図-5に示す。式（1）により水域の抽出、瀬淵の概略、を表現している。しかし、水深推定結果の一部は極端に大きく推定されるなど、精度は不安定であった。

3.2 RGBによる水深推定と河川周辺部のDEMデータ併用による水深推定結果

新たに開発した本手法による水深分布の推定結

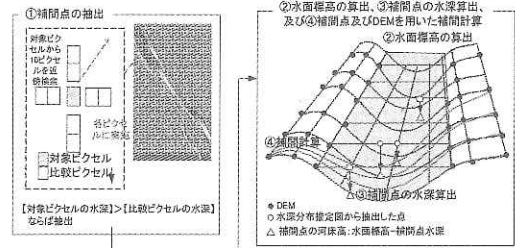


図-3 空中写真のRGB値及びDEMを用いた河床標高推定手法の概要

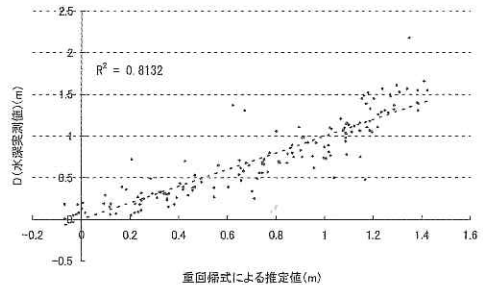


図-4 重回帰式による推定値と水深実測値の相関図

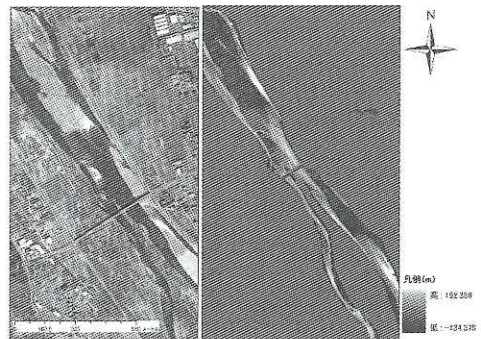


図-5 調査区間の空中写真と水深分布図の比較

果を図-6に示す。図-6では図-5と比較して極端に大きく推定されるなどの問題点が解消され、水深推定結果は現地の瀬淵構造の形状に近いことが確認できた。

河床標高実測データと河床標高推定結果の差(以下、誤差とする)の記述統計結果を表-1に示す。平均誤差は0.43m、中央値は0.29mであった。誤差の最小値は0.002m、最大値は3.09mであった。図-7に誤差のヒストグラム及び累積確率を示す。誤差0.25mが最も多く0.5、0.75mと誤差発生回数が続いた。誤差0.5mまでの累積確率が72.5%となった。

誤差が大きい地点は、①付着藻類の現存量が多い地点、②河岸沿いの地点で現地調査時に急勾配であった箇所であることが多かった。①は図-8の瀬の中央部、②は図-9の橋梁直下部が代表例として挙げられる。

誤差が小さい地点は、河道中央部や水面の波立

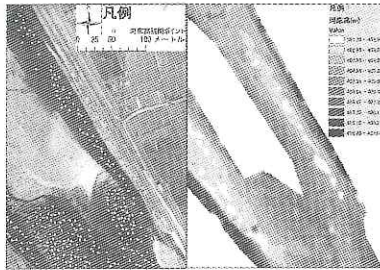


図-6 調査区間の水深補間ポイント(左)と本手法による河床標高推定結果(右)

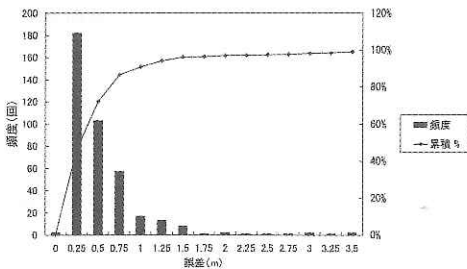


図-7 誤差のヒストグラム及び累積確率

表-1 河床標高推定誤差の分布

	調査区間1	調査区間2	合計
平均	0.36	0.51	0.43
標準誤差	0.03	0.04	0.04
中央値(メジアン)	0.28	0.29	0.29
最頻値(モード)	0.18	0.10	0.14
標準偏差	0.39	0.69	0.54

単位：m

ちが少ない箇所であることが多かった。

調査区間1で実測と推定を横断面で比較した結果を図-10、11に示す。断面1では断面形を概略推定できた。しかし、右岸沿いでは実際の河床よりも高く推定された。断面2では横断面中央部で実際の河床標高よりも約3m低く推定された。

調査区間2(断面3、4)の実測と推定の比較結果を図-12、13に示す。断面3で横断形状の概要を高精度で推定した結果となった。微細な横断面形状は約0.5m程度異なるが断面形状の概略は精度良く推定できた。断面4では一部2.5m程度異なる地点が存在し断面の再現に問題があると考えられる。

4. 考察

4.1 本手法による河床標高推定精度と実用性

本手法を用いた河床標高推定の誤差は平均約0.43m、最頻値で約0.14mであった(表-1)。誤差は約0.25~0.5mの範囲に発生頻度が集中し、誤差0.5m以下の確率が高い(図-7)。このことは、本

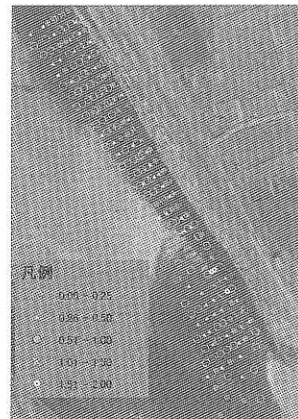


図-8 調査区域2の河床標高推定誤差



図-9 調査区間1の河床標高推定誤差

手法により河床標高を一定の精度で推定することが可能であることを示している。

調査区間1及び2で、河道内断面形状を概ね推定できている(図-10~13)。調査区間1の任意点の河床標高も誤差約0.5mで推定している事から本手法による河床標高推定の信頼性は高いと考えられる。生物生息空間調査のような厳密な水深分布図を必要としない調査には本手法は適していると考えられる。

しかし、誤差約0.75m以上の河床標高推定精度が十分でない箇所(以下、誤推定箇所)も存在する(図-10、11)。誤推定箇所は、①河道内微地形(砂州等)の周縁部で水深の浅い箇所、②河道沿いの急勾配部(オーバーハング部)が多いと考えられる。

①は、河道内微地形の周縁部に付着藻類等が面的に繁茂し空中写真上では黒く見える。空中写真のRGB値から水深を推定する場合、黒く判読される箇所は水深が深いと判読される。面的に広がる黒い箇所は、近傍検索による平滑化でも除去できず、河床標高の補間点として残ってしまい河床標高推定精度に影響を与えたと考えられる。対策としては、付着藻類の繁茂が著しい箇所を除去する方法が考えられる(図-11)。

②は、低水路河道周辺のDEMと水面下の河床標高補間ポイントを空間内挿する計算手法が要因と考えられる。河道内の河床標高補完ポイントは、補間点としての信頼性を向上するため近傍検索処理し数を絞り込んでいる。このため、波立ちが多い箇所の場合、水際部に補間点が少なくなる傾向がある。スプラインのような補間計算の場合、補間点が少ない箇所は平滑化される。その結果、河岸の急勾配部が平滑化され急激に変化する河床標高変化は表現できなかった可能性が高いと考えられる(図-10)。しかし、波立ちが多い箇所ではRGB値のみによる方法でも良好な判定は不可能であり、このことが本手法の優位性を損なうものではない。①、②の場合を除けば、本手法には対象区間の瀬淵構造等の概略地形等の推定には十分な精度があると考えられる。本手法の場合、空中写真の情報だけに依存せず河道周辺のDEMデータを使用するため、この追加情報を利用することで河床標高をより安定して取得できる利点がある。水面の反射、RGB値の不安定さを除去した面的な河床標高データを安定して収集する手法として有効であると考えられる(図-8、9)。

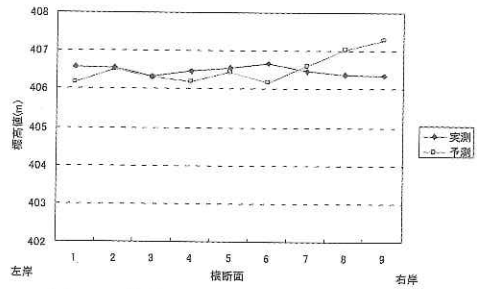


図-10 調査区間1の横断面比較 (断面1)

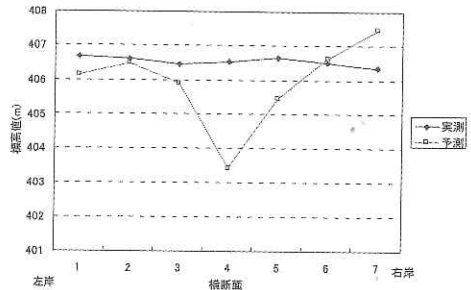


図-11 調査区間1の横断面比較 (断面2)

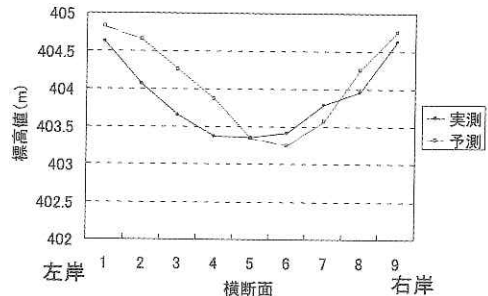


図-12 調査区間2の横断面比較 (断面3)

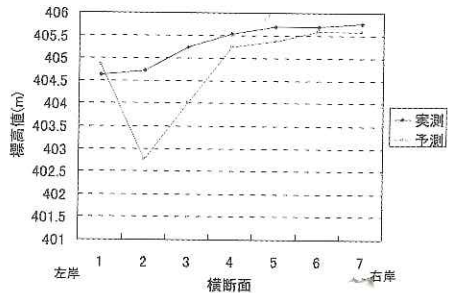


図-13 調査区間2の横断面比較 (断面4)

4.2 本手法の河川環境研究への発展性とデータ取得時の留意点

プロファイラ及び空中写真により河道内地形(陸域の地形・植生)を詳細に把握できると同時に本手法で河道内の地形(河床標高)を把握する

ことが出来れば、河道内微地形を連続的に把握することが可能になる。このことは河川管理・河川環境管理に大きな可能性を与えると考えられる。河床標高の時系列変化が分かれば、治水・河川管理上重要である河床変動状況を把握でき、平面的な河道内微地形変化・河床変動を把握することが可能となる。そのためには、プロファイラ及び空中写真の定期的な取得を行う必要がある。また、取得したデータ間の比較を容易に行えるよう、データ仕様の統一を図る必要がある。

本研究で行ったように、プロファイラ及び空中写真のデータは、現地調査による校正データが整備されることで、リモートセンシングの情報として大いに効果を発揮すると考えられる。例えば、プロファイラ及び空中写真データの取得と同時に植物群落調査を行えば、概略の植物群落図等を作成することが可能となる。ここに、陸上部のプロファイラデータを重ねれば、三次元的な植物の生育状況を把握することが可能となる。この作業を複数年実施すれば植物群落の変化を定量的に把握できる。植物群落の変化に水理計算から算定した冠水頻度や出水の外力状況を関係づければ、植物群落の管理に大きな情報を提供すると考えられる⁷⁾。

5. まとめ

1) プロファイラの陸上部の地形及び水深の変化に伴う空中写真RGB値を利用し内挿計算を行うことで河床標高の面的な分布を把握する手法の開発を行った。その結果、河床標高の面的な分布を概ね良好な精度（誤差平均0.43m、誤差の標準偏差0.54m、誤差の中央値0.29m）で把握することが可能になった。

3) 本手法の誤差発生要因を分析した結果、付着

藻類等の繁茂により空中写真のRGB値が特異な値をとる箇所、河岸沿いの急勾配部の河床標高推定精度に問題があることが明らかになった。今後、補間計算を行う際の補間ポイントの検討が必要であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) M. G. Turner, R. H. Gardner, R. V. O' Neill 著、中越信和・原慶太郎監訳：景観生態学, pp15-29、文一総合出版, 2004.
- 2) 井上 優・大沼克弘・藤田光一：3ラインセンサーを用いた河川の河床標高推定、土木学会年次学術講演会講演集, pp525-526, 2004.
- 3) Carl J. Legleiter, Dar A. Roberts, W. Andrew Marcus, Mark A. Fonstad : Passive optical remotesensing of river channel morphology and in-stream habitat: Physical basis and feasibility, Remote Sensing of Environment, 93, pp.493-510, 2004.
- 4) 全 炳徳、後藤恵之輔、水深推測のためのリモートセンシング手法の比較と提案、日本リモートセンシング学会誌, Vol.13, No.4, pp.41-50, 1993.
- 5) 黒木敏郎、海洋学講座 第14巻 海洋測定法、東京大学出版会, 1972.
- 6) 航空レーザ測量ワーキンググループ：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.
- 7) 天野邦彦・傳田正利・時岡利和・大石哲也：水理特性に着目した河川微地形の生態的機能評価の試み、河川技術論文集, pp.483-488, 2006.

傳田正利*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
河川生態チーム研究員
Masatoshi DENDA

時岡利和**



独立行政法人土木研究所
ICHARM水災害研究グループ
国際普及チーム研究員(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水環境研究グループ河川生態チーム研究員)
Toshikazu TOKIOKA

天野邦彦***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所水環境研究グループ
河川生態チーム上席研究員、工博
Kunihiko AMANO