

レーザプロファイラ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

DEVELOPMENT OF A METHOD TO ESTIMATE THE RIVER BED ELEVATION USING LASER PROFILER AND DIGITAL AERIAL PHOTOGRAPH

傳田正利¹・時岡利和²・天野邦彦³

Masatoshi DENDA, Toshikazu TOKIOKA and Kunihiko AMANO

¹正会員 (独) 土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 (独) 土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 工博 (独) 土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

To enhance the efficiency of sounding in rivers, we have developed and assessed a new water depth estimation method using digital elevation model obtained by laser profiler and RGB value of digital aerial photograph.

In this field study, average discrepancy between actual measurement and estimation with the new method was about 0.43m. The new method is able to estimate river bed elevation and cross section form schematically.

Key Words : Laser profiler, digital dir photograph, river bed elevation, digital elevation model, RGB

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が、河川計画、水理計算等を行う場合には現行の測量で十分な精度である。

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。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、言い換えれば河床高の面的変化(以下、河床高とする)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、淵等の景観要素を特徴づける上で河床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ラインセンサー等で河川内を計測し河床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⁹⁾。

プロファイラ及び空中写真を用いて河床高を推定しようとする場合、現状の技術だけでは河床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高の推定が出来ると考えた。

このような背景から本研究では、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

(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（長野県埴科郡坂城町、東経138°12′4.6″、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) 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定の諸元は、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。

(3) 現地調査

プロファイラ及び空中写真を用いた河床高推定結果を検証するため、水深測量及び河床高測定を行った。現地測量地点及び河床高検証断面を図-1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

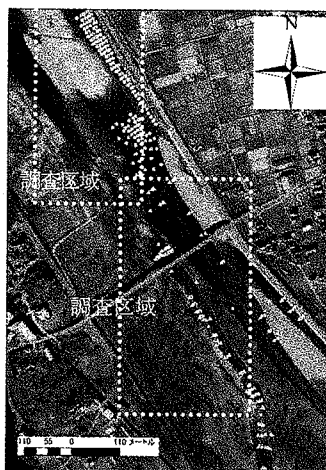


図-1 調査地の概要と調査区間

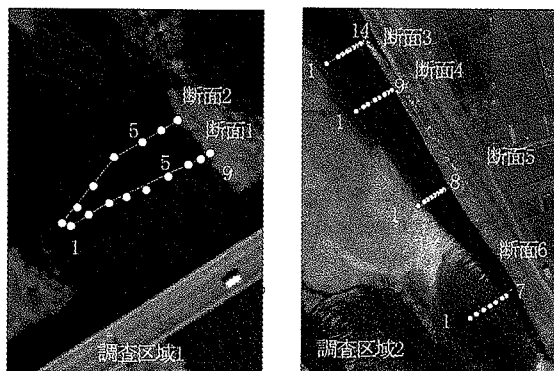


図-2 調査区間ごとの断面及び測点番号

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内の瀬淵構造周辺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高推定結果と地形を比較することが可能であった。

(4) プロファイラ及び空中写真を用いた河床高推定方法 a) 空中写真のRGB値を用いたによる河床高推定手法

取得したDEM及び空中写真から、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河床高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 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。調査区間 2 は、河床高データのみ計測したため、③で示す方法で水面の標高値を作成後、水面の標高値と河床高の差分を水深データとした。空中写真の RGB 値と作成した重回帰式から水深分布図を作成した。

- ③ 水面標高の作成：水域周辺の DEM データから GIS で TIN (Triangle Irregular Network) 解析し水面の標高値 (以下、水面標高) を算出した。
- ④ 水深測量結果の河床高標高値への変換：水深測量で得た水深データは以下の手順で標高値に変換した。水深計測した場所の位置座標から平面的に最も近い水面標高を検索した。水面標高から水深計測した場所の水面高とし、水面高から水深データをひき河床高の標高値とした。

b) 空中写真の RGB 値及び DEM を用いた河床高推定手法

- ① a)-②で作成した空中写真の RGB 値を用いた水深分布図ではピクセルごとに RGB 値が変動し水深分布図をそのまま河床高推定に用いると不自然な河床高推定を行う可能性が高い。このため、水深分布図と河道周辺の DEM を併用してスプライン補間により内挿する方法を開発しこれを用いた。水深分布図から河床高として信頼性の高いピクセル値を抽出する以下の処理を行った。

水深分布図を構成する全ピクセルごとに近傍解析 (フィルタリング処理) を行った。水深分布図を構成するピクセルごとに対象ピクセルから 10×10ピクセルの近傍検索を行い対象範囲で最も深い (河床高が低い) ピクセル (以下、比較ピクセル) を抽出した。その後、対象ピクセルと比較ピクセルの値を比較し深い方のピクセル値を河床高の補間ポイントとして採用した。

- ② a)-③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ポイントの河床面高を抽出した。
- ③ a)-③で計算した河床高データの標高値と水域周辺 (DEM 測量時の水域から近傍 10m) の DEM を合成し補間計算の地形データ (以下、地形データ) を作成した。地形データの陸域 DEM 全てに対しスプライン補間を行い河床高を推定した。スプライン補間は、河川の特定の横断方向だけでなく対象となる地点から上下流 10m ずつに該当する地形データ全ての組み合わせの補間を行いその平均値を河床高とした。この処理を全ての陸域 DEM に対して行った。

c) データ解析

推定した河床高データと現地測量した水深データを比較し、河床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高推定手法を本手法と記述する。

(5) プロファイル及び空中写真を用いた河床高推定結果

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 (図-2)。

3. 結果

(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-3 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。

RGB 値からの水深分布を推定した結果を図-4 に示す。式 (1) により良好に水域内の瀬淵構造を表現していることがわかる。しかし、水深が深い淵では淵全体が均一の水深として推定される傾向があった。

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

D: 水深(m), R: 赤バンド, G: 緑バンド, B: 青バンド

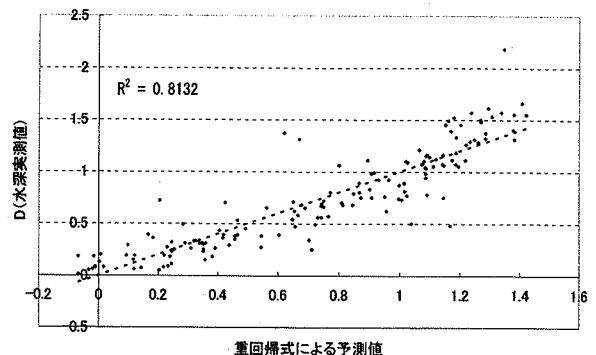


図-3 重回帰式による推定値と水深実測値の相関図

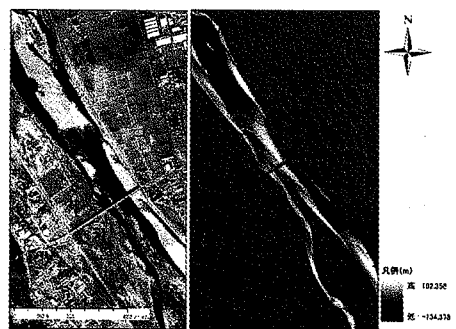


図-4 調査区域の空中写真と水深分布図の比較

(2)RGBによる水深推定と河川周辺の部の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果を図-5に示す。図-5では図-4と比較して瀬淵の微妙な水深変化を表現していることがわかる。

河床高実測データと河床高推定結果の差（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-6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-7の瀬の中央部、②は図-8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-9,10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高よりも約3m低く推定された。

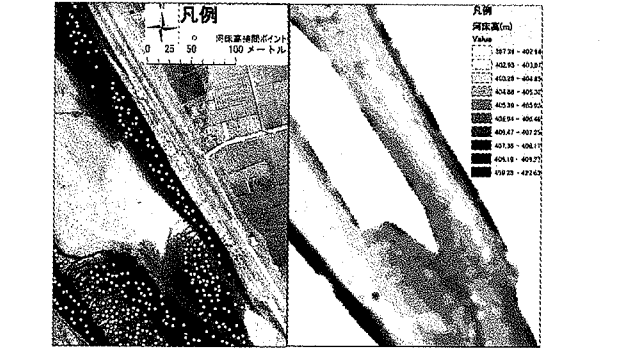


図-5 調査区域の水深補間ポイントと本手法による河床高推定結果

表-1 調査区域の水深分布図

	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

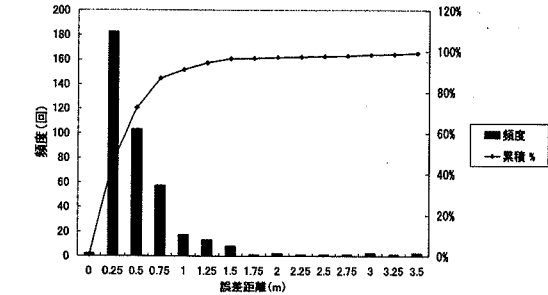


図-6 誤差のヒストグラム及び累積確率

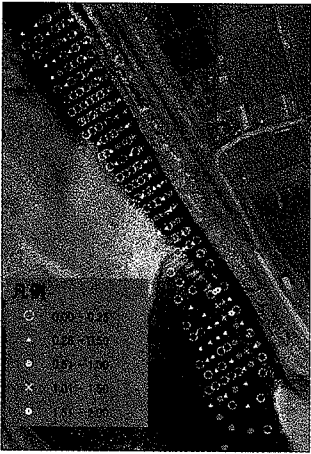


図-7 調査区間ごとの河床高推定誤差



図-8 調査区間ごとの河床高推定誤差

調査区間2（断面3, 4, 5, 6）の実測と推定の比較結果を図-11, 12, 13, 14に示す。断面3, 4, 5で横断面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6では一部1.5m程度異なる地点が存在するが、全体的に断面形状を良好に再現していることがわかる。

4. 考察

(1)本手法による河床高推定精度と実用性

本手法を用いた河床高推定精度の誤差は平均約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-6）。このことは、本手法により河床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-9～14）。断面形状に関しては空中写真のRGB値と水深の重回帰式を作った区間（調査区間2）で検証しているため横断面形状推定精度が高い可能性もある。調査区間1の任意点の河床高も誤差約0.5mで推定している事から本手法による河床高推定の信頼性は高いと考えられる。

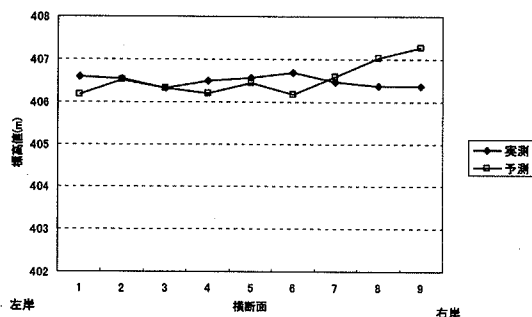


図-9 調査区間1の横断面比較 (断面1)

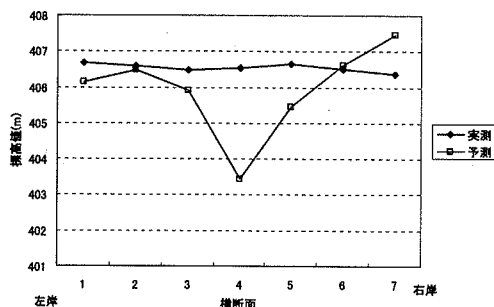


図-10 調査区間1の横断面比較 (断面2)

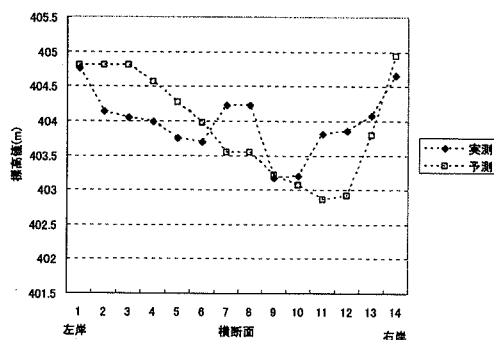


図-11 調査区間2の横断面比較 (断面3)

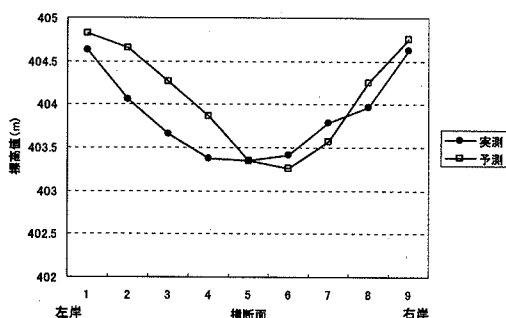


図-12 調査区間2の横断面比較 (断面4)

しかし、誤差約0.75以上の河床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。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）が多いとが考えられる（図-9, 10, 14）。

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

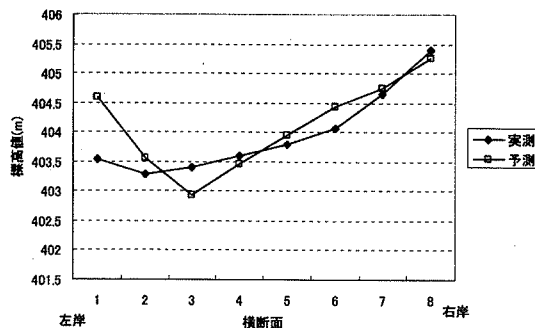


図-13 調査区間2の横断面比較 (断面5)

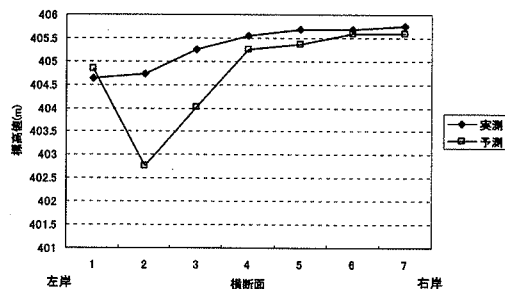


図-14 調査区間2の横断面比較 (断面6)

水深を推定する場合、黒く判読される箇所が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、河床高の補間点として残ってしまい河床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。

②は、低水路河道周辺のDEMと水面下の河床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高変化は表現できなかった可能性が高いと考えられる。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。

(2) 本手法と他の河床高推定手法の比較

リモートセンシングによる河床高（水深分布）推定手法として、本手法の一部である画像のRGB値だけを利用することも可能である。しかし、RGB値だけの利用の場合、水面での太陽反射によるハレーションや瀬での波立ち等の影響を受ける場合もあり河道内の全ての河床高（水深分布）を安定して得ることが難しい可能性がある。

また、RGB値は空中写真を構成するピクセル値ごとに微妙に異なる可能性が高くRGB値をそのまま用いる推定では河床高は極度に不安定な状態になることが多い。

しかし、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-6, 7)。

本手法はコスト面でも他の手法よりも優れている。河床高を推定する場合、直接測量を行うか音響測深手法を利用する場合が多い。これらの手法は有効ではあるが面的に多量のデータ取得が難しい。本手法の利点は今後整備が進むと考えられるプロファイラ及び空中写真を利用し面的に高解像度の河床高データが有効活用が出来る点にある。本手法を用いれば、通常の河川管理の中で整備された空間データ(プロファイラ及び空中写真)を利用し新たな空間情報として河床高を生産できる利点がある。

(3) 本手法の河川環境研究への発展性

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・河川環境研究に大きな進展の可能性を与えると考えられる。

河床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の状況を正確に把握でき、平面的な河道内微地形・河床変動を把握することが可能となる。このことは同時に河床変動計算の精緻化の可能性を示す。河床高の面的分布は河床変動計算の検証・公正等に利用できる可能性があり、河川の維持管理上重要である河床の動態に関する研究に貢献する可能性が高い。

河道内微地形を水域・陸域ともに面的に把握できれば河川水理・生息空間評価等の研究に寄与すると考えられる。河川水理では、横断測量等限られた河床高データを用いて地形データを再現することが多い。プロファイラ及び本手法による河床高データを用いれば地形データの詳細な再現が可能になり平面流況解析の精度は向上すると考えられる。この向上は河川内の物理環境の精緻な再現を可能にすると同時に物理環境を通じた生息空間評価の精度を上げることが期待される。例えば、河川でPHABSIM(Physical Habitat Simulation)を行う場合に物理環境情報の中でも水深、流速の面的分布は重要な情報である。現地計測や地形データが正確でない状態では精度の高い面的な水深、流速データを入手することは極めて困難であった。本手法により現在の状況が改善される可能性が高く、物理環境を通じた生息空間評価手法の研究の進展に寄与する可能性が高いと考えられ、プロファイラ及び空中写真の積極的な利用が期待される。

5. 結論

- 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。
- 2) 本手法により河床高及び河道の横断面形状の概略での推定が可能となった。
- 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高推定精度に問題があることが明らかになった。
- 4) 河床高の面的な分布特性が明らかになることにより、河床変化傾向の把握、物理環境解析及び生息空間評価の精度向上への可能性が考えられ、本手法はその可能性を有する手法であると考えられた。

6. 謝辞

大日コンサルタント株式会社環境・水工部原田守啓氏には研究を進める上で有益な助言を頂いた。(株)パスココンサルタント事業部環境情報部農業情報技術課石岡義則氏には画像解析作業に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

7. 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高推定, 土木学会年次学術講演会講演集, pp525-526, 2004m
- 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

(2006. 4. 6 受付)