

岩床河川の精密測量および小型 UAV を用いた簡易測量の試み

Precise survey and simple survey with multi UAV in bedrock river

北海道大学工学部 環境社会工学科社会基盤学コース ○学生員 山口進(Susumu Yamaguchi)
 北海道大学大学院 工学研究院環境フィールド工学部門 教授 フェロー 清水康行(Yasuyuki Shimizu)
 寒地土木研究所 寒地河川チーム 研究員 正会員 井上卓也 (Takuya Inoue)
 (株)北開水エコンサルタント 前田育彦 (Ikuhiko Maeda) 藤崎秀樹 (Hideki Fujisaki) 伊賀久晃 (Hisaaki Iga)
 株式会社 水工技研 正会員 石田義明 (Yoshiaki Ishida)

1. 背景

近年、河床の岩盤が露出した河川が多く確認されており、そのような河川では、流水による剥離や乾湿の繰り返しおよびこれに伴う風化、流砂の衝突などにより、岩盤侵食が際限なく進むため、大規模な地形変化が生じることがある。

岩盤侵食は橋脚の根入れ不足や護岸の浮き上がりなどの問題を引き起こす。このような場合、まずは河床変動の将来予測が重要となるが、そのためにはまず精度の高い河川地形のデータを得ることが重要となる。

本研究では、豊平川上流に位置する花魁淵と呼ばれる岩盤が露出した区間を対象に、最新機器による岩床河川の精密測量を実施し、その計測手法や成果について考察を行った。そして、より実用的な現地観測方法を模索するため、前述の精密測量と並行して、小型 UAV を用いて空撮を行い、この空中写真から SfM-MVS 手法により対象地の標高データを取得する航空測量（以下 UAV 測量）も同時に行い、UAV による河川地形調査への可能性を考察した。

2. 花魁淵について

本研究の対象である豊平川上流部に位置する花魁淵と呼ばれる箇所では、河床の岩盤が露出し、泥岩の地層部分が削り込まれる活発な地形変化が見られ、一部では高低差 5m 程度の小滝が生じている（図-1）。小滝の上流側では、小さな起伏のある地形が広がっており、複雑な流路が形成されている。小滝下流部では川幅が狭まり、峡谷状の地形が見られる。

花魁淵の地形変化は、岩床河川としての特徴のみならず、小滝による下刻や、その遷急点である knickpoint が流砂の影響などで上流側へ後退する²⁾といった特徴を有すると考えられ、地形データの計測は岩床河川の研究上有意義である。

3. 精密測量

花魁淵の小滝の上下方向に約 800m の調査範囲（図-2）を設定し、後述する様々な計測方法を用いて最新の地形データを得た。

以下に 2015 年 7 月 29 日から 8 月 1 日までの 4 日間にわたって行われた測量についてまとめる。精密測量は、地上部では、地上レーザースキャナーによる計測、水中部では ADCP の測深機能による計測を主体として行われた。また、滝壺部・極深部では置き型の 3D 水中ソナー、浅瀬等これらの機器で測量できない箇所については、



図-1 豊平川花魁淵小滝部分



図-2 調査区間

TS(トータルステーション)やGPS 測量器を用いて単点測量を併用し、詳細な 3 次元地形形状の計測が行われた。

3.1 地上レーザースキャナー測量

使用した機器は RIEGL VZ-1000 である。地上レーザー測量では水中の地形データは取得不可能であるが、短時間で地上部の 3 次元データの取得が可能であり、デジタルカメラを搭載することで RGB カラー情報を点データに付加可能である。

計測は、現地の地形や河川状況に応じ、標定用のターゲット板を配置し、死角を捕う形で全 21 計測行われた。特に滝壺周辺については詳細な計測が行われた。地上



図-3 地上レーザー測量によって得られた
標高データを用いた鳥瞰図

レーザースキャナーは水面下の計測は不可能であるため、出来るだけ水位の低い時期である7月後半に実施され、水面下についてはTS及びGPSを用いて計測された。取得された点群データ情報について、空中のごみや虫などのノイズや、樹木・草木などを、反射率をもとに除去し、地盤高を抽出した(x, y, z)データを鳥瞰図で表示したものを図-3に示す。

地上レーザー計量では、点群データは航空レーザー等とは比較にならないほど細かく、詳細な地形把握が可能であった。また、通常の測量では難しいとされる急傾斜地等の危険箇所についても長距離レーザーを用いることにより安全に作業を行うことが出来た。たえだし、航空レーザー及びUAV測量と比較すると、計測範囲は狭く、状況に応じた使い方が必要である。また、レーザー計測機器全般の問題として水面下は計測不可という点に対してはグリーンレーザーという特殊なレーザーも存在するが、現時点では安全面から今回のような現場での使用は厳しいと判断した。

3.2 ADCP 測量

用いた機器はADCP1200kHzであり、流速・測深が可能である。観測船に搭載し、同時にRTK-GPSによって計測した船位(水位)の計測を行いこれから河床の座標データを算出した。ADCP測量は、後述するTS測量やGPS測量が不可能である水深の深い箇所で行われた。

測量は、河川の両岸から人力によってロープでADCP観測船を操作して行われた。ただし、急斜面などにより両岸からロープによる操船が困難な箇所では、ゴムボート(手漕ぎ船)でADCP計測船を曳航する形で行われた。ADCP測量の計測結果と地上レーザー測量の測量結果を合成したものを図-4に示す。図中枠内の線状データが船の軌跡に沿ったADCP測量の結果であり、線の色の違いが深淺の度合いを示している。船の往復回数をより多く行うことで河床の全域的な標高データの取得が可能となる。

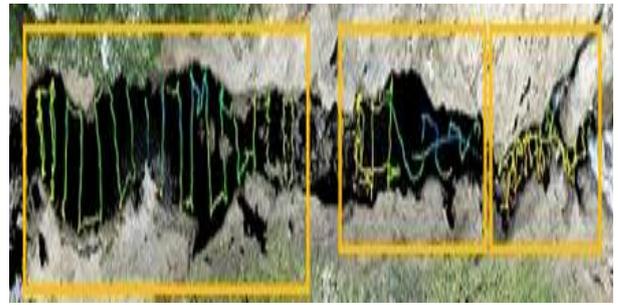


図-4 ADCPによる測量の結果
(線は計測船の軌跡を示し、色は深淺の値を示す)

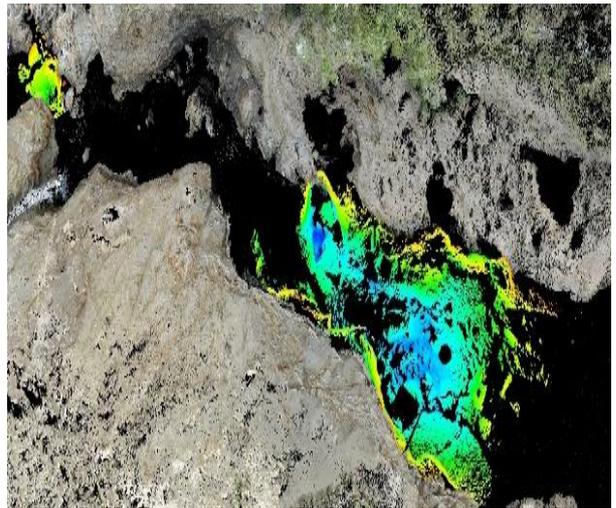


図-5 水中ソナー計測の結果

ADCP計測は、小型ボートにRTK-GPS、測深、流速計測がシステム化されており、データ通信をボートと観測者がワイヤレスで行えるため、地形計測だけでなく、多様な河川調査で活用することが可能である。

3.3 水中ソナー測量

計測に使用した機器はBlue View BV-5000である。三脚で固定し、半径30mを球状の範囲の計測が可能である。上流側1地点、中流・下流各3点の合計7点で計測が行われた。

計測地点の河床に水中スキャナーを設置し、システム化されたパン・チルト装置(首振り装置)で回転させ、ソナーを中心とした半球内の3次元地形データを取得した。また、データ処理は同時計測している地上レーザースキャナーの地形形状と合成することで計測点を公共座標へ変換した。水中スキャナーによる計測結果と地上レーザー測量の結果得られた地形データを合成し、3D表示した鳥瞰図を図-5に示す。図中で黒い部分は水面であるが、この中に黄色・黄緑・青の点群で示されているのが計測された標高データであり、色の違いは標高データの高低を示す。この例で最大水深が約3mとなっている。

水中ソナー測量では、機器の接続ケーブルが少なくデータ通信等が他の3次元取得機器に比べて容易であり、また、局所的な深掘れや変状地点、河川構造物の水中部形状の計測に有効であり、他の単点計測機器に比べ取得

点数が多く、河床に堆積した礫の形状を確認できるほど詳細な形状を計測可能というメリットがあった。課題としては、最大計測距離が 30m であるため広範囲の地形形の計測には適しておらず、また、水深や河床形状の影響による計画範囲の狭小や死角によってデータの抜けや低密度となることが挙げられる。また、河川では高流速地点での計測や機器の設置方法、運搬方法にも課題が多い。複数計測点の合成処理や公共座標取得におけるデータ処理方法が体系化されていない点も今後改善の余地がある。

3.4 単点測量

レーザー計測が不可能な水面下の地形データ取得は基本的には水中ソナー計測と ADCP 計測で行われたが、計測地点の水深が極端に浅い部分は上記 2 手法でも計測が困難である。そのため、計測不可能な部分は、GNSS 測量機(GR-2100GGDM)又は TS (GPT-9005AC) を用いた単点計測を行った。

さらに浅い水中部や ADCP 観測船の航行が困難な部分の計測では、TS 自動追尾機能を活用し、目標点には TS 用全方位ミラーを設置して単点計測を行った。また、TS 計測の視通確保が困難な地点では、GNSS 測量機による単点測量が併用して行われた。

今回の単点測量では自動追尾トータルステーション及び全周囲ミラーを用いたことにより、従来法に比べ作業時間の短縮が可能になり、省力化の面で有効性が確認された。しかし、人力による作業であるため直接測量を行わなければならない、少人数及び短時間では観測可能なデータ量に限界があり広範囲な水中部地形の把握手法としては課題が残された。

以上、最新の計測機器を用いた精密測量について、その方法と成果および課題について述べた。

4. 小型 UAV 測量

本研究では、前述の精密な地形計測と並行して、容易に且つ安価で地形データを取得できる小型 UAV (ドローン) を用いた計測方法も行った。

調査区間内の標高の異なる地点に 6 箇所の標定点を広く設置し、その座標を単点 GPS 測量によって求め、そのうちの上流側 1 点は、座標取得前に破損したため、これを除く計 5 地点の座標を使用した。

ドローンによる空撮は Phantom2 VISION+ と Phantom3 という 2 種類のドローンを使い、それぞれで得られた写真を別途処理し 2 つの地形データの作成し、両者の比較を行った。

撮影は、高度 50m から 80m 程度で、80% 程度のラップ率を確保しつつ行い、また、標高変化の大きい箇所では 5m から 10m 程度の高度からの斜め写真による河岸のり面に対する撮影も行い、合計で 500 枚程度の写真を撮影した。

次に、Agisoft 社の PhotoScan という高解像度オルソモザイク作成ソフトを用いて得られた写真画像データから地形データを作成した。ソフト内では、各写真の EXIF データを読み取り、カメラの GPS 情報や焦点距離から、被写体までの距離を計算し、地形の点群データを作成し

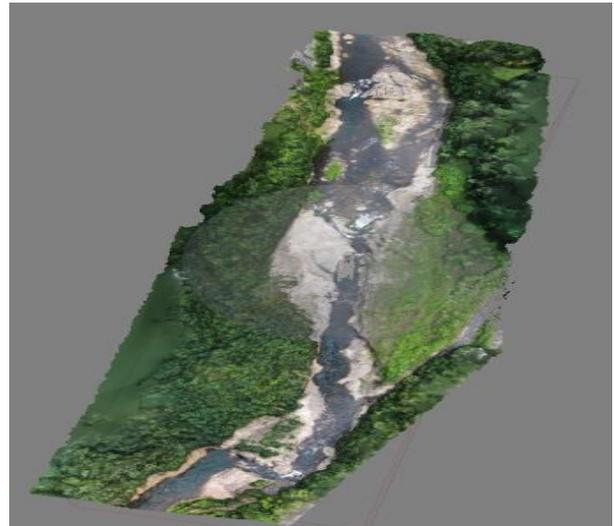


図-6 UAV 測量により作成した地形点群データ

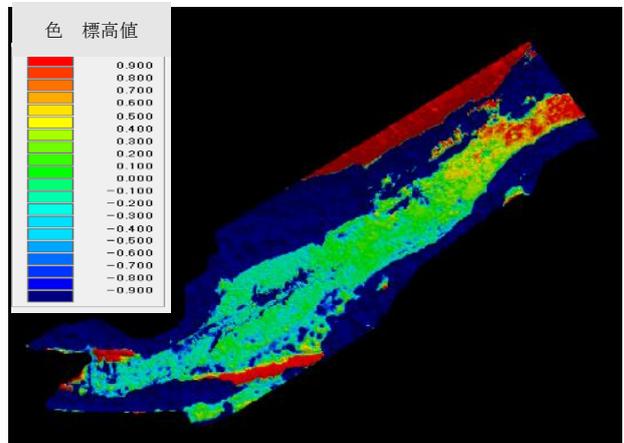


図-7 Phantom3 による地形データと地上レーザー測量比較

ている。作成された地形点群データを図-6 に示す。

次に作成した 3D データの標定点に座標付けを行った結果、ソフト内で作られた標高データと、標定点に入力した値の平均誤差は、Phantom2 VISION+ の空撮写真から作成したデータでは 0.26m、Phantom3 の空撮写真から作成したデータでは 0.05m となった。

Phantom2 VISION+ の方で誤差が大きくなった原因としては、PhotoScan が許容する空撮カメラの焦点距離が 20mm から 80mm である³⁾のに対し、Phantom2 VISION+ に搭載されたカメラの焦点距離は 5mm であり小さすぎたことが主要因であると考えられる。Phantom3 に搭載されたカメラの焦点距離は 15mm であった。ドローンに搭載するカメラの焦点距離を適切な値にすることでより精度の高い計測が出来るかと期待できる。

5. 地上レーザー測量と UAV 測量の比較

地上部における標高データを取得した地上レーザー測量と Phantom3 を用いた UAV 測量の 2 つの点群データを比較したものを図-7 に示す。図中では地上レーザーの計測値を基本として、UAV 測量から得られた点群の標高

が地上レーザーより 0.4m 以上低い場合は黄色及び赤色、逆に 0.4m 以上高い場合は青色で示し、地上レーザーと同様の高さを示すところは緑色で示した。

青色の範囲は樹林帯と一致している。当然ではあるが、樹林帯樹では計測時期や年によってこのように点群の標高にばらつきが見られる。今回の調査の対象となる露岩部では、地上レーザー測量と UAV 測量の 2 つの点群には ±15cm 程度の標高の違いが見られた。なお、最上流側に設置した標定点が破損したためその部分では 2 つの点群の標高の差異が大きく表れているが、他箇所においては、2 つの点群はほぼ同様の高さであった。

UAV 測量の結果を見ると、露岩している河道部の再現性は良いと考えられるが、その精度は地上レーザーに比べると若干劣るようである。

6. 地形点群データを使用した地形変化の評価

CloudCompare というソフトを用いて、北海道開発局札幌開発建設部提供の 2006 年に計測された花魁淵付近の航空測量による LP データと、本研究で得られた地上レーザー測量による 2 つの点群データの差異を色で可視化したものを図-8 に示す。ここでの差異とは単に標高値の違いではなく、地上レーザー測量で得られた各点と、LP データの各点で最も近くにあるものどうしの距離である。赤色の部分で 5m 以上の大きな差異が見られ、地形変化が起きた箇所と判断できる。赤色の部分は植生の部分を除くと、小滝の遷急点(knickpoint)および下流部右岸側で見られる。

2006 年の LP データと本研究で得た地上レーザーデータの knickpoint を通る線で作成した縦断面図を図-9 に示す。図中上側が 2006 年の縦断面図で、下側が 2015 の縦断面図である。Knickpoint が 9 年間で約 5m 上流側に移動しているのが分かった。

今後、この約 5m の移動が妥当な値であるかを、岩盤の強度や流砂の衝突を考慮した数値計算を行い検証していく予定である。

地上レーザー測量から得られた点群データに比べ、今回比較に用いた LP データは密度が極めて低い。航空測量や地上レーザー測量は費用の面から容易ではないが、今回、簡易性と高い精度を確認できた UAV 測量を用いることで、精度の高い経年変化の評価が期待できる。

7. まとめ

岩床河川での精密測量および小型 UAV を用いた簡易測量についてまとめる。

- 1) 今回行った精密測量では、複雑な地形を地上部と水部、さらに水深によって分類し、それぞれに適した計測方法で行った測量結果を合成することで、全域的かつ精密な地形データを得ることができ、その成果と課題を得ることが出来た。
- 2) UAV 測量では、今回使用した機器では、その準備から撮影、画像処理に要する時間は 2 日程度であり、諸作業に要する人員は最低 2 名で行うことが可能であったことから、UAV 測量の簡易性を確かめることが出来た。精度については、

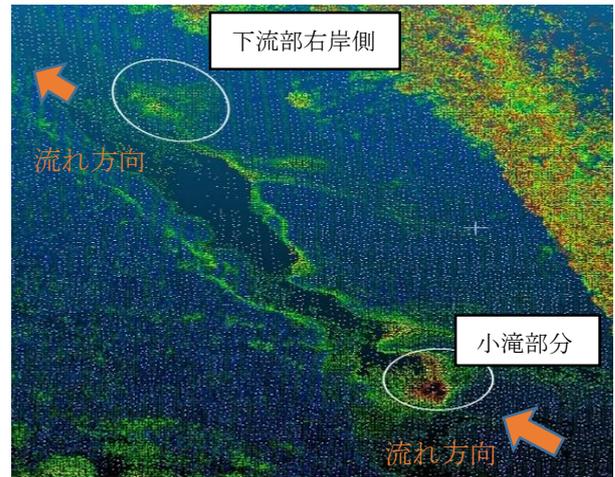


図-8 2006 年 LP データと 2015 年地上レーザーデータの差異

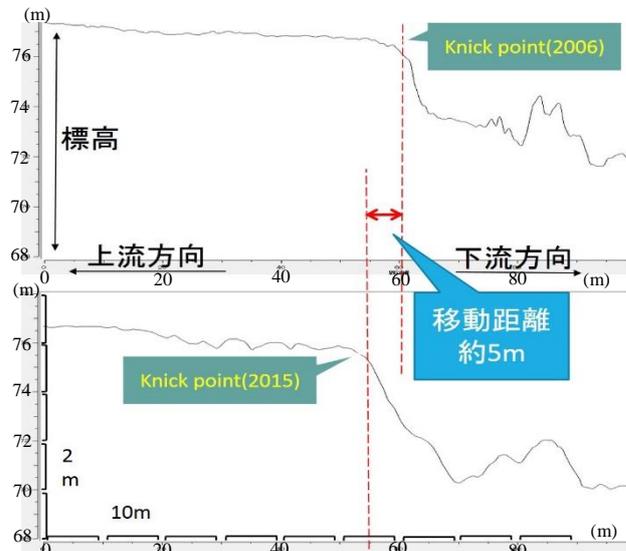


図-9 2006 年(上)と 2015 年(下)の Knickpoint の比較

地上レーザーデータと概ね一致する結果を得られたため、肉眼で確認できる地形を正確に再現できることが確認できた。

- 3) 本研究で得た地形データから、花魁淵の小滝の knickpoint は 2006 年から 2015 年までの間に約 5m 上流側へ移動したことが分かった。

今後は本研究から得られた測量結果を利用し、花魁淵における地形変化、特に knickpoint の移動に着目して、その上流側への移動を岩盤の強度や流砂の衝突を考慮した数値計算によって再現することを目標に研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、多くの組織との共同研究として行われたものである。御協力いただいた多くの皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) 宮坂省吾, 田中実: 札幌の自然を歩く, pp29
- 2) Kristen L.Cook, Jens M. Turowski and Niels Hovius: A demonstration of the importance of bedload transport for fluvial bedrock erosion and knickpoint propagation
- 3) Agisoft PhotoScan User Manual, pp4