

10. UAVを用いたダム貯水池に浮遊する 水面上部の捕捉流木群形状復元

和具麻里子^{1*}・田子 洋一²・中島 英敬³・小森 大輔⁴

¹株式会社 新星コンサルタント（〒363-0015埼玉県桶川市南1-3-19）

²株式会社 新星コンサルタント（〒986-0859宮城県石巻市大街道西一丁目7-11）

³株式会社 新星コンサルタント（〒330-2721茨城県常総市篠山885番地の3）

⁴東北大学（〒980-8579宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-6）

* E-mail: wagu@nsc30th.co.jp

近年、流木発生に伴う災害被害の拡大が注目されている。流木発生メカニズムの理解が重要であり発生流木量の把握の為にダム貯水池に捕捉された流木（以後、捕捉流木群とする）の定期的なモニタリングが重要視されている。モニタリングには非接触にて安全な場所から計測が可能であり、かつ機動力がある無人航空機（UAV）を用い上空から撮影を行う。上空から撮影を行うことで一度に広範囲の撮影を行い、撮影した写真はSfM処理ソフトを使用して水面上部の捕捉流木群を形状復元し3次元点群化する。水域部は写真同士のマッチングポイントが判別しにくく、SfM処理が困難である。そこで対空標識設置に工夫を行った撮影を想定し捕捉流木群の形状復元方法を提案した。

Key Words : photo survey, SfM-MVS, drift wood, wood accumulation volume

1. はじめに

近年、日本では地球温暖化に伴う大雨の激化が顕在化し、大規模な土石流発生に伴う流木流出による災害被害の拡大が注目されている。今後、災害外力の増大によって洪水や土石流等の大規模化が想定され、流木発生源も含めたより効果的な流木対策を検討する必要がある。こうした点から、流木発生のメカニズムを理解することがとても重要であり、発生流木量の把握のためにダム貯水池に捕捉された流木（以後、捕捉流木群とする）の定期的なモニタリングの重要性が、「ダム貯水池流木対策の手引き（案）（国土交通省（平成30年3月））」にもまとめられている。

無人航空機（UAV）は機動力がありデータ収集時間の限られた現場に優れている。また、安全を確保した場所から飛行することで多種の現場に活用が可能であり、近年、UAVを用いた写真測量技術の進展が著しい。小さな機体とバッテリーで動く計測機器は、現場移動時の作業員の負担を軽減し、すばやく現場作業に応じることが可能となる。最新の研究では、対象が陸部の場合、適切な撮影と対空標識（基準点）の設置により写真測量精度が安定することが判明している（垣内ほか（2016）¹⁾ や菅井ほか（2017）²⁾。一方、水域部では、原田ほか（2016）や神野ほか（2017）³⁾による水面反射を軽減させた写真測量技術の研究はあるが、対空標識の水面浮遊

設置や水面上部浮遊物形状の復元を検討した研究ではない。また、現状での水面反射軽減撮影方法は、静止画と動画の両方を取得する必要がある、従来の撮影時間に比べて2倍以上の時間を要する。撮影時間を要することに加えて、撮影高度を30mと低く設定する必要があり、各地点における1枚当りの撮影面積が狭くなることから撮影枚数が増加する。膨大な撮影写真を用いてスケールを有する3次元点群データを形状復元する場合は、SfM-MVS処理（撮影した複数枚の画像からカメラの撮影位置を推定し、そのカメラの撮影位置情報から三次元形状を復元する技術）の負荷が大幅に増大し解析作業が非効率である。

写真から撮影状況を三次元形状復元するのでは無く、空撮写真（画像）を基に画像解析処理を用いて浮遊する流木量を把握する研究は角ら（2018）⁴⁾によって進められている。角らは流木が水面に浮いているという特徴を活かし、上空からの状況確認が可能なUAVにて空撮を行い、取得した画像を用いて流木量の推定を行う手法の開発に取り組んだ。画像はモノクロ二値化法やカラー二値化法といった色相による判断を用い、機械的に流木を抽出した。流木が画像上で重なり合う場合は大きな流木群として判断されてしまうため、画像から標本を目視にて抽出し機械的抽出による推定の補正式を求め算出を行っている。流木は肉眼での本数把握は難しいため捕捉流木群量の把握に画像解析処理を用いることはとても有意

義である。しかし、この方法は事前の画像処理や標本の目視抽出など画像データ取得から補足流木群量算出までに時間を有し、UAVを用いる利点である即効性の部分に課題が残る。そこでUAVの利点である機動力を活かし、撮影画像を3次元点群データに形状復元しスケールデータにすることで大まかな捕捉流木群量の把握に繋がると考察した。⁵⁶⁾⁷⁸⁾

捕捉流木群は水面に浮遊することから、撮影した際の写真に写り込む水域エリアが多くなり、パスポイント・タイポイント（2枚以上の空中写真をコース方向および隣接コース接続する際に目印として設ける点）といった地形上の目印を写真同士で把握することが困難である。

そこで本研究は、撮影高度を下げずに対空標識の設置方法を水面浮遊設置へ応用することで捕捉流木群形状を大まかに復元し、復元した補足流木群形状から量を把握する方法を検討した。現状使用している対空標識を使用することで、陸部を対象に行ってきた写真測量技術を水域部に活かす事が可能となる。対空標識の設置は高価な座標観測機器の使用に比べ汎用性があり、簡易的に水面上部の浮遊物形状を復元できれば生産性向上に繋がり現在引き揚げ時に判明している流木量を水面浮遊時に捕捉流木群量として算出することが可能と考えた。

2. 対象ダム

対象ダムは2018年10月末時点でダム貯水池水面に捕捉流木群が浮遊していた北上川水系に位置する鳴子ダム、月光川水系に位置する月光川ダムの計2つのダムとし、両ダム共に捕捉流木群の浮遊するエリアを網羅するように撮影を行った。（図-1）

鳴子ダムは水際に寄るように、月光川ダムは網場部分に集まるように捕捉流木群が浮遊していた。そこで本研究では、浮遊状況の異なる2ダムにて捕捉流木群の形状を復元し捕捉流木形状および量の把握を検討することとした。

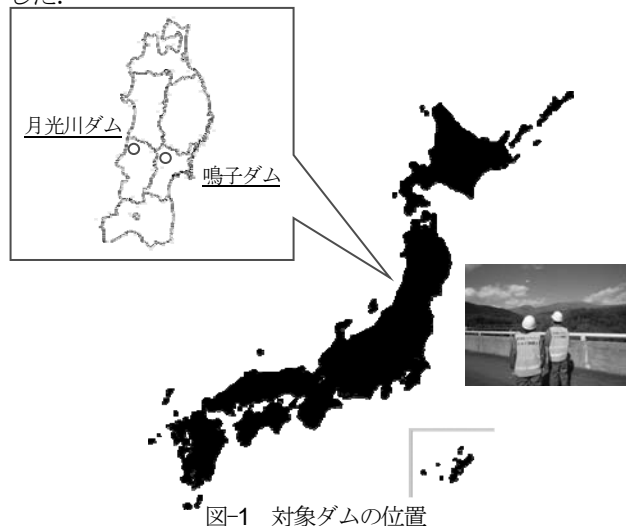


図-1 対象ダムの位置

3. 調査方法

鳴子ダムは2018年10月24日、月光川ダムは2018年10月25日にInspire2（DJI社製）を高度約120mにて飛行させUAVによる写真撮影を行った。以下に調査手順を詳述する。

はじめに、空撮開始前に陸部および水域部にA3サイズの対空標識を設置した。空撮写真は後に汎用性のある市販ソフトPix4d（SfM-MVS処理ソフト）を用いて解析を行うため、写真上で上空から対空標識を明確に確認できるよう捕捉流木群エリアにて満遍なく散布を行った。

陸部は植生繁茂していない地表面へ、水域部は水面浮遊散布を行うため、対空標識が水面に浮くよう図-2の様に工夫を行い、進入が可能な範囲で浮遊する流木や植生等に縛り付け、風による水面上での移動に対応した。

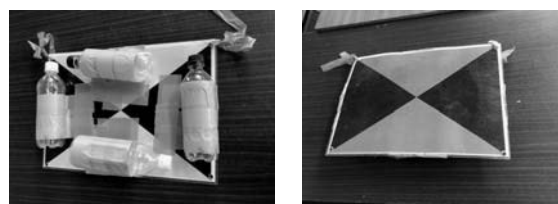


図-2 水面浮遊散布する対空標識の様子

撮影は飛行ルートに沿った自立飛行にて垂直写真の撮影を行った。撮影する写真同士の重なり合いは両ダム共にオーバーラップ率90%・サイドラップ率60%とし、水面に浮遊する捕捉流木群エリアを十分に網羅するルートで鳴子ダムにて172枚、月光川ダムにて149枚の空撮を行った。（図-3、4）

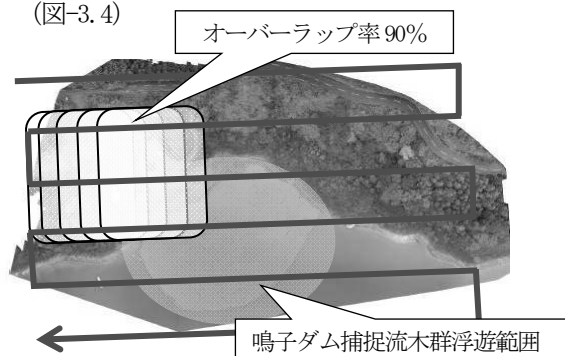


図-3 UAV写真撮影の飛行ルート（鳴子ダム）

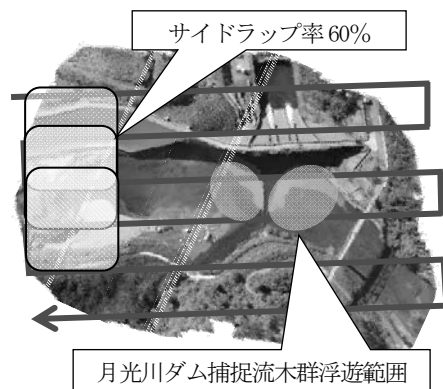


図-4 UAV写真撮影の飛行ルート（月光川ダム）

現地にて設置をした対空標識の中心部は、SfM-MVS処理時の基準点とするためGNSS機器を用いて座標観測を行った。各ダムにて撮影した写真と観測した座標値を用いてSfM-MVS処理により捕捉流木群の形状復元を行った。

4. 結果

(1) SfM-MVS 処理

a) 鳴子ダム

図-5は鳴子ダムにおいて撮影した写真のSfM-MVS処理画像である。空間上部には撮影した写真が示され、下部には形状復元された3次元点群データが表示されている。

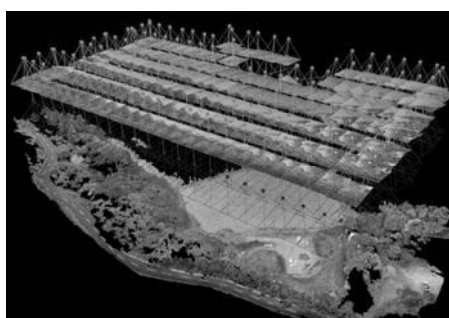


図-5 形状復元の様子（鳴子ダム）

図-6はSfM-MVS処理による空撮写真のオーバーラップ状況を確認した図である。オーバーラップが十分にされていればキーポイントの一致が対象とするエリアにて十分に行われ、良好なデータ品質を確保できる。緑色のエリアは各ピクセルについて5つの写真の重なり合いが行われたことを示す。重なりが不十分である場合は赤色で示される。エリア端部に少し赤色や黄色がみられるが概ねのエリアにて5つの写真の重なりを確認できる。



図-6 ピクセルにおける写真の重なり数（鳴子ダム）

図-7はSfM-MVS処理中に写真位置の位置関係を確認した図である。図に示す点や丸は、青点が観測値、緑点が算出値である。緑色の楕円や丸は、米印に示す標定点（対空標識中心部観測座標）を基に水平位置および標高を決定する作業（ハンドル法によるブロック調整）が行われたことを示している。青点と緑点の離れ具合により調整が大きく行われたため楕円や円の大きさに変化がみられる。

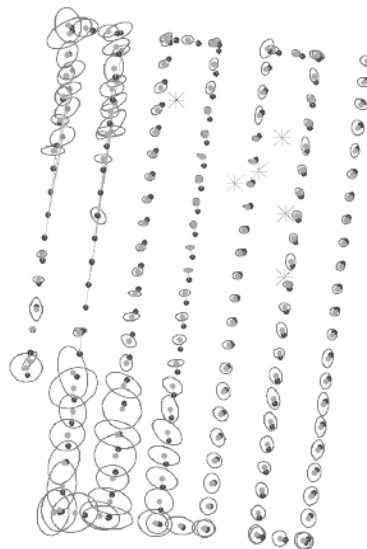


図-7 写真位置関係の調整（鳴子ダム）

図-8・9の2画像はSfM-MVS処理により算出したオルソモザイク画像と数値表層モデル（DSM画像）である。SfM-MVS処理にて誤った処理が行われた場合は、算出される2画像に欠落や大きな歪みが発生する。

また、図-10は3次元点群データを上空から垂直にみた平面的画像である。3画像を並べて確認した際、各画像に欠落や大きな歪みは見られない。これはSfM-MVS処理が良好に行われたことを示す。

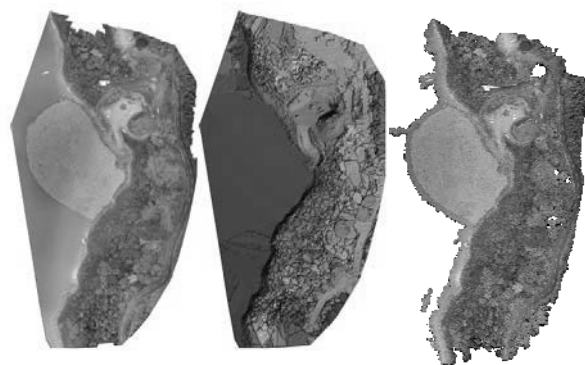


図-8 (左) オルソモザイク画像
図-10 (右) 3次元点群データ

図-9 (中央) DSM 画像

b) 月光川ダム

月光川ダムも鳴子ダムと同様に画像を用いてSfM-MVS処理の確認を行った。図-11は月光川ダムにおけるSfM-MVS処理の画像である。

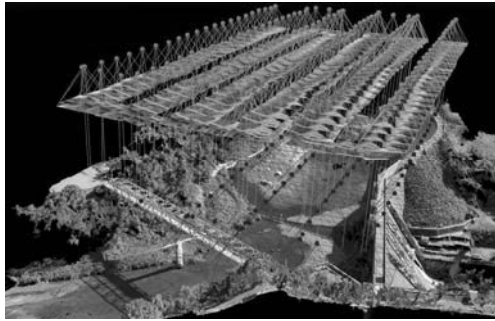


図-11 形状復元の様子（鳴子ダム）

図-12は月光川ダムにおける写真の重なり合いを確認した図である。鳴子ダム同様にエリア端部に赤色や黄色の部分が見られるが、概ね対象のエリアにて5つの写真の重なりを確認できる。



図-12 ピクセルにおける写真の重なり数（鳴子ダム）

図-13は鳴子ダム同様に月光川ダムにおいて写真位置の位置関係を確認した図である。月光川ダムは鳴子ダムに比べてブロック調整が少なく、重なり合う写真上の共通点が、鳴子ダムより明確であったと推測される。

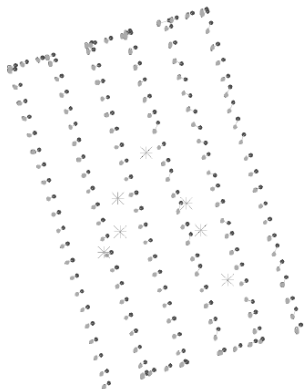


図-13 写真位置関係の調整（月光川ダム）

図-14・15・16は月光川ダムにて鳴子ダム同様に算出したオルソモザイク画像、数値表層モデル、3次元点群データである。こちらも各画像に欠落や大きな歪みは見られずSfM-MVS処理が良好に行われたことを示す。

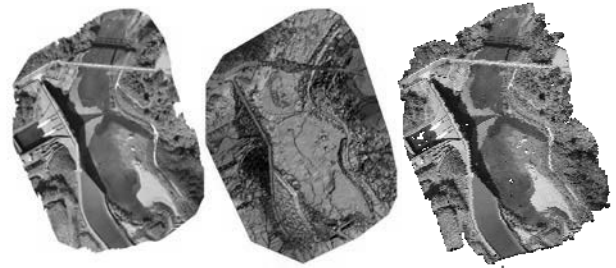


図-14（左）オルソモザイク画像 図-15（中央）DSM画像
図-16（右）3次元点群データ

(2) 可視的判断

a) 鳴子ダム

図-17は、3次元点群データに形状復元し、点群データとして表現された捕捉流木群を示す。図-18は図-17において捕捉流木群形状の部分拡大した画像である。隣に示す図-19はUAVにて撮影した垂直画像である。比較を行うと、可視的判断でも水面上部の捕捉流木群を現況の色彩で形状復元していることがわかる。撮影した写真の色彩を用いて形状復元できることは、水域部との境界を目視することに繋がり、捕捉流木群量の過大評価軽減へ繋がる。

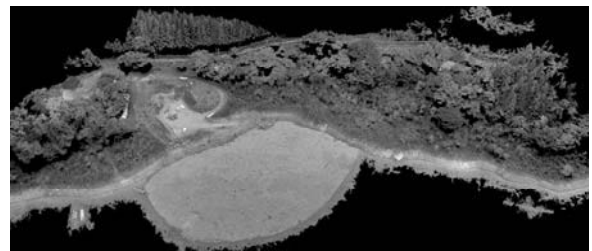


図-17 3次元点群データにて表現された鳴子ダムに浮遊する捕捉流木群の様子

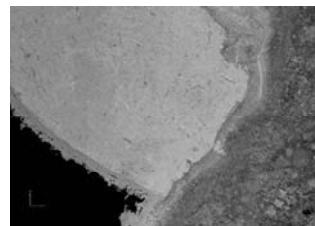


図-18 鳴子ダム点群詳細部

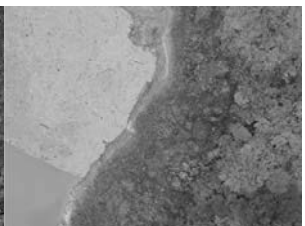


図-19 UAVによる垂直写真

b) 月光川ダム

月光川ダムにおいても同様に、3次元点群データ細部は垂直写真と比較を行うことで確認をおこなった。



図-20 3次元点群データにて表現された月光川ダムに浮遊する捕捉流木群の様子

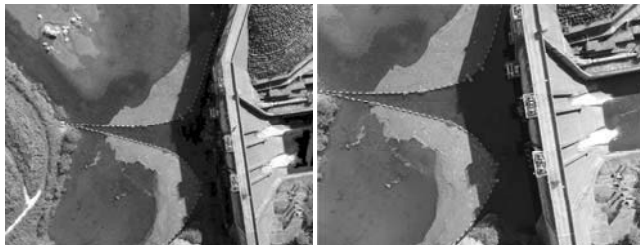


図-21 月光川ダム点群詳細部



図-22 UAVによる垂直写真

(3) 座標値による確認

形状復元状況の確認は、SfM-MVS処理に伴い評価された鳴子ダムおよび月光川ダムの対空標識設置中心部における観測値と算出値の誤差を用いて行った。

観測値は現地にてGNSS機器を用いて観測を行った値である。算出値はSfM-MVS処理による算出された3次元点群データ上で、点(X,Y,Z座標+RGB)として形状復元された値である。

図-23に、3次元点群データを形状復元した際に算出した点群(算出値)を示す。



図-23 3次元点群データ上でみる座標評価の様子

図-24に、評価を行った1点の点群座標値における誤差算出の様子を示す。図は観測値を青丸、算出値を緑丸で示されており、誤差が大きいほど青丸と緑丸にずれが生じる。

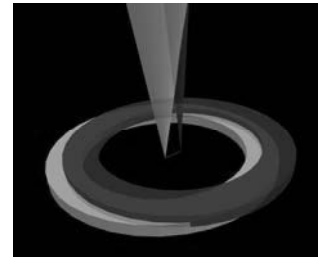


図-24 位置関係図

座標値誤差の算出はX・Y・Z方向の個々に行った。鳴子ダムおよび月光川ダムにおいて誤差をまとめた表は下記の表-1.2である。

表-1 鳴子ダムにおける座標誤差

GCP No.	X座標			Y			Z		
	観測値: X1	算出値: X2	誤差 (X1-X2)	観測値: Y1	算出値: Y2	誤差 (Y1-Y2)	観測値: Z1	算出値: Z2	誤差 (Z1-Z2)
1	-10636.717	-10636.719	0.002	-137439.602	-137439.578	-0.024	245.864	245.872	-0.008
2	-10647.929	-10647.934	0.005	-137456.220	-137456.245	0.025	244.744	244.670	0.074
3	-10634.835	-10634.818	-0.017	-137477.612	-137477.641	0.029	242.311	242.189	0.122
4	-10688.570	-10688.557	-0.013	-137421.054	-137421.036	-0.018	240.224	240.231	-0.007
5	-10659.346	-10659.377	0.031	-137462.314	-137462.342	0.028	240.222	240.282	-0.040
6	-10635.391	-10635.373	-0.018	-137509.281	-137509.252	-0.029	240.225	240.314	-0.089
平均誤差			-0.002	Y座標値に関する評価			Z座標値に関する評価		
標準偏差			0.017	標準偏差			標準偏差		
二乗平均平方根			0.017	二乗平均平方根			二乗平均平方根		

表-2 月光川ダムにおける座標誤差

GCP No.	X			Y			Z		
	観測値: X1	算出値: X2	誤差 (X1-X2)	観測値: Y1	算出値: Y2	誤差 (Y1-Y2)	観測値: Z1	算出値: Z2	誤差 (Z1-Z2)
1	-73333.097	-73333.096	0.001	-107657.144	-107657.160	-0.016	170.671	170.685	0.014
2	-73351.858	-73351.902	-0.044	-107621.742	-107621.727	0.015	169.538	169.556	0.018
3	-73361.905	-73361.943	-0.038	-107603.005	-107602.933	0.072	169.440	169.469	0.029
4	-73390.180	-73390.125	0.055	-107567.444	-107567.402	0.042	169.307	169.337	0.030
5	-73409.978	-73409.953	0.025	-107599.589	-107599.682	-0.093	169.360	169.273	-0.087
6	-73408.362	-73408.367	-0.005	-107623.055	-107623.057	-0.002	169.384	169.414	0.030
7	-73419.655	-73419.656	-0.001	-107637.251	-107637.249	0.002	169.378	169.486	0.108
平均誤差			-0.001	Y座標値に関する評価			Z座標値に関する評価		
標準偏差			0.032	標準偏差			標準偏差		
二乗平均平方根			0.032	二乗平均平方根			二乗平均平方根		

表-1.2は鳴子ダムおよび月光川ダムに設置した対空標識設置位置毎の座標誤差を示した表である。

結果は、鳴子ダムにおけるX・Y座標方向の最大絶対値が0.031m・0.029mであり、二乗平均平方根誤差は0.017m・0.026mであった。また月光川ダムにおけるX・Y座標方向の最大絶対値は0.055m・0.093mであり、二乗平均平方根誤差は0.032m・0.048mであり、XY座標方向(平面方向)における二乗平均平方根誤差は0.05m以内となった。

形状復元時の懸念事項はZ座標方向(縦断方向)の誤差である。上空から撮影した画像を使用し3次元点群データを作成する場合は、側面部のデータを得る事が難しく高さ方向(Z座標方向)の形状復元を不得意とする。しかし結果は、復元を不得意とするZ座標方向の二乗平均平方根誤差0.071m(鳴子ダム)・0.057m(月光川ダム)となり、高さの誤差に関しても0.10m以内の誤差となった。

5. 考察

本研究では、浮遊させた対空標識を用いて捕捉流木群の3次元点群データへの形状復元を試みた。また、対空標識の設置位置にて観測した観測値と、形状復元により算出した点群における算出値を比較し座標誤差値が微小であれば、今後捕捉流木群量の把握へ大いに応用できると考察した。

以上の事を踏まえ、今後は適切な対空標識の配置によって、UAVを用いて空撮画像を用いて復元される3次元点群データを有効的に使用することで引き揚げ前に捕捉流木量を把握することが可能であると考えられた。

引き上げ前に捕捉流木群の量を把握可能とすることは撤去・運搬量の事前把握へ繋がり、大きな生産性向上に繋がる。更に捕捉流木群量把握の際、今回の対空標識を用いた方法を用いることは、多くの方に使用可能な手法であり、汎用性のある把握手段になると考察する。

しかし、本研究で対象とした事例は2ダムのみであり今後もデータの収集が重要であると考察する。また今回はダムに浮遊する捕捉流木群の水面上部の形状しか形状復元できておらず、捕捉流木群量を把握するためには水面下にどの程度沈んでいるのかを把握することも重要である。更に、今回は形状復元した補足流木群の量自体もわずかなものであったため、今後は広域な範囲での3次元点群データ作成も試みる必要がある。

今後はデータ蓄積に努めつつ、本研究の手法による補足流木群の形状復元・復元した3次元点群データの精度向上および捕捉流木群形状の全形状把握が必要と推察する。

謝辞：本研究の一部は、科学研究補助金（19H02395、代表：小森大輔）の支援により実施された。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 垣内 力, 鈴木英夫, 大森康至: UAV テストサイトを使用した 3 次元点群測量の精度検証例, 写真測量とリモートセンシング, 55, 301-302
- 2) 菅井秀翔, 宮地邦英, 中村孝之, 南 秀和, 橘 克己: UAV を活用した写真測量の精度検証,
- 3) 神野有生, 上田修靖, 赤松良久, 関根雅彦: UAV を用いた浅水底の写真測量のための水面反射軽減技術, 土木学会第 72 回年次学術講演会 平成 29 年
- 4) 角 哲也, 鈴木沸久, 小林草平, 竹門康弘, カントウシ ユ サメ: 九州北部豪雨における寺内ダムへの流木流入の実態とダム下流に対するその意義, 京都大学防災研究所年報 第 61 号 B 平成 30 年
- 5) 津留宏介, 村井俊治: デジタル写真測量の基礎 デジカメで 3 次元計測するには, 公益社団法人 日本測量協会, 2011
- 6) 齋藤正徳, 市川 健, 天谷香織, 那須野新, 佐藤慶治, 藤崎雅史, 池内幸司, 石井雄章: 中小河川を対象とした UAV 写真測量を用いた流下能力評価手法に関する研究, 河川技術論文集, 第 25 巻, 2019 年
- 7) 安田晃昭, 萬矢敦啓, 小関博司, 安田浩保: カメラ同期制御装置を用いた近接写真測量による水面形状の計測, 河川技術論文集, 第 25 巻, 2019 年
- 8) 齋藤正徳, 湧田雄基, 唐木正史, 市川 健, 天谷香織, 那須野新: UAV 写真測量による簡易な河川地形把握手法を活用した河道管理の検討, 河川技術論文集, 第 23 巻, pp. 179-184, 2017