

どこでも三次元測量 ～モバイルレーザ計測の応用活用～

城下 奨・西川 貴史・石原 宏之・高橋 弘・瀬口 栄作・宮山 智樹 (中日本航空株式会社)

1. はじめに

我が国は急峻な山間地が多いほか、降水量も多く、梅雨や台風時期には洪水や土砂災害が発生しやすい。また地震の発生も他国に比較すると極めて高く、自然災害に対して脆弱な国土となっている。一方で人口減少、少子高齢化の課題にも直面している中で、インフラの維持管理、災害対応においては、より効果的、効率的なロボット技術の開発が求められている。

本稿ではこのような背景を踏まえ、少ない労力でより高精度、より効率的な計測を主眼として、モバイルレーザ計測を車両・UAV・船・人と様々なプラットフォームに搭載し、計測した事例について報告する。

2. システム構成

2.1 小型モバイルレーザスキャナ

モバイルレーザ計測システムは、レーザスキャナ及び位置姿勢計測装置 (GNSS/IMU) で構成される。Riegl 社製レーザスキャナ VUX-1



図1 小型レーザスキャナ

(図1) は、コンパクトで軽量小型 (3.6kg) ながら、波形計測機能、発射回数は 50 万発 / 秒と、有人機の航空レーザ計測にも劣らないスペックが確保されている。また、視野角が 330° と、広角のデータが取得できるのも特徴の一つである。

2.2 位置姿勢計測装置 (GNSS/IMU)

Applanix 製 AP20 (図2) は、GNSS/IMU の位置精度 5 cm (水平) を確保しているほか、IMU の測定レートが 200Hz と、高性能であるものの軽量小型である事が特徴である。また、取得衛星は GPS のほか、GLONASS、GALILEO、QZSS 等、幅広い衛星データの取得が可能である。

3. 車両による計測

車両によるレーザ計測は、モバイルマッピングシステム (MMS) が一般的に普及しているが、特定の車に積載が必要な事や、適切なキャリブレーションを維持するためにスキャナの取り付



図2 位置姿勢計測装置

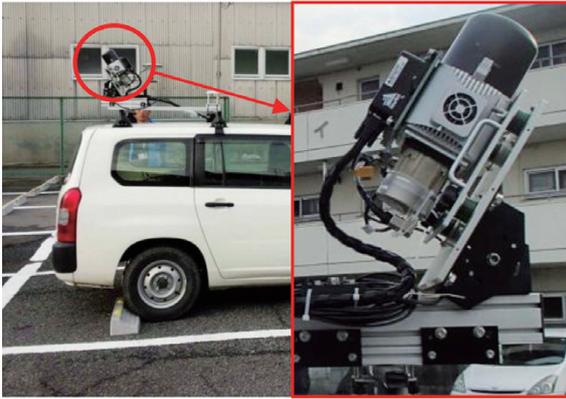


図3 車両搭載例



図5 検証箇所

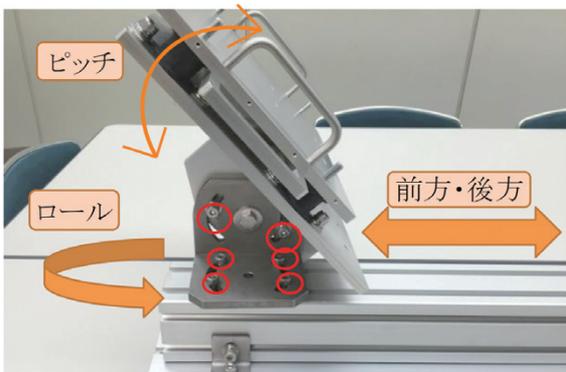


図4 設置架台

け位置を容易に動かす事ができないなどの課題点があった。また、MMS 車両の遠方への運搬も作業的課題であった。

これらの課題を解決するため、本計測システムは、図3のとおりキャリアレールの取り付け可能な車両であれば、どんな車両でも運用できる仕組みを考案した。

キャリアレールに設置した架台は、図4のとおり VUX-1 の特徴である小型軽量化を活かし、目的や対象物に合わせ自由なアングルでレーザー照射する事を可能とした。また、取り付け、取り外しが容易にできるメリットを活かし、現地発送やレンタカーへの取り付けによる計測も可能としている。

3.1 実地検証

計測は、車両に搭載した VUX-1 による計測データを距離標との較差点検を行い、VUX-1

の計測精度を確認する事を目的とし、検証フィールドは佐賀県の六角川及び支川牛津川の全長112km区間とした(図5)。

3.2 データ取得状況

自社の三菱社製 MMS-X640 の計測データ(図6)と本計測システムの計測データ(図7)を比較した。結果は、表1のとおり発射回数に依存するものであり、MMS では15cmに一点、VUX-1 では3cmに一点のデータが取得されている事から VUX-1 の計測データが高密度に取得できている事がわかる。特にガードポールなどの細かい構造物も判読が可能であり、高密度・高精細に取得されている事が確認できる。

3.3 垂直版ターゲットによる精度検証

垂直版ターゲットを河川距離標5km毎に30箇所設置(図8)し、レーザー計測により取得したターゲット点群(図9)と河川距離標の座標値との較差について比較検証した。

- 点検結果は、表2のとおりである。
- ・ 水平位置の最大較差は、0.160m が1点あったが、その他は0.070m 以内であった。
 - ・ 水平位置の平均較差は、0.020m 以内であ

表1 計測諸元

項目	VUX-1	MMS
発射回数	500,000 発 / 秒	13,575 発 / 秒
計測密度	3cm	15cm

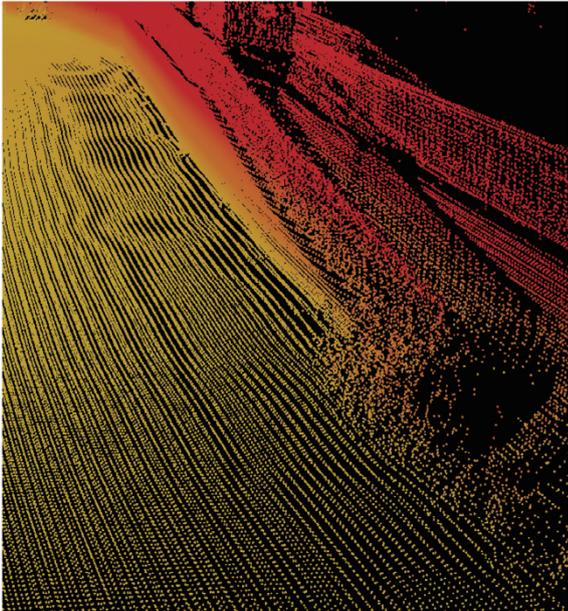


図6 MMS計測データ

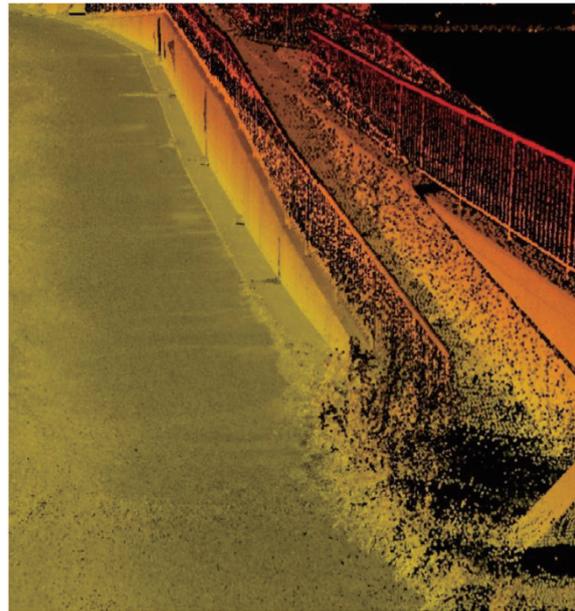


図7 VUX-1計測データ

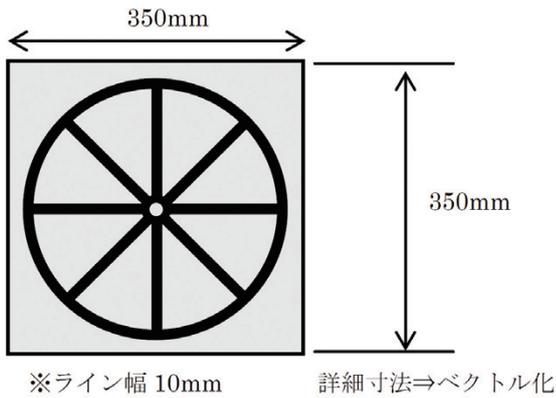


図8 垂直版ターゲット

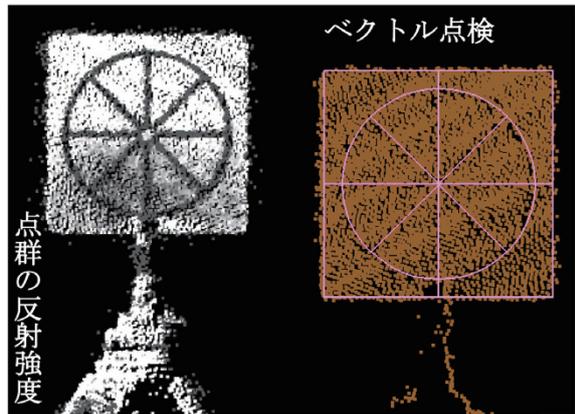


図9 垂直版ターゲット計測状況

表2 垂直版ターゲット点検結果

項目	較差 (m)		
	Δx (東西)	Δy (南北)	Δz (標高)
平均	0.016	-0.011	-0.076
標準偏差	0.019	0.037	0.021
+方向最大	0.068	0.024	-0.024
-方向最大	-0.007	-0.160	-0.118

り良好な結果が得られた。また、標準偏差においても 0.040m 以内と、地図情報レベル 250 の位置精度 0.12m と比較しても良好な結果であった。

- ・標高の較差平均は、 -0.076m の結果が得られた。また、標準偏差においては 0.021m と、地図情報レベル 250 の標高点精度 0.25m と比較しても良好な結果であった。

3.4 水平版ターゲットによる精度検証

水平版ターゲットについては、垂直版ターゲットの中間点の河川距離標に 29 箇所設置 (図 10) し、レーザ計測により取得したターゲット点群

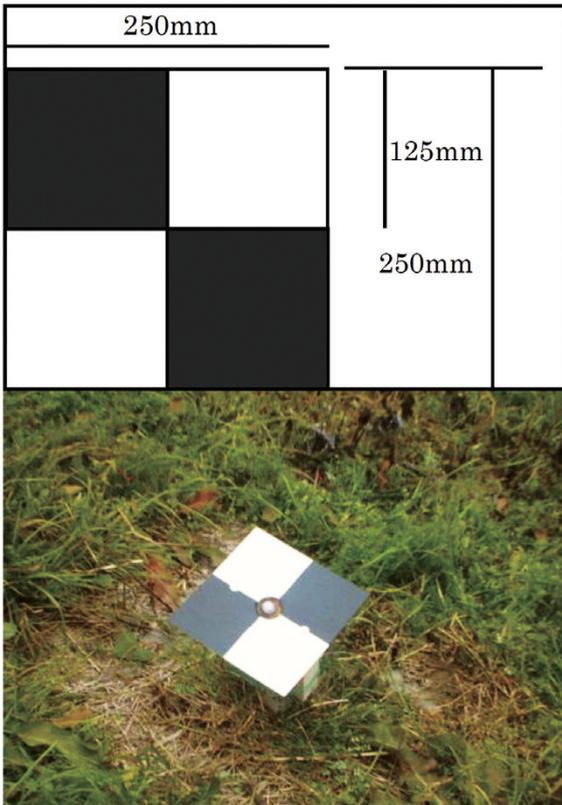


図10 水平版ターゲット

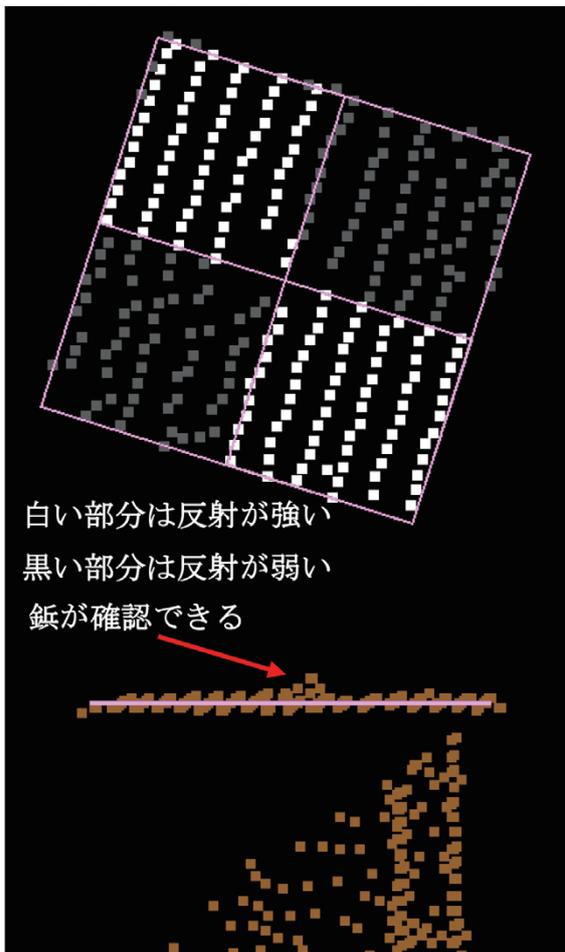


図11 水平版ターゲット計測状況

表3 水平版ターゲット点検結果

項目	較差 (m)		
	Δx (東西)	Δy (南北)	Δz (標高)
平均	0.011	-0.012	-0.069
標準偏差	0.026	0.026	0.016
+方向最大	0.064	0.023	-0.040
-方向最大	-0.063	-0.080	-0.104

(図 11) と河川距離標の座標値との較差について比較検証した。

点検結果は、表3のとおりである。

- ・ 水平位置の平均較差は、0.020m 以内であり良好な結果が得られた。また、標準偏差においても 0.030m 以内と地図情報レベル 250 の位置精度 0.12m と比較しても良好な結果であった。
- ・ 標高の較差平均は、- 0.069m の結果が得られた。また、標準偏差においては 0.016m と地図情報レベル 250 の標高点精度 0.25m と比較しても良好な結果であった。

点検結果は、表3のとおりである。

- ・ 水平位置の平均較差は、0.020m 以内であり良好な結果が得られた。また、標準偏差においても 0.030m 以内と地図情報レベル 250 の位置精度 0.12m と比較しても良好な結果であった。
- ・ 標高の較差平均は、- 0.069m の結果が得られた。また、標準偏差においては 0.016m と地図情報レベル 250 の標高点精度 0.25m と比較しても良好な結果であった。

車両によるレーザー計測では、通常走行距離計(オドメーター)を搭載するが、本システムのようにレーザスキャナと GNSS/IMU のみのシンプルなシステムでも高精度な計測データを取得できる事が確認できた。ただし、本検証は、衛星条件が良好な環境で実施したため、今後は、衛星環境の悪い条件でも検証が必要となる。



図12 UAVレーザ計測システム「TOKI」



図14 現地解析状況



図13 フライトコース

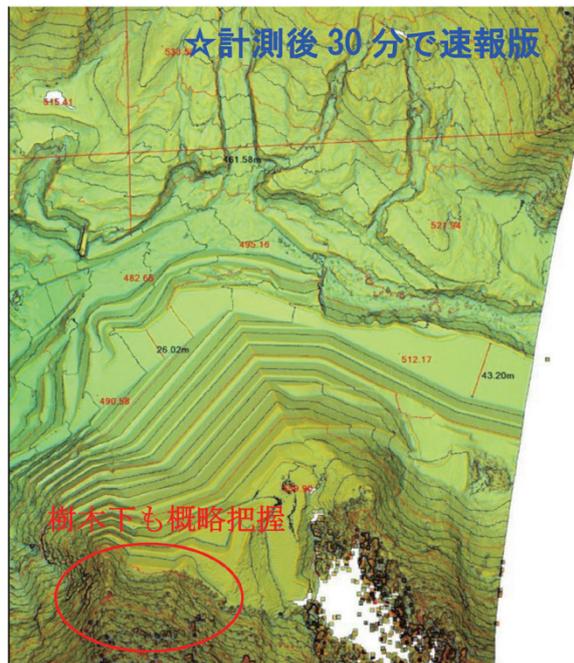


図15 平面図(立体図+等深線図)

4. UAVによる計測

近年、UAV（ドローン）による計測が急速に普及している。ドローンによる計測は、その機動力を活かし、空間計測分野での活躍が期待されているが、計測は空中写真撮影が大半を占めている。そこで、植生下も計測が可能なモバイルレーザ計測をUAVに搭載し、平成27年12月に『次世代社会インフラ用ロボット技術』に応募（国交省：災害調査部会の公募）、計測を実施して災害対応の可能性を検証した（図12）。

4.1 実地検証

検証フィールドは、奈良県五條市大塔町赤谷地区とし、崩壊地を計測した。

計測は、崩壊地から1km離れている離着陸場から自律航行（オートパイロット）により1フライト行った（図13）。

4.2 データ取得状況

計測時は、図14のように現地にて解析処理

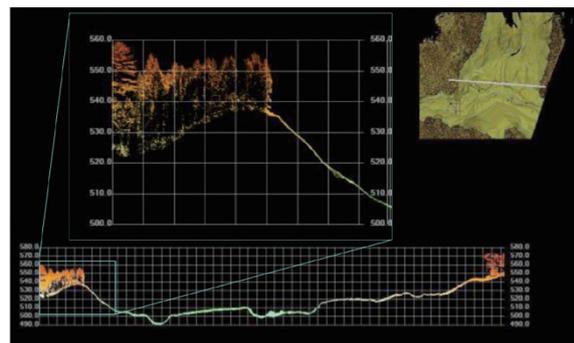


図16 横断面図(断面形状を把握)

を行い、UAV着陸30分後に速報データを作成し、3次元地形モデルに展開後、図15の平面図（立体図と等高線の重ね合わせ）、及び図16の横断面図（任意箇所断面状況を把握）

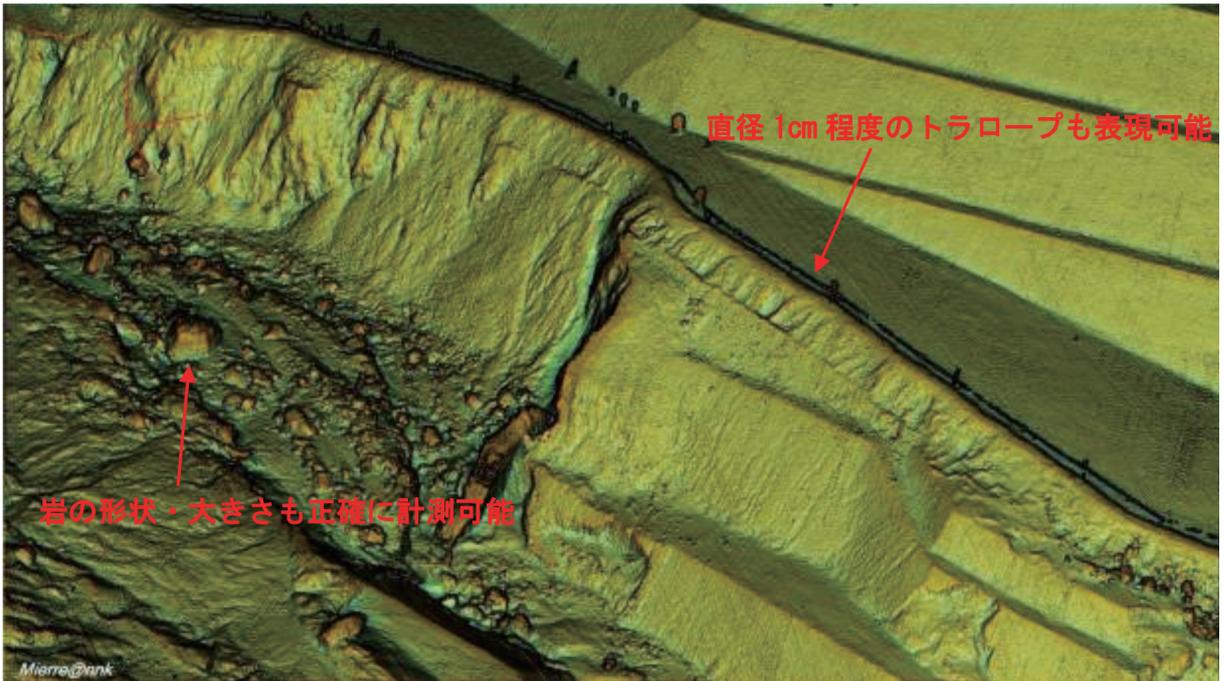


図17 3次元地形モデル

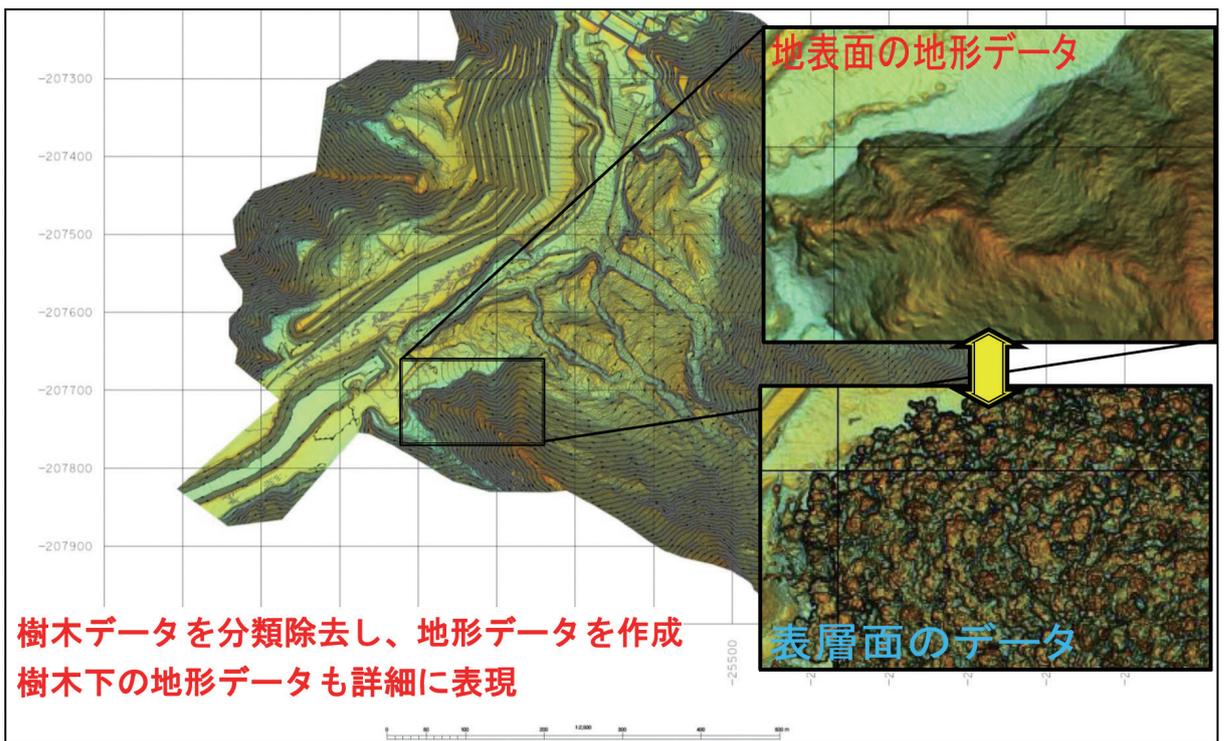


図18 3次元地形モデル(地表面の地形データ)

を災害直後の現地状況把握のための速報データとして国交省へ提供した。

着陸3時間後には、図17の3次元地形モデルを作成し、直径1cmのトラロープも表現されている事を確認した。(これにより、同規模の地

割れも確認できるものと推定される)

さらに着陸8時間後には、図18の詳細な3次元地形モデルから、各種図面(平面図、縦断面図、横断面図)を作成し、災害時の緊急性にも対応できる事を確認できた。

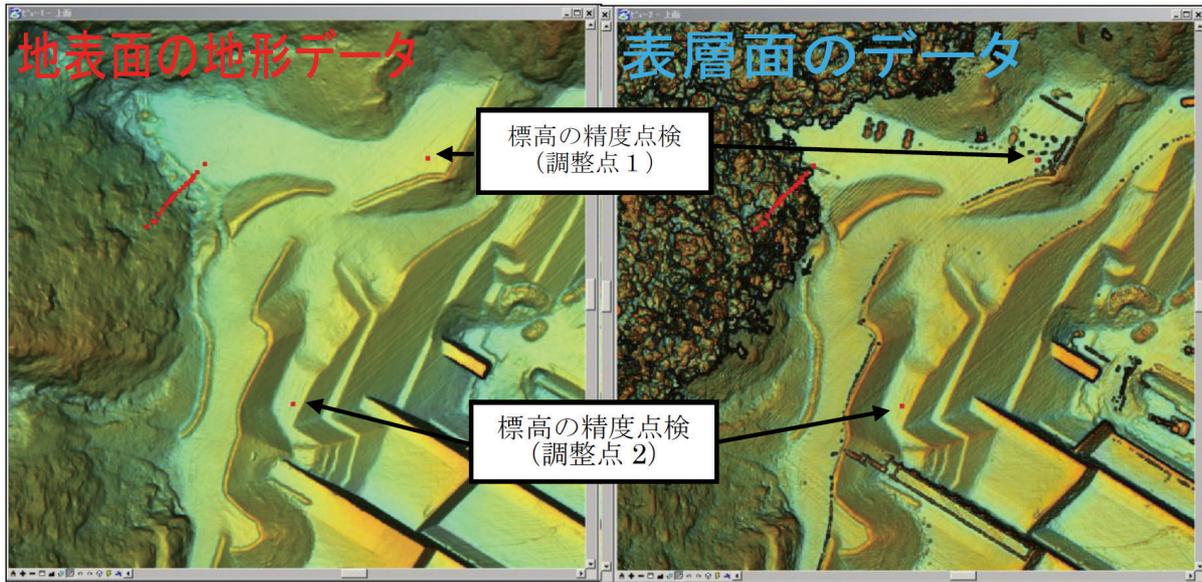


図19 点検箇所

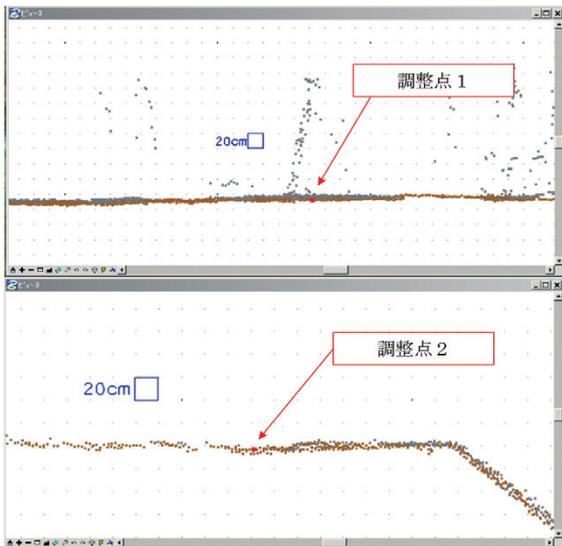


図20 レーザデータ取得状況 (断面)



図21 GNSS 測位機

表4 調整点による点検結果

点名	標高較差	標準偏差
調整点 1	0.004m	0.009m
調整点 2	0.015m	0.017m

4.3 標高の精度検証 (調整点)

標高の精度検証は、図 19 に示す箇所では現地にて設置した GNSS 測量機 (図 21) による標高値とレーザ計測による標高値の較差について、「公共測量作業規程」を参考に調整用基準点を用いた較差点検を実施した。データ取得状況は、図 20 に示す。

点検結果は、表4のとおりである。

- ・ 標高較差は、いずれも 0.020m 以内であり高精度な結果が得られた。また、標準偏差においても 0.020m 以内と地図情報レベル 250

の標高点精度 0.25m と比較しても良好な結果であった。

これらの結果から、着陸後 30 分の速報データ提供では現地の概略把握、着陸後 3 時間後の三次元地形モデル提供では 1cm の地割れ等の検出、着陸後 8 時間後の各種図面提供では災害対策の検討等、UAV によるレーザ計測は災害への適用性が高い事が確認できた。

5. 船による計測

ダムにおける地形測量では、ナローマルチビームや航空レーザ測量により、計測を行っている。ただし、小規模区域においては、コスト的制約があり、特に航空レーザ測量の実施は困難なケースが多い。そこで陸上地形データを手軽かつ安全に実施するため、モバイルレーザ計測システムを測量船に搭載し、計測速度3ノットで湖上から陸上部の計測を行った。計測は、ナローマルチビーム測深機 CARPHIN(株)オキシテック社製)と同時搭載、同時計測とした(図22)。陸上部を湖面から計測できる事により遮蔽物が少なく視通を意識せず高密度なデータを取得できた。



図22 船載状況

表5 計測結果比較

項目	VUX-1	ナローマルチビーム
レーザ種類	近赤外線	音波
ビーム幅	330°	90°
1m四方内点数	2000点	240点
計測密度	3cm	20cm

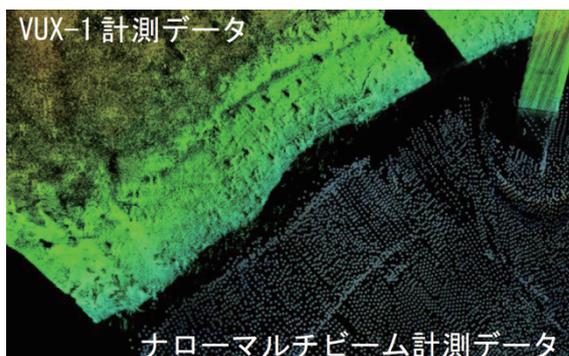


図23 データ取得状況

5.1 データ取得状況

図23にデータ取得状況を示す。レーザ計測データ密度、取得状況を確認した結果、水中のナローマルチビーム測深データと比較しても、表5のとおり高密度に計測されている事が確認できた。

5.2 構造物による精度検証

港湾構造物のインフラ点検を目的として港湾地区での計測も行い、精度検証を行った。検証は、構造物(岸壁の防舷材)の取得形状からCAD上で寸法を読み取り、17個の防舷材について規格値との比較を行った。比較は、図24のとおり4箇所について読み取り値を検証した。



図24 構造物読み取り位置

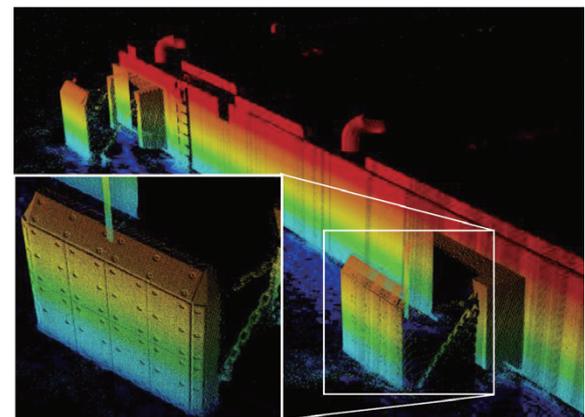


図25 データ取得状況

表6 構造物による点検結果

項目	較差 (m)			
	①	②	③	④
平均	0.007	-0.020	-0.005	-0.074
標準偏差	0.030	0.015	0.009	0.028
+方向最大	0.066	0.001	0.012	0.001
-方向最大	-0.061	-0.057	-0.018	-0.095

点検結果は、表6のとおりである。

- ・ 最大較差は、すべて 0.010m 以内であった。
- ・ 平均較差は、④が 0.074m であったが、その他は、0.020m 以内であった。
- ・ 標準偏差は、全て 0.030m 以内であり、地図情報レベル 250 の位置精度 0.12m と比較しても良好な結果が得られた。

船による計測でも高精度な結果が得られ、各種水中機材を同時搭載、同時計測する事で、陸上及び水中の計測データの整合性も図れるほか、コスト縮減も可能であり、ダムや港湾のほか海岸計測への利活用に期待できる。

6. 人力による計測

小規模地区を対象とした面的な地形測量において、通常は人海戦術によるトータルステーション法や地上レーザ測量が一般的に実施されている。これらの計測では、事前に基準点測量等が必要になり効率面が課題であった。そこで本検証では、小規模地区の地形測量において、人力によるモバイルレーザ計測を実施した。



図26 人力による計測状況

図 26 のとおり二人で手持ち架台を担ぎ、息を合わせて徒歩移動するだけのシンプル計測である。手軽さを考慮し VUX-1 は、L 字アングルにビス止めだけの簡単な構造とした。

6.1 データ取得状況

計測は 10 分程度行い、約 150m 区間を歩き河床部や溪岸部の地形データを取得した (図 27)。青色箇所は、水部によりデータが欠測と

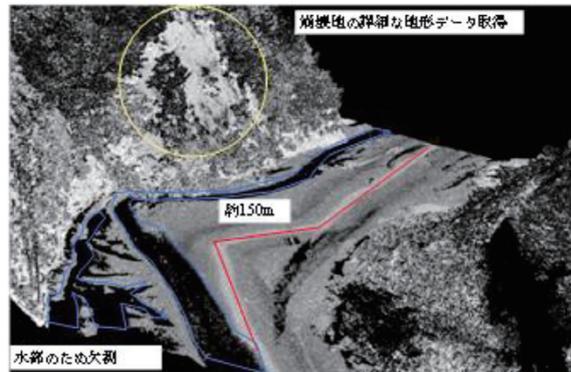


図27 取得データ

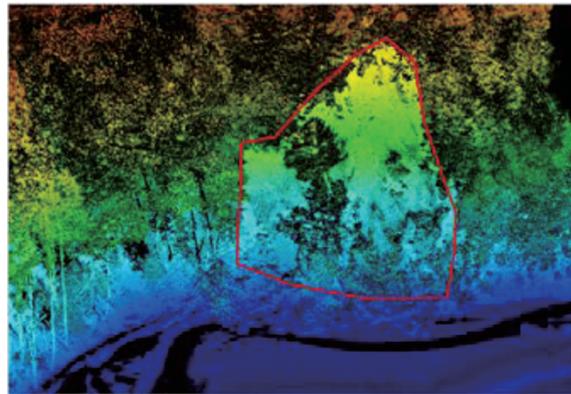


図28 崩壊地

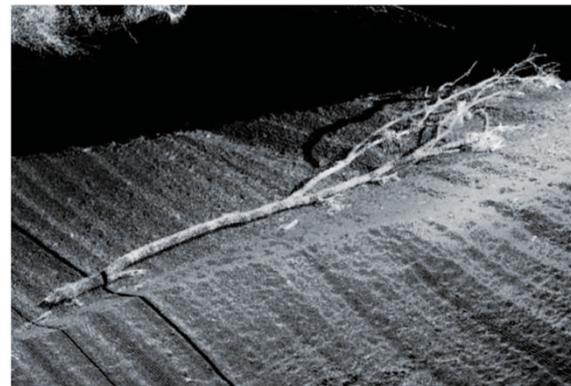


図29 流木の計測状況

なった。黄色箇所は、崩壊地であり詳細な地形データが取得できている事を確認した(図28)。

また、上流から流れてきた流木の木の枝や地表面の凹凸(足跡等)まで詳細に表現されている事が分かり、レーザが高密度に取得されている事が確認できた(図29)。

6.2 点群による精度検証

精度検証は、補備測量で活用している自動追尾型トータルステーションによる面的測量データとの比較検証を行った。

自動追尾を活用した面的測量は、図31のように360°ミラーを取付けたヘルメットを被った観測者の軌跡を自動追尾型トータルステーションで追尾し、XYZの座標値を取得した。取得したデータは、図30に示したとおり白枠4測線、約200点とVUX-1で取得した標高較差を比較評価した。

点検結果は、表7のとおりである。

- ・最大較差が0.090m以内であり、十分な精度

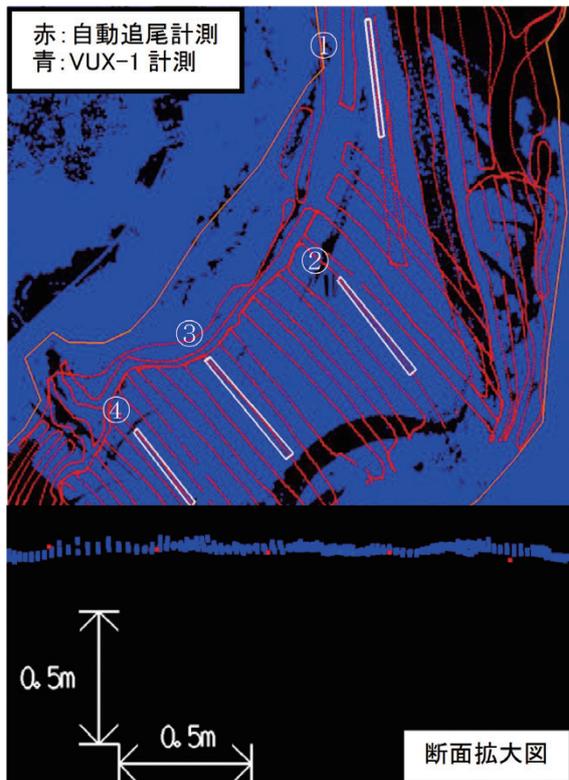


図30 点検箇所



図31 自動追尾を活用した面的測量

表7 点検結果

項目	標高較差 (m)			
	①	②	③	④
平均	-0.005	-0.038	-0.020	0.012
標準偏差	0.014	0.017	0.021	0.009
十方向最大	0.030	-0.06	0.001	0.027
一方向最大	-0.024	-0.078	-0.089	-0.003

である事を確認した。

- ・平均較差は、4箇所すべて0.050m以内であり、良好な結果が得られた。
- ・標準偏差においてもすべてのエリアで、0.020m以内と地図情報レベル250の標高点精度0.25mと比較しても良好な結果であった。

人力計測では、測量に必要な基準点等の準備作業が不要でありながら、高精度・高効率な結果が得られた。今後は、崩壊地のほか、河川や構造物の計測などにも利活用が期待できる。

7. まとめ

7.1 検証結果

「公共測量作業規程」地図情報レベル250(数値地形図)と本検証結果を表8のとおり、標準偏差値で評価した。結果は、全ての項目において、位置精度を満たしていた。

航空レーザ測量は、通常地図情報レベル500まで対応する事が可能である。一方、本システムでは、精度面において地図情報レベル250ま

表8 本検証結果と公共測量作業規程との比較

測量方法	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差	備考
公共測量作業規程 地図情報レベル 250	0.12m	0.25m	—
車載	0.019m (東西) 0.037m (南北)	0.021m	垂直版ターゲット
	0.026m (東西) 0.026m (南北)	0.016m	水平版ターゲット
UAV	—	調整点 1 0.009m 調整点 2 0.017m	調整点との比較
船載	① 0.030m ② 0.015m ③ 0.009m ④ 0.028m	—	構造物との比較
人力	—	① 0.014m ② 0.017m ③ 0.021m ④ 0.009m	自動追尾型 TS との比較

で対応しており、より高精度な結果が得られた。これは、本システムが比較的シンプルなシステム構成であるものの、計測条件として対象物へのレーザ照射距離が近い事が要因の一つと考えられる。

このように1つのシステムを様々なプラットフォームに搭載したが高精度を維持し、効率的かつ安全で品質の高い3次元データを取得する事が可能であった。



図32 湖面からの離発着

7.2 課題と展望

UAVによる計測においては、安全運航を目的として、無人航空機を対象とした航空法やガイドライン等が整いつつある。また、ドローンの機材の課題も多く、これらに対応した改良が求められている。

車両による計測では、舗装状況によりシステムへの衝撃による損傷等が懸念される。また、水濡れ厳禁のため船による計測では、安定の悪い船上での急な天候変化への対応、波しぶき等による水濡れ対策も必要である。

本システムは、GNSSの取得状況で精度が大きく左右されるため、遮蔽物や橋梁下では、安定して計測する事ができない事も課題である。

なお新たな取組としては、2m四方の簡易フロートから離発着させたUAVレーザ計測に成功した(図32)。

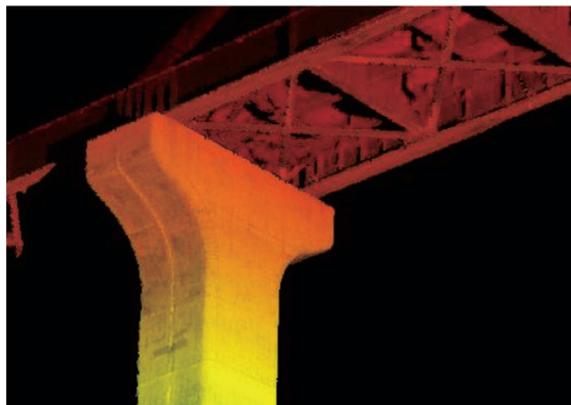


図33 橋梁下のデータ取得状況

また、船による計測では、航空レーザやUAVでは、計測が困難な橋梁の裏側も計測でき、インフラの維持管理等にも活用を予定している(図33)。

今後さらなる実績を積み重ね、新しい発想で

様々なニーズに対応できるようさらなる開発を進めて行く予定である。

7. 謝辞

本論文の作成にあたっては、共同研究として株式会社コハタに多大なる協力を頂いた。また、武雄河川事務所（国土交通省）・港湾空港技術研究所・近畿実測株式会社をはじめ多くの皆様から計測データのご提供等、ご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

■参考文献

- 1) 日本測量協会：公共測量作業規程 2016
- 2) 都竹正志・瀬口栄作（中日本航空株）、長井伸正（株コハタ）：UAVによる高精細レーザ計測の試み－Riegl LMS VUX-1の試験報告－、（一社）日本写真測量学会、平成27年度学術講演会論文集 2015
- 3) 高橋弘・高野正範・宮山智樹・若松孝平・瀬口栄作（中日本航空株）：超小型モバイルレーザ計測装置のUAVへの適用 日本測量調査技術協会、先端測量技術 第107号
- 4) 高橋弘（中日本航空株）：自動追尾型トータルステーションを活用した面的測量 日本測量調査技術協会、先端測量技術 第105号

■執筆者

城下 奨（しろした すすむ）

中日本航空 株式会社

調査測量事業本部

s_shiroshita@nnk.co.jp



（共著者）所属は筆頭著者に同じ

西川 貴史（にしかわ たかし）

石原 宏之（いしはら ひろゆき）

高橋 弘（たかはし ひろむ）

瀬口 栄作（せぐち えいさく）

宮山 智樹（みややま ともき）