

## 特集：将来の安全・安心な国土の礎となる土木技術

# 迅速で確実な天然ダム形成確認調査に向けて ーヘリコプター搭載型簡易レーザ計測システムの開発ー

水野正樹\* 岡本 敦\*\*

## 1. はじめに

地震や豪雨等、天然ダム形成につながる異常現象が発生した場合、ヘリ等により河道閉塞（天然ダム）形成の有無と規模を迅速に把握し、決壊氾濫等による被害を防止する必要がある<sup>1)</sup>。「土砂災害防止法に基づく緊急調査実施の手引きにおけるII.1の作業方法（案）」では、携行型レーザ距離計（図-1）をヘリに持ち込み計測する手法をヘリによる天然ダム形成確認調査の標準的な手法としている。



図-1 標準的なヘリ携行型レーザ距離計計測で用いるGPS、レーザ距離計と計測対象項目

しかし、携行型レーザ距離計計測は、一定時間ヘリをホバリング（空中静止）して計測するため、不安定な気象条件では計測が難しい、また、計測記録の再現性がない等の課題がある<sup>2)</sup>。

そこで、発災時にヘリによる天然ダム形成確認調査をより迅速かつ確実に行うために、計測手法を検討し、ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムを開発した。本報では、開発までの過程に沿って、各種計測手法の比較評価によるヘリ調査手法の選定、ヘリの計測試験飛行による調査手法の有用性検証、その結果を受けて「ヘリ搭載型簡易レーザ計測システム」を関東地方整備局の防災ヘリあおぞら号に搭載して、実装計測飛行による有用性の検証、に至る一連の検討成果について報告する。

## 2. 天然ダム計測手法

### 2.1 天然ダム計測手法の検討

ヘリによる天然ダムの計測手法は、6種類の手法について、「迅速性」、「難易度」、「確実性」の3項目で比較、評価を行った（表-1）。

計測手法の比較検討の結果、「ヘリ搭載型簡易レーザ計測」を選定した。これは、レーザ距離計、GPS 及び、慣性計測装置（Inertial Measurement Unit、3軸のジャイロと3方向の加速度計により3次元の角速度と加速度を計測する装置。以下IMU。）等の計測器をヘリに搭載し、計測する手法である。

表-1 ヘリ計測手法の評価項目

| ヘリ計測手法      | 迅速性                                                     | 難易度                                     | 確実性                                          |
|-------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|
| 斜め写真計測      | 評価 ○<br>作業工程数 2<br>計測作業 有<br>変換作業 有<br>解析作業 有<br>判読作業 有 | 評価 ○<br>機材の操作性 ◎<br>解析の複雑度 △<br>機材の調達 ○ | 評価 △<br>記録の再現性 ○<br>精度 △<br>計測時間 ○<br>解析作業 △ |
| ビデオ映像計測     | 評価 △<br>作業工程数 4<br>計測作業 有<br>変換作業 有<br>解析作業 有<br>判読作業 有 | 評価 △<br>機材の操作性 △<br>解析の複雑度 △<br>機材の調達 ○ | 評価 △<br>記録の再現性 ○<br>精度 △<br>計測時間 ○<br>解析作業 △ |
| 携行型レーザ距離計計測 | 評価 ◎<br>作業工程数 1<br>計測作業 有<br>変換作業 有<br>解析作業 有<br>判読作業 有 | 評価 △<br>機材の操作性 △<br>解析の複雑度 有<br>機材の調達 ○ | 評価 △<br>記録の再現性 △<br>精度 ○<br>計測時間 △<br>解析作業 有 |
| 搭載型簡易レーザ計測  | 評価 ◎<br>作業工程数 1<br>計測作業 有<br>変換作業 有<br>解析作業 有<br>判読作業 有 | 評価 ○<br>機材の操作性 ○<br>解析の複雑度 有<br>機材の調達 ○ | 評価 ○<br>記録の再現性 ○<br>精度 ○<br>計測時間 ○<br>解析作業 有 |
| 複眼デジタルカメラ計測 | 評価 ○<br>作業工程数 2<br>計測作業 有<br>変換作業 有<br>解析作業 有<br>判読作業 有 | 評価 ○<br>機材の操作性 ○<br>解析の複雑度 ○<br>機材の調達 ○ | 評価 △<br>記録の再現性 ○<br>精度 △<br>計測時間 △<br>解析作業 △ |
| 距離カメラ       | 評価 ◎<br>作業工程数 1<br>計測作業 有<br>変換作業 有<br>解析作業 有<br>判読作業 有 | 評価 ×<br>機材の操作性 ○<br>解析の複雑度 有<br>機材の調達 × | 評価 ◎<br>記録の再現性 ○<br>精度 ◎<br>計測時間 ○<br>解析作業 有 |

## 3. ヘリ搭載型簡易レーザ計測手法の検証

### 3.1 試験したヘリ搭載型簡易レーザ計測システムのシステム構成

「ヘリ搭載型簡易レーザ計測」のシステムを製

For the quick and certain check investigation of landslide dam formation by a helicopter  
-Development of the simple laser counting system mounted on a helicopter-

作し、計測試験飛行を実施した。製作したシステムは、計測パルス頻度 100Hz（1秒間に100回）のレーザ距離計、ファインダーの役割を示すビデオカメラ、及び、計測位置と計測姿勢の測定が可能な GPS/IMU からなる（図-2）。



図-2 計測試験飛行の機器設置状況

### 3.2 計測試験飛行の手順

テストエリアは、宮ヶ瀬ダム周辺で行った（図-3）。飛行高度は、使用したレーザ距離計の性能から対地高度 150m～200m とした。また、計測試験飛行の手順は次のとおりである。

- ・飛行中は、データ表示を目視で確認
- ・着陸後に計測データをダウンロードして結果を確認
- ・別に用意した航空レーザ測量による 2m メッシュの DSM を用いて軌跡下の横断面を作成し、本システムによる計測結果と比較

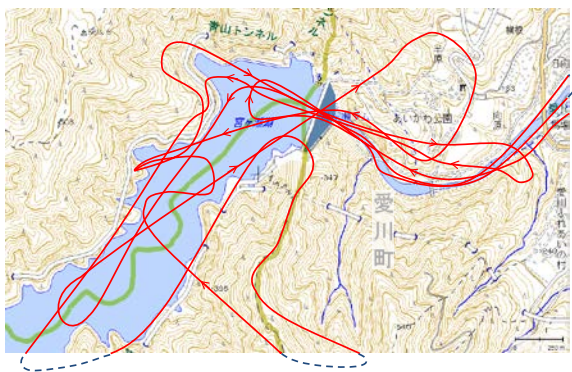


図-3 計測試験の航跡図

### 3.3 計測試験飛行の結果

ダムの本体と、周辺地域において、同じ場所の往復飛行計測を行ない、計測精度の確認、及び、繰り返し精度について確認した。

- ・試験結果
  - 1) ダム本体を往復して計測したところ、往復の計測で同じようにダム本体の形状が得られた。
  - 2) 航空レーザ測量による 2m メッシュの DSM と試験結果を比較した結果、図-4 に示すように計測時間差によって生じる進行方向に依存するズレ

が見られた。このズレを手動で DSM に合うように補正したところ、飛行箇所ではほぼ計測位置が一致した（図-4）。補正後の DSM との相対的な精度は概ね  $\pm 5\text{m}$  以内（使用した GPS の精度と同じ）であった。このずれは、GPS/ジャイロとレーザ距離計の同期が取れていないためと考えられる。

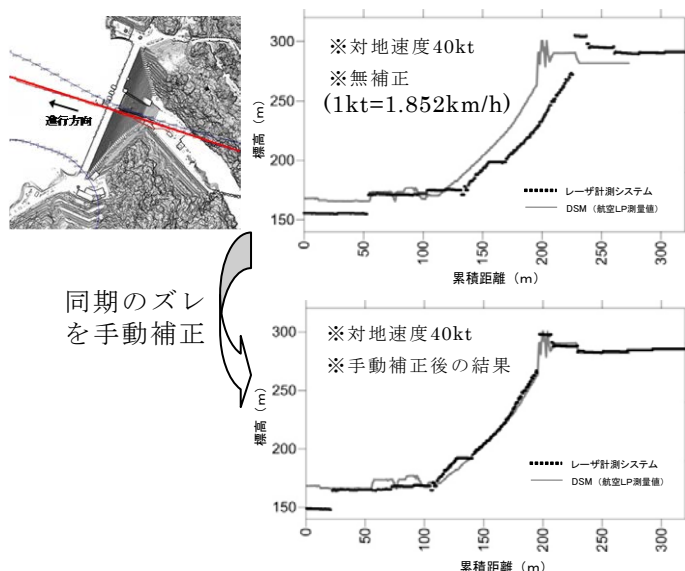


図-4 計測試験飛行結果と DSM との比較

計測試験飛行を行った結果、ヘリによる天然ダム形成確認調査手法として比較選定した「ヘリ搭載型簡易レーザ計測」は、より迅速・確実な天然ダムの形成確認調査に有効であると考え、国土交通省防災ヘリへの実装試験へ移行した。

## 4. ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの実装検証

### 4.1 実装したレーザ計測システムの概要

ヘリ搭載型簡易レーザ計測手法の試験結果を基に「ヘリ搭載型簡易レーザ計測システム」を製作し実装した。このシステムは、ヘリコプターの機外に取り付けた水平防振架台とそれに搭載された GPS/IMU（レーザ距離計と同期を取る事が可能なもの）、ビデオカメラ、3台の 100Hz レーザ距離計（3章の試験飛行で使用したレーザ距離計より、測定距離が長くパルス照射時間が短い機種を使用）で構成される（図-5）。天然ダムの調査では、機体の左側にシステムを装備し、計測オペレータが計測対象位置をビデオカメラのリアルタイム映像で確認しながら飛行ルートを指示し、河川の上空を縦断方向に低速で飛行することにより、

3測線の地形縦断データが得られる（図-6）。また、レーザ距離計の機種を変更したことで、計測時の対地標高は150m～350m、機体速度は50kt（約90km/h）と3.の試験飛行より速い計測飛行が可能である。

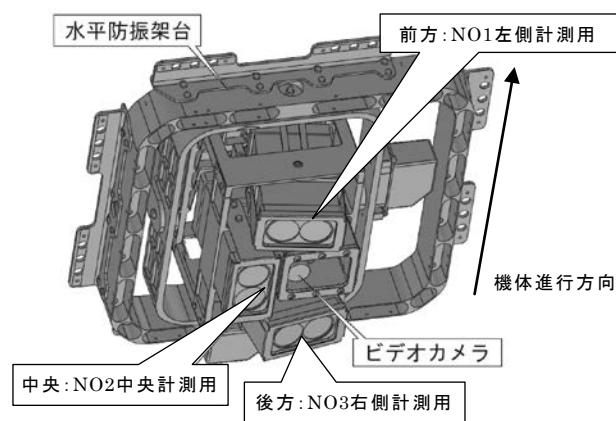


図-5 レーザ測定システム（システムを斜め下から写したモデルで、左側が機体位置、GPS/IMUはビデオカメラの上部に固定）

計測時にシステムから出力されるデータは、1秒間隔で計測地面の位置座標と標高を算出して機内のPC画面に計測箇所の縦断グラフとして表示し随時確認できる。さらに、100Hz周期で、レーザ距離計の測定距離データ、IMUの姿勢データ及びGPSのヘリ位置情報がPCに収録され、後処理により計測地面の位置座標を100Hz周期で算出できる。

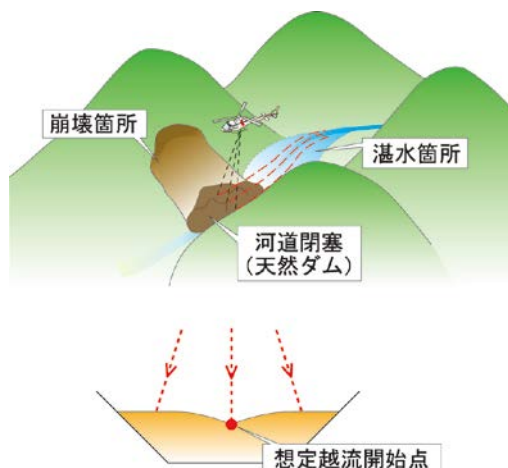


図-6 天然ダムの計測イメージ

システムの特徴は、(1) 3台のレーザ距離計を搭載することで、越流開始点（最低点）により近い位置を捉えることが可能、(2) 複数のレーザ距離計を有することでシステム冗長度を確保、(3) 水平防振架台にレーザ距離計とIMUを載せるこ

とで低コストかつ、ブレの少ない安定した計測が可能、という点である（図-5）。さらに、システムの架台は、投光器のマウントに設置可能であり、飛行前の20分程度の時間で付け替え作業が行われる。

ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムを構成する3台のレーザ距離計のうち中央のものは、IMU及びビデオカメラと同軸に直下方向で固定され、前後2つのレーザ距離計は機体進行方向に対して左右方向（ロール方向）に $\pm 5^\circ$ 間で取付けが可能である。さらに、水平防振架台は、機体内部のコントローラーを使って、飛行中にロール、ピッチ、方位方向へ独立で $\pm 10^\circ$ まで傾けることが可能である。

#### 4.2 ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの実装検証

ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの実装検証は、関東地方整備局のあおぞら号にシステムを搭載し実施した（図-7）。

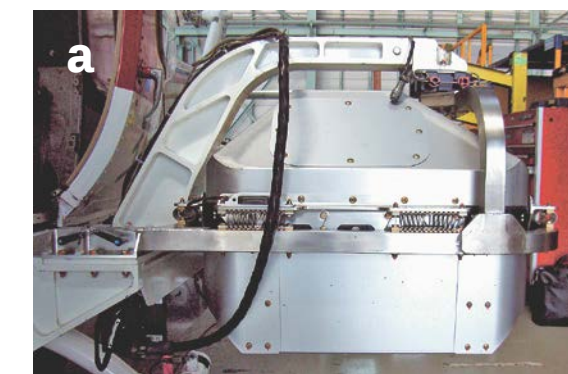


図-7 ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの搭載状況

計測時にオペレータは機内作業として、(1) システムの起動とビデオカメラ映像の録画・表示開始、(2) オペレータからパイロットへ測定対象と計測コースの指示、(3) 必要に応じて機体内部のコントローラーによる水平架台の操作、(4) 測定

対象上空のレーザ測定開始とPCの操作、を実施する。

#### 4.2.1 計測対象地域

計測の対象地域は、群馬県吾妻郡中之条町の野反ダム付近とした（図-8）。野反ダムでは、堰堤を天然ダムと想定し、下流側から対地高度約330m(1000ft)、機体速度約93km/h（50kt）で計測した。



図-8 対象地域と計測コース

#### 4.2.2 検証方法

ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの検証は、計測結果を既存の地形データと比較することで行った。野反ダムの計測結果は、航空レーザ計測の2mDEMと比較した。計測結果は、約0.25m間隔で取得されているため、対比するDEMの値は、計測点の座標が含まれるメッシュの4点から共一次補間により推定した。

ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムに使用したGPSは、MSAS補正DGPSである。単独測位により位置を算出するため、位置の計測精度は、水平方向より高さ方向でGPS衛星の配置の影響を受け易く、相対精度で水平方向±2.5m（DGPS時）、高さ方向±5m（DGPS時）である。また絶対精度はより低い。そこで、DEMと高さを比較するため、構造物等の平坦面や堤体端部を基準面に設定してDEMと重ね、計測結果の標高値を補正した。

#### 4.2.3 検証結果

##### (1) 野反ダムの縦断方向の検証結果

野反ダム（堤高44.0m）のA-A'縦断でヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの計測結果と航空レーザ測量成果の2mDEMについて堰堤端部（図-9 No.2の赤矢印）を基準として標高を補正した。

ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの3台のレーザ距離計（図-5）を直下と機体進行方向に直交±2°の角度で取り付け飛行した計測結果は、堰堤付近でDEMとほぼ一致し、地形の形状を明瞭に表している。そして、標高約1,520m以上の値は、ややばらつきがあるが、これは樹木等の地表面以外の値が取得されていると考えられる（図-9）。

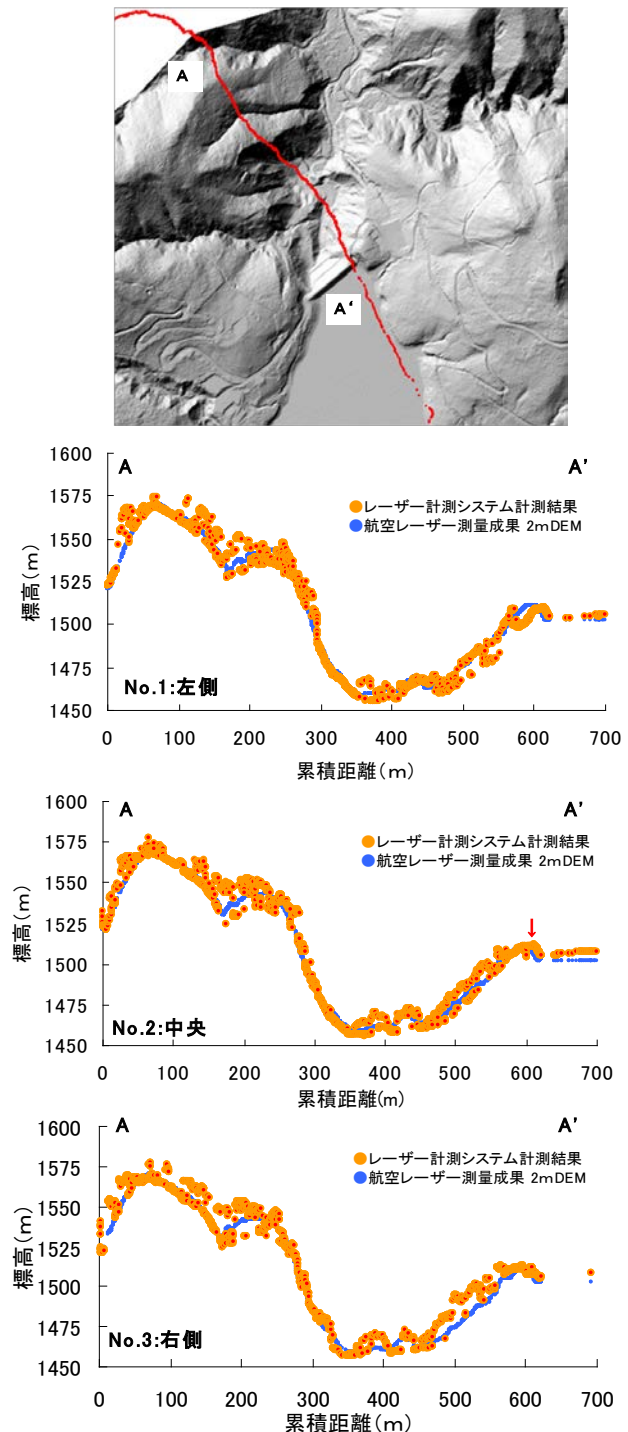


図-9 レーザ距離計3台の計測結果とDEMの比較（野反ダム縦断方向）

航空レーザ測量成果を正解とした時の標高値の比較では、標高1,520m～1,560m付近の樹木の影響がある箇所を除き、ほとんどの地点で較差が±5m範囲にある(図-10)。また、計測結果を基に、堰堤の天端から下流側末端の比高差を算出すると約48mで、公称の堤高44mとの差は4mとなった(図-11)。

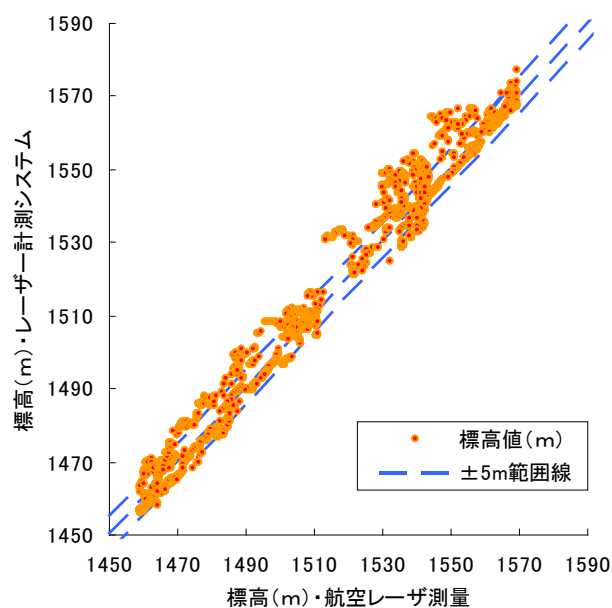


図-10 縦断方向での標高値比較(野反ダム)

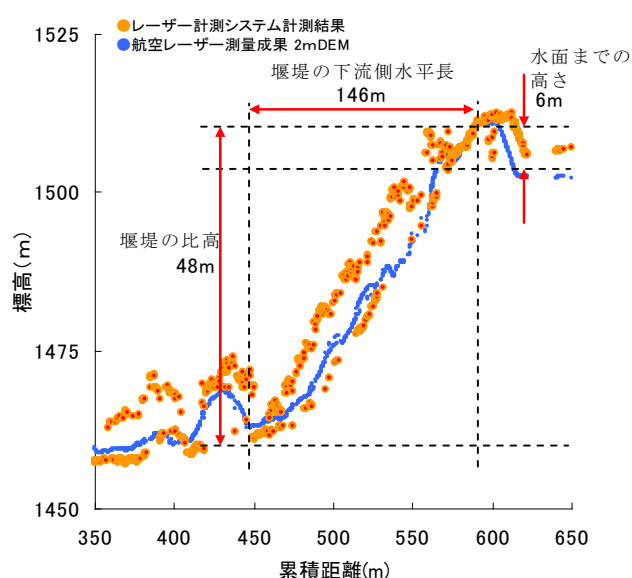


図-11 堰堤の形状比較(図中の数字はヘリ搭載型簡易レーザ計測システムにより読み取った堰堤の比高、下流側水平長、水面までの高さ)

## (2) 野反ダムの横断方向の検証結果

野反ダムのB-B'横断でヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの計測結果と航空レーザ測量成果の

2mDEMについて堰堤の左右岸(図-8 No.2中央の赤矢印2箇所)を基準として標高を補正した。

3台のレーザ計測結果は、縦断方向の比較と同様に、樹木等の地表面以外の値も計測されている箇所ではばらつきがあるものの、堰堤付近でDEMとほぼ一致し、地形の形状を明瞭に表している(図-12)。

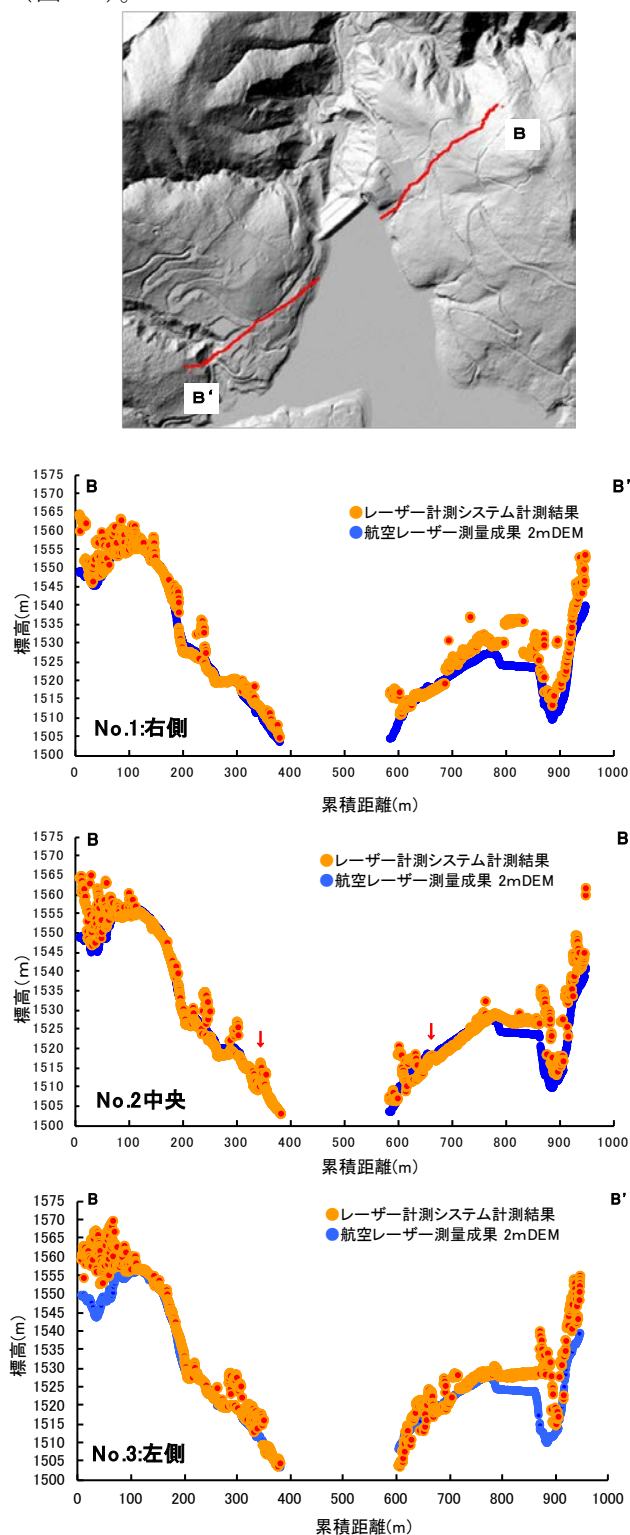


図-12 レーザ距離計3台の計測結果とDEMの比較(野反ダムの横断方向)

航空レーザ測量成果を正解とした時の標高値の比較では、標高1,510m～1,530m、1,550m付近の樹木の影響がある箇所を除き、ほとんどの地点で相対的な較差が±5mの範囲にある（図-13）。

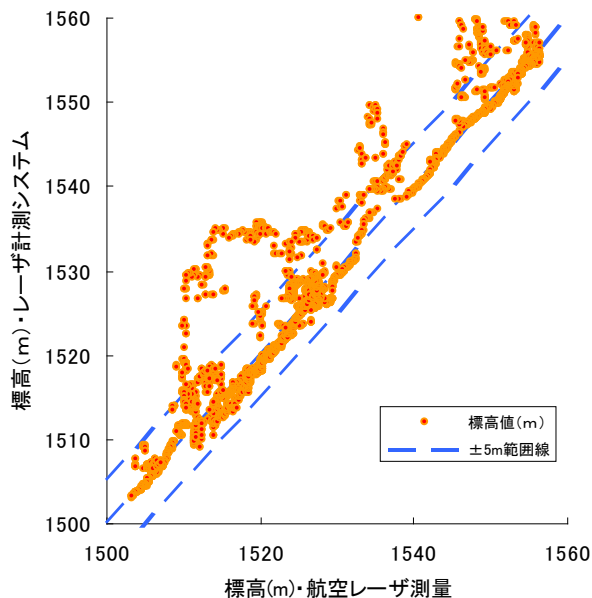


図-13 横断方向での標高値比較（野反ダム）

## 5. まとめ

天然ダム形成確認調査を行う際の計測手法の検討を行い、最適手法である「ヘリ搭載型簡易レーザ計測システム」を用いた検証を実施した。その結果、天然ダムに見立てて計測した野反ダムのダム高44mに対して約48mと計測し相対誤差±5mの範囲内で取得できた。また、航空レーザ測量成果である2mDEMと比較した結果、樹木の影響を除き概ね相対誤差±5m以内で計測ができた。

ヘリ搭載型簡易レーザ計測システムの計測位置座標の誤差が大きくなる主な要因としては、計測時には機体姿勢の大きな変動、機材的には水平架台上にGPSアンテナがあるためヘリコプターの影によるGPS衛星の受信状況に偏りがあること、等が挙げられる。

計測時の誤差要因を軽減するためには、なるべく等高度で対象に対して直線状に飛行することが必要である。

また今回、精度の比較のため構造物のある位置を使って標高の補正を行ったが、既知の標高が無い場合にも、「想定越流開始点」と「天然ダムを

形成している土塊の下流末端」との天然ダム比高計測で、相対誤差±5m程度を確保できると予想される。しかし、天然ダム標高の絶対標高が必要な場合は、災害前のDEM等を用いて補正することにより精度が向上する。

## 6. 今後の課題

今後の課題としては、計測時の誤差要因をさらに軽減するため、GPSについては、ヘリ機体の影にならないように機体本体搭載のGPSアンテナを活用、誤差の小さい準天頂衛星対応のGPS受信機に更新することで、より精度が向上すると考えられる。

今後、実際に形成された天然ダムを計測することにより、災害時に適切に計測出来るかどうか確認したい。

## 謝 辞

国土交通省防災ヘリあおぞら号を用いた計測試験飛行等において、協力いただいた関東地方整備局及びヘリ運航会社の皆様に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流グループ：天然ダム監視マニュアル（案）、土木研究所資料、第4121号、2008
- 2) 内田太郎、吉野弘祐、清水武志、石塚忠範、小竹利明：長距離レーザ距離計を用いた天然ダム形状の計測、土木技術資料、第53巻、第5号、pp.22～25、2011

水野正樹\*



国土交通省国土技術政策  
総合研究所危機管理技術  
研究センター砂防研究室  
主任研究官  
Masaki MIZUNO

岡本 敦\*\*



国土交通省国土技術政策  
総合研究所危機管理技術  
研究センター砂防研究室  
長  
Atsushi OKAMOTO