航空レーザ計測データを活用した災害対応の有効性と課題の検討
—「平成20年岩手・宮城内陸地震」で発生した
河道閉塞（天然ダム）箇所の緊急対策を例として—

Discussion on the Effectiveness of Disaster Control based
on Aerial Laser Survey Data and the Problems thereof

小浪 尊宏*・小野 博之**・大谷 徹**・藤 良太郎**

Takahiro KONAMI, Hiroyuki ONO, Toru OTANI and Ryotaro FUJI

Abstract: The effectiveness of disaster control based on the aerial laser survey data and the problems thereof have been discussed by taking the emergency measures taken for the river course (natural dam) blocked by the “Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008” as an example. As compared with the conventional aerial photographic survey, the aerial laser survey that collects land-surface data of wider areas has been recognized as an extremely helpful technique to understand the present situation of earthquake disaster more quickly and precisely. However, there are some matters that need technical innovation. This report summarizes the effectiveness and problems based on actual experiences.

1. はじめに

我が国は地震や豪雨による斜面災害や洪水が多発し、これまでもその迅速な復旧の基礎として災害箇所の地形やその変化の計測、土砂量や洪水被害の把握に写真測量技術が活用されてきた。一方、近年では新しい航測技術として航空レーザ計測の活用が進み、地形情報の取得の効率化が図られている。災害対応においてもその計測能力は活用性が高いと期待され、実務での活用が始まっている。

本稿では、平成20年岩手・宮城内陸地震における航空レーザ計測技術の活用結果をケーススタディとして、実際の災害対応の結果に基づく、同技術の災害対応への有効性と課題を報告する。

2. 平成20年岩手・宮城内陸地震とその緊急対応の概要

「平成20年岩手・宮城内陸地震」は、6月14日午前8時43分に岩手県内陸南部の宮城県境付近（仙台市の北約90km）を震源として、マグニチュード7.2の規模で発生した。この地震によって、内陸部で多数の土砂崩壊が発生し、土砂災害により死者・行方不明者23名を含む人的被害者449人の大災害となった（表1）。同地震の被害の特徴は、同規模の地震と比較して建物被害が少ない一方、土砂災害が多いことが挙げられる。また、大規模な河道閉塞（天然ダム）が少なくとも15箇所発生し（図1）、水位が上昇する中で、決壊を防ぐための緊急対応が必要となった。その中で、国土交通省東北地方整備局（以下「整備局」）は、航空レーザ計測を実施して各種の災害情報の収集を行った。整備局では、地震発生と同時に災害対策本部を設置し、非常体制として緊急対応を開始した。地震発生当日には、整備局保有の防災用ヘリコプターや民間の航空機等による上空からの調査を行い、状況確認に全力を尽くし、その結果、宮城県栗原市の迫川上流部、岩手県一関市の磐井川上流部を中心に多数の崩壊や地すべりを確認

* 内閣官房
Cabinet Secretariat

**国際航業株式会社

Kokusai Kogyo co., ltd

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 48, NO. 6, 2009

表1 平成20年岩手・宮城内陸地震とその被害の概要

地震の概要						気象庁発表より					
発生日時		6月14日 8時43分									
場 所		北緯39度01.7分 東経140度52.8分（岩手県内陸南部の深さ8 km）									
規 模		M7.2									
震 度		6 強（岩手県奥州市，宮城県栗原市） 6 弱（宮城県大崎市 等） 5 強（岩手県北上市，一関市，宮城県仙台市，名取市，登米市，秋田県湯沢市 等）									
地震名称		平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震									
発震機構		西北西－東南東に圧力軸を持つ逆断層型									
人的及び住家被害の状況											
平成21年7月2日13時00分現在 消防庁発表より											
都道府県名	人的被害					住家被害			火災		
	死者	行方不明	重傷	重症	軽症	全壊	半壊	一部損壊	建物	危険物	その他
	人	人	人	人	人	棟	棟	棟	件	件	件
岩手県	2		37	9	28	2	4	778	2		
宮城県	14	4	365	54	311	28	141	1,733	1		
秋田県		2	21	5	16		1	9	1		
山形県			1	1				1			
福島県	1		2	1	1						
計	17	6	426	70	356	30	146	2,521	4	0	0

図1 河道閉塞箇所（丸で表示）位置図

した。

整備局は、岩手・宮城両県知事からの要請を受け、決壊や氾濫のおそれが高い天然ダムを「直轄砂防災害関連緊急事業」として直轄実施を決めるとともに、各天然ダムの規模や対策の方向性、緊急度を検討するため、全河道閉塞箇所の航空レーザ計測を実施した。

また、緊急対応は発災直後に留まらず、地震発生から約4ヶ月後、一部の河道閉塞箇所における越流と土砂浸食の発生時においても、緊急の航空レーザ計測を実施した。

3. 地震直後の対応

3.1 地震直後の緊急計測

地震直後に実施した緊急計測の諸元を表2に示す。点密度は地形情報の把握性能と計測効率の双方を勘案して2m四方に1点とした。

3.2 地震発生直後のレーザ計測の活用

地震直後には、計測した航空レーザデータから、主として現況把握を目的とした複数の解析図面を作成し、災害対策に活用した。また、被災前の地形も既存の資料を用いて再現し、被災前後の変化を把握できるように整理した。

航空レーザデータの解析のながれを図2に示す。以下、7種の解析図の作成法と活用の概要を記す。

(1) 縦横断面図

縦横断面図はグラウンドデータ（レーザ計測データから地物の高さ分をフィルタリング処理で取り除いたもの）から20mピッチでした。河道閉塞箇所の縦断面図、横断面図の例を図3に示す。この際、被災前の縦横断面図も同測線で作成し重ね合わせることで崩壊土砂の堆積や侵食の状況を定量的に把握することができる。

なお、航空レーザ成果は、面的な地形モデルを作成することで任意箇所の断面図を容易に作成できる点が特徴である。今回のように大量な断面（約900断面）の一括生成や、天然ダムの天端高の推定のための高密度な断面計測などへの活用性が非常に高い。

表2 地震直後の航空レーザ計測の諸元

計測日	計測機器	点密度
2008/6/15, 18	Leica ALS-50	1点（2m×2m） 以上
その他諸元		
<ul style="list-style-type: none"> プラットフォーム：Cessna208 飛行高度：1,720m 対地高度：1,370m 対地速度：200km/h 		<ul style="list-style-type: none"> サイドラップ：50% パルスレート：53kHz スキャン角：23度 スキャン回数：42.0Hz

図2 航空レーザデータの解析のながれ

図3 河道閉塞箇所の横断面図(上)と縦断面図(下、破線丸：河道閉塞箇所)

また、縦横断面図は、設計や土工数量算定の基礎資料となるため、災害復旧費の要求時、復旧対策工事の設計等において活用された。

(2) 等高線図

グラウンドデータを用い、主曲線間隔1mの等高線図を作成した(図4：岩手県市野々原地区)。河道閉塞箇所の微細な地形が表現されている。高密度レーザ計測データから生成された等高線図は、従来の図化手法による等高線図と比較し、微地形の表現力に優れている。後述するH-V図と併せ、越水の予測と越水時の挙動の検討に活用された。

図4 河道閉塞箇所の等高線図作成例(岩手県市野々原地区)

(3) 鳥瞰図

航空レーザ計測データによる3次元モデル(グラウンドデータ)に航空写真を正射投影処理することにより鳥瞰図を作成した(図5)。

鳥瞰図は、航空写真を利用することで地形を視覚的に把握することができ、被災前後の状況を任意の視点から比較することが可能であるため、地元住民や市役所防災部局に対し災害状況を説明する際に活用された。

(4) 湛水域想定図・H-V図

天然ダムの水位上昇によって湛水すると想定される範囲を、3次元モデルを基に水位1m毎に算出した。

また、スライス法によりH-Vを算出し、H-V曲線及びH-V図を作成した(図6)。H-V曲線とは、貯水位・貯水量曲線で、航空レーザ計測時の水位、水量を考えあわせることで越流日時の推定が可能となった。当初、天然ダム下流住民は避難していたが、一時帰宅の可否の判断や作業員の安全確保に際しての避難・警戒体勢、情報伝達体勢の構築に活用された。

<越流日時の推定方法>

■基礎条件

- 河道閉塞前の地形データとして、平成18年度東北地方整備局発注業務における航空レーザ計測データ(グラウンドデータ)を使用。
- 地震発生6月14日8:43、航空レーザ計測6月15日9:00~10:00⇒約24時間後

■計算手法

- 標高233.5mを最下点とし、水位(H)1m毎の水量(V)をスライス法で算出。
- 航空レーザ計測時(24時間後)の水位、水量
 - 標高246.6m(6/15計測結果より抽出)
 - 水量234,679m³(H-Vより算出)

図5 航空レーザデータを用いた地震前後の鳥瞰図（市野々原地区）

図6 貯水位-貯水量曲線（H-V）図

図7 横断面を利用した河道閉塞箇所の最小標高の推定

■ 1時間あたりの水量の増加量

- $234,679\text{m}^3 \div 24\text{h} = 9,778\text{m}^3/\text{h}$

■ 河道閉塞箇所の最小標高（図7）

- 標高約260.0m（6/15計測結果より抽出）
- 260.0mは、河口閉塞箇所を乗り越えて下流へ流れ出す水位である。

■ 標高260mの水量

- $1,790,123\text{m}^3$ （H-Vより抽出）

■ 標高260mに達する時間（日数）

- $1,790,123 \div 9,778 = 183\text{h} = 7.6\text{日}$

■ 河道閉塞から越流する日時（推定）

- 6月14日 8:00 + 7.6日 = 6月21日 22:00頃

(5) 土砂量算出

被災前後の横断面データを用い、平均断面法による移動土砂量の算出を行った。デジタルオルソ画像を併用することで、土砂崩壊範囲の設定を行うとともに、河道堆積部と斜面変動部を区分した土砂量を定量的に把握することができた。これらのデータは、災害の規模をわかりやすく示す指標として報道等で活用されたほか、応急対策完了後の土砂流出防止対策（砂防堰堤等の整備）の検討時に活用された。

(6) 天然ダム決壊シミュレーション

天然ダム決壊による洪水流量及び下流への伝搬状況の推定を磐井川（市野々原地区）及び迫川（湯ノ倉温泉地区）について行った（図8）。計算手法は一次元不定流計算とし、計算断面は矩形近似（1/100確率水位以下の通水断面積を利用）とし、100mピッチの航空レーザ計測データ（地震前計測）による断面図を元に設定した。これにより、万が一の決壊時における地点ごとのリスクが明らかになり、一時帰宅中の避難住民や作業員の行動の指針となった。

3.3 地震直後の現況把握結果と考察

航空レーザ計測データの活用により、被災状況を迅速かつ客観的に把握し、しかも調査結果を視覚的に富んだ表現で表すことができた。

図8 天然ダム決壊のシミュレーション結果

図9 出水前後の土砂変化量 (川原小屋沢地区)

図10 地形変化に関する出水前後の比較資料（湯ノ倉温泉地区の例）

この結果により、現地に通じる道路が寸断されている中、早期（被災11日後の6月25日）に計15箇所の河道閉塞の状況（閉塞土砂量、閉塞幅等）を公表できた。また、現状把握だけでなく、水位－容量の関係を算出した越流水位の想定は、水位上昇に伴う下流への避難・警戒体制の確立に資する特筆すべき成果となった。航空レーザ計測は、地表面のデータを直接デジタル

データで取得することから、加工が容易であり高精度な地形モデルの構築が可能である。本件は、災害時等、現地への立ち入りが困難な箇所における航空レーザ計測によるデータ取得の有効性が十分に発揮された事例であると同時に、地震前のレーザデータが整備されている箇所では、より迅速で高精度な状況把握が可能であったことから、大規模災害に備えた詳細地形データ

蓄積の重要性が改めて認識された。

4. 出水時の対応

4.1 出水時の緊急計測

地震発生から約4ヶ月経過した平成20年10月24日、当該地域は大雨に見舞われ、その影響により一部の天然ダムから越流、土砂侵食が発生した。

そのため、再度の現況把握とリスク評価を行うため、表3の通り2回目の緊急計測を行った。

4.2 出水時のレーザ計測の活用

出水時の現況把握では地震発生直後と同様の手法で各種の解析図を作成した。

また、出水前後で詳細な地形モデル間の比較が行えることから、土砂変化量を面的に表した差分図(図9)を作成の上、他の解析結果と総合的に考察した資料を地区毎に作成した(図10)。

図10には最も大きな変動が生じた湯ノ倉温泉地区について取りまとめた資料の例を示す。

(湯ノ倉温泉地区の変動状況)

河道閉塞上流側の堆積は左岸側崩壊地の再崩壊に伴う堆積、および河道閉塞対策のための人工改変である。河道閉塞の越流部(上流端)については侵食深が浅く、下流側に進むに従って侵食深(侵食土量)が増える傾向にある。地震時に生産された土砂は出水により下流側に運搬され、河道閉塞下流端から川原小屋沢合流点以下に至るまでの範囲にわたって河床高の上昇(堆積)が確認できる。越流水が発生する直前まで流路上で流路工敷設工事が行われていたため、算出した土砂変動量には人工改変の影響も含まれている。

表3 出水時の航空レーザ計測の諸元

箇所	計測日	計測機器	点密度
宮城県	2008/11/11～/27	Leica ALS-50	1点(1m×1m)以上
その他諸元			
・プラットフォーム：Cessna208 ・飛行高度：1,670m ・対地高度：1,370m ・対地速度：200km/h		・サイドラップ：50% ・パルスレート：61kHz ・スキャン角：22度 ・スキャン回数：40.0Hz	

4.3 出水時の現況把握結果と考察

出水時も地震直後の航空レーザ計測データと同じ精度で計測を行っているため高精度な比較が可能であった。土砂の侵食や堆積状況について定量的に比較ができ、土砂の移動状況が明確に把握できた。また、同時に撮影したデジタルオルソ画像との重ねあわせにより人工構造物と自然地形との違いも容易に確認できた。

定量的な比較に当たっては、河道中心線や横断箇所など同一の箇所での比較が不可欠である。データが座標管理されていることにより、地形モデルを差し替えるだけで必要な情報(3次元情報)の取得が可能となった。

5. 総合評価

平成20年岩手・宮城内陸地震では、土砂災害が多発したため、その緊急対応では特に迅速な地形情報の把握が重要となった。その点で、航空レーザ計測技術の活用は、迅速性、計測精度の面で、従来からの空中写真測量に基づく調査に比べ、表4のとおり有利な点が認められた。

原則的には空中写真測量を用いても同種の成果を作成することは可能ではある。しかし、レーザ計測では近赤外線レーザを地上に照射しその反射データを取得して直接的に地形の3次元データを計測するのに対し、空中写真測量では熟練オペレータによるステレオ写真の図化作業が必要となり、迅速性やコストの面で差違が生じる。また、能動的センシング手法によるデータ取得であるため、森林地域で直接的に地表面のデータの取得が可能である(ビーム径より広い樹冠の隙間がある場合)。

表4 従来法との比較

比較項目	迅速性	精 度
①状況把握(定量的)	○ (1.6倍)	○ 25cm(33cm)
②縦横断地形図	○ (2倍)	△ 30cm(33cm)
③貯水量・水位土砂変化量	○ (2倍)	○ 30cm(33cm)
④鳥瞰図	○ (2倍)	○ 30cm(33cm)

※()は空中写真測量の比率または数値

迅速性及精度およびコスト面からも、空中写真測量と比較し、航空レーザ計測は災害時の緊急的な3次元データ取得に有効と言えよう。

6. 今後の課題

今回の検討を通じて、次のような点が航空レーザ計測手法を用いた災害対応の課題と考えられた。

(1) 構造物等の地物が表現された地形データの取得

緊急対応においては、対策工などの設計業務へのデータ提供が不可欠である。航空レーザ計測から得られるデータは、基本的にランダムな位置座標を有した標高データであるため構造物や建物、道路形状などのエッジ部分、いわゆるブレイクラインが不明確である。他のセンサなどとの組み合わせによって地物の取得が可能になればより詳細な地形データの作成が可能となり、詳細設計などにも十分利用できるデータとなる。

(2) 航空レーザ計測の位置精度

土砂災害箇所は、現地への立ち入りが困難な場合がほとんどである。このため検証点の設置のため現地へ立ち入れる箇所を事前に確認し計測を実施する必要がある。また、平面位置の精度については、検証用基準点の位置とレーザ計測点が必ずしも一致しないため十分な検証は困難である。位置検証手法の確立も課題として挙げられる。

(3) フィルタリング処理の高度化

土砂災害箇所は、崩壊により樹木等の被覆がない場合がほとんどであるが、周辺部は植生が繁茂している箇所や構造物が多い。これらの処理には手動によるフィルタリングが不可欠であり、人的な誤差要因が生じる可能性がある。今後、新たなアルゴリズムによる自動化率の向上が必要である。

(4) 現況データの蓄積

今回の対応においても、地震前のデータの存在が地形変動を把握する上では必要不可欠であることが改めて認識された。「地理空間情報活用推進基本法」の理念からもデータのアーカイブ化、インターネットを利用したデータの活用性の向上などが必要である。

(5) データ送信の効率化

緊急対応においては、計測データのスピーディな解析が求められる。現在のところ、計測データの配信がデータ取得時間に比較して時間を要している。この解決のためにはデータの高度な圧縮技術などを待つ必要がある。

7. おわりに

本稿では、「平成20年岩手・宮城内陸地震」に伴う土砂災害の緊急対応を例として、地震直後と出水時の各段階における航空レーザデータ活用の有効性と課題について述べた。

今後、同様の災害に対する効果的な対応を目指して、今回の検討で得た知見の活用と、課題への対応を進めていきたい。

(受付日2009.9.9, 受理日2009.11.13)

参考文献

- 国土交通省岩手河川国道事務所, 2008, 「平成20年度磐井川流域河道閉塞対策検討用図面作成業務報告書」, 23p (図3-図8に引用)
- 国土交通省北上下流河川事務所, 2008, 「平成20年度北上川水系迫川下流地形計測業務報告書」, 7p
- 国土交通省北上下流河川事務所, 2009, 「平成20年度北上川水系栗駒地区外地形計測業務報告書」, 37p (図9-図10に引用)