

空中レーザー計測を用いたモニタリング 技術の土木分野における活用

大塚正幸¹・秋山幸秀²・上田俊也³・垣内力⁴・福田真⁵・小林浩⁵

¹正会員 朝日航洋株式会社 公共事業事業推進室（〒171-0022 東京都豊島区南池袋 2-49-4）

²理博 朝日航洋株式会社 空中探査部（〒350-1331 埼玉県狭山市新狭山 1-18-1）

³朝日航洋株式会社 空中探査部（〒350-1331 埼玉県狭山市新狭山 1-18-1）

⁴朝日航洋株式会社 商品開発部（〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-1-1）

⁵朝日航洋株式会社 コンサルタント事業部（〒350-1331 埼玉県狭山市新狭山 1-18-1）

航空機を利用したレーザー計測の原理と特長について概説し、高精度で詳細な地形計測を可能とする技術の要素を解説するとともに、多時期にわたる三次元数値地形情報の差分解析から得られる正確な変位量および容積変化量をもって、地形や土木構造物の変化をモニタリングに活用することの有意性について述べた。次に、これらの計測成果が、河川・斜面・構造物の維持管理・防災点検、環境変化の監視、あるいは大規模土工の施工管理など、土木分野の業務合理的化に効果的に活用できることについて、具体的な適用事例をあげて示した。また、情報化技術に立脚したレーザー計測技術の今後の展望についても言及している。

キーワード：空中レーザー計測，LiDAR，三次元数値地形図，維持管理，環境変化，モニタリング

1. はじめに

航空機を利用したレーザー計測によって得られる高密度の地表面座標点群データは、精度の高い三次元数値データとして詳細な数値地形平面図に展開して、諸施設の建設・保守管理用基盤図として利用されている。機械的なデータ処理による図化作業では、作業過程における人的誤りを排除して、地表面地形を正確に表現することができる。このことは、時期の異なる計測比較における変化量の有意性と信頼性を担保するために、とくに重要と考える。

小論では、レーザーによる多時期計測の変化量に着目した土木構造物・諸施設の維持管理等への適用事例の考察とともに、本技術の展望を述べる。

2. 空中レーザー計測技術一般

(1) 空中レーザー計測の概要

空中レーザー計測は、航空機からスキャニング方式により照射したレーザーの、地上反射波の到達時間を距離に変換して、対象点の位置を取得するリモートセンシング手法である¹⁾。わが国ではレーザープロファイラ(スキャナ)の名称で紹介されている。

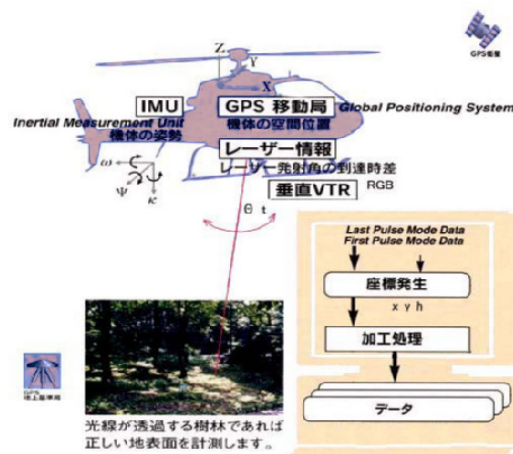


図-1 空中レーザー計測システムの概要

LiDARの呼称(Light Detection and Ranging)が海外では一般的である。また計測を測量として適用する場合には航空レーザー測量とも呼ばれている。

計測作業の概念を図-1に示したが、高周波数で発射されるレーザーパルスの照射時間と方向をIMU(Inertial Measurement Unit=慣性測位装置)から得られる機体位置情報と同期させて、地上反射点の位置を数10cm密度の三次元点群情報として取得することができる。各ショットの最初と最終の入射光(First/Last-pulse)を分離し、樹冠等からの反射と

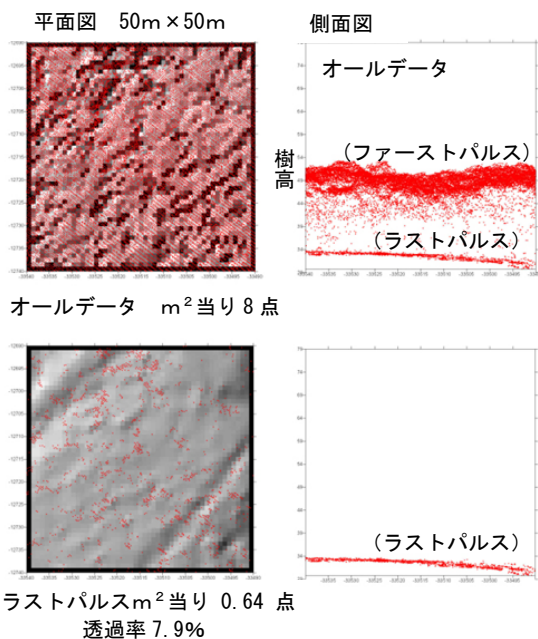


図-2 レーザー計測で取得される点群データ密度(例)

地表面(直近)点での反射とを識別することで正確な数値地形モデル(DTM=Digital Terrain Model)を得る。

図-2 は計測で得られる全点群データの例示である。数万回/sec の頻度で発射されるレーザーの、樹間を縫って地表に到達したラストパルス測点群の座標値を処理して DTM を作成する。ファーストパルスからは樹冠面を包絡する数値表層モデル(DSM)ができ、また、差分を求めれば樹高を表すことになる。

図-3 は、樹木を排除してレーザー計測で得た DTM と写真斜面との対比である。溪流内の砂防施設をはじめ、写真に現れない地上構造物が確認できている。

信頼性の高い地形データを得るためには、レーザー装置の発射頻度が一つの重要要素となる。最近では 10 万パルス/sec の性能や、中間のパルス(アザパルス)を識別する機能を付加した新機種も導入されるようになり、今後さらに多様な活用が期待される。

空中レーザーを用いた地形測量は、公共測量作業規程の 1/1000 の縮尺精度を満たす成果が得られることが確認され、誤差の発生要因も考察されていること²⁾、今のところ公共測量成果として採用されるためには、国土地理院の技術的指導と計画機関による承認などの制約がある。新しい計測手法の特性を生かした精度管理方式の確立が求められている。

(2) 空中レーザー計測の特徴

空中レーザー計測の主たる特徴を以下に列記する。

a) 地表面地形の正確な表現

レーザー計測では、ラストパルスを集めて航空写真で判読困難な陰影部分や、樹下に隠された地表面の数値地形モデルを精度良く表現することができる。



図-3 レーザー計測図(陰影図)と航空写真の比較



図-4 樹下に隠された明治噴火口地形

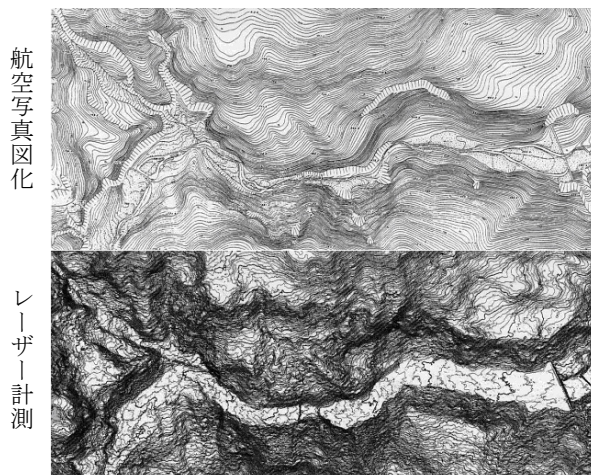


図-5 航空写真とレーザー計測の図化等高線比較

図-4 は 2000 年噴火直前計測における有珠山の陰影図である。樹木に隠蔽されて写真には顕れない明治 43 年噴火の火口群の痕跡を、残存地形として明瞭に読取ることができる。

図-5 は空中写真図化との相違を示した事例である。写真図化では主計曲線以外の等高線や急崖地の標高は正確を期しがたいが、レーザーでは数値データから再現される正確な等高線によって、崖部、河床の堆積土砂、遷急線、崩落地形や細流の位置など、数多くの地形情報が詳細に表現されている。

b) 計測結果の再現性

機械的処理により図化作成される地表面地形は、作業員の熟達度に左右されることなく、計測ごとに同一成果の再現が期待できる。正確性と再現性の保証は、異なる時期の計測結果を比較して差分(変化量)を論ずる場合、その有為性と信頼性を担保するうえで、きわめて重要であり、本論の主題でもあるので、精度の項で詳述する。

c) 三次元数値データの加工性

三次元数値データからは、断面図、容量算出などの加工・解析が容易であるほか、CG や鳥瞰図による実態視的な表現や、定量的な算出ができる。

d) 三次元数値データの保存性と搬送性

電子データの特徴は保存・搬送性能に優れていることである。保存性がよいので、過去にデータが得られていれば、直ちに照合・比較して、被災前後の地形変化や、被災数量の把握、また日常の施設管理等に活用することができる。また、遠隔地同士が複写や双方向通信手段によって、共通のデータに基づく意見の交換、意思の疎通ができるなど、施設の管理にも有用であると考えられる。

地上に立入ることなく、機動的に広範囲を計測できる空中レーザーによる計測は、従来の地上測量、人工衛星情報等と、精度、安全性・経済性などその目的と特性に応じ、相分担して国土の建設・管理に効果的に活用されるべきものとする。そのため、空中レーザー計測で期待される地形モデルの、精度に係わる諸条件についての正しい認識が必要とされる。

3. 空中レーザー計測の精度

(1) 器械的性能条件にかかわる精度

レーザーの測距(高さ)精度は、安全面を考慮して採用されている波長に依存する固有の誤差が±15cm程度であるが、有効な多数の点群データが得られれば、平均化により同レベルの識別表現が可能である。

図-6は都市部におけるDTMの標高データから得た0.2m刻みの段彩図である。宅地や路面の標高から冠水シミュレーション等に必要な高さ情報が得られ、図例では市街化以前の地盤高を読取ることができた。一方、水平位置方向に影響する測角誤差は、対地高度に比例し1/2000程度である。計測エリア内での相対的な誤差は、ヘリコプタを用いれば、最大30cmの密度で地表の座標値情報を得ることができる。この場合、等高線間隔数10cmで縮尺1/1000レベルの精度での図化が可能となり、遷急線や重要な地形変化点など、詳細微地形判読に必要な情報を表現することができる。

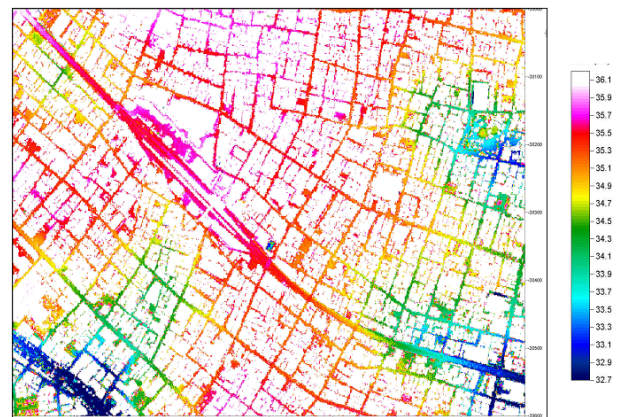


図-6 都市部における標高計測（段彩図）

表-1 空中レーザー計測器の仕様と精度への寄与条件

レーザー発射回数	25,000Hz	データ取得密度に関連
スキャン回数	25Hz	横断方向点密度に関係
スキャン角度	22.6°	同上
スキャン形状	矩形、三角波	取得データの均等性に関係
受信モード	First, Last	DSM/DTMの分離情報
ビーム広がり角度	0.25, 1.2mrad	フットプリント(拡散度)に関係
サンプリング量	1000 点/scan	横断方向点密度に関係
地上分解能	25cm (V=45Km/h)	
測距精度	0.15m	使用波長固有の誤差
座標精度	<対地高度/2000	距離に伴う誤差
照射角度精度	0.05° (POS)	機械精度
飛行高度	150~1000m	横断方向点密度に関係
飛行速度	60~150Km/h	進行方向点密度に関係
レーザー放射レベル	クラス4	安全性に関係
波長	1064nm (ND:YAG)	固有の計測精度に関係

表-1 に従来実績の多い代表的な計測器の性能を計測条件とともに例示した。絶対座標とのずれは、主としてGPSとIMUによる航空機の位置・姿勢補正誤差によって生ずるもので、求められる品質によっては、GPS 現地基準局の追加や、現地照合による補正を要する場合もある。計測の品質はレーザーの地表到達密度に左右されるから、レーザーの発射頻度は高いほど望ましいが、適切な計測実施方法の選択によって対応することが重要である。

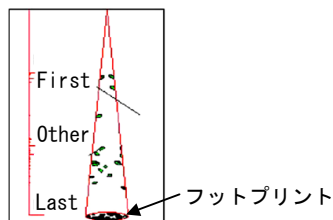
(2) 計測実施条件にかかわる精度

レーザー計測で取得する点群の密度は、機体の飛行高度と速度に反比例するから、計測目的によっては作業の効率が損なわれても、低高度、低速度での計測作業が必要となる。固定翼機では安全面から、最低巡航速度ならびに飛行高度に大きな制約を受ける。ヘリコプタでは最低高度300mであるが、騒音などの関係もあり通常500m以上で計画される。

スキャン角度も計測密度と作業の効率に影響し、広角スキャンは、作業効率は良いが光線が斜め

表-2 樹種と密生度および透過率

樹種	密生度	計測点密度 Pt/100m2	透過点密度 Pt/100m2	透過率 %
針葉樹	高	1980	440	22.2
	中	1240	370	30.0
	低		64	40.0
広葉樹	高	810	61	7.9
	低	2050	1070	29.9
	落葉期	1220	1070	87.0
竹	高	860	40	0~4



に入射するので樹幹や地物に遮蔽される確率が高い。このようにレーザー計測の実施にあたっては、適切な計測条件を目的に応じて設定する必要がある。

(3) 現地の条件にかかわる精度

樹林地帯では、レーザー光束が地上に到達する範囲(フットプリント)内の枝葉部に阻害されて、地表に到達する光線は確率的に少なくなるので、樹種による季節変化を考慮する必要がある。変化の少ない針葉樹林は、地上から見上げる隙間感覚のとおり数10%の透過率が確保できるが、繁茂した広葉樹林は十分な透過光が得られない。表-2は実測事例に基づく樹種ごとの透過率である。対策として可能ならば落葉期に計測するほか、密な点群を得られるように計測計画を立てる必要がある。なお、竹藪や照葉樹林、笹など生茂った草地については、現在の技術では標高データは厳密を期せない問題がある。

計測対象地点が急傾斜面をなしている場合、レーザー光は、幾何学的な理由で鉛直より斜面下流側において地表面密度が粗くなるため、計測精度の低下が避けられない。計測高度が高い場合、光束が広い範囲へ拡散するため、地上反射点の平面位置の認識が甘くなる。とくに崖地においては平面位置の誤差が高さの誤差に大きく影響する。急斜面での精度低下を防ぐためには、高密度の計測条件を確保するよう、コース間ラップを通常の倍にして斜面上流側半分のデータのみ採用する、あるいは同一地点の反復計測データを重ね合わせる等の工夫を要する。

通常計測の場合 0.5~1m (精度よりも経済性を重視する場合~2m) 程度の密度で計測点が得られるよう、現地条件や要求精度に合致した計測高度・速度・スキャニング幅、計測時期等の計測条件を選定することが重要である。

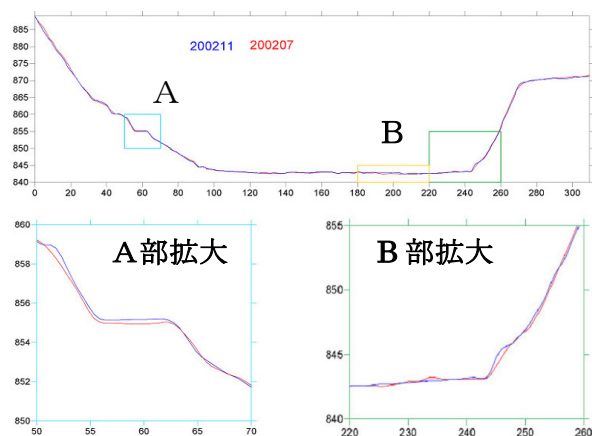


図-7 ダム横断面図二時期断面の整合

一方、絶対座標精度の向上のためには、現地に設置する GPS 基準局増設のほかに、主要地点の実測値を引照したり、設計図から位置座標が既知点として得られる構造物などの照合を行う方法もある。その他の誤差要因として、機器のキャリブレーション補正誤差、取得データのコース間整合、データ処理上のアルゴリズムに関する問題等もある。これらは作業実施側の問題であり、ここでは言及しない。

4. レーザーによる多時期変化量解析

正確で、かつ作業員の熟達度に左右されない安定した計測は、異なる時期の計測で得られた比較における変化量の有為性を担保する絶対の条件である。

図-7には、河川断面の二時期計測結果を重ねて示した。一般に再現性の悪い隅角部も含め、断面はよく整合しており、河岸地形や堤体、構造物の形状が明瞭に再現されていることがわかる。なお、急傾斜部は水平位置ずれが高さに及ぼす影響が若干大きい。

このようにレーザー計測により初期状態を取得しておけば、必要時期に随時再計測して、地表地形の変化を定量的に算定することができる。

以下に具体的な適用事例をあげて説明する。

(1) 火山噴火における災害状況の把握

図-8は2000年3月31日に発生した有珠山西山麓噴火直前に計測された地形(左上)であり、右上は約1ヶ月後の最大変化量65mの隆起により変貌した山体の姿である。噴火口や山容の変化が陰影図に表され、被災当初の状況が生々しく記録されている。約半年後の再測までにさらに10mの隆起が認められたが、この間地下で動いたマグマの総量を $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ と推定するなど、追跡調査から噴火活動の動向判断の資料となった^{3), 4)}。

噴火の恐れのある火山の詳細な地形を、レーザー

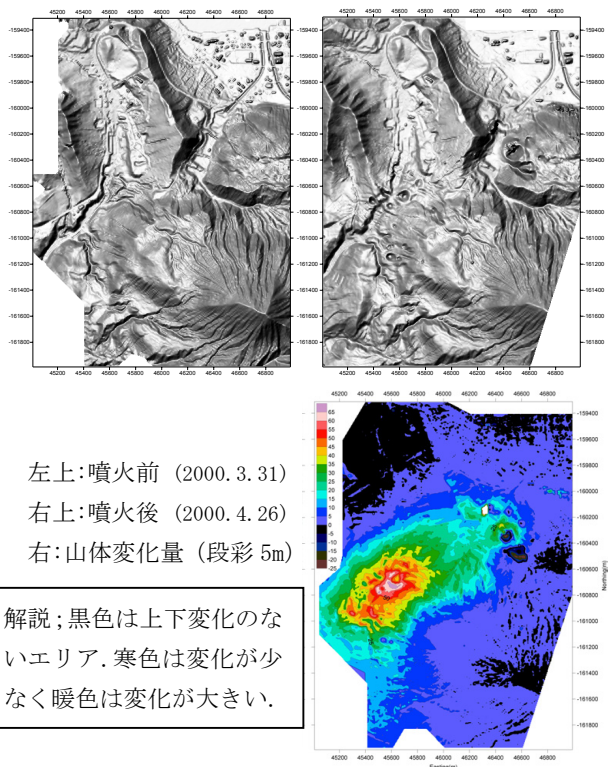


図-8 有珠噴火に伴う地形変化と山体隆起

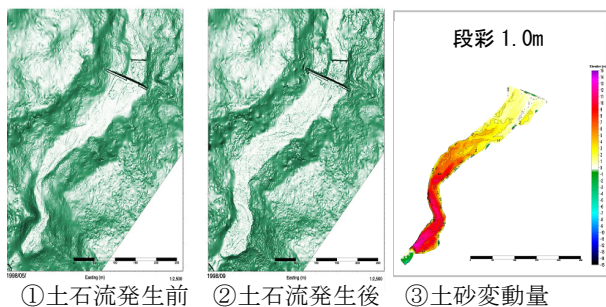


図-9 河床変動の追跡調査

の数値データとして事前に取得しておくことで、火山活動による地殻変動、火砕流や溶岩流、降灰量などの変化量の監視や、緻密なハザードマップの作成に利用でき、被災時には被災数量の把握や、復旧計画に必要な基図に活用することができる。

三次元計測の座標点群データは、陰影図や勾配図に表して地形モデルの判読に利用される。本事例では噴火時緊急体制として現地において解析処理を実行することで、例示の陰影図に近い一次出力図を数時間で提供し、災害対策に活用することができた。

(2) 河床変化と土砂堆積移動量の調査

図-9 は、河床移動の激しい中流部河川における調査計測期間中に発生した豪雨による流況変化である。上流で発生した崩壊土砂の土石流により溪岸林の一部が流出して、V 字谷をなした河床は、多くの堆積物によって幅が広く変動した様子が陰影図から明瞭

に

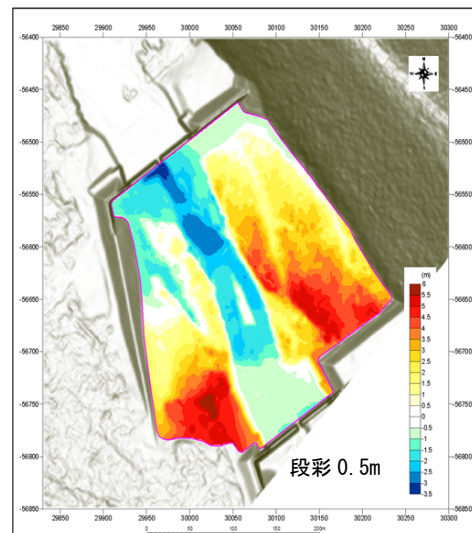


図-10 砂防ダムの堆砂推移

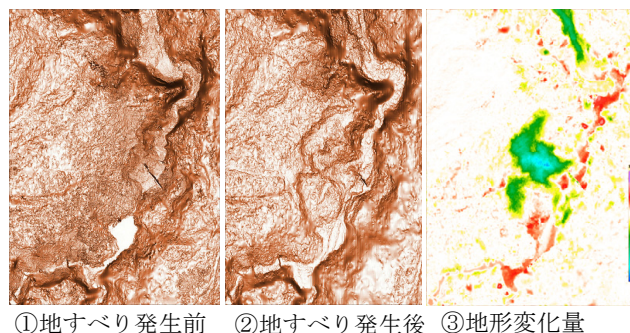


図-11 地すべり発生と土砂移動量

表現され、標高差分からは土砂の移動状況が判別できる。表現の都合上 1m 毎段彩図としているが、等高線データに基づくスライス断面を積分して、洗掘・堆積土砂の数量を算出することが容易にできる。

図-10 は砂防ダムの機能の追跡調査事例である。堆積・洗掘の変化量を 50cm の段彩で示しているが、反復計測によって河川施設管理への適用ができる。

(3) 地すべりに伴う地形変化の把握

図-11 は豪雨に伴い、斜面に発生した地すべりを捉えた事例である。陰影図と 2m 段彩表現により滑落崖発生位置の特定と、移動土砂の堆積位置が追跡できる。本地すべりによる当初の土砂崩壊量は、約 11 万 m^3 と算出され、継続してモニタリングされた。

(4) 堆積泥流の分布調査

図-12 は前掲(図-8)の有珠山の噴火前後の計測結果をもとに、差分により得られた、発生泥流の堆積層厚を図化した事例である。レーザーの標高計測誤差は約 15cm とされているが、平坦な裸地では多数の計測点が平均化されることによって、最小の段階差で堆積土砂厚を分析することができている⁵⁾。

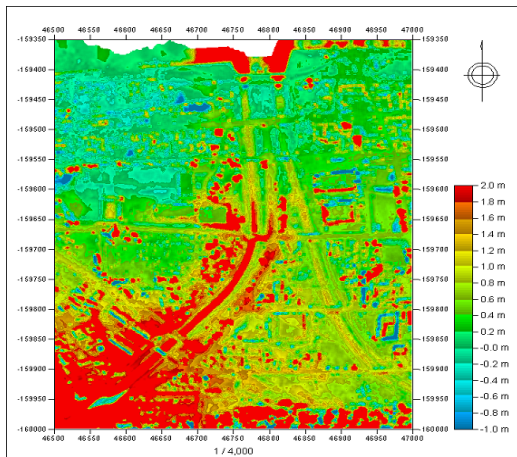


図-12 火山泥流の堆積計測

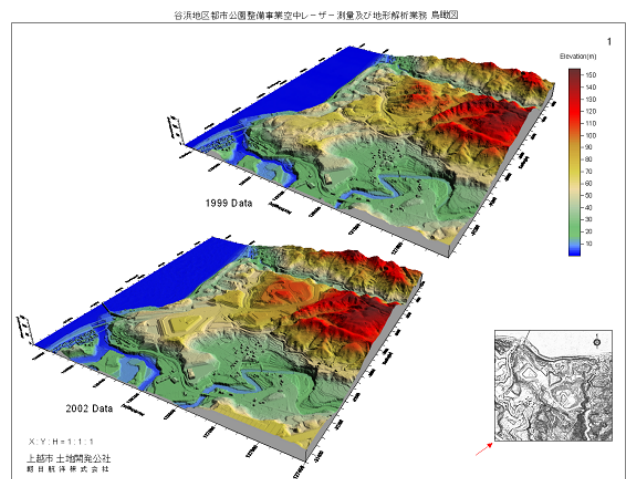


図-13 大規模土工の施工管理

(5) 大規模土工における施工管理

空中レーザー計測は、ダム等大型土工工事の施工管理にも適用することができる。精度の高い三次元数値地形図は、複雑な斜面地形に起因する容量の誤差を防ぎ、出来形管理を適切に実施できる。図-13は大規模造成地の施工管理に適用した事例である。

以上紹介した事例のほかに、多時期にわたる繰返し計測により、広域積雪量調査、植生等環境変化のモニタリング調査など、土木分野への広範な適用できる。GISを適用した道路等公共施設の合理的な維持管理の手段として、今後新たな展開に寄与することができるものと思われる。

5. レーザー計測の技術課題と今後の方向

レーザー計測で得られた数値データは、近い将来において採用が予測されるGISを適用した、公共施設の合理的な維持管理の手法の採用にとって最適のデータベースを提供するであろう。本計測技術の普及にとって必要なことは、精度の保証と地物の識別能力の向上である。

識別化に関しては、ビデオまたはCCDカメラによる同時取得画像の解説、航空写真との重ね合わせなどの手法が考案・採用されている。最近では対象物の性状に基づくレーザーの反射強度の異差をもって、道路境界や構造物の輪郭を識別する工夫も試行されており、これらのパターン認識から、画像の自動抽出も模索されている。

一方、計測精度についてのハード面の開発・改良に比べこの新しい計測技術の活用面でのノウハウの蓄積は始まった段階といえる。目的に応じた要求品質に対してどのような手法で最適な計測条件を採用すべきかといったマニュアル化の対応が望まれる。

こうした問題に関して、空中レーザー計測に関する多数の事例収集・分析に基づく、品質情報(計測条件と期待精度)の開示が積極的に進められる必要がある。また、経済性と目的別所要精度を考慮して、従来の地上測量や、人工衛星利用のリモートセンシング等との適用区分を明確化することも必要であろう。

6. おわりに

リモートセンシングの手法である空中レーザー計測は、膨大な三次元数値データ処理を可能とする情報化の流れを象徴する新しい技術である。しかし実用に供されてから日も浅く、地上のさまざまな条件に対して最適の計測条件を確立するためには、豊富な事例をとおして経験を蓄積する必要がある。同時に、新しい技術を適用した各種利用法についても、さらなる検討を重ねていく必要がある。以上のような課題にとって本論が一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 秋山幸秀：空中レーザー計測システムの治山・砂防関係への応用，写真測量とリモートセンシング，39-2，pp. 25-28，2000。
- 2) 佐藤潤：レーザー測量の公共測量への展開，日本写真測量学会，画像による三次元測量講習会，pp. 75-80，2001.11。
- 3) 岡田弘・大塚正幸・高貫潤一ほか：有珠山の火山活動に伴うレーザープロファイラの活用と技術の展望，土木学会第57回年次学術講演会，CS6-003，2002.09。
- 4) 仲野公章・山越隆雄・秋山幸秀ほか：2000年有珠山噴火時におけるヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定，新砂防(砂防学会)，53-6，pp. 88-94，2001。
- 5) 仲野公章：土砂災害監視技術の動向と今後の課題，土木研究所資料，No3844，pp.61-85，2002。