航空レーザ測量について

防災地質チーム

1．はじめに

近年、国土情報整備事業によってデジタルデータの整備が進められる中、航空レーザ測量を用いて「細密な数値標高データ」が取得され、東京都区部など主要な都市圏についてはより詳細な５ｍメッシュの数値地図（標高）が作成されるに至っている。その成果は、測量だけでなく、土木工学、防災、環境保全等の幅広い分野で利用されつつあり、治水分野では近年の異常気象による洪水氾濫対策のための浸水想定区域図作成に使われ、また、平成16年の新潟県中越地震やえりも町斜面災害、台風による水害等の自然災害における場面でも、迅速な地形図（等高線）作成は初動調査に大変に役立つなど、道路や砂防及びダム事業においても航空レーザ測量の活用が増加している。

本稿では、「公共測量において航空レーザ測量による数値標高モデルを作成する場合の標準的な作業方法を定め、その規格の統一、成果の標準化及び必要な精度の確保に資する」ことを目的に国土地理院によりまとめられた「航空レーザ測量による数値標高モデル（DEM）作成マニュアル（案）（平成17年７月）」（以下、DEM マニュアル）に従い、航空レーザ測量について概説する。

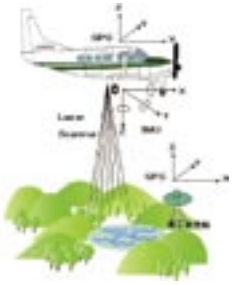
2．航空レーザ測量とは

2．1　名称

航空レーザ測量は、航空機レーザスキャナやレーザ・プロファイラシステムなど様々な名称で呼ばれているが、ここでは「航空レーザ測量」とする。

2．2　計測の概念

航空レーザ測量は、航空機から地上に向けてレーザパルスを照射し、地上から反射してくるレーザとの時間差より、航空機と地上のレーザパルスが反射した地点の距離を計算する技術である（**図－１**）。航空機と地上のレーザパルスが反射した地点の距離、GPS による航空機の正確な位置、IMU（慣性計測装置）による航空機の姿勢を解析することにより、１パルスごとの地表の３次元情報、つまり（X，Y，Z）の計測が可能となる。レーザパルスは１秒間に最大数万回照射される。



図－１　航空レーザ測量の概念図

2．3　従来手法との違い

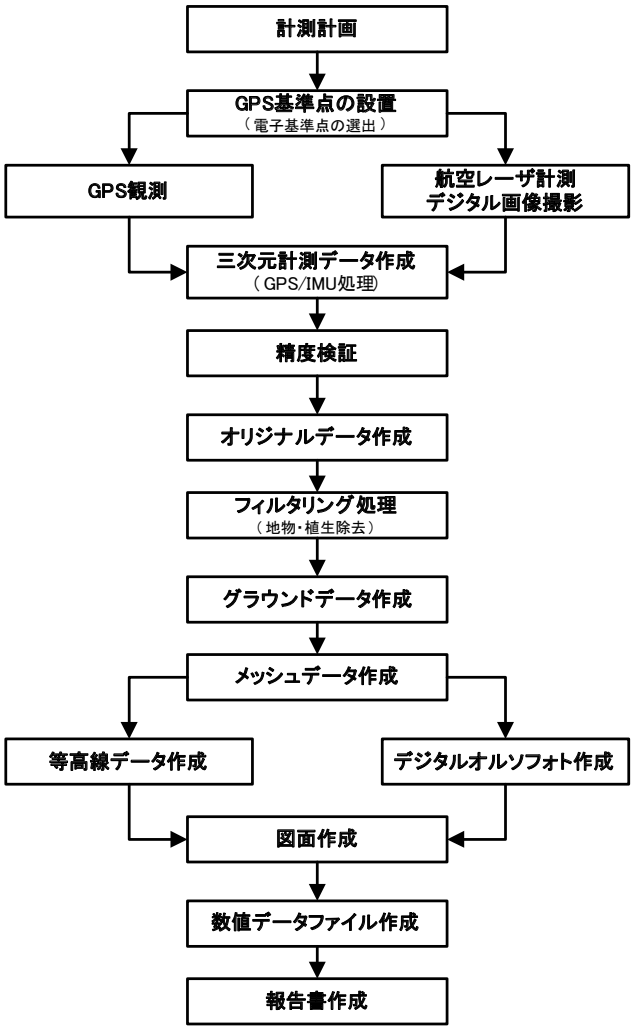
これまでの地形図作成は、空中写真を用いた空中写真測量が主体であった。空中写真測量では、数値標高データをオペレーターが１点ずつ取得しており、山間部では樹木の高さを人間が勘案して座標を取得するため、個人差が出やすい技術ともいえる。一方、航空レーザ測量では、１秒間に数万点という大量の標高値を取得することができ、樹木等の地物に関しては、「フィルタリング」と呼ばれる機械的な処理により除去される。空中写真測量とは異なり、標高値の取得に人間の主観が介入せず、客観的なデータ処理といえる。大量の標高値の取得及び機械的な樹木等の除去のため、従来の地形図よりも細かい微地形が表現できる（４章参照）。

3．航空レーザ測量の作業手順

航空レーザ測量の作業手順について、**図－２**に示す。

3．1　計測計画

計画は、GPS 衛星配置等を考慮し、計測諸元（**表－１**）、飛行コース計画、GPS 基準局の設置場所及び GPS 観測計画を立案する。



図－２　作業フローの例

表－１　計測諸元の例

計測高度		1371.6 m
計測速度		203.7 km/h
計測間隔	進行方向最大	1.77 m
	進行方向に直角方向最大	1.60 m
計測幅		385.5 m
スキャン角度(FOV)		16 °
スキャンレート		32.0 Hz
パルスレート		24,000 Hz

３．２　GPS 基準局の設置

GPS 基準局は、計測対象地域内の地上電子基準点を用いることが多い。場合によっては、１級基準点測量及び３級水準測量に準ずる測量によって水平位置及び標高を求めた基準点を設置することもある。

３．３．航空レーザ計測

航空機搭載のレーザ計測装置を使い計測を行う。計測データの取得密度は、使用目的に応じて設定する（１ｍ×１ｍに１点以上または２ｍ×２ｍ以上に１点以上など）。対象区域内では、取得密度が均一になるようにデータ取得を行なうとともに、地表面のデジタル画像データも同時に取得する。

３．４　三次元計測データ作成（GPS/IMU 処理）

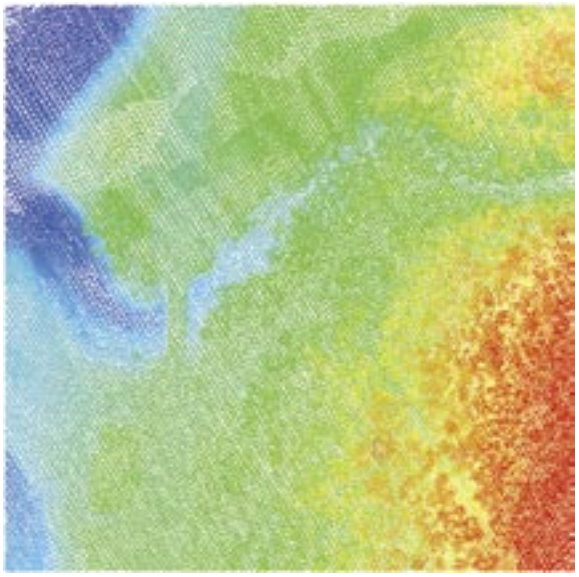
レーザ計測時に取得したデータのスキャン角度、距離、ジャイロ回転角、加速度、空中 GPS 情報と地上 GPS 情報から、各レーザ点及びデジタルカメラ主点ごとの計測ポイントの３成分（X, Y, Z）を算出する。

３．５　精度検証

高さ方向の標高検証は、現地において水準点及び公共の基準点を基に数ヶ所の直接観測を行い、取得データとの比較検証を行う。また、水平方向の位置検証は、構造物の角などを選び、既存平面図と取得データの比較を行い、計測データの妥当性を検証する。

３．６　オリジナルデータ作成

計測したデータからノイズ等のエラーデータを除去したデータを作成する。これらは建物・樹木等のデータ（地物データ）を含む全てのデータである（図－３）。



図－３　オリジナルデータの例

３．７　グラウンドデータ作成

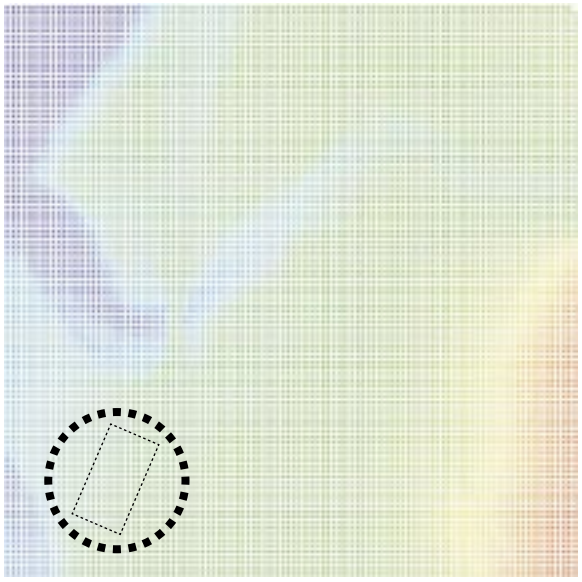
フィルタリング技術を用いて、オリジナルデータから建物・樹木等の地物データを機械的に除去し、地表面の計測データを作成する。これは従来の空中写真測量で、技術者が樹木の高さ等を勘案して地盤高を取得

していた内容である。**図－４**中の○部の空白は建物の箇所で、樹木と同様に表層を捉えており、地盤標高を表していないためデータが機械的に除去されている。

図－４　グラウンドデータの例

３．８　メッシュデータ作成

使用目的、グラウンドデータの密度を考慮し、ランダムな元データから､近隣の点群から推定（内挿処理）しメッシュデータを作成する。内挿処理には、最近隣法、TIN（Triangulated Irregular Network: 不整三角網モデル）、IDW、Kriging、平均法などの手法が用いられる。**図－４**中の○部においても、これらの手法で内挿補間しメッシュデータとして作成される。メッシュデータ間隔は用途に応じて設定するが、１ｍや２ｍである場合が多い。



図－５　メッシュデータの例

フィルタリングの除去が少ない場所では、内挿補間により計測点と同等の標高精度を持つが、フィルタリングで大幅に除去された場所（家屋周辺等）では、計測点密度が下がり（計測点間隔が大きくなり）、内挿補間を行なったとしても、標高精度が低くなる。

３．９　等高線データ作成

メッシュデータより自動コンター発生処理を行い、等高線データを作成する。メッシュデータの間隔により作成可能な等高線の間隔は決まり（**表－２**）、自動で等高線が描画されるため、人間の主観が入らない点が従来の空中写真測量による航測図化とは異なる。

一般に１ｍＤＥＭと呼ぶ場合、レーザ計測時の取得密度（１ｍ×１ｍに１点以上）か、メッシュデータの間隔（１ｍ×１ｍ）か、等高線の間隔（１ｍ）かは明確ではないため注意が必要である。

表－２　等高線データとメッシュデータ間隔[1)]

	主曲線	計曲線	メッシュデータ間隔		
			約1m	約2m	約5m
1/1,000	1m	5m	○	－	－
1/2,500	2m	10m	○	○	－
1/5,000	5m	25m	○	○	○

３．10　デジタルオルソフォト作成

航空レーザ計測と同時に撮影したデジタル画像とメッシュデータを用いて、１枚ごとのデジタルオルソフォトを作成する。これまで、航空写真からオルソフォトを作成する場合、写真撮影とは別にカメラの座標（X、Y、Z）及び傾き（ω、ϕ、κ）といった写真標定要素を求めるために、対空標識設置、空中三角測量、モデル標定などの作業が必要であったが、レーザデータ処理の過程において、デジタル写真撮影時の標定要素がすでに求められているため、大幅に作業過程を省略することができる。

図－６　デジタルオルソフォトの例

３．11　図面作成

3.9で作成した等高線を基に図面を作成する。等高線のみを表示する図面では、場所を特定しにくい（**図－８（左）**参照）ため、道路・建物・河川等の主な地物骨格のデータを重ねて表示する場合が多い。

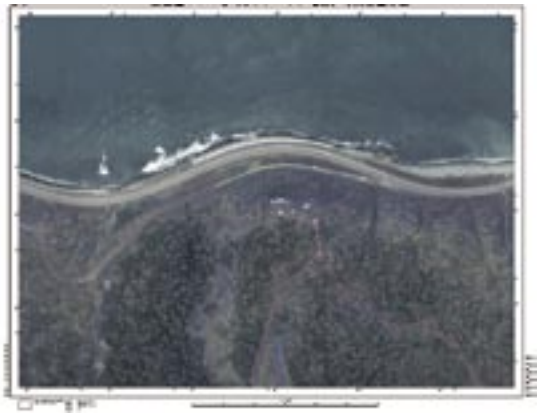
地物骨格データの取得方法には二種類ある。一つは3.10で作成したデジタルオルソフォト画像を用いる方法である。デジタルオルソフォト画像から判読できる範囲の地物骨格（道路・建物・河川等）をマップデジタイズしてデータを作成する。この方法は、二次元のデータ取得となるため、2500レベル地形図より精度が若干落ちる。ここでいうレベルとは、従来の縮尺に相当する数値地形図における表示指標であり、参考までに、公共測量作業規定[2)]による地形図の精度[3)]を**表－３**に示す。

表－３　地形図の精度[3)]

縮尺 ／地図情報レベル	高さ精度 （標高点）	高さ精度 （等高線）	水平精度
１０００	0.33m以内	0.50m以内	0.70m以内
２５００	0.66m以内	1.00m以内	1.75m以内
５０００	1.67m以内	2.50m以内	3.50m以内

もう一つの方法は、アナログ空中写真を利用したステレオ図化である。これは従来の空中写真測量を用いた手法であり、2500レベルの地物骨格データが作成できる。しかし、航空レーザ測量とは別に空中写真撮影等を行なう必要がある。

3.9で作成した等高線、3.10で作成したデジタルオルソフォト及び地物骨格データを重ねあわせ、等高線重ね図を作成することもできる。



図－７　等高線重ね合わせ図の例

３．12　数値データファイル作成

DEMマニュアルにおいて成果物として納品される数値データファイルは以下の通りである。

１）オリジナルデータ
２）グラウンドデータ
３）メッシュデータ
４）水部ポリゴンデータ
５）オルソフォト画像
６）位置情報ファイル
７）等高線データ
８）格納データリスト

従来の測量業務では、地形図のデータがCADデータとして納品されてきた。航空レーザ測量では、等高線データ以外にも作成に使用したメッシュデータ等も納品される。メッシュデータは、鳥瞰図や断面図の作成、地形解析など様々な作業に使える有用なデータである。

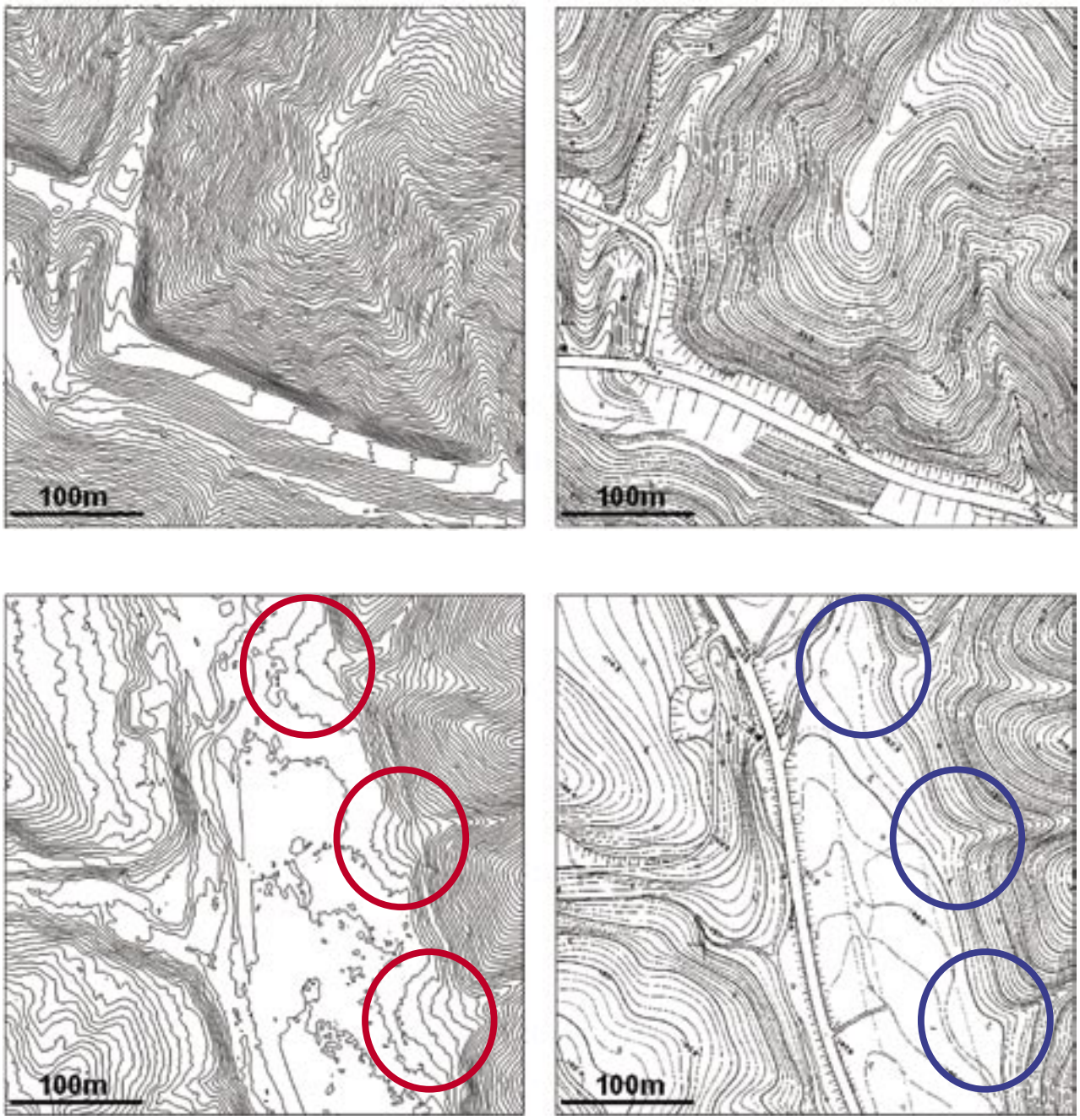
４．従来の地形図との比較

航空レーザ測量による等高線図（以下､LS等高線図）と航測図化による地形図（航測図）の違いについて説明する（**図－８**参照）。LS等高線図では、メッシュデータから等高線が作成される。メッシュデータは樹木等が機械的に除去されるため、技術者の主観が入らない客観的な等高線が描画される。航測図は、技術者が樹木の高さを勘案し地盤高を推定して描くため、技術者の主観が反映した等高線図となる。

等高線の形状を比較すると、LS等高線図の等高線は鋭敏で地形を鮮明に表現しているが、微地形を計測しすぎているため、等高線が滑らかではない。一方、航測図の等高線は技術者が描いているため滑らかな地形として表現される。傾斜が緩いところの微地形を比較すると、LS等高線図では渓流からの土砂が堆積して作られた沖積錐（扇状地）が半円錐形状に表現されているが､航測図ではやや不明瞭である（**図－８（下）**参照）。これは航空レーザ測量が全域の標高値を漏れなく取得するのに対し、航測図は技術者が必要だと思われる標高値（地形）のみを取得していることによると思われる。

道路・切土・盛土などの構造物を見ると、LS等高線図では全て等高線で表現されるため、正確な位置・形状がわかりにくい。そのため、マップデジタイズ等による地物骨格データの取得等が必要となる。一方、航測図では、道路縁及び構造物が記号等で表現され、正確な位置及び形状がわかる。

項目	航空レーザ測量による等高線図	航測図化による地形図
等高線の取得	フィルタリングで植生・地物を取り除いたデータ（メッシュデータ）から等高線を作成するため、客観的な等高線が描画される。	技術者が樹木の高さを勘案して描くため、個人差が生ずる。等高線は主観的に描画される。
等高線の形状	等高線が鋭敏で鮮明である。	等高線が滑らかである。
地形の再現性	微地形が明瞭に表現される。	微地形はあまり明瞭ではない。
道路・切土・盛土などの構造物	等高線で表現されるため、正確な位置・形状がわかりにくい。	道路縁および構造物が記号等で表現される。



図－８　航空レーザ測量と航測図化の比較

5．航空レーザ測量の精度

5．1　機械精度

航空レーザ測量装置は，GPS/IMU やレーザ測距装置など幾つかの装置を統合したものであり、トータルの機械誤差（標準偏差）は、メーカによって多少異なる[4)]が、概ね**表－4**の通りである。

表－4　航空レーザ測量装置の機械精度[4)]

精度の種類	機械精度（標準偏差）
水平精度	対地高度の1/2,000程度
垂直精度	0.15m程度（対地高度1,000mの場合）

5．2　実際の計測成果の精度

実際に計測を実施する際には、機械誤差に加えて、GPS、対地高度、測点密度、フィルタリング、地形・被覆状況、座標変換（ジオイド）、内挿誤差等などの運用に関連する様々な要因が計測精度に影響を及ぼすため、計測条件において計測精度を一意に規定することは困難である[4)]が、目安としては**表－5**に示す通りである。

表－5　計測条件とデータ精度の目安[4)]

計測条件	地図情報レベルの目安
樹木が繁茂している	2,500
樹木が繁茂していない	1,000
樹木が繁茂せず局地的な範囲、かつ相対的な地形形状について	500

5．3　DEM マニュアルに示された成果品の精度

DEM マニュアルでは、オリジナルデータとメッシュデータの要求精度が異なる。オリジナルデータは、1㎝単位で記載し、その精度（標準偏差）は25㎝以内であるのに対し、メッシュデータは、0.1m単位で記載し、その精度は**表－6**の通りとする[1)]。両者の精度の違いは、メッシュデータが内挿補間により作成されることに起因する（3.8及び3.9参照）。

表－6　メッシュデータの精度[1)]

項　　目	精度(標準偏差)
1メッシュ内にグラウンドデータがある場合	0.3m以内
1メッシュ内にグラウンドデータがない場合	2.0m以内

6．おわりに

航空レーザ測量の特徴をまとめると以下の通りである（向山（2005）[5)]を加筆修正)。

①計測点密度が高い。
②それぞれの計測点が十分に精度の良い位置情報を持つ。
③広範囲の計測が短時間で実施できる。
④計測データの機械処理が容易である。
⑤デジタル画像など、位置情報以外の情報を同時に取得できること。

これらをまとめると、「直接計測された正確な位置情報を持つ計測点が面的に高密度かつ膨大な量で取得されるにもかかわらず、すべて数値データ化されていることによって、計量処理が迅速に行なえ、詳細な三次元地形モデル作成が容易にできる」[5)]と言える。

今後、各分野で航空レーザ測量が実施され、詳細なDEM の整備がさらに進むと思われる。航空レーザ測量で得られる地形データは従来手法の地形データよりも地形再現性が高いため、作成される地形図は空中写真判読や現地調査を実施する際の「基図」として有用である。また、詳細な三次元データを用いた地形解析・地形判読などへの応用が期待される。

（文責：日外　勝仁）

参考文献

1）国土地理院：航空レーザ測量による数値標高モデル（DEM）作成マニュアル（案)，平成17年７月.
2）（社）日本測量協会：国土交通省公共測量作業規定 解説と運用，2003.
3）（財）日本測量調査技術協会：航空レーザ測量ハンドブック，2004.
4）（社）日本測量協会：デジタル写真測量の理論と実践，2004.
5）向山　栄：レーザ計測から得られる細密デジタル地形情報，平成17年度日本応用地質学会特別講演およびシンポジウム予稿集，2005.