

# 空中レーザー計測による高密度三次元地形情報活用の現状と問題点

## Practical Use and the Problem of Airborne Laser Measurement Technology

大塚正幸<sup>1</sup>・西満幸<sup>2</sup>・木下隆史<sup>3</sup>・田中善治<sup>3</sup>・垣内力<sup>4</sup>

Ootsuka Masayuki, Nisi Mitsuyuki, Kinoshita Takashi, Tanaka Yoshiharu, Kakiuchi Tsutomu

**抄録：**情報技術の革新に伴い、電子化された各種の地図情報が幅広く用いられている。空中レーザー計測によって、三次元地形モデルを正確に再現するためには、計測点の精度のほかに、地表面を計測した点群の密度と分布が重要である。地表計測点の密度は計測手法にもよるが、植生密度、斜面傾斜などの地上条件によって異なるものである。緻密でムラのない計測点を取得するためには、レーザー計測の特徴をよく理解して計測計画を立てなければならない。また、計測結果の編集・表示方法も重要である。情報の量、精度などの品質の異なるデータに基づく成果は、メッシュやTINサイズが同じ数値地図に表されたとしても、利用結果の信頼性には大きな差がある。利用目的に応じた品質目標を定め、目的に合致する計測を実施すること、出力様式を定めることが重要である。

**キーワード：**空中レーザー計測、LiDAR、三次元数値地形モデル、計測精度、欠測率

### 1. 三次元地形情報の現状

情報技術の著しい伸展は地理情報の電子化など、土木分野にも大きな変革をもたらしている。全国を対象に 1/2.5 万縮尺に対応する高度情報を持つ 50m メッシュの数値地図が発行され、GIS の基盤情報などに利用されている。

空中レーザー計測（航空レーザースキャナ、LiDAR の呼称も同義）は膨大な情報を処理する高度情報化に裏付けられた新技術である。航空機からスキャニング方式によって地表面地形を立体的に再現する本手法は確実に実績を伸ばしている。最近、レーザー計測に基づく 5m あるいは 10m メッシュの三次元数値地図も一部区域では整備されるなど、より精度の高い地理情報として、噴火・津波等の災害に対するハザードマップや河川氾濫シミュレーション等に汎用的に利用される体制が整いつつある。一方、緻密な立体数値地形モデルが設計・解析、施設管理や災害調査等の個別業務に利用される機会も多い。計測に係る様々な環境・条件を問題とせず、所期の成果が得られるように、本計測の性状と、誤差の生ずる要因を明らかにしておく必要がある。

### 2. 空中レーザー計測の信頼性に関する問題点

空中レーザー計測の基本技術の詳細や適用事例については既往の発表文献<sup>1)~4)</sup>に譲るものとし、計測結果の信頼性に関する因子について述べる。

レーザー計測で得られる地上の反射点群から、地表面まで達したランダムな測点を抽出し、編集して三次元地形モデル(DTM)を再現するまでの情報処理の過程を図-1に示した。

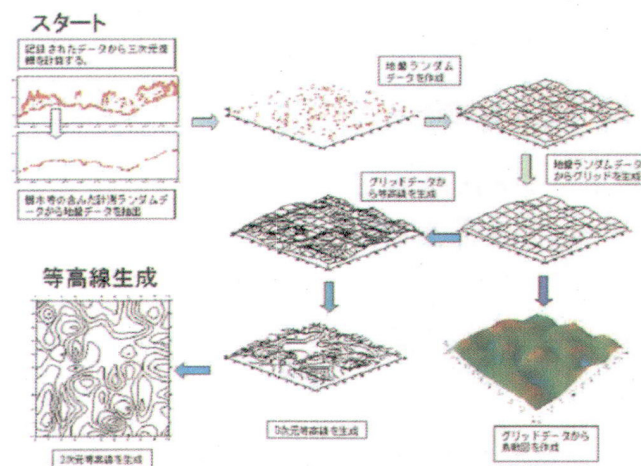


図-1 DTM 作成のための情報処理

表-1 に空中レーザー計測の誤差要因を大別して示した。地形モデルを正確に再現するための要素としては、位置情報の測定誤差のほかに、データの編集解析手法、地表計測点の取得密度の問題がある。

ここで誤差要素のうち計測機器については性能の向上した機械の機能を適切に選択する。解析編集については、計測データの読取り、欠測点の補正手法など、適用されるアルゴリズムのノウハウに係る部分がある。

1 : 正会員 朝日航洋(株) 空間情報事業本部 理事  
(〒171-0022 東京都豊島区南池袋 2-49-4, Tel : 03-3988-5073, E-mail : masayuki-ootsuka@aeroasahi.co.jp)  
2 : フェロー会員 朝日航洋(株) 空間情報事業本部 地図コンサルタント部 (〒350-1331 埼玉県狭山市新狭山 1-18-1)  
3 : 非会員 同上 同上 本社PM部 (同上)  
4 : 同上同上 同上 同上 開発グループ (〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-1-1)



表－１ 計測誤差要素と地表点計測密度に及ぼす要因

|              |       |                           |
|--------------|-------|---------------------------|
| ①計測機器        | 機体位置  | GPS,IMU,時刻,振動・たわみ,対地高度    |
|              | 地表座標  | レーザー光計測(時間,方向角度,拡散,対地高度)  |
|              | 計測密度  | 発射頻度,スキャン幅・周期             |
| ②解析編集        | 地表点抽出 | 地表反射パルス分離,(解析のアルゴリズム)     |
|              | 補正・編集 | 中間点補正(補正のアルゴリズム),コース間接合   |
|              | モデル   | モデルの種類(メッシュ/TIN密度)        |
| ③地表条件        | 植生    | 種類,密度,季節                  |
|              | 地形    | 傾斜,起伏,凹凸変化                |
| 計測密度成果への影響要因 | 機体の運行 | 飛行高度,飛行速度,季節,天候,反復計測,ラップ率 |
|              | 計測仕様  | 発射頻度,スキャン幅・周期             |

起伏の激しい地形の正確なモデルを再現するためには、緻密でムラの少ない地表面計測点データが欠かせないが、対象域の植生や傾斜によって計測点密度に差が生ずることはやむをえない。DTMの品質は、オリジナルデータの精度、密度に制約されるから、計測手法の如何にかかわらず成果物は不均一な精度を含むものとなる。計測成果を地形図として利用する際に、メッシュまたはTINなどをもって表示されるが、基礎データの取得密度と整合した分割サイズの設定が大切である。

(このほか複数コースにわたる計測結果の整合には、コース間調整として問題もあることを指摘しておかなければならない)

### 3. 植生と斜面形状が地表計測密度に及ぼす影響

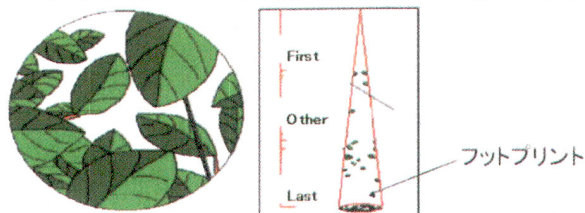
#### (1) 植生の影響

地表を覆う樹木はレーザーの通過を妨げて、地表まで透過する光量を減ずる。それでも図－2に示すようにレーザー1ショットの光束が拡散して地上に到達する範囲(フットプリント)内に光を通す隙間があれば、地表点の座標値を取得できる。図中の表に示す実測事例のように、透過光の得られる割合(透過率)は、樹種や季節により異なることがわかる。針葉樹林では、季節変化は少ないが一定の透過光が得られる傾向がある。また、竹藪や照葉樹林、笹などの生い茂った草地等、計測が困難な植生もある。

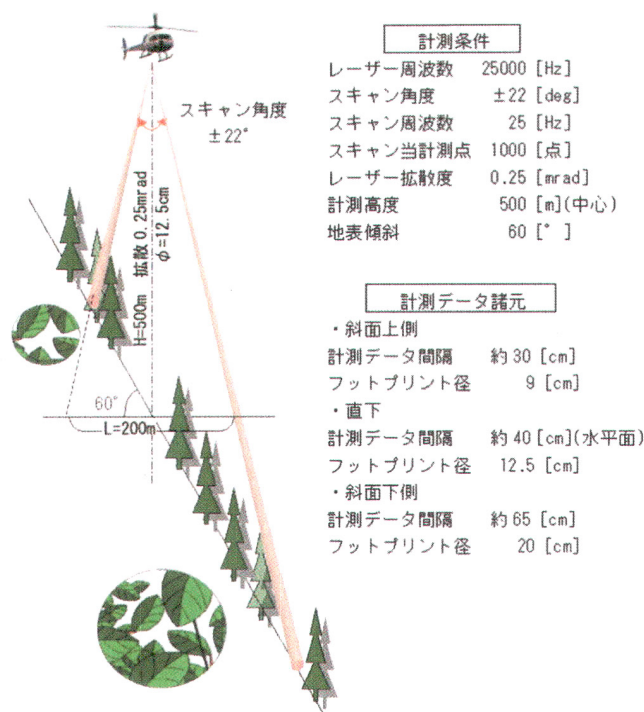
#### (2) 急傾斜地の計測

植生の影響に加えて急傾斜地では、取得データ密度が希薄になる。このことは斜面と航空機の位置・レーザーの照射角度から幾何学的に説明される。斜面に並行に飛航した計測の場合、直下のデータ取得間隔の平均とすると、斜面上・下流側で傾斜面に沿った照射点密度にムラを生ずる。図－3に示すように、仮定した斜面傾斜度ならびに計測機器の仕様、機体の運航条件とした場合、上・下流側の測点間隔の相違を数値で示した。スキャン幅、飛行高度が増せばさらに差は拡大する。オーバーハングした斜面は不可能で、垂直に近い壁はデータが取れても非常に効率が悪い。

| 樹種  | 密生度 | 計測点密度<br>Pt/100m2 | 計測点密度<br>Pt/100m2 | 透過率% |
|-----|-----|-------------------|-------------------|------|
| 針葉樹 | 高   | 1980              | 440               | 22.2 |
|     | 中   | 1240              | 370               | 30.0 |
|     | 低   | 1076              | 410               | 40.0 |
| 広葉樹 | 高   | 810               | 61                | 7.9  |
|     | 低   | 2050              | 613               | 29.9 |
|     | 落葉期 | 1220              | 1070              | 87.0 |
| 竹   | 高   | 860               | 40                | 0~4  |



図－2 フットプリントと透過率

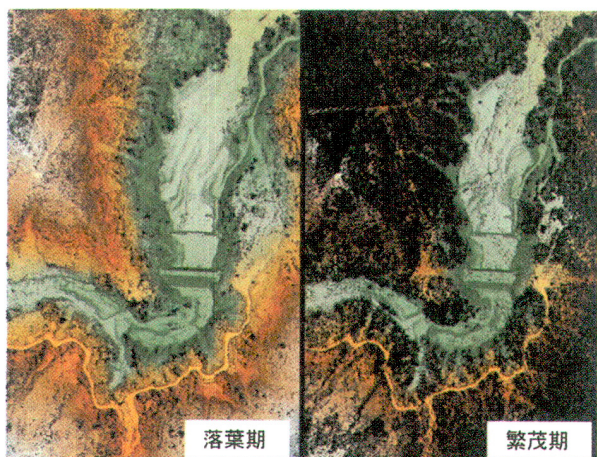


図－3 急斜面におけるデータ密度の偏り

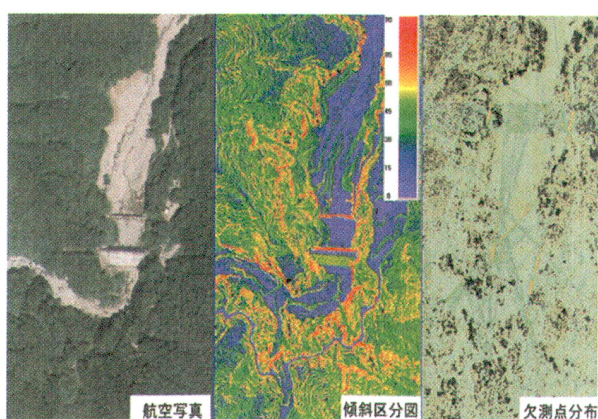
#### (3) 斜面計測における位置のずれ

斜面計測においては、フットプリントも拡大するが、現在の計測のメカニズムでは、平面座標位置は照射光の中心点(=フットプリント中央)として認識される。これに対して高さは、フットプリントの範囲内における最下反射点(ラストパルス)を平面座標位置の標高として記録するから、両者は確率としてフットプリント径に比例した位置誤差を有する可能性がある。平坦地では問題は少ないが、傾斜度とともに座標位置のずれの影響は増大するから、起伏に富んだ斜面地形においては、密度の高いシャープな計測が必要である。また、地形等の変化量の計測を目的として反復計測を実施する場合も地表面計測点密度が信頼性を左右することになる。





図－４ 季節による欠測点分布



図－５ 傾斜および植生と欠測点分布

図－４に急傾斜河川流域斜面の、繁茂期と落葉期における地表面欠測部分を例として 1m メッシュに編集して比較した。区画内に計測点のない部分を黒点で示した。

図－５は計測で得た傾斜度の区分(中央)と落葉期の欠測点の分布(右)である。さらにデジタル写真から作成したオルソ画像(左)をもって判読すると、急傾斜部分と欠測分布の相似性が見られる。森林のうち針葉樹との関連も一部に想定できた。余談ながら傾斜区分図では堰堤の斜度の区分を明確に捉えている。

#### (４) 計測の品質向上のための対策

計測精度向上の対策は、上述のとおり計測密度を上げて、高い確率で地表面データの欠測点を減ずるよう、高い発射頻度の機器を用い狭スキャン幅で、低高度・低速度で計測するよう努めることである。レーザーの拡散の小さなモードを用いればフットプリントは小さく、シャープな計測ができる半面、飛行高度が高いとフットプリントの重なりが得られず、欠測箇所が増加する。

計測のバラツキは主として傾斜や植生に因るものであるから、航空機の運航、計測機器の性能・設定等データ取得のための条件改善では解決することができない。対策は、地表面の露出多い時期に計測時期を設定し、高いラップ率を持って計測に当たることである。傾斜面に沿って

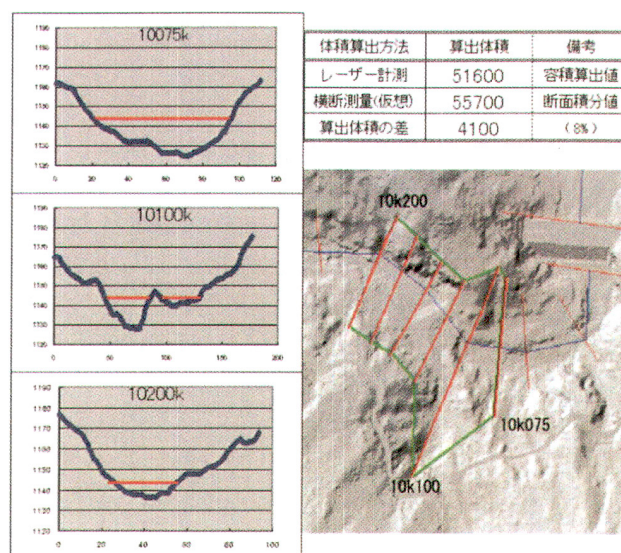
高度を一定に保ちながら計測したり、斜面に接近して斜方からレーザーを照射する方法は、回転翼機であれば可能である。最も厳しい計測環境条件における計測密度を予め予測する技術は、主として計測者のノウハウに依存する部分であるが、いまのところ的確な判断基準に達していない。

今後必要な蓄積を期待するものである。今後成果の面的な制度の一様性を廃して、困難な条件・重要部分を入念な計測を当てるなどの方法も考案すべきかと考える。

#### ４．立体地形計測モデルの利用

空中レーザー計測から得られる地形モデルは、点と線からなる従来の測量とは概念を異にするもので、各点ごとの測定精度は地上測量に及ばないものの、圧倒的量の計測点の集合から、直接立体地形を表現することができる。この性状は土捨て場やダム堤体等大規模土工の数量算出、湛水容積などの算出・シミュレーション、地すべり土塊等地形変化の正確な算出にとって、多くの利点がある。数十メートル間隔で精密な地上測量を選ぶか、位置精度は数十センチメートル(一般に平面精度 1/2000-3000、高さ精度 15cm=波長に固有の機能限度)であっても、偏りのない高密度(一般に 0.5～2m 程度)の DTM を選択するかは、事業の目的に沿って、費用、速度、利活用法を考慮して選択されるべきことがらである。なお、高さの誤差は平坦で障害の少ない、市街地・路面・田畑・堤外地等では高密度計測点群の平均化効果によって、機械的精度限界を超える成果が期待できる。

空中レーザー計測の膨大な情報をそのまま地形図としてすべて掲出するのは、情報の偏り量の重さからも得策ではない。CAD や数値地図の基盤情報としては補間を施し平均化したうえで、使用目的に適合したサイズのメッシュまた



図－６ 河床断面容積計算例



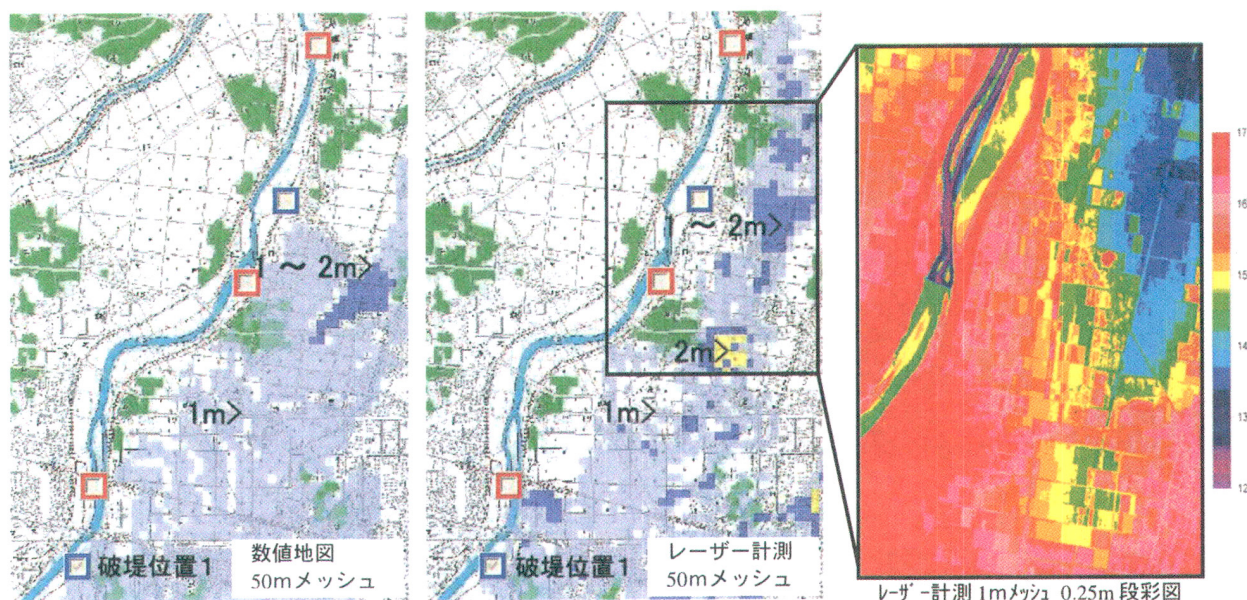


図-7 河川氾濫シミュレーション

はTIN情報に軽量化された編集モデルが用いられる。しかし見た目に同サイズのメッシュデータであっても、基の情報量を反映した精度差があることを理解しなければならない。換言すれば編集されたデータは、オリジナルデータの精度を超える品質は期待できない。移動・変化量など先の利用が考えられる場合には、経済的に可能な範囲で高密度の地表データの取得を心がけるべきであろう。以上述べたことに対する事例の一端を紹介する。市販の数値地図情報は、簡便性、汎用性を活かした業務に利便性はあるが、個別のニーズに適用するには不自由があると思われる。

#### (1) 河谷容積の算出

図-6は、例示の河川区域の一部区間をサンプルとして、三次元地形から標高 1145m 以下の立容積を計算し、これを従来の断面測量による計算(平均断面法)との比較を試みたものである。断面は実測に拠らず立体モデルから切り取ったものである。表に示したように、結果は8%の体積差が算出された。評価は目的次第でもあるが、個々の断面積はさらに偏差によりさらに大きなものとなる。

#### (2) 氾濫シミュレーション

図-7は計測点間隔 1m で実施されたレーザー計測と、数値2500を利用した浸水予測シミュレーションの結果を比較したものである。同じ 50m のグリッド表示で、同一経過時刻(4 時間)を例示したが、基礎データの違いを反映して浸水水域、水深にかなりの差がみられる。レーザーでは市街地の微妙な標高、既設水路に沿った浸水域の拡散など、より適切な表示がおこなわれている。これをオリジナルデータを基に作成された 1m メッシュの地形モデルにあらわすと、さらに細かな地形の凹凸が抽出できて、避難路の抽出・特定など、再現性の高いハザードマップとして使用できることがわかる。

## 5. おわりに

レーザープロファイラで取得された数値データはGIS、CALSE 等施設の管理のIT 化という次代の趨勢に適うものである。今後、土木構造物の計画、設計、周辺環境変化のモニタリングを含めた施設管理等に必要な基盤情報の取得技術の改良と、解析手法に工夫が重ねられて適用範囲が拡大されることを期したい。本論の執筆にあたり、天竜川上流河川工事事務所にデータの解析のための使用を申し出たところご承諾いただくことができた。ここにご協力への感謝とともに、今後のご指導を賜るようお願い申し上げる。

## 参考文献

- 1) 大塚正幸, 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, 土木学会土木新技術シンポジウム, pp.123-456, 2004 年 7 月
- 2) 仲野公章, 土砂災害監視技術の動向と今後の課題, 土木研究所講演会講演集, pp. 61-86, 2002 年1月
- 3) 仲野公章他, 2000 年有珠山噴火時におけるヘリコプタ搭載レーザー扫描仪による地形変化測定, 砂防学会誌 vol.53-6, pp. 88-94, 2001.3 月
- 4) 秋山幸秀, 航空機搭載レーザー測量システム ALMAPS, 北海道土地改良設計技術協会会誌第 13 号, 1999.