

航空機搭載型レーザ及び地上型レーザ計測の前浜地形計測への適用

宮瀬 正* · 柘植 貢** · 田中茂信*** · 森田真一**** · 野田敦夫*****
川村啓一***** · 山本幸次***** · 目黒嗣樹*****

本研究では各種レーザ計測手法の前浜地形計測への適用について検討を行うことを目的とし、伊勢湾西南海岸において航空機搭載型レーザ計測、地上型レーザ計測を同時期に実施し、精度検証等を行った。研究結果からは地上レーザは航空レーザより高精度で地形を捉えること、また対象範囲が狭域の場合、地上レーザは航空レーザよりコストが安価であること等が確認された。航空レーザの取得点間隔を変えて精度検証を行った結果からは、平均1.0 m 程度の点間隔が対象地域における前浜地形計測を行う上で適切であることも確認された。

1. はじめに

本研究では、近年注目されている各種レーザ計測手法の前浜地形計測への適用について検討を行うことを目的とする。前報(森田ら, 2004)では航空機搭載型レーザ計測の前浜地形計測への適用について検討を行い、その有効性を確認した。本報では、引き続き前浜地形計測における航空機搭載型レーザ計測の適切なデータ取得点間隔の検討を行うとともに、新たな計測手法である地上型レーザ計測による前浜地形計測の試行及びその適用方法について検討した。

2. 研究方法

(1) 対象範囲

研究対象範囲は、航空レーザ計測を実施した伊勢湾西南海岸全域(延長約11 km, 0.48 km²)の中で、養浜工事が実施されており、養浜効果の定量的な把握が必要とされている北浜の一部(延長約2.1 km, 0.11 km²)の範囲とした(図-1)。

(2) レーザ計測手法の概要

a) 航空機搭載型レーザ計測

航空機搭載型レーザ計測(以下、航空レーザ)は、航空機から地上に向けてレーザパルスを発射し、地表面で

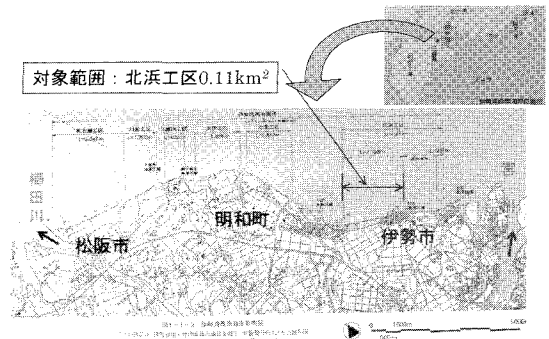


図-1 研究対象範囲位置図

反射して戻ってきたレーザパルスから、高密度な三次元デジタルデータを取得する測量技術である。この技術はGPS (Global Positioning System), IMU (Inertial Measurement Unit), レーザ測距装置の3要素技術の統合化により実現されたものである。

GPSは地上局と航空機に搭載するGPSの二つを用い、航空機の位置を求める。GPSデータは通常1秒毎に取得されるが、1秒間に航空機は数10 mも移動するため、その間のデータをIMUで補う。IMUは3軸のジャイロと加速度計から構成されており、航空機の姿勢と加速度を数10分の1～数100分の1秒間隔でデータを取得する。レーザ計測では、GPSによる位置情報、IMUによる角度・加速度情報から、レーザの照射方向を求めている。レーザ測距装置は、航空機から地上の測点までの距離を求める装置であり、パルス発射回数は1万数千～数万回/秒に及ぶ。これら3要素を併せて求めた地形計測結果は、高密度のランダムな標高点データとして表現される。なお、同技術の機械精度は高さ方向でRMS = 0.15 mである。

今回使用した航空レーザの計測器の諸元は表-1に示すとおりであり、レーザ計測におけるデータ取得の点間隔は最大で約1.0 mの設定で計測を行った。また、GPS地上局としては計測対象範囲から約30 kmの地点に位置する国土地理院の松阪電子基準点の計測データを用いる

*	国土交通省中部地方整備局 三重河川国道事務所調査第一課 専門調査員
**	国土交通省中部地方整備局 三重河川国道事務所調査第一課 課長
*** 正会員	工修 (独法) 国土研究所ユネスコセンター設立推進本部 上席研究員 (前 三重河川国道事務所 所長)
**** 正会員	(株) パスコ コンサルタント事業部防災技術部部長
***** 農修	(株) パスコ コンサルタント事業部防災技術部砂防課係長
***** 農修	(株) パスコ 中部事業部技術部国土情報課
***** 正会員	博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室主任研究官
***** 正会員	修(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室研究官

ものとした。

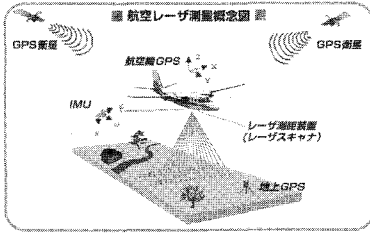


図-2 航空機搭載型レーザ計測手法の概念図
(航空レーザ測量 WG, 2004)

表-1 航空搭載型レーザ計測器の諸元

測定高度	最大 対地高度4,000 m
データ収集幅	最大 9,400 m
視野角	最大 75度
レーザパルス数	最大 83 kHz
反射取り込み数	最大 4個
平面(X,Y)位置精度	0.30 m 以下(RMS)
高さ(Z)位置精度	0.15 m 以下(RMS)

b) 地上型レーザ計測

地上型レーザ計測（以下、地上レーザ）は、地上据え置き型のレーザ測距儀であり、トータルステーションと同じ光波測距儀の一種である（図-3）。同技術は計測器が自動的に回転しながら水平方向、垂直方向に対し一定間隔で地表面にレーザパルスを多数照射することで、計測器周辺の地形を三次元デジタルデータとして捉える。トータルステーションによる測量では1点毎に計測するが、地上レーザは数万～数100万の計測点を数分～数10分程度で計測が行えるため、取得されるデータは高密度な点群データとなる。レーザはある一定の角度間隔で地面に対して斜めに照射されるため、計測器から遠方になるにつれ、データの取得点間隔は広がる（図-4）。さらに計測点までの距離が同じであれば、レーザの照射角度が垂直に近づくほど点間隔が密となり、レーザパルスの径（フットプリント）も小さくなるため、計測効率や測定精度が高くなるという特徴も有す。同技術の計測結果は、レーザの発射・受光による測距及びその際の水平角度、垂直角度をもとにレーザ照射位置の座標を求め、機械内部のローカル座標系上に保存される。これを地図座標系に展開する際には、計測範囲内に地図座標値が明らかな最低4点のターゲットを設け、レーザ計測結果にターゲットの座標値を与えることで変換を行う。なお、同技術の計測精度は、レーザ計測器の測距精度 RMS = 0.025 m に計測器の設置誤差、ターゲットの計測誤差、座標変換時に生じる誤差を加えた値となる。

今回の計測では、データの取得点間隔を最大1.0 m

（観測点最遠点付近における許容点間隔）と設定し、これを満たすための観測点及びターゲットの配点を計画した。レーザの照射特性より、平坦な前浜地形を計測する場合、観測点は高所に設定することが望ましい。しかし、堤体からは汀線部は見通せないため、観測点は堤防天端に設置するとともに汀線際にも設置した（全30点）。ターゲットは観測点と同位置にミラーを設置し、4級基準点測量をもとに座標値を把握した。今回使用した地上型レーザ計測器の諸元を表-2に示す。

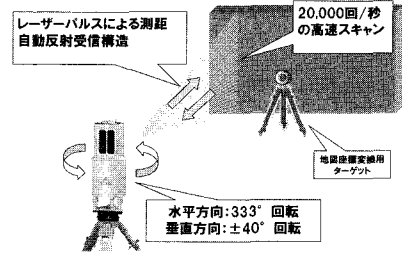


図-3 地上型レーザ計測手法の概念図

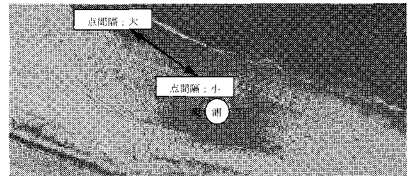


図-4 地上型レーザ計測結果の一例

表-2 地上型レーザ計測器の諸元

計測範囲	2～350 m
最小計測角度	0.072°
スキャンング範囲（最大）	垂直方向 80° + 水平方向 333°
レーザ波長/レーザクラス	近赤外線/クラス1
レーザパルスの広がり角	約0.17°
本体寸法/重量	435×210 φmm/約13 kg

(3) 検討方法

航空レーザ、地上レーザの計測結果についての精度や計測効率についての知見を得ることを目的とし、2手法のレーザ計測と精度検証用の現地横断測量を対象地域においてほぼ同時期に実施した。これら3つの計測結果をもとに、①航空レーザ、地上レーザの精度比較、②航空レーザの取得点間隔の違いによる精度比較の2つを行った。以下にその方法を述べる。

a) 航空機型及び地上型レーザ計測の精度比較

実測では、地形変曲点を人間が確認し計測を行うが、レーザ計測はランダム点の計測を行うため、地形変曲点を全てうまく捉えることが難しく、取得点間隔が実測との精度差を生じさせる要因の一つとなっている（森田ら、

2004). 地上レーザは航空レーザと比べ、細密な取得点間隔で地形を計測することが可能である。従って、変曲点を多く含む複雑な地形を計測する場合、地上レーザの方が高い精度で地形形状を捉えることが可能といえる。一方、計測効率の面では地上レーザは1回の計測範囲が航空レーザより狭いため、広域を対象とした計測を行う場合には効率が低いといえる。

このような一般的特徴を有す地上レーザを前浜地形計測に適用した場合、航空レーザと比べどの程度の精度等を示すのかについて確認を行うことを目的とし、以下の手法により地上レーザの精度検証及び航空レーザとの比較を行った。

検討対象範囲において、検証用横断測線を20 m 間隔で14測線設定し、堤防～汀線間の約40 m 程度の区間(面積:約22,000 m², 図-5)を測量した。航空レーザ及び地上レーザ計測結果はGISソフト上で最も近い3点をつないで面を構成するTIN(不規則三角網: Triangulated Irregular Network, 図-6)を生成し、検証用横断測線を重ね合わせて横断面を作成した。精度検証は、現地横断測量、航空レーザ及び地上レーザ計測結果からそれぞれ作成した横断面を重ね合わせ、横断面上で地盤高を比較する手法をとった。なお、地盤高の比較点は、現地横断測量における測点(約10点/測線程度)とした。

また、今回の作業結果をもとに、各レーザ計測の計測効率の比較も行った。

b) 取得点間隔の違いによる精度比較

航空レーザから取得されるデータの取得点間隔は、測定高度、レーザの計測視野角、レーザの発射パルス数等の設定に支配される。複雑な地形を計測する場合、取得点間隔が狭いほど地形変曲点を網羅的に計測する確率が

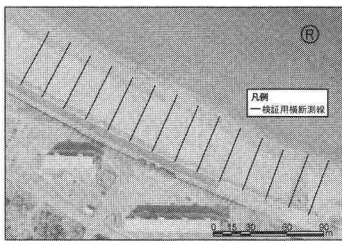


図-5 海浜部における検証用横断測線位置図

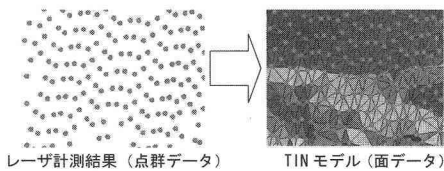


図-6 レーザ計測結果のTINモデル生成イメージ

高くなるため、高い精度で地形形状を捉えることが可能といえる。

このような航空レーザの取得点間隔の違いが前浜地形計測を行う上で与える影響度について確認することを目的とし、以下の手法により点間隔の異なる航空レーザ計測結果の精度検証及び比較を行った。

比較を行った点間隔のケースは、今回の航空レーザ計測において取得した点間隔1.0 m と、これより間引き処理を行った2.5 m, 5.0 m の3ケースとした。点間隔の調整方法は、比較を行った範囲の面積から取得点間隔2.5 m 及び5.0 m の場合の計測点数を求め、それぞれの点数に合うように当初計測結果(1.0 m 間隔)から計測点を間引いた。

以上の方法により調整した3ケースの点間隔データは、a)の方法と同様に横断面を作成し、検証用の現地横断測量結果の横断面と重ね合わせ、地盤高の比較を行った。

a), b)の両検証ともに、比較の指標としては①RMS(平均二乗誤差; 誤差分散, 式(1)), ②現地横断測量から求められる地盤高との相関の2つを用いた。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - x)^2}{n}} \dots\dots\dots (1)$$

x_i : 計測値(レーザ計測結果)

x : 最確値(現地測量結果)

(4) 計測実施時期

レーザ計測は、水面ではレーザが吸収もしくは乱反射するため、水面下の地形を計測することが困難である。同特徴を踏まえ、大潮で日中に干潮となる2004年9月14日に、干潮時を挟んで(干潮位:T.P. = -69 cm)航空レーザ計測を実施した。また同日中に現地横断測量、9月13~15日に地上レーザ計測を実施・完了した。

3. 研究結果

本研究における検討結果を以下に示す。

(1) 航空機型及び地上型レーザ計測の精度比較結果

a) 精度比較

航空レーザ、地上レーザの比較検証結果から得られたRMS比較表を表-3に示す。表より、航空レーザのRMSは約0.14 m程度となっており、同レーザ計測機器の機械精度(RMS = 0.15 m)を満たす結果を示しているが、地上レーザのRMSは0.08 mであり、地上型の方が高い精度を示すことが確認された。

また、現地横断測量と各レーザ計測結果の地盤高の相関関係を調べた結果を図-7に示す。図-7によれば、航空レーザ、地上レーザの相関係数はそれぞれ0.96, 0.99となり、地上レーザの方が高い相関を示した。

このような計測手法の違いにより計測精度、あるいは

現地横断測量との相関に差を生じさせる区間を横断図上で確認したところ、主に変曲点を多く含む侵食崖付近で差異が生じている状況が確認され、取得点間隔が狭い地上レーザの方が現地地形への追従性が高いことが確認された(図-8)。

表-3 航空レーザ, 地上レーザの精度比較

手法	標準偏差	RMS
航空レーザ	0.133 m	0.139 m
地上レーザ	0.079 m	0.080 m

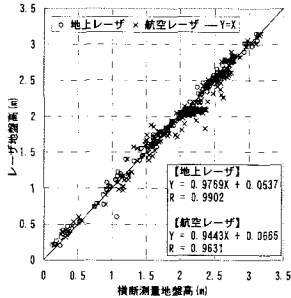


図-7 現地横断測量とレーザ計測との地盤高測定値相関関係 (航空レーザ, 地上レーザの比較)

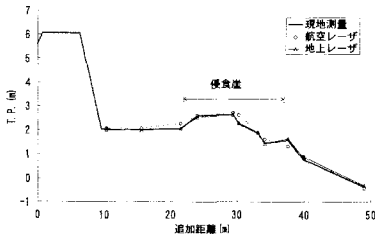


図-8 重ね合わせ横断図例 (航空レーザ, 地上レーザの比較)

b) 計測効率比較

航空レーザ, 地上レーザの計測効率について考察するため, 両レーザ計測の作業期間及びコストについて概算した。比較方法は, 計測対象面積を①広域の場合 (浜幅 0.05 km × 延長 20 km = 1.0 km²), ②狭域の場合 (浜幅 0.05 km × 延長 0.5 km = 0.025 km²) の 2 ケースを想定し, 本研究における作業実績をもとに外業・内業を含めた人日数及び経費を概算し, 比較した。

比較した結果, ①広域を対象とした場合では地上レーザは航空レーザと比べ, 人日数は約115倍, 経費は約18倍となり, ②狭域を対象とした場合では地上レーザは航空レーザと比べ, 人日数は約3倍, 経費は約1/2倍となった。

(2) 取得点間隔の違いによる精度比較結果

航空レーザ計測結果の取得点間隔を3ケースに調整し, 比較検証した結果から得られた RMS 比較表を表-4 に示

す。表より, 取得点間隔が1.0 m, 2.5 m, 5.0 m と大きくなるにつれ, RMS が約0.04 m 増加, つまりバラツキも大きくなる傾向が確認された。

また, 現地横断測量と各取得点間隔のレーザ計測結果の地盤高との相関関係を調べた結果を図-9 に示す。図-9 によれば, 取得点間隔が1.0 m, 2.5 m, 5.0 m と大きくなるにつれ, R = 0.96, 0.95, 0.93 と相関係数は低下する傾向を示した。

このような航空レーザの取得点間隔の違いにより計測精度, あるいは現地横断測量との相関に差を生じさせる区間を横断図上で確認したところ, 主に変曲点を多く含む侵食崖付近で差が生じており, 取得点間隔を狭く設定する方が精度面も向上することが確認された(図-10)。

4. 考 察

研究結果において得られた知見等をもとに, 地上レーザの前浜地形計測における適用方法及び航空レーザの適切なデータ取得点間隔等について考察する。

(1) 地上型レーザ計測の適用についての考察

航空レーザと地上レーザの精度比較結果からは, 両手法の取得点間隔の違いにより, 地上レーザの方が RMS

表-4 取得点間隔1.0 m, 2.5 m, 5.0 m の精度比較

取得点間隔	標準偏差	RMS
1.0 m	0.133 m	0.139 m
2.5 m	0.149 m	0.153 m
5.0 m	0.183 m	0.183 m

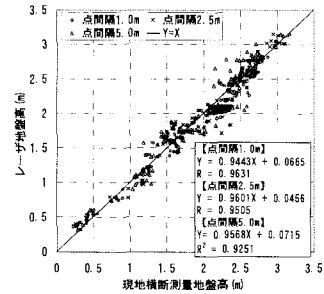


図-9 現地横断測量とレーザ計測との地盤高測定値相関関係 (取得点間隔1.0, 2.5, 5.0 m の比較)

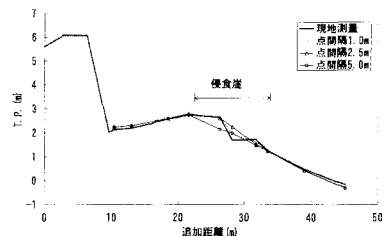


図-10 重ね合わせ横断図例 (点間隔1.0, 2.5, 5.0 m の比較)

で0.06 m 程度高く、現地横断測量結果の地盤高との相関が高いことが明らかとなり、このような精度の差が生じる区間は、主に変曲点を多く含む侵食崖付近であることも確認された。

一方、計測効率の面では、広域を対象とした場合には地上レーザは航空レーザと比べ、圧倒的に計測効率が低いことが分かったが、狭域を対象とした場合は経費が1/2程度と、安価であることが確認された。航空レーザの経費は航空機の運航費に支配されており、広域になるほど1回の計測に係る運航費は割安となる。このため、広域を対象とした計測を行う場合、計測効率は極めて高くなるが、狭域を対象とした場合は運航費などの経費の比率が高くなり、費用的には割高となる。さらに、航空レーザは上空からの計測であるため、雲の影響など天候の影響を受けやすい。よって暴浪発生直後の曇天時に計測を行うような場合には、地上レーザの方が機動性に富むといえる。

以上のような航空レーザ、地上レーザの計測精度、計測効率を踏まえると、長大な海岸全域の前浜を計測するような場合には航空レーザの方が適しており、養浜施工区間の変化や特定波浪により局所的に生じた前浜の顕著な侵食・堆積状況など、計測対象範囲が狭域かつ地形が複雑で、より高い精度で計測が必要な場合には地上レーザの方が適していると考えられる。

(2) 航空機型レーザ計測の取得点間隔についての考察

航空レーザの取得点間隔を3ケースに調整し、精度比較を行った結果からは、点間隔1.0 m のケースが最も高精度に現地地形を表現していることが確認され、点間隔が大きくなるにつれ特に侵食崖付近の地形表現が低下する傾向も確認された。

研究結果でみられたような点間隔の違いによる精度差は、後浜のように比較的地形が平坦な区間では地形変化のモニタリング結果に与える影響は少ないと考えられるが、侵食・堆積が活発な汀線付近や侵食崖付近では地形が複雑になるため、より小さい点間隔で計測することが望ましいといえる。

さらに、最近では航空レーザに用いられるレーザ計測器自体の性能が飛躍的に高まり、本研究開始当時はパルス数が15 kHz 程度であったものが、現在では50 kHz～80 kHz のものが市場に供給されてきている。研究開始当時の計測器性能では、干潮時の限られた時間内で西南海岸全域を計測するためには点間隔を2.5 m 程度しか確保できなかったが、最新機種を用いた今回の研究では点

間隔1.0 m を確保することが可能となった。このように、最新機種を用いて今回の研究フィールドである西南海岸のような直線的な海岸地形の計測を行う場合、取得点間隔1.0 m～5.0 m 程度の幅なら、計測コース数の増減などの計測効率に大幅な変化は生じない。

これらのことより、航空レーザを用いた前浜地形の計測においては、平均1.0 m 程度の取得点間隔が適切であるといえる。

5. おわりに

本研究では、各種レーザ計測手法の前浜地形への適用について研究した結果を報告した。

研究結果では、計測対象範囲が狭域かつ地形が複雑で、航空レーザの計測精度より高い精度で計測が必要な場合は地上レーザの適用が適切であることや、前浜地形計測における航空レーザの取得点間隔としては1.0 m 程度が適切であることを確認できた。

なお、地上レーザ計測については、近隣に高層構造物が存在する場合や観測塔の設置を行う等、堤防先端よりも高い位置に観測点を設置することが可能であれば、今回の研究結果以上に計測精度や計測効率が向上するものと考えられる。

航空レーザの取得点間隔については、今回の研究フィールドである西南海岸のように侵食崖が形成されている場合は最大1.0 m と設定して計測することが適切といえる。しかし、平坦な前浜地形を呈している海岸においては、点間隔が2.5～5.0 m 程度でも十分であるケースも考えられる。また、地形変動がよりダイナミックな海岸においては、今回検討した平均1.0 m～5.0 m の点間隔でみられた精度の差に主眼をおくのではなく、より計測効率面を重視した点間隔で計測を行い、モニタリングの回数を増やすことが望ましいケースも考えられる。

上記のように、地上レーザ、航空レーザの適用方法や取得点間隔については、本研究の成果を指標とした上で適用範囲の地形特性、地形変動状況、計測目的に応じて適宜設定することが望ましいといえる。

参考文献

- 森田真一・野田敦夫・川村啓一・田中茂信・田中浩充・福濱方哉・山本幸次(2004): 航空機搭載型レーザ計測の海浜地形測定への適用性, 海講論文集, 第51巻, pp.1405-1409.
航空レーザ測量WG(2004): 航空レーザ測量ハンドブック, (財)日本測量調査技術協会, 119p