

航空機搭載型レーザ計測の海浜地形測定への適用性

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*****

海岸の経年的な地形変化は、現地横断測量により把握してきたが、現地測量は多大な労力、期間、コストがかかるとともに、測線間隔が広いことによる精度の課題がある。本報告はこれらの課題を解決するために、伊勢湾西南海岸で実施した航空機搭載型レーザ計測器を用いた海浜計測について報告するものである。本手法と従来手法との精度を比較すると、レーザ計測は地形変曲点の再現性について若干精度は劣るものの、面的に地形を把握できること、作業効率が高いことが確認された。

1. はじめに

伊勢湾西南海岸は、図-1 に示すように三重県松阪市から伊勢市に至る約 11 km の国土交通省直轄海岸である。平成 4 年より海浜の地形変化を把握するため、250 m 間隔で T.P.-10 m 堤防間において船舶による音探測量、横断測量を過去 10 年間実施してきたが、大きな地形変化もないことから、調査手法について目的、作業効率から見直すことにした。

当海岸における地形調査の具体的な目的は、浜幅の有無による堤防の機能低下、養浜砂の移動状況把握（事業効果）等があげられる。同目的を達成するために、これまでは現地測量により調査を行ってきたが、多大な労力、期間、コストが必要であるとともに、測線間隔が広い等の精度面での課題がある。これらの課題を解決する手法として、航空機搭載型レーザ計測に着目し、同手法を用いた海浜計測を実施することにより、同手法の主に精度面に関する適用性について検討を行った。

2. 研究方法

(1) 対象範囲

研究対象範囲は、伊勢湾西南海岸の北浜の一部 (0.11 km²) である (図-1)。対象区間は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区間である。

(2) 航空機搭載型レーザ計測の概要

航空機搭載型レーザ計測 (以下、レーザ計測) は、航空機から地上に向けて多数のレーザパルスを発射し、地

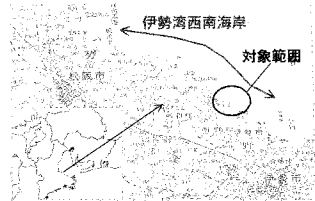


図-1 対象範囲位置図

表面で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新しい測量技術である。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 (慣性計測装置) は 3 軸のジャイロと加速度計から構成されており、航空

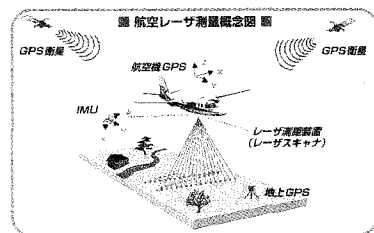


図-2 航空機搭載型レーザ計測手法の概念図 (航空レーザ測量 WG, 2004)

表-1 研究に用いたレーザ計測器のスペック

測定高度	最大 対地高度 3,000 m
データ収集幅	最大 2,500 m
視野角	最大 45 度
パルス数	最大 15 kHz
X, Y (水平) 位置精度	0.30 m (RMS)
Z (高さ) 位置精度	0.15 m (RMS)

* 正会員 (株)パスコ中央省庁事業部技術部 河川砂防グループリーダー
** 農 修 (株)パスコ中央省庁事業部技術部 河川砂防グループ
*** 農 修 (株)パスコ中部事業部技術部 国土情報課
**** 正会員 工 修 国土交通省中部地方整備局 三重河川国道事務所長
***** 正会員 国土交通省中部地方整備局 三重河川国道事務所工務第一課海岸係長
***** 正会員 工 修 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長
***** 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

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。レーザ測距装置はレーザを送受光し、航空機から地上の測点までの距離を求める装置であるが、そのパルス発射回数は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。

今回使用したレーザのスペックは表-1に示す通りであり、レーザ計測におけるデータ取得の点間隔は平均で2.5mとした。また、GPS地上局としては計測対象範囲から約30km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ものとした。

(3) 計測実施時期

レーザ計測は、2003年3月21日、7月31日、10月9日の3回行った。各計測日は日中に干潮となる日であり、各計測時の潮位は表-2に示すとおりである。

表-2 レーザ計測実施時の潮位表*

月日	干潟時刻	潮位 T.P. (cm)
2003.03.21	13:58	-105
2003.07.31	13:26	-104
2003.10.09	11:27	-68

*気象庁：鳥羽地点

(4) 検証方法

対象地域において、レーザ計測を表-2に示す3回実施するとともに、ほぼ同時期に現地横断測量を行い、両手法から得られた地盤高を比較することにより、レーザ計測の精度検証を行った。比較は起伏の少ない平坦地と、変曲点の多い海浜部に分けて行った。各比較方法について、以下に説明する。

a) 平坦部における検証方法

レーザ計測器の機械精度は、高さ方向でRMS(平均二乗誤差；誤差分散、式(1))0.15mとされる。本研究におけるレーザ計測結果が、機械精度内に収まった妥当な結果であるかを検証することを目的に、平坦部における精度検証を行った。

検証エリアは北浜近辺のアスファルト舗装路(約1,400m²)とした。検証材料としての現地測量は4級基準点測量で、概ねメッシュ状となるように63点を計測した。同計測結果より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)を作成し、検証エリア全域の地盤高を求めた。そして、検証エリア内にプロットされたレーザ計測結果の点と、現地測量から得られた地盤高とを比較した。比較点数は約300〜500点程度とした。

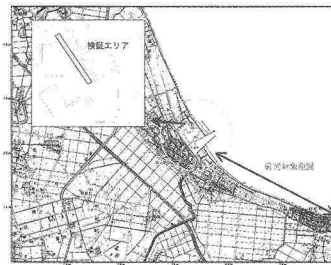


図-3 平坦部における検証対象エリア

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

x_i : 計測値 (レーザ計測結果)
 x : 最確値 (現地測量結果)
 (1)

b) 海浜部における検証方法

海浜部におけるレーザ計測結果の精度検証は、従来計測手法との比較を行う事を目的に、現地横断測量との比較による精度検証を行った。

現地横断測量は、検証用横断測線を20m間隔で14測線設定し、堤防〜汀線間の約40m程度の区間(面積：約7800m²)を測量した。レーザ計測結果はGISソフト上でTINを作成して面データとし、検証用横断測線を重ね合わせて横断図を作成した。地盤高の検証方法は、現地測量、レーザ計測から得られた横断図を重ね合わせ、現地測量における測点(約10点/測線程度)の地盤高を比較する手法をとった。

また、ここで得られた2手法間の地盤高の差が、土砂量に換算した場合どの程度の差になるかについて把握するために、2時期間の地形変動量を現地横断測量、レーザ計測よりそれぞれ求め比較した。現地測量結果からは、平均断面法により変動量を求めた。レーザ計測結果からは、1) 同手法より作成した横断図を用いて平均断面法、2) 面データを用いて面的に差分計算、の2ケースの方法により変動量を算定した。

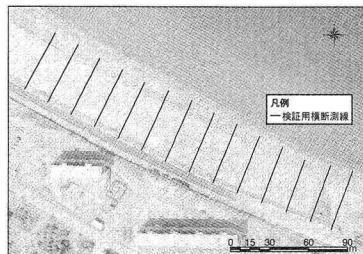


図-4 海浜部における検証用横断測線位置図

(5) レーザ計測結果を用いた海浜移動状況の把握

レーザ計測結果は、高密度の点データで構成されるため、地形を面的に捉えるという特徴を持つ。同特徴について把握するために、2時期間の海浜移動状況をレーザ計測結果より把握することにした。

把握方法は、各時期のレーザ計測結果をGISソフトにより2.5mの正方形メッシュの地形モデルに変換し、1) 2時期間の土砂変動量をメッシュ毎に算定し、2) 地形モデルより汀線ライン(T.P.=0mと定義)を生成し、複数時期間の汀線変化図を作成し評価することにした。

3. 研究結果

本研究における検討結果を以下に示す。

(1) 地盤高検証結果

a) 平坦部における地盤高検証結果

平坦部の検証エリアにおいて、レーザ計測結果による標高点と現地測量から得られた地盤高とを比較し、平均標高差、標準偏差、RMSを算定した結果を表-3に示す。表より、比較結果は時期により多少の差はあるものの、平均標高差は最大で0.05m、平均で約0.02m、標準偏差は最大で0.07m、平均で約0.06m、RMSは最大で約0.09m、平均で約0.07mとなった。

レーザ計測器の機械精度はRMSで0.15mであることから、今回の計測結果は、全時期とも機械精度内であり、妥当な計測結果を得たといえる。

b) 海浜部における地盤高検証結果

海浜部における現地測量とレーザ計測結果から作成し

表-3 現地測量とレーザ計測の標高差 (平坦部)

計測時期	平均標高差	標高偏差	RMS
3002.03	-0.008 m	0.045 m	0.046 m
3002.07	0.003 m	0.063 m	0.063 m
3002.10	0.049 m	0.074 m	0.089 m
平均	0.015 m	0.061 m	0.066 m

表-4 現地測量とレーザ計測の標高差 (海浜部)

計測時期	平均標高差	標高偏差	RMS
3002.03	0.073 m	0.123 m	0.143 m
3002.07	0.020 m	0.129 m	0.118 m
3002.10	0.088 m	0.150 m	0.136 m
平均	0.060 m	0.134 m	0.132 m

表-5 現地測量結果とレーザ計測結果との相関関係

計測時期	相関係数	近似直線式
3002.03	0.978	$y = 0.9473x + 0.158$
3002.07	0.991	$y = 0.9289x + 0.113$
3002.10	0.968	$y = 0.9648x + 0.145$

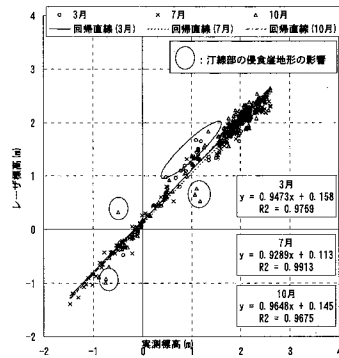


図-5 現地測量とレーザ計測の地盤高測定結果の相関関係

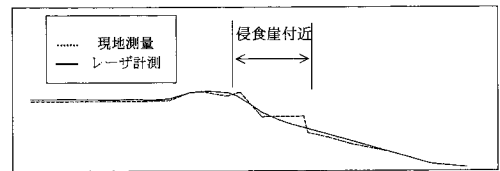


図-6 現地測量とレーザ計測との横断面重ね合わせ結果の一例 (縦方向縮尺2倍)

た横断面を重ね、地盤高を比較した結果をa)平坦部における検証と同様にとりまとめた結果を表-4に示す。

表より、比較結果は時期により多少の差はあるものの、平均標高差は最大で約0.09m、平均で約0.06m、標準偏差は最大で0.15m、平均で約0.14m、RMSは最大で約0.14m、平均で約0.13mとなった。

海浜部でみられた2手法間の標高差は、RMSでいえばレーザ計測器の機械精度内であることが分かったが、平坦部における比較結果より、やや差が大きくなる傾向もみられた。

次に、現地測量結果とレーザ計測結果の地盤高の相関関係を、計測時期毎に調べた結果を表-5に示す。表より、2手法間の相関は $R = 0.97 \sim 0.99$ と高い値を示した。

また、2手法の相関関係を示した図を図-5に示す。図より、近似直線より比較的大きく外れる地点が数カ所確認された。このような地点の現地状況を確認したところ、主に汀線部の侵食崖で、変曲点を多く含む地点であることが分かった(図-6)。このような部分の影響により、海浜部における比較結果は、平坦部における結果と比べ、RMSが大きくなったものと考えられる。

(2) 変動量比較結果

次に、現地測量とレーザ計測それぞれから求めた2003.03~2003.10間の地形変動量を比較した結果を表-6に示す。表より、現地測量とレーザ計測の2手法間では、変動量の総量では約300m³程度、対象エリアの面積で割り算定した単位面積当たりの変動量は平均で約

表-6 現地測量とレーザ計測の変動量比較 単位： m^3

(2003年3月～2003年10月期間)

手法	変動量(全体)	単位面積当たり
①実測横断※	315	0.04
②レーザ断面※※	706	0.09
③レーザ面※※※	732	0.09
②-①	391	0.05
③-①	417	0.05

※現地測量横断図を基に、平均断面法より算定

※※レーザ計測結果横断図を基に、平均断面法より算定

※※※レーザ計測結果面データを基に、面的な差分計算より算定
(対象範囲：延長250m区間、横断測線間隔20mピッチ)

$0.05 m^3/m^2$ 程度の差となった。なお、レーザ計測結果については横断図比較、面的比較の2ケース行ったが、両者に大きな差異はみられない。これは、横断図比較に用いた横断測線が20m間隔と短いため、面的比較と大きな違いが生じなかったものと考えられる。

(3) 海浜の移動状況把握結果

本研究において実施した複数時期のレーザ計測結果より、海浜の移動状況を把握した結果の一例を示す。

a) 土砂変動状況

レーザ計測結果より作成した地形モデルを用いて、2003年3月～10月の土砂変動状況を算定した結果の一例を図-7に示す。また、レーザ計測と同時期に撮影したオルソ画像も図-8,9に併せて示す。図-7に示した区間は、3月計測時の直前に養浜工事が行われているが、10月時点では平滑化されていることがオルソ画像から確認される。このような顕著な海浜地形の変化が、レーザ計測結果からは埋め戻された範囲は堆積、数均された範囲は侵食と表現されており、これらの変化が面的に把握されていることが分かる。なお、図に示した黒線は、従来実施されていた横断測量の測線(125m間隔)である。

b) 汀線の変化状況

次に、レーザ計測結果より作成した複数時期の汀線位置を重ね合わせた結果の一例を図-10に示す。図より、突堤の東側は3月計測時期以降汀線が前進、西側は逆に後退する傾向がみられる。同様の傾向は他の区間の突堤

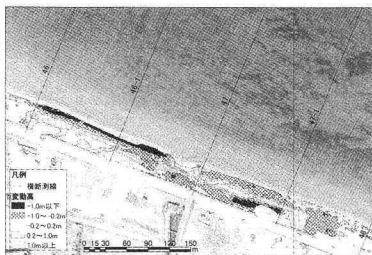


図-7 レーザ計測結果からの土砂変動高
(2003年3月～10月、養浜工事区間)

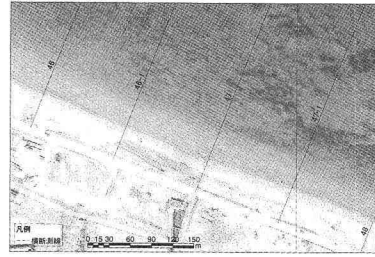


図-8 デジタルオルソ画像 (2003年3月)

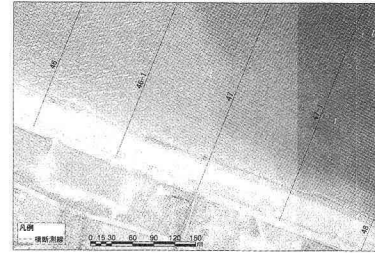


図-9 デジタルオルソ画像 (2003年10月)

付近においても確認された。対象区間付近は、冬季は風向きが概ね西から東方向へ、夏季は逆に東から西方向へ流れており、漂砂卓越方向も同様の傾向であるとされている(三重工事事務所, 2000)。本研究でみられた汀線の変化は、このような現象を反映しているものと推定される。なお、図にはa)と同様に横断測量の測線を黒線で示しているが、横断測量ではこのような連続的な汀線位置の把握が困難であることがわかる。

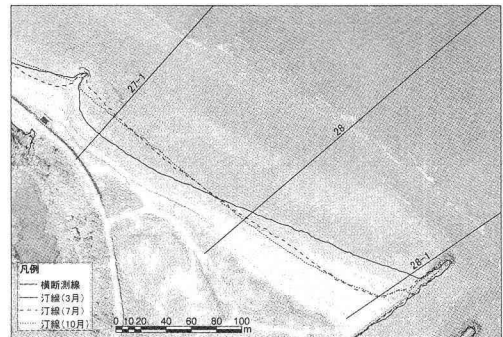


図-10 レーザ計測結果からの汀線変化状況図
(北浜より北西約3.0km地点、笹笛川河口付近)

4. 考 察

研究結果より得られた知見を基に、レーザ計測の海浜地形計測における適用性として精度、計測効率の2点について考察を行う。

(1) レーザ計測の精度についての考察

レーザ計測手法による海浜地形測定の精度については、平坦部ではRMSが平均で約0.07mであり、ほぼ現地測量結果と一致することが明らかになった。一方、海浜部においては、変曲点を多く含む侵食崖付近でややRMSが大きくなる傾向がみられた。これは、レーザ計測手法はランダム点の計測を行うという特徴を有しており、地形の変曲点全ての計測を行う事が困難なためと考えられる。しかし、海浜部のRMSは平均で0.13mと平坦部と比較してRMS0.06m程度の増加で、レーザ計測器の地盤高測定精度範囲内であり、現地測量結果との高い相関性も確認されている。また、変動量で比較すればレーザ計測結果と現地測量結果との差は $0.05\text{ m}^3/\text{m}^2$ 程度であったことから、レーザ計測は現地測量の代替手法として利用できる可能性は高いと考えられる。

また、レーザ計測結果を用いた海浜移動状況の把握結果からは、地形の変動量が面的に把握できること、あるいは汀線位置が連続的に把握できること等が確認された。従来手法である横断測量結果からは、海浜地形の状況が測線上のみしか把握されないため、測線間の地形は不明である。また海浜の移動状況についても線の情報から類推することになる。本来、海浜地形は三次元であり、その移動状況も三次元的な動きをしている点を考慮すれば、これを捉える地形計測手法としてはレーザ計測の方が適しているといえる。

以上より、レーザ計測は海浜地形の計測手法としての適用の可能性は高いと考えられる。

(2) 計測効率についての考察

レーザ計測の計測効率について考察するため、レーザ計測と現地横断測量の作業期間及びコストについて比較した。比較方法は、算定対象エリアの面積を 1 km^2 (測量幅 $0.05\text{ km}\times$ 延長 20 km)とし、レーザ計測は本研究の実績等を基に、また現地横断測量は設計業務標準積算基準書を基にそれぞれ延べ人日数、費用を概算するものとした。比較結果では、レーザ計測は現地横断測量と比べ、人日数では約1/5、費用では約1/4となった。これより、レーザ計測は、従来手法と比べ短期間でかつ低コストであることがわかる。このように、レーザ計測は広域を対象とした調査や、気象擾乱前後の海浜地形の測定のように、短期間で測定を完了する必要性が高い調査等にはより有効な手法であると考えられる。

一方で、レーザ計測は水面下を計測できないという特

徴を有す。また悪天候時には飛行条件やレーザの疎通条件等の影響により、計測が困難な場合もある。従って、計測を行う際には潮位の変動、天候の影響等を考慮したうえで、適切な計測のタイミングを図る必要があるといえる。

5. おわりに

本研究では、航空機搭載型レーザ計測手法の海浜地形計測への適用性について研究した結果を報告した。

研究結果からは、レーザ計測は地形を面的に把握可能であること、また高い計測効率であること等が確認された。これらの結果より、レーザ計測は海浜地形の計測手法として利用できる可能性が高いと考えられる。

一方で、レーザ計測は地形変曲点の再現性が現地測量と比べて低いという特徴も確認されている。同特徴は、例えば養浜事業の評価のための計測等のように、局部的に高い精度が求められる調査を行う場合には精度的に不十分となる可能性もあるため、無視できない課題といえる。

同課題に対しては、航空機搭載型のレーザ計測器はその機能が現在飛躍的に高くなってきており、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 $50\text{ kHz}\sim 80\text{ kHz}$ のものが市場に供給されてきている。パルス数が高くなれば、より高密度のデータ取得が可能となるため、地形の再現性が高まる。

なお、点密度が高くなってもレーザ計測器の高さ方向の機械精度である $\text{RMS}=0.15\text{ m}$ については変わらない。このため、同値を上回る精度が必要な調査においては、同様の仕組みで航空機搭載型と比べ高密度、高精度の地形データが取得可能な地上据え置き型のレーザ計測器の利用等も考えられる。

このように、今後レーザ計測を海浜地形計測に適用する際には、調査の目的と要求される精度に応じたレーザ計測技術の使い分けが必要になると考えられる。

参考文献

- 気象庁 鳥羽地点潮位 (2003): 気象庁ホームページ。
- 建設省中部地方建設局三重工事事務所(2000): 平成11年度北浜工区漂砂管理計画検討業務報告書 pp. 5.
- 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、119 p.
- 国土交通省大臣官房技術調査課 (2003): 設計業務等標準積算基準書、平成15年度版、(財)経済調査会 pp. 1-2-36—1-2-55.