「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部　第２巻第１号　31-39頁（2004）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Vol.2 No.1 pp. 31-39, 2004

三保海岸における航空レーザー測量の精度検証

横山心一郎*1・弘松峰男*2・金子純二*3・秋山幸秀*4・根元謙次*5

Measurement accuracy of Airborne-Scanning LiDAR on the Miho coast.

Shin-ichirou YOKOYAMA, Mineo HIROMATSU, Junji KANEKO,
Yukihide AKIYAMA and Kenji NEMOTO

Abstract

Seashore erosion has started early in the 1980s on the Sizuoka coast and went northeast gradually, finally took place on the Miho coast in 1994. Seashore erosion is a serious problem not only on Sizuoka-Simizu coast but also on seashore around Japan. In order to solve this problem, quantitative analytical method for erosion process at the beach is urgently required. Airborne-Scanning LiDAR (Light Detection And Ranging), the method of being the short time land survey technology using an aircraft or helicopter, appears to be useful for this objective. Data from LiDAR and that from conventional leveling method using Total Station are compared in order to verify LiDAR system. The data from LiDAR were obtained in April and September 2003, and compared with leveling data obtained at the about same period. The study area is classified into two areas according to the topographic characteristics which may cause differences of error in altitude. It turns out that the positioning error is found in data of LiDAR, the positioning by LiDER were shifted on the whole. Consequently, the average difference in altitude arising from two different method is 11cm in the flat area, and 12cm in the slope area. This indicates that a certain systematic error is included in LiDAR and that the accuracy by LiDER in a slope area does not significantly differ from that of the flat area. The same positioning error is also found in data obtained in September 2003, and both average altitude differences were 4cm after horizontal shifting. These differences are equal to each measurement error. Results indicate the positioning error may caused by GPS, IMU and the laser profiler, and it is also considered that the position error of the ground datum point used for compensation appears to be added.

１．はじめに

全国的規模で海岸浸食が進んでいる．的確な海岸浸食対策を講じるためには浸食状況を写真などにより視覚的にとらえると同時に数値的にも把握する必要がある．「三保の松原」や「羽衣の松」などの景勝地として有名な静岡県三保海岸（Figs. 1，2）でも，のこぎり型の海岸線で示された深刻な海岸浸食が見られる．三保半島は，その南西約15km に位置する安倍川から波浪などで供給された土砂により形成されたとされるが，1960年代ごろから治水事業を目的とした安倍川での砂防ダムの建設や河床砂礫の採取が行われ，それに伴い沿岸域への供給土砂が減少し，海岸線は徐々に後退した（椹木，1982）．静岡県では，テトラポッドの設置や養浜工事により海岸浸食の対策を講じてきた．

海岸浸食に有効な対策を講じるためには，広範囲および高密度な数値データを必要とする．東海大学海洋学部では三保海岸の海岸浸食の定量化を目的として水準測量を実施し，過去いくつかの標高資料を取得してきたが，この方法での測量では，1）データを取得するために時間がかかる，2）調査範囲が限定される，3）高密度データを取得しにく

2004年５月12日受理
＊1　東海大学 海洋学研究科 大学院生（Graduate Student, Graduate School of Marine Science and Technology）
＊2　東海大学 海洋学研究科 研究生（Research Student, Graduate School of Marine Science and Technology）
＊3　東海大学 海洋学研究科 研究生（Research Student, Graduate School of Marine Science and Technology）
＊4　朝日航洋株式会社（Aero Asahi Corporation）
＊5　東海大学海洋学部海洋資源学科（Department of Marine Mineral Resources, School of Marine Science and Technology, Tokai University）

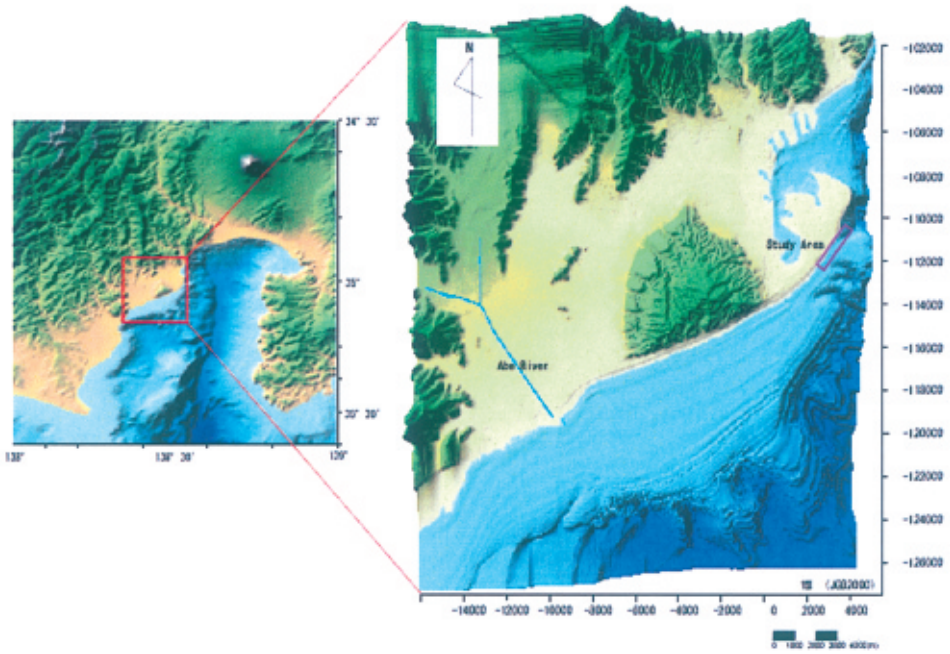

Fig. 1　Study Area



Fig. 2　Aerial photograph of Miho Peninsula (Aero Asahi Corporation)

い等の問題がある．そこで，都留（2002）や秋山（2003）などにより近年多くの研究報告がなされている航空レーザー測量によって海岸測量を行い，海岸浸食の問題に取り組んでいる．本研究では，2003年 4 月と 9 月に実施した 2 度の航空レーザー測量の計測精度を検証し，その違いから砂礫海岸における航空レーザー測量の有用性と問題点を明らかにする．

2．計測方法

2-1．航空レーザー測量システム

航空レーザー測量システムとは，航空機に GPS やレーザープロファイラなどを搭載し，直接的に地形計測を行う測量機器である．主要な機器としてレーザープロファイラ（LiDAR システム ALTM1225：走査式光波測距儀）や空中 GPS 受信装置，動揺計測装置（ジャイロ），加速度計，地上 GPS 基準局などで構成される．動揺計測装置と加速度計は，これらを統合した慣性航法装置として，あるいは複数の空中 GPS 受信装置を組み合わせて実現させているものとがある．航空レーザー測量システムでは，レーザープロファイラを用いてレーザー発射位置から地形までの距離，空中 GPS 受信装置を用いてレーザー発射位置の空間位置，慣性航法装置を用いてレーザープロファイラの姿勢と飛行方向の加速度をそれぞれ計測し，これらを解析する

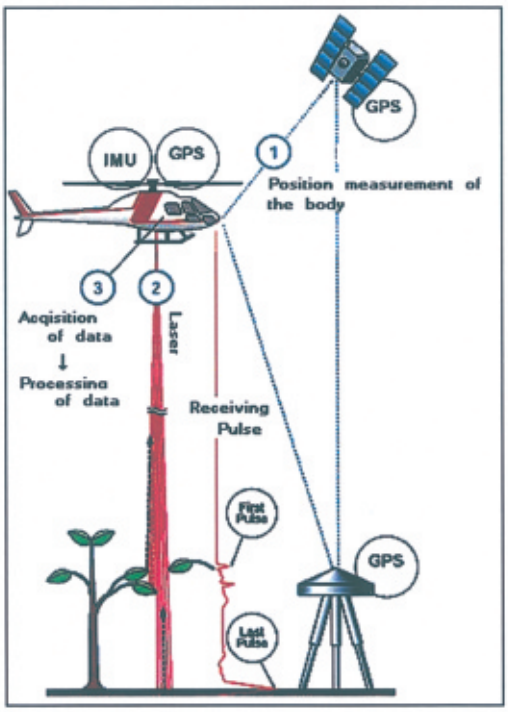

Fig. 3　Measurement Image

ことにより地形情報を求める（Fig. 3）．レーザープロファイラは，地上で用いるノンプリズム型光波測距儀と同じだが，航空機が移動し，かつ移動方向に直交して走査することにより面的な計測を実現する．空中 GPS 受信装置では，連続キネマティック法による計測が行われ，後処理により機体の軌跡が求められる．慣性航法装置や空中 GPS 受信装置を組み合わせた装置では，航空機の揺れを計測してレーザーの走査方向の絶対角度が求められる．加速度計は空中 GPS 受信装置や動揺計測装置の計測間で走査されたレーザー光線の位置や姿勢などを内挿補間するために用いられる．地上 GPS 基準局では，レーザー計測と同時に計測が行われ，レーザー発射点の空間位置を求める空中 GPS 受信データとの基礎解析に用いられる．また，測線幅，走査方向や進行方向のデータ間隔は，対地高度，走査角度，レーザー発射数，飛行速度，走査数により決められる．このような計測や解析により，測量対象地域の地形情報が得られる．航空機上のレーザープロファイラから発射されたレーザー光線は，徐々に広がりながら円錐体を描くように進む（秋山，1998）．この光線が最初に地物から跳ね返ってきたものが First Pulse，最後の地物から跳ね返ってきたものが Last Pulse とよばれる．この特性を利用して，First Pulse のみを処理することで樹木や構造物の表面などを再現した DSM（数値表層モデル）が，Last Pulse のみを処理することで樹木や構造物などを取り除いた DTM（数値高度モデル）が作成できる．航空レーザー測量（以下 LS）の計測仕様と地上基準点に使用した電子基準点の詳細を Table 1，2 にそれぞれ示す．

2-2． 水準測量

光波測距儀とデジタルセオドライトを一体化した測距測角儀であるトータルステーションによる水準測量を行い，静岡県土木事務所が定める工事基準点から座標計算した．トータルステーションによる水準測量は一般に最も精度が確保できるとされ，本研究でもこの値を真値として精度検証を実施した．工事基準点の精度は，水平位置・標高ともに 1cm 程度とされる（静岡県土木事務所）．水準測量は，工事基準点にトータルステーションを設置し，座標を求めたい地点にプリズムを設置し計測を行う．測点間隔は 10m を基本とし，地形変換点がある場合は測点間隔に係わらず計測した．水準測量（以下 TS）の計測仕様を Table 3 に示し，工事基準点 No. 30～No. 49 および 4 月，9 月の観測点の位置を Fig. 4，Fig. 5 にそれぞれ示す．本研究では，TS，LS の座標系を公共座標第 8 系（JGD2000）で統一した．

Table 1　LS Measurement Element

Day	2003/4/7	2003/9/3
Measurement Time	13:54～14:22	11:58～12:25
Deta Interval (m)	1m	1m
Flight speed (km/h)	210～225	215～225
Flight altitude (m)	1,200	790
Pulse frequency (Hz)	25,000	25,000
Scanning frequency (Hz)	25	34
Scan Angle (deg)	±11	±12

Table 2　Detail of Datum Point

Datum Point Code	5238-34-7101
Datum Point Name	2 Shimizu-City Shizuoka
Coordinate	Ⅷ
X	−112436.431
Y	1431.315
Z	14.40m

Table 3　TS Measurement Element

	Apr. 2003	Sep. 2003
Survey Period	2003/4/14～4/18	2003/8/29～9/6
Data Interval (m)	10m	10m
Number of Surveying Points	1062	1179

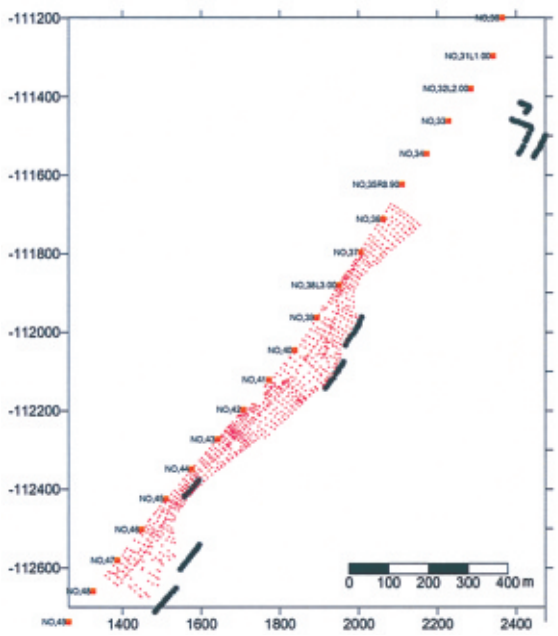

Fig. 4　Plot of leveling Points in April

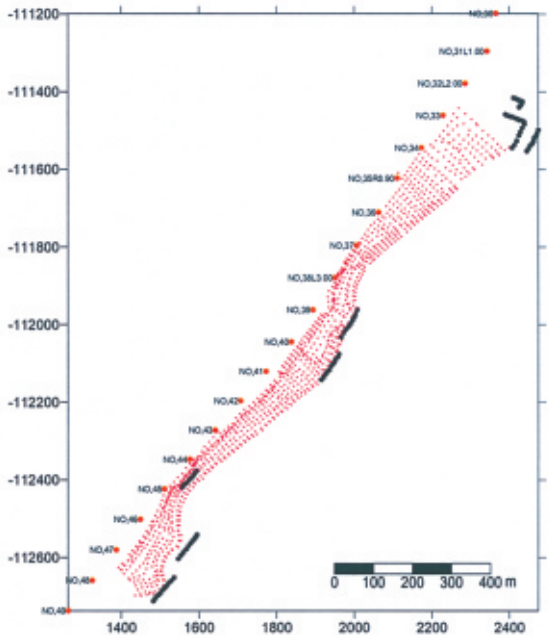

Fig. 5　Plot of leveling Points in Sep.

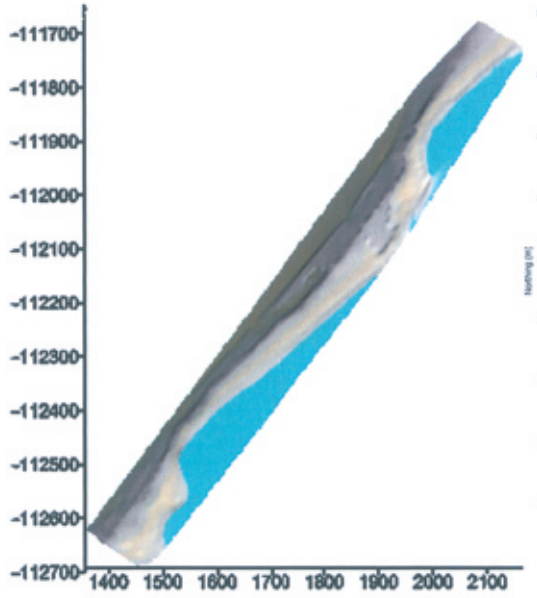

Fig. 6　Bird's-eye view (TS)

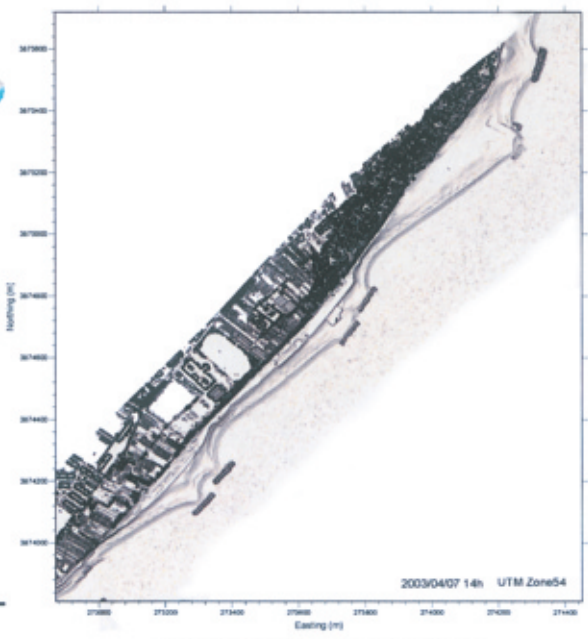

Fig. 7　Bird's-eye view (LS)

2-3．トータルステーション（TS）と航空レーザー測量（LS）との違い

水準測量に使われるトータルステーションでは正確な3次元データを取得できるものの，広範囲を高密度でカバーするのは困難である．しかし航空レーザー測量では短時間で，広範囲にわたる高密度3次元デジタルデータを取得できる．Table 1，3に示すようにTSでの計測では10m間隔のデータを取得するのに1～2週間かかるのに対し，LSの計測では現場での準備時間も含め，1m間隔のデータを30分程度で取得できる．ほぼ同地域であるTSの鳥瞰図（Fig. 6）とLSの鳥瞰図（Fig. 7）に示すように，地形の再現性，人工物の形状などは航空レーザー測量による計測が明らかに優れており，計算機上での視覚的および数値的な地形表現，またそれに伴う地形変化の過程を詳細に表現することが可能である．

3．航空レーザー測量の精度要因

3-1． 水平方向の精度要因

航空レーザー測量システムは，プラットフォームの位置を求めるためのGPS，動揺（3軸の傾き）を求めるIMUシステム，レーザーの地表到達点までの距離を計測するレーザー測距システムの主要な3システムから構成される．航空レーザー測量の位置計測の精度は，これら3システムの個々の誤差を複合させたものである．計測精度に影響を与える要因として，プラットフォームとGPS基準局との距離の他に，プラットフォームが高速で移動するために生ずるものがあり，プラットフォームが高速で移動する場合，GPSからの位置情報を補間する．その時の航空機の姿勢の変化は，直行3軸に配置されたジャイロの信号から判断されるが，ローリング，ピッチングおよびヘディング検出用のジャイロにドリフトが存在すれば，これらが系統的誤差となりうる．しかし，航空レーザー測量システムに用いられているほとんどのIMUシステムは，GPSとハイブリッドになっており，かつカルマンフィルターが導入されているために，大きな誤差を生むことはない．

その他に，レーザー測距の精度がある．記録される座標は拡散したビームの中心であるため，航空機の飛行高度に影響を受ける．水平方向については対地高度に比例し1/2000程度で，さらに空中の位置座標の誤差も含める．都留他（2002）は，標高データの陰影画像を作成して物体の形状を計測し，水平方向の精度1.3mを示した．

3-2． 高さ方向の精度要因

高橋（2000）は，航空レーザー測量の誤差要因を明らかにするとともに，航空機に搭載された航空レーザー測量システム対地高度450mと600m，飛行速度180km/時，レーザー照射数5,000発/秒，スキャン角度±15度，スキャン回数12回/秒の仕様で平坦な地域を計測して水準測量成果と比較することにより，GPS衛星の配置に十分な配慮がなされれば，15cmの標高精度を確保できることを示した．

4．計測精度検証

4-1． 水平方向の検証

Fig. 8は，2003年4月に計測したLSの3D図にTSの観測点図を重ねたものである．TSによる水準測量では，地形変換点の上下（Fig. 9—上）で測量を行った．しかしFig. 8ではLSの3Dで表現された図上の地形変換点とは重なっておらず，全体的に3D図が北西方向にずれているように見える（Fig. 9－下）．同様に2003年9月の計測でも北西方向へのずれが見られた（Fig. 10）．等高線間隔を

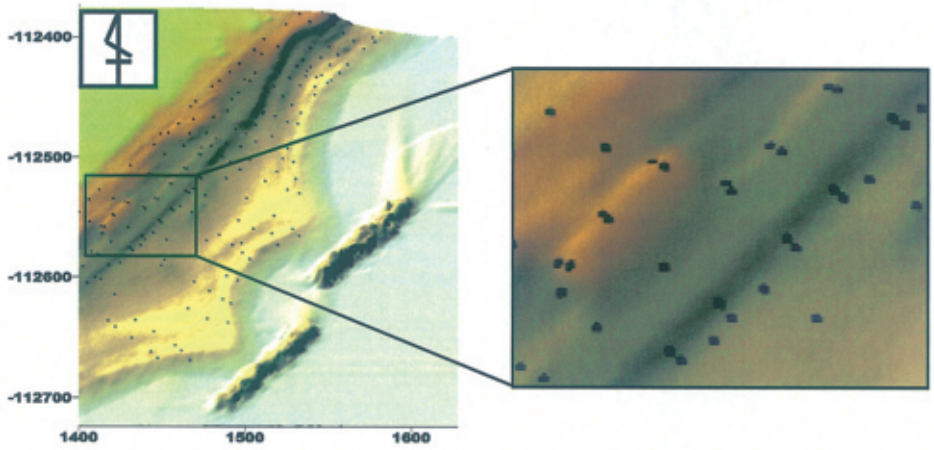

Fig. 8　3D image and location of data point obtain in April

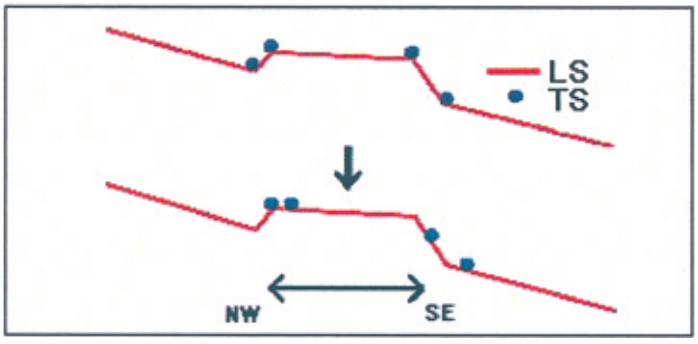

Fig. 9　The image of the horizontal difference

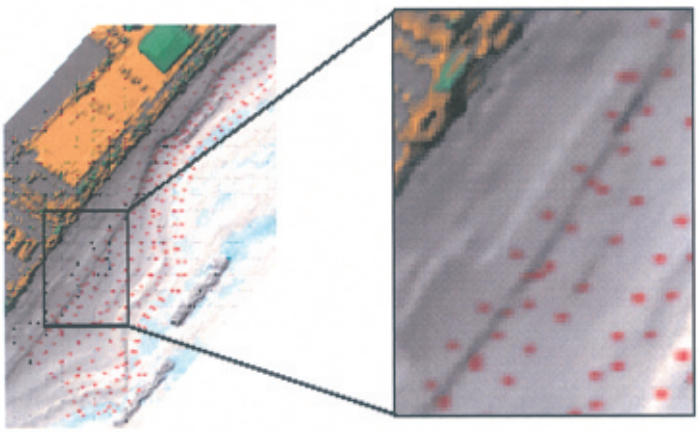

Fig. 10　September
Note: Fig. 8, 10　Observing point map（TS）pile up 3D-map（LS）

極めて小さくした LS 等高線図と TS 観測点図を重ね，実際に TS で計測した地形変換点と，図上でプロットされている点との距離を算出したところ，そのずれはともに北西方向に約 1m であったため，本来は逆であるが便宜的にデータ量を考慮した処理のしやすさから TS の XY 座標を北西方向に 1m ずらして比較を行った．

4-2．高さ方向の検証

LS はレーザーの照射位置を特定できないために同一点での標高差を求めることは不可能である．今回の精度検証には，TS のある 1 点を中心とする円を描き，その円内にある LS の点との水平距離と標高差（TS−LS）を求めるプログラムを作成し実行した（Fig. 11）．このとき TS を真値として精度検証を行った．ただし研究対象地域の三保海岸では，自然の浜や過去に養浜された土砂が波浪によって削り取られた結果として浜崖が形成され，そこでは地形変換点が形成されるのでその影響を考慮する必要がある．全点において比較を行うと，指定水平距離内に浜崖が存在

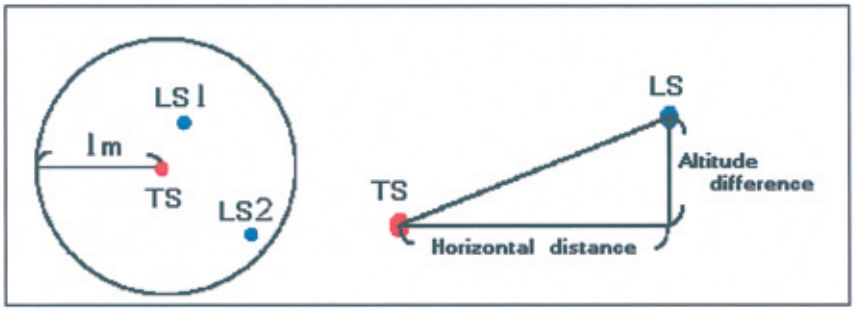

Fig. 11　Comparison Image

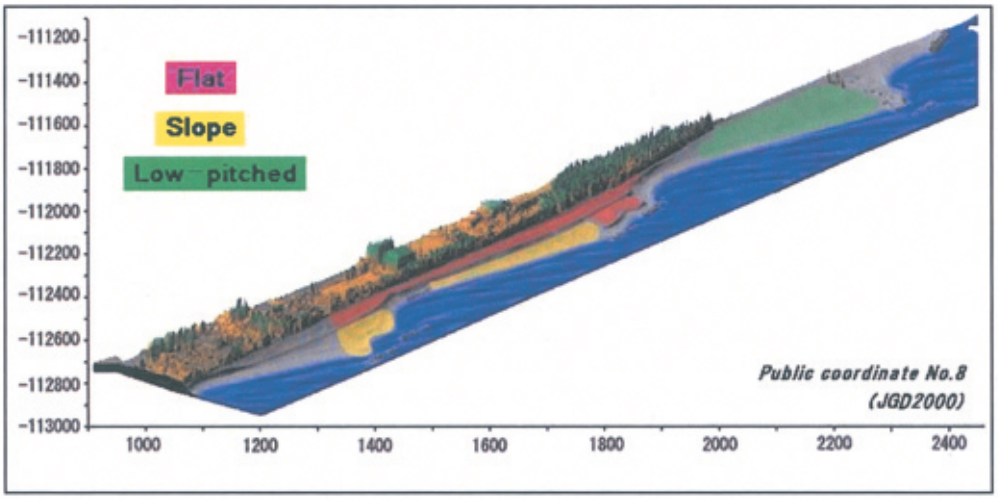

Fig. 12　Comparison Area

した場合に比較の対象となる2点が崖の上下に分かれてしまう場合があり，出力された標高差の値が極めて大きくなる．よって地形変換点の陸側（平坦面）と海側（傾斜面）に分類し比較を行った．平坦面では傾斜の影響が殆どないものと仮定しTSの点を中心とする半径1mの円を，傾斜面では傾斜の影響を少なくするために半径0.3mの円を描いて標高差を算出した．また，航空機から扇状に発射されるLSにおいて傾斜面と平坦面とで同様の計測精度が得られるのかについても検証した．

地形変換点によって区分された対象区域をFig. 12に示す．図中の赤色で示す区域が陸側の平坦面（①），黄色で示す区域が海側の傾斜面（②），緑色で示す区域が羽衣の松付近のなだらかな傾斜面（③）を示す．しかし③については，他区域に比べて粒度の細かい砂で工事基準点が砂に埋没していたり，TSを設置した三脚が沈みやすいなど水準測量において誤差を生じやすい区域であるため，本研究では対象外とした．

5．結　果

2003年4月および9月の結果をTable 4，Table 5にそれぞれ示す．平均水平距離とは，指定水平距離が1m以下もしくは0.3m以下のすべての点の平均値であり，標高差も同様に平均値である．4月の平均標高差は，平坦面（Flat area）で約11cm，傾斜面（Slope area）で約12cmとなった．また9月の平均標高差は，平坦面で約4cm，傾斜面で4cmとなり，2度の検証で双方とも平坦面と傾斜面での標高差に差がない．以上より，LSは傾斜面においても平坦面と同様の計測精度を得られるといえる．Fig. 13，14はそれぞれ4月の計測での平坦面と傾斜面における水平距離と標高差の分布を示し，Fig. 15，16はそれぞれ9月の計測での平坦面と傾斜面における水平距離と

Table 4　The result of comparison in April

Area	Horizontal Distance		Number of Points	Average of the altitude difference (m)
	Specification	Average(m)		
Flat area	1m or less	0.637	249	0.112
Slope area	0.3m or less	0.206	36	0.116

Table 5　The result of comparison in Sep.

Area	Horizontal Distance		Number of Points	Average of the altitude difference (m)
	Specification	Average (m)		
Flat area	1m or less	0.677	224	0.042
Slope area	0.3m or less	0.199	40	0.040

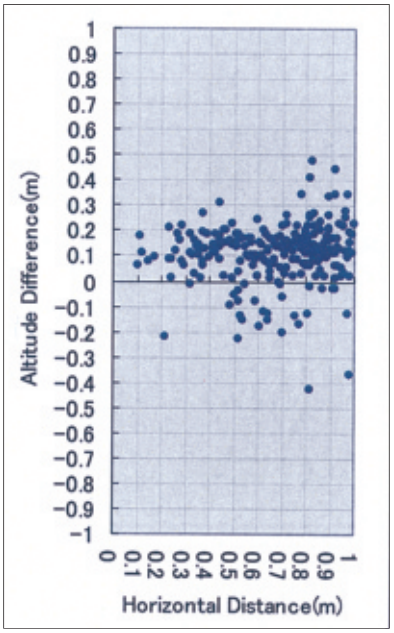

Fig. 13　Comparison in a Flat area

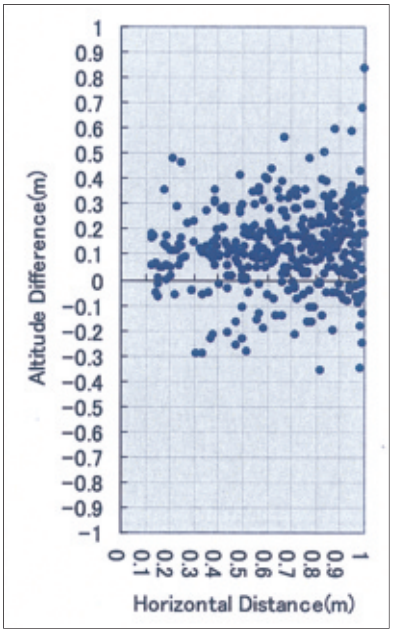

Fig. 14　Comparison in a Slope area

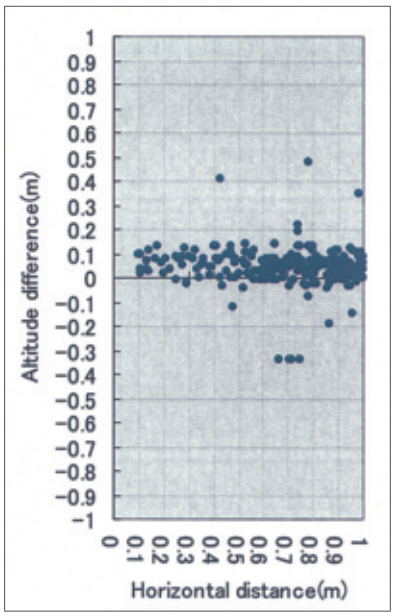

Fig. 15　Comparison in a Flat area

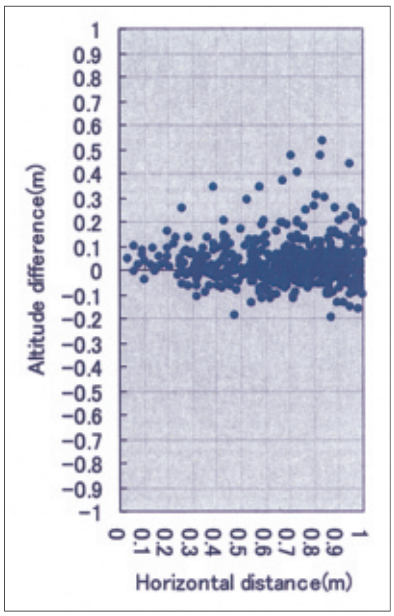

Fig. 16　Comparison in a Slope area

Note: Fig. 13, 14　April
Fig. 15, 16　September

標高差の分布を示している．両月とも平坦面よりも傾斜面でばらつきが大きい．これは標高差を算出した 2 点で水平距離や傾斜の影響を受けているためである．しかし，Table 4，5 で示すように結果にはそれらの影響がない．これは比較点数が多いことと，傾斜面での指定水平距離を 0.3m としたことに起因すると考えられる．2 度の計測での標高差の違いは，LS の高さ方向の計測誤差の違いと考えることができる．高橋（2000）は，LS で同一エリアを連続して 4 度計測した結果，それぞれの標高の較差にばらつきがあることを明らかにした．4 月と 9 月の標高差は，航空レーザー測量による計測誤差と考えられる．

9．まとめ

海岸における航空レーザー測量の精度について検証した．研究対象地域の三保海岸では，養浜や波浪の影響により浜崖が存在し，一様な比較を行うことは困難である．そのため地形変換点を境にして平坦面と傾斜面の 2 区域に分類した．今回の航空レーザー測量では水平位置が北西方向に 1m ずれていて，水平位置を微調整した後に標高差を算出したところ LS 計測精度は平坦面と傾斜面では同様であることが判明し，4 月の計測では約 11cm，9 月の計測では約 4cm であった．この月による標高差は，航空レーザー測量のそれぞれの高さ方向の計測誤差と考えられる．水平位置誤差は，GPS，IMU，およびレーザープロファイラの計測誤差が複合されたものであり，同時に補正に用いた地上基準点座標の誤差が，水平位置誤差に影響したと考えられる．

砂礫海岸および砂浜海岸は 1 度の台風や強い低気圧の接近で劇的に変化し，その地形を 1m 間隔の DEM（Digital Elevation Model）で表現する場合，数センチメートルの誤差はその変動に比較して，極めて小さな値である．DEM を用いて海岸浸食量を定量的に把握するうえで，この計測精度の違いは無視できる値である．計測対象地域が危険地域であるなど，地上からの侵入が困難である場合は，地上基準点を設置することが不可能であり，それによる補正をすることはできない．本研究で 2 度実施した航空レーザー測量では，水平位置誤差の傾向が同じであり，地上基準点による補正が実施できない場合でも海岸浸食の経年変化を数値的に把握することができると考える．

10．今後の研究

本研究において，三保海岸における航空レーザー測量の計測精度が明らかとなった．広い地域を対象とする海岸浸食の検討資料として，この精度は許容範囲内であることがわかった．今後，同様の計測を繰り返し実施し，地形変化を検討する．

東海大学海洋学部では，海岸浸食問題において陸上部分での水準測量だけでなく，その沖合の浅海域での調査も行い，土砂の流動や堆積・浸食量について検討している．航空レーザー測量で取得された高密度の DEM と浅海域の DEM を併用すれば，さらに詳細な土砂の流動のメカニズムが明らかとなり，今後，より的確で効率の良い海岸浸食対策を立てることが可能となる事が期待できる．

謝　辞

東海大学海洋学部，根元研究室の皆様には，水準測量で多大な協力をいただいた．皆様に御礼申し上げます．

引用文献

1） 秋山幸秀（1998），航空機搭載型レーザー測量システム ALMAPS 北海道土地改良設計技術協会報文集 Vol. 13，P.1-11．
2） 秋山幸秀 他（2003），Airborne-Scanning LiDAR による海岸線浸食調査，APA，No.85，P.82-95．
3） http://www.aeroasahi.co.jp/spatial/geographic/index.html
4） 佐藤浩他（2003），現地測量の成果を用いた航空レーザー測量 DTM の高さ方向の精度検証に関する研究，日本写真測量学会，平成15年度学術講演会発表論文集，P.91-94．
5） 椹木亨（1982），防災シリーズ 3，漂砂と海岸浸食，北出版株式会社，P.195．
6） 高橋博将（2000），航空レーザー測量における標高精度の検証，APA，No.77-92．
7） 都留宏介他（2002），航空レーザー測量の品質評価，写真測量とリモートセンシング，**41**(1)，P.21-27．

要　旨

海岸浸食が続く静岡県三保海岸において，高密度な地表面高度の数値情報を2003年 4 月および 9 月に航空レーザー測量（以下 LS）によって取得し，同時期に実施した水準測量との比較によって砂礫海岸での LS の精度と有用性を検証した．三保海岸には養浜や浜崖が存在する．従って調査区域を浜崖の影響を受けない，①平坦面，②傾斜面に分類して比較した．LS には一様な水平位置の誤差があることがわかり，その誤差を調整し標高差を算出したところ，4 月の標高差は平坦面で 11cm，傾斜面で 12cm であった．9 月の比較では 4 月と同様の水平位置誤差が見られ，平坦面・傾斜面ともに標高差は 4cm であった．平坦面と傾斜面は同等の計測精度が得られ，標高差が航空レーザー測量の計測誤差と考えられる．水平位置誤差は，GPS，IMU，レーザープロファイラの複合誤差からなり，補正に用いた地上基準点の座標誤差が加わる．