

海底地形モニタリングに向けた差分解析手法の検討

岡山大学 学生会員 ○酒井多樹

岡山大学大学院 学生会員 崎田晃基, 正会員 西山哲

株式会社パスコ 正会員 吉岡裕嗣, 川村裕, 間野耕司

1. 序論

現在日本では、海岸侵食による国土の消失が問題となっている¹⁾。効果的な海岸侵食対策を行うためには、海底地形の形状変化を継続的にモニタリングする必要がある。現在、海底地形の把握手法として主流とされているマルチビーム音響測量などは広域の計測に日数やコストがかかることや、船舶での計測により、浅瀬の海岸地形の面的な計測を行うことが課題となっている²⁾。これらを解決し、広域を面的に効率よく計測する方法として、水中部の計測が可能であるとされる航空レーザー測深機（ALB：Airborne Laser Bathymetry）による計測の導入があげられる。

しかし、ALBでの水中計測に用いられるグリーンレーザーは水中部の様々な外的要因による欠測や減衰が多いため、適用に向けてALBの測深能力を明らかにする必要がある³⁾。

そこで本研究では、海底地形計測時におけるALBの基本特性を明確にするため、まず現在の計測方法に対するALBの測深精度に関する検証を行い、次に海中の点密度と測深深度の関係についての検証を行った。

また、海底地形の変状を3次元で具体的かつ定量的に表現するため、自動運転にも用いられているSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術を応用した解析手法を用いた変位置抽出を行い、深さ方向の変位に対する精度検証を行った。

2. ALB 測量と計測の実施概要

2.1 ALB 測量の概要

航空レーザー計測とは、航空機から地上に向けてレーザーを照射し、地表面で反射したレーザー反射

位置の3次元座標(X,Y,Z)を求めるものである。

これまで使用されてきたレーザー測距装置の多くは近赤外レーザーを用いている。近赤外レーザーは水中をほとんど透過しないため、航空レーザー測量を用いて海底地形を計測することは不可能であった。それに対し、ALBは近赤外レーザーとグリーンレーザーの2つを搭載している。図

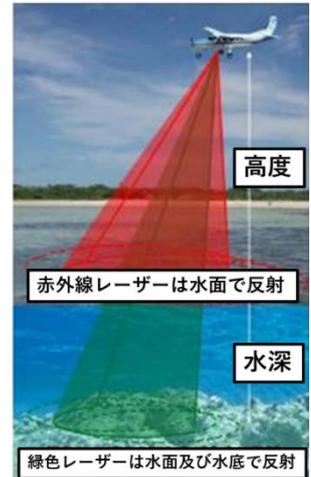


図-1 ALBによる水中計測

-1に示すようにグリーンレーザーは水中を透過するため、陸上部と水面の計測を近赤外レーザーで、水中部の計測をグリーンレーザーで行っている。水面反射するパルスと水を透過し水底で反射するパルスの往復時間の差から水深を算出して、陸上部と同時に水中部の3次元座標を計測している。

2.2 計測の実施概要

本研究では、地形的特徴から、高波が起りやすく汀線後退の新興が著しいA海岸、B海岸において実施された海底地形測量の計測データを用いることとする。現地の状況を図-2および図-3に示す。

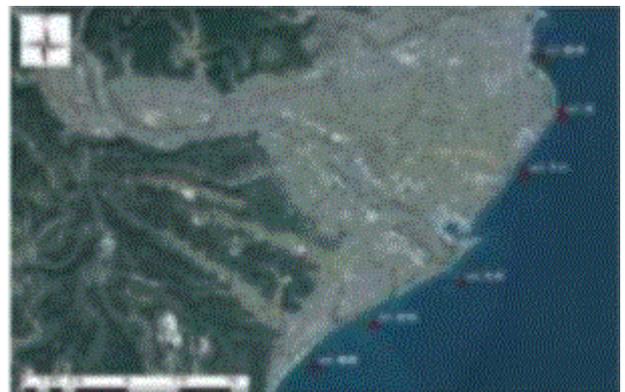


図-2 A海岸の計測範囲

キーワード 海底地形, 三次元モニタリング, ALB, ICP

連絡先 〒700-8530 岡山市北区津島中1-1-1 TEL 086-251-8801



図-3 B 海岸の計測範囲

3. ALB 測定の測深能力の検証

3. 1 ALB 測定の高さ方向の測定精度検証

本検証では、既存の海底地形測定方法であるマルチビーム測定とシングルビーム・間接水準測定の計測データを用いて、ALB による計測データの高さ(Z 座標)方向に関する精度検証を行った。マルチビーム測定データは面的なデータであるため、ALB の計測データは 1mメッシュのグリッドデータを用いた。また、シングルビーム・間接水準測定は線的な計測であるため、比較用測線を指定し、線上の点群データでの比較を行うこととした⁴⁾。

精度検証にあたり、計測方法による Z 座標値の差の平均を較差平均として式-1 のように定義する。

$$\text{較差平均} = \frac{\sum |X_1 - X_2|}{N} \quad \text{式-1}$$

X_1 : ALB 計測による Z 座標値

X_2 : 比較対象計測による Z 座標値

N: 比較点数

検証の結果、マルチビーム測定との較差平均は、表-1 に示すように A 海岸で 0.03m、B 海岸で 0.09m であった。また、シングルビーム・間接水準測定との較差平均は表-2 に示すように B 海岸で 0.06m であった。

表-1 マルチビーム測定との較差

	A海岸	B海岸
ALB測定データ	2016年12月3日	2016年8月6日
マルチビーム測深データ	2016年12月12日 ～19日	2016年8月 3,4,9,10,11日
比較面積 (km ²)	0.23	0.13
比較データ数 (個)	233112	130512
範囲内の標高 (m)	-8.05 ~ -10.24	-1.18 ~ -6.43
較差の平均 (m)	0.03	0.09

表-2 シングルビーム・間接水準測定との較差

ALB測定データ	2016年10月31日
シングルビーム間接水準測定データ	2016年10月31日
比較測線数 (本)	21
比較データ数 (個)	1196
範囲内の標高 (m)	+1.40 ~ -11.4
較差の平均 (m)	0.06

3. 2 点密度と ALB 測深深度の関係

地上部では、地上の高度(標高)が点密度に影響を与えることがわかっており、また、グリーンレーザーでの水中部計測は欠損が多いことも分かっている。本検証では、A 海岸と B 海岸の測定データから、選択した7つのエリアについて、ALB の測深深度と点密度の関係を分析し、X 方向 20m×Y 方向 20m の正方形を検証ブロックとし、点密度と測深深度について以下の式-2 と式-3 で定義する。

$$\text{点密度} = \frac{n}{A} \quad \text{式-2}$$

$$\text{測深深度} = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{2} \quad \text{式-3}$$

n: 20m×20mの検証ブロック内の点群データ数

A: 検証ブロック面積

Z_{\max} : 検証ブロック内の点群の Z 座標の最大値

Z_{\min} : 検証ブロック内の点群の Z 座標の最小値

全7エリアの水中部の点密度についての検証結果を図-4 に示す。測深深度と点密度の相関係数が 0.3184 となり、正の相関を示した。また、7つのエリアごとの比較を行ったところ、相関係数が 0.37 から最大で 0.99 となり、すべてのエリアで正の相関

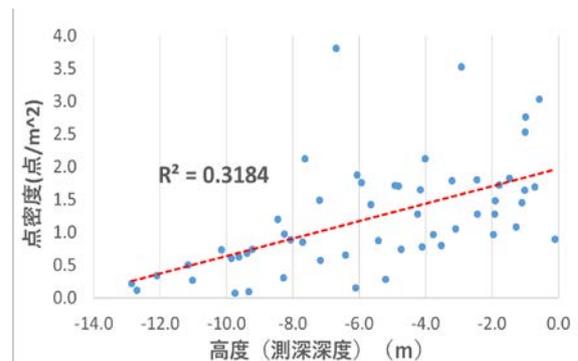


図-4 全エリアの水中部の点密度

を示した。水中部において 1 m²に 1 点が計測できた最大測深深度は 8.5m であった。

4. 海底地形変化の 3 次元表現の試み

4. 1 ALB 測量データによる 3 次元海底地形表現

ALB によって計測される点群データは 3 次元 (X,Y,Z) の座標をもっていることから海底地形の計測に用いることで、地形表現を 3 次元的に行うことができ、海底の細かな起伏まで見る事が可能となる。図-5 は点群編集ソフトである Recap を用いて B 海岸の地形を 3 次元的に表現したものである。

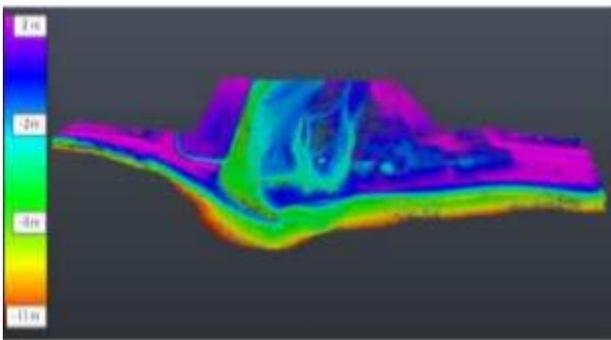


図-5 B 海岸の 3 次元図

4. 2 ICP アルゴリズムによる変位量解析

ICP は 2 つの点群の形状が合致するように位置合わせをする手法である。図-6 に示すように、2 つの点群データ間で、対応付けと位置の最適化を交互に繰り返すことで、点群のマッチングを行う。ICP は、マッチングを行う際に移動量がベクトルで表されるという特徴があり、本解析ではこの特徴を応用し、2 時期の点群に対してマッチングを行うことで、算出された移動ベクトルを変位とみなす。ICP を用いた変位量解析を行うことで、点群移動を 3 次元で表現できる⁵⁾。

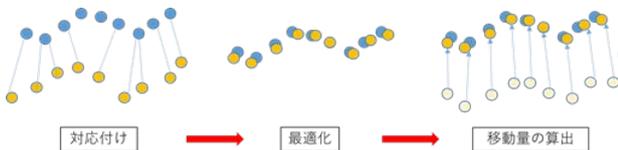


図-6 ICP の概念図

まず初めに、1 m メッシュのグリッドデータを用いて解析を行い、ICP による海底地形変化の表現が可能か検討した。検討の際に比較のため用いたのは、水深差分図と呼ばれる地形の高低変化を色合いで表現した図である。図-7 では黒の四角で囲まれている部分について、3 m を超える堆積と侵食がみられる。

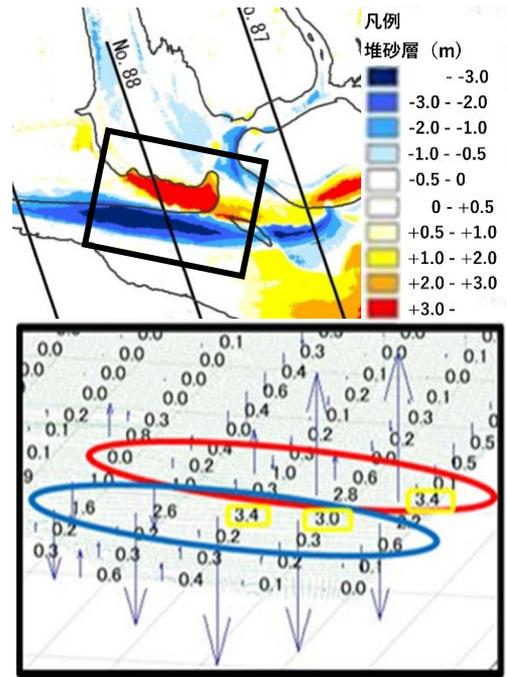


図-7 ICP の解析結果と水深差分

4. 3 ICP 解析による変位量の精度検証

B 海岸の第 1 期と第 2 期測量についての海底地形の変化を ICP による変位量解析で定量的に表現できるか検討するため、精度検証を実施した。

今回精度検証を行うのは ICP によって表示されたベクトル 26 個である。図-8 は ICP 解析の結果であり、精度検証を行うベクトルである。これら 26 のベクトルは X=1.225 の断面から取得した。検証する範囲は地形の変動が大きい部分を選定した。

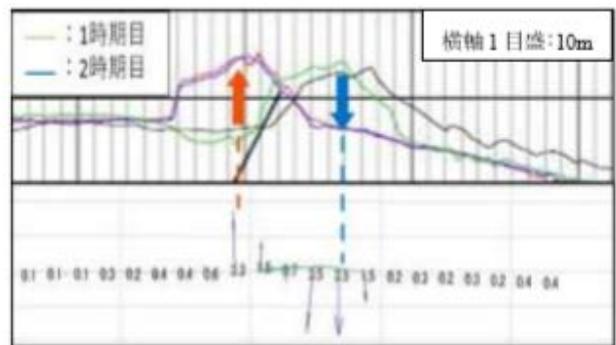


図-8 ベクトル表示されている断面図

ICP のベクトルに対して比較を行ったのは、2 時期のグリッドデータにおける点群の Z 座標の差分である。また、ICP 解析は解析効率化のため、20m × 20m のメッシュごとに変位量を算出している。したがって、Z 座標の差分についても 20m ごとに平均値を取ったものを精度検証に用いるデータとする。変位量についての精度は以下の式-4、式-5 を用いる。

RMS 値は計測のばらつきを示すものであり、本検証では、点群の Z 方向の差分を最確値としたときの RMS 値を ICP による変位量の精度とみなす。

$$DIS = OBS - TV \quad \text{式-4}$$

$$RMS = \sqrt{(\sum DIS^2)/n} \quad \text{式-5}$$

DIS:較差

OBS:ICP 解析により導出した変位量,

TV : Z 方向の座標値の差分平均

RMS:平均二乗平方根

また、ベクトルの向きについても、Z座標値から判別できる変位の向きに対し、同じ向きを示しているか、ベクトルごとに評価を行った。

精度検証を行った結果を述べる。量については、RMS値を算出したところ0.249mとなった。向きについては26個中22個のベクトルが正しい向きを示し、また、向きが異なった3個のデータについても、変位量とZ座標値を比べてみると、最大で0.19mの差であった。

5. 結論

本研究では、ALBを用いた海底地形の3次元モニタリングの実施に向けた、海底地形計測時のALBの基本特性に関する検証を行い、結果を得た。そして、海底地形の変状を具体的かつ定量的に表現するため、ICPアルゴリズムを用いた変位量解析を行った。以下にその結果を示す。

- (1)ALB測定のZ軸方向の精度について、水深10mまでにおいてはマルチビーム測定との較差は0.03mと0.09mとなり、シングルビーム・間接水準測定との較差は0.06mとなった。
- (2)ALBの点密度について、地中部の点密度平均は13.1点/m²、水中部の点密度平均は1.23点/m²であった。水中部について、ALBの測深深度と点密度の決定係数は0.3184であり、1m²に1点以上の計測が行えた最大水深は8.5mであった。
- (3)ICPによる変位量解析によって、海底地形の変動に対し、変位をZ方向にベクトル表示させることができた。また、ICPによって表示したベクトルのZ方向の変位量の精度はRMS値が0.245mであった。また、向きは22/26個のデータが正しく示していた。

以上より、ALBの基本特性については水深10m程度までは3次元海底地形モニタリング実施に必要なデータを精度に問題なく取得できることが分かった。したがって計測に日数やコストがかかる既存の測量方法よりもALB測量の方が広域で面的な計測をより短時間かつ安価に実施することが期待される。また、ICPによる変位量解析については、3mの大きさの変位に対して25cm程度の誤差で変位の表現が可能であったため、精度に問題なく、高低差をベクトルで表現することが出来た。しかし土砂の移動として表現することが出来なかったためメッシュを切る方向を変えてみるなど工夫を凝らし移動方向にベクトル表示させる方法を検証する必要がある。

本研究で得た較差や点密度に関する結果は、海底地形を対象としたALB測量の基本特性の明確化に向けた1つのデータに過ぎない。したがって、今回扱ったパラメーターをはじめ、ALBの測深能力への影響が考えられる様々なパラメーターについてより多くの検証結果を取得することがALBの基本特性の明確化につながると考える。また、ICPによる変位量解析については、点密度や透明性といったパラメーターがICPの精度に与える影響についても検討し、ICP解析が適応できる条件の把握も必要と考える。

参考文献

- 1) 砂浜保全に関する現状と課題 国土交通省：
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tsunamiKondankai/dai01kai/pdf (2019.4.5)
- 2) マルチビーム深浅測定 沿岸海洋調査株式会社：<http://www.enganjp/chikei/multibeam.html> (2019.4.5)
- 3) 小澤淳真・岡部貴之・川村裕・宮作尚宏・橋菊生：航空レーザ測深技術、写真測量とリモートセンシング、第56巻6号,p290-291, 2017
- 4) 吉田圭介・前野詩朗・間野耕司・山口華穂・赤穂良輔：ALBを用いた河道地形計測の精度検証と流況解析の改善効果の検討,水工学,第73巻4号,p3-6,2017
- 5) 友納正裕(2018) 『SLAM入門-ロボットの自己位置推定と地図構築の技術』 オーム社