

傾斜地におけるマンガクラスト音響厚さ計測についての研究 Acoustic measurement of Manganese Crust Thickness on Sloped Surfaces

学生証番号 47-116644 佐藤 匠

指導教員 浦 環 教授

Keywords: 音響計測, リアルタイム制御, 海中ロボット, マンガンクラスト, 海底鉱物資源

Keywords: Acoustic Measurement, Real time Control, Underwater Robot, Manganese Crust, Seafloor Mineral Resources

1. 序論

マンガクラスト (以下クラスト) とは、平頂海山の肩などの安定した基盤岩に、海水に溶け込んでいる金属酸化物が層状に付着して形成される化学堆積岩である。分布深度は 800m~3000m と、比較的浅く、主成分となる鉄、マンガに加え、コバルト、ニッケル、白金などのレアメタルを含有するため、新たなレアメタル供給源として期待され、賦存量の調査が急務となっている[1]。

従来、厚さ計測手法としてドリリングやサンプリングといった手法が採られてきた。しかし、その厚さは場所によって大きく変動する上、面的で広大に分布するクラストの厚さ分布を調べるには多大な時間と経費が掛かってしまう。よって、離散的ではなく連続的なデータを得る手法として本研究では、海中ロボットに搭載する音響装置を用いて、クラスト表面と裏面反射の時間差から厚さを求めるシステムを研究開発している[2]。2010年に本システムは、拓洋第五海山において実海域の平地において初めて、クラストの連続的な厚さ計測に成功した。

2. 先行研究の課題点と本研究の目的

厚さ計測を行う音響プローブは指向性が高く、傾斜地において音波が斜めに入射する場合、クラストの厚さを計測するのに十分な反射強度が得られない。よって本研究では、音響計測を傾斜地においても適用可能とするシステムの開発を行う。手法として、音響プローブ本体を2軸で回転できるジンバル装置に取り付け、海底面へ常に垂直に入射する自動制御システムを開発する。クラストは傾斜地に多く分布することが知られており、本システムによって、計測領域は格段に増加することが期待できる。

3. 入射角変化の影響

入射角が音響計測にどのような影響を与えるのか調査するため、実サンプルを用いた水槽実験を行った。垂直入射からの角度差 θ を変化させた時の音響反射強度を調査した。実験は、拓洋第五海山で取得したサンプルにおいて、表面を岩石カッターによって平坦にした場合(Flat)と、二種類の凹凸の場合(Surface1,2)の3条件について行った。

Fig. 1 に結果を示す。横軸は θ 、縦軸は音響データにおけるノイズ強度を基準としたデシベルである。表面に凹凸がある場合は、平坦の場合よりも θ の変化に依る表面反射強度の低下が小さい。これは、表面の凹凸の影響だと考えられる。これらの結果から、垂直入射から $\pm 3[\text{deg}]$ 程度の角度差ならば、直角入射に対して -6dB の強度低下で抑えることができるとわかった。次に実海域のマッピングデータから、クラスト海域にどのような傾斜が存在するかを解析し、この条件を満たすにはどのような制御システムが必要とされるかを調べる。

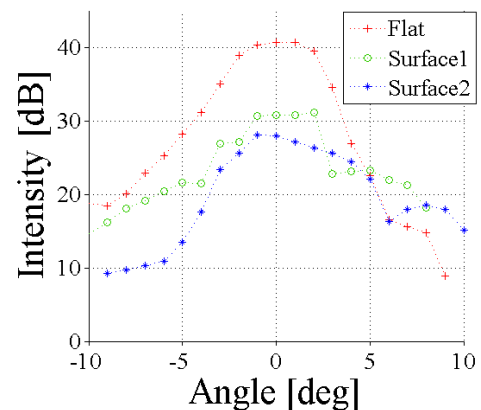


Fig.1 Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample (blue) and a flat acrylic sample (red).

4. マッピングデータ解析による、海底面傾斜解析

NT12-05 航海では、拓洋第五海山において、3D マッピング装置「SeaXerocks」[3]による、3.5km もの長距離地形データを取得することができた。地形データには、絶対座標情報が含まれているため、こ

れを解析することで、海底の傾斜角を得る。

ロボットから見た海底の絶対傾斜角で議論する必要があるため、以下に海底の傾斜角を2つ定義する。

- θ_p … DVL (Doppler Velocity Log) を原点、ロボット前方を X 軸とする右手系座標系における、Z-X 平面方向の傾き。ロボットから見て、上り傾斜の時、プラスの値とする。
- θ_R … θ_p と同様の座標系における、Z-Y 平面方向の傾き。ロボットから見て、右手に登り斜面を見る時にプラスの値とする

計算手法としてマッピングデータの点群から一定数選択し、特異値分解を利用した主成分分析によって近似的な面を計算し、傾斜角を算出する。プローブの真下の傾斜が音波の入射角に影響してくるため、プローブから真下方向へのベクトルを軸とした円筒内に含まれる点群で近似面を作る。円筒の半径については、高度が多少上下しても音波が選択した領域に確実に入射する様に、2cm 以上の半径で選択する必要がある。また、SeaXerocks によって得られた 3D データの解像度は、平均として 1[cm] 程度のため、全方向において 30 点程度の点をサンプリングするよう、半径は 30[cm] と設定した。これによって、高い精度でかつ全方位に指向性がない様に傾斜角を算出することが可能である。

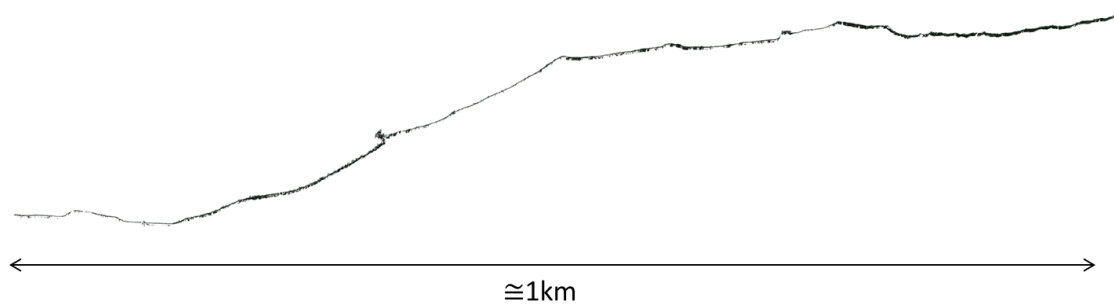


Fig.2 Side view of the 1.3 km mapping data.

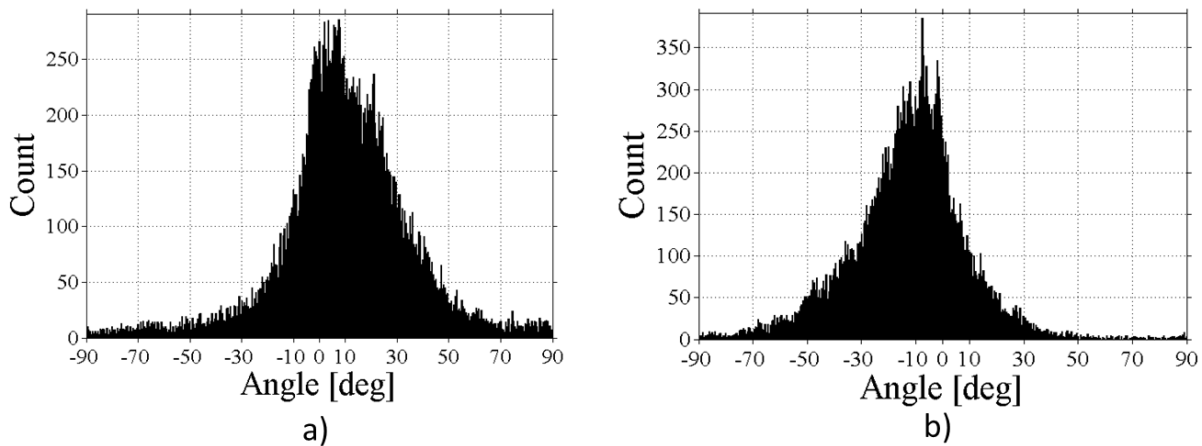


Fig.3 a) is the histogram of θ_p from analyzing 1.3km mapping data, b) is the histogram of θ_R ..

Fig.1 に示した解析したデータは、合計 1.3[km] であり、それぞれの傾斜角変化と分布が計算されている。1.3[km] にわたって計算した傾斜角でヒストグラムを作成した。Fig. 3-a) に θ_p 、Fig. 3-b) に θ_R の分布を示す。これより、 θ_p は 10° 程度の傾斜が最も多く、 -5 から 30° 程度の変動が存在する。 θ_R については、 -7° 程度の傾斜が多く、 -20 から 0° 程度の変動が確認された。この差は、調査した 1.3 等深線を登る形になっていた事を表している。 θ_R に関しては、理想的に 0° になるはずが $\pm 10^\circ$ 程度の傾斜変動が見て取れるため、 θ_p, θ_R の 2 軸の制御が必要だとわかる。また、各々の傾斜が $\pm 35 \sim 40^\circ$ 程度の分布があるため、対応するにはジンバル機構がこの程度の角度範囲において稼働できる必要がある。

5. ジンバル制御アルゴリズム概要

海底面の傾斜に対して、2軸の制御を行うには、以下の条件を満たす必要がある

- ① 海底との相対的な傾斜角度を θ_P, θ_R の2軸で、数° 以内で計測する
- ② リアルタイムで傾斜を把握する
- ③ 傾斜に合わせて音響プローブの角度を2軸で制御する

①に関して、SeaXerocks 装置は、レーザーを用いることによって、10mm より細かい分解能で海底の 3D データを取得するため、数° 以内の高精度で海底面の傾斜を計測することができる。しかしながら、取得する点群データは、処理量が膨大であるためリアルタイム制御を行うには適さない。リアルタイムで動作させるには、

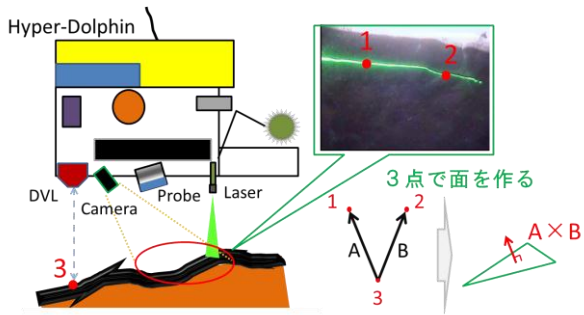


Fig.4 Illustration of real time seafloor slope measurement algorithm

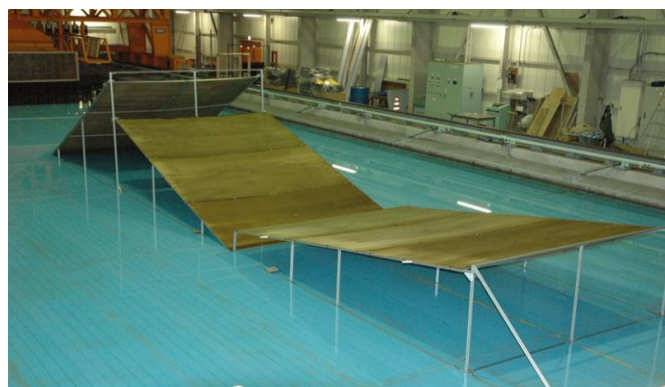
少ない情報から効率よく傾斜角を読み取って制御するアルゴリズムを開発する必要がある。

このため、音響プローブの前方に、SeaXerocks と同様に海底面への距離をライン状に計測する光切断法において、全ての座標情報を使わず、検出したレーザーラインを2等分し、各々の面積の中心の2点を選択し、これらのみの座標を計算する。さらに、 θ_P 方向の角度を読み取るため、音響プローブの後方に海底面からの距離を音響レンジセンサで読み取り、レーザーで検出する点と合わせて合計 3 点の座標情報から近似的な面を算出する。傾斜角精度は SeaXerocks と比較して落ちるが、データ処理量を著しく減らすことができ、リアルタイムで傾斜を把握することが可能である。

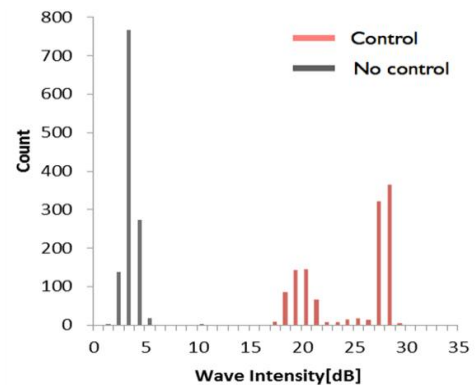
6. 水槽におけるセットアップの性能試験

開発したアルゴリズムは音響データの改善に効果があるのか、水槽で性能評価実験を行った。システムを動作させる斜面において、表面のランダムな凹凸による入射角変化が存在すると評価が難しいため、ベニヤ板を使用した角度一定な擬似海底面を作成した。

10, 20, 30° の斜面 (Fig.5-a) の等高線でシステムを静止した状態で、アルゴリズムによるジンバル制御を行うと同時に音響計測も行った。この音響データと、アルゴリズムを使わずにプローブを真下へ向けて固定した時の音響データを比較し、得られた音響データから、斜面の表面反射強度のヒスト



a)



b)

Fig.5 a):The slopes made of wood , b):Histogram of wave intensity with gimbal control(black), and without control(red).

グラムを作成した。なお、音響強度は、プローブの電気ノイズ強度を基としたデシベルゲインで示した。結果を Fig.5-b)に示す。Fig.5-b)の黒のデータセットが、ジンバル制御なし、赤のデータセットが制御ありのヒストグラムである。これより、制御を行わない場合に対し、制御を行うことによって 15~20 dB 程度の音響反射の増加が確認された。また、システムを 0.1,0.2,0.3m/s で移動させながら傾斜を追従する実験もおこない、移動速度による音響反射強度の低下は-2dB 程度に収まっていることが確認された。

7. 実海域展開

本研究で開発したシステムは JAMSTEC の NT12-25 航海において、実海域展開を行った。本航海は悪天候によって、調査する予定であった流星海山に潜ることができず、フィリピン海本北部に位置する大東海嶺で展開することになった。大東海嶺の傾斜は、拓洋第五海山と流星海山と比較して凹凸が激しく、傾斜変化の周期も短い。このため、開発した装置のパフォーマンスを評価するに当たって、海底傾斜に物理的に装置が対応できる範囲 (θ_p 方向に $\pm 45^\circ$ 、 θ_R 方向に $\pm 30^\circ$) を超えている場所に関して評価は行わない。

制御アルゴリズムを動作させた場合、海底との相対角度がわかるため、これにロボットのロール、ピッチ角度を考慮することで、海底の絶対角度を計算することができる。開発したアルゴリズムの有効性を検証するため、制御を行わない時に生じる角度差と比較する。アルゴリズムを使用しない場合、音響プローブはロボットの真下方向に固定されている状態であるため、ロボットのロール、ピッチ動作と海底面の傾斜によって入射角変化が生じる。よって、以下に示す 2 つの項目を比較し、垂直入射からの角度差の低減効果を確認する。

- ① マッピングデータから得た傾斜の絶対角度と、アルゴリズムから得た相対角度から計算した傾斜角度の差
- ② マッピングデータから得た傾斜の絶対角度と、ロボットのロール、ピッチ角との差

Fig.6-a)に、評価した傾斜のマッピング画像を示す。これより、その凹凸の激しさを視認することができる。Fig.6-b)の縦軸は、横軸に示した①②の角度差以下で計測に成功した回数の、全計測回数に対する割合を示す。3章では、調査した入射角の影響より、 3° 以内に制御することが重要であると確認されたため、横軸 3° での値を比較する。Fig.6-b)から、ジンバル制御がない場合は 3° 以内の割合はほぼ 0%であるのに対し、制御を行った場合は 3%まで上昇している。よって開発したジンバルシステムは、実海域において正常に動作し、入射角度誤差の低減が可能であるとわかった。

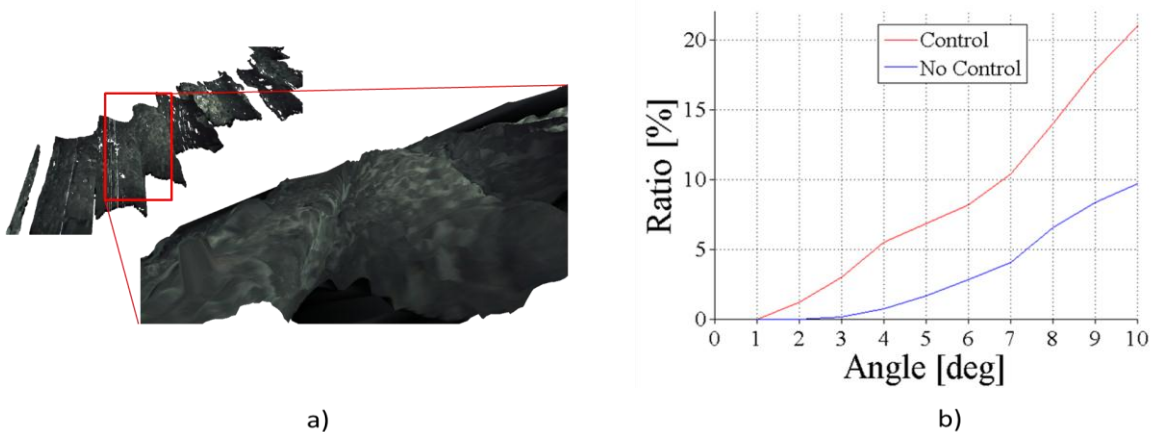


Fig.6 a) is a example of 3D images mapped in survey area. b): Vertical axis is the ratio with respect to the number of calculated value within horizontal axis values

8. 結言

本研究で開発したシステムによって、今まで平地において得られた結果と同様な結果を傾斜地でも取得できるようになったと考える。特に堆積物が少ない傾斜地において、平らな海底面よりクラストが多く露出しているため、これは提案手法の傾斜地への一般化、マンガンクラストの調査能力を大きく向上する技術として期待する。

参考文献

- [1] J.R. Hein, A. Koschinsky, M. Bau, F.T. Manheim, J.K. Kang, and L. Roberts, "Cobalt-rich ferromanganese crusts in the pacific," in Handbook of marine mineral deposits. Cronan D.S., Ed. Boca Raton: CRC Press, 2000, pp. 239-279.
- [2] B. Thornton, Akira Asada, Adrian Bodenmann, Mehul Sangekar, and Tamaki Ura, "Instruments and Methods for Acoustic and Visual Survey of Manganese Crusts", IEEE JOURNAL OCEANIC ENGINEERING, Vol. 38, No.1, January, 2013.
- [3] Adrian Bodenmann, Blair Thornton, Mehul Sangekar, Tamaki Ura, Takeshi Nakatani, Takashi Sakamaki, 'Pixel based mapping using a sheet laser , camera for generation of colored 3D seafloor reconstructions', In Proc. IEEE/MTS Oceans'10 Seattle, 2010.