

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
海洋技術環境学専攻  
平成 24 年度  
修士論文

傾斜地におけるマンガンクラスト音響厚さ計測に関する研究

2013 年 1 月提出  
指導教員 浦 環 教授

47116644 佐藤 匠

# 目次

1 序論	1
1-1 マンガンクラストとは	1
1-2 従来の調査手法と連続的音響計測の必要性	2
1-3 先行研究について	3
1-3-1 音響厚さ計測プローブ	3
1-3-2 先行研究における課題点	6
1-4 本研究の目的	7
1-4 論文の構成	9
2 入射角の影響評価と海底面傾斜解析	10
2-1 本章の概要	10
2-2 入射角影響実験	11
2-2-1 実験内容	11
2-2-2 音響データの解析手法について	12
2-2-3 実験結果と考察	14
2-2-4 結論	19
2-3 海底面傾斜解析	20
2-3-1 マッピングデータにおける傾斜角解析手法	20
2-3-2 マッピングデータにおける傾斜分析の内容	23
2-3-3 傾斜角度の概略	23
2-3-4 傾斜角度の変化と傾向	24
2-3-5 $\theta_P$ 、 $\theta_R$ の変化周期について	25
2-3-6 長距離データ解析	38
2-3-7 考察	38
3 制御アルゴリズムと開発したセットアップ	40
3-1 本章の概要	40
3-2 アルゴリズムの満たすべき条件と、手法概要	40
3-3 制御アルゴリズムについて	43
3-3-1 ベースラインについて	43
3-3-2 光切断法による前方座標の算出方法	46

3-3-3	光切断法の原理	46
3-3-4	Greenness	47
3-4	開発したセットアップ	51
3-4-1	全体の構成	51
3-4-2	ジンバル機構について	51
3-4-3	測距デバイス及び DVL について	51
4	水槽実験による制御アルゴリズムの性能評価	55
4-1	本章の概要	55
4-2	水槽実験の目的と概要	55
4-3	静止実験について	56
4-3-1	実験結果	56
4-3-1	考察	57
4-4	動的実験について	57
4-4-1	実験結果	57
4-4-2	考察	58
4-5	結論	58
5	実海域における動作試験	68
5-1	本章の概要	68
5-2	実海域実験概要	68
5-3	航海の内容	68
5-4	実験結果	68
5-4-1	マッピングデータから得た傾斜角	68
5-4-2	制御アルゴリズムから得た海底傾斜の絶対角度	69
5-5	考察	70
5-6	結論	70
6	結論	76
6-1	結論	76
6-2	今後の課題	76
	謝辞	78
	参考文献	80

付録 A ..... 84

付録 B ..... 85

# 図目次

Fig. 1-1: Manganese Crust sampled in NT10-11[7]	1
Fig. 1-2: Compressional wave velocity and wet densities plotted for crust and substrate samples obtained at depths of between 1000 m and 3000 m at #5 Takuyo seamount[7].	3
Fig. 1-3: Rayleigh reflections at the crust-substrate interface for various substrate impedances, assuming an average impedance of 5.64 [kg/m <sup>2</sup> s] [7]	4
Fig. 1-4: Acoustic Probe[7]	5
Fig. 1-5: Schematic diagram of acoustic measurement	6
Fig. 1-6: (a)The top view of the 3D visual reconstruction,(b) acoustic data compensated for vehicle motion, (c) acoustic data with respect to the surface of the seafloor.[7]	8
Fig. 1-7: Purpose of this study	9
Fig. 2-1: Definition of angle of incidence	11
Fig. 2-2: Manganese Crust sample from Takuyo Daigo seamount	12
Fig. 2-3: Raw data of Acoustic wave	13
Fig. 2-4: Result of peak detection	13
Fig. 2-5: Histogram of noise of acoustic probe	14
Fig. 2-6-a): Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at $\theta=0$	15
Fig. 2-6-b): Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at $\theta=3$ .	16
Fig. 2-6-c): Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at $\theta=5$ .	16
Fig. 2-6-d): Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at $\theta=8$	17
Fig. 2-6-e): Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at $\theta=10$ .	17
Fig. 2-7-1: a): a flat surface of manganese crust sample cut by rock cutter, b): hubbly surface maintained natural state(Sample2).	18
Fig. 2-7-2: Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample (blue) and a flat acrylic sample (red).	18
Fig. 2-8: Definition of absolute coordinate system and robot coordinate system.	20
Fig. 2-9: Definition of $\theta_P$ (left figure) and $\theta_R$ (right figure)	21
Fig. 2-10-a): Mapping data of Data1	26
Fig. 2-10-b): $\theta_P$ calculated by SVD (Data1)	27
Fig. 2-10-c): $\theta_R$ calculated by SVD (Data1)	27
Fig. 2-10-d): Histogram of $\theta_P$ (Data1)	28
Fig. 2-10-e): Histogram of $\theta_R$ (Data1)	28
Fig. 2-10-f): FFT result of $\theta_P$ (Data1)	29
Fig. 2-10-g): FFT result of $\theta_R$ (Data1)	29

Fig. 2-11-a): Mapping data of Data2	30
Fig. 2-11-b): $\theta_P$ calculated by SVD (Data2)	31
Fig. 2-11-c): $\theta_R$ calculated by SVD (Data2)	31
Fig. 2-11-d): Histogram of $\theta_P$ (Data2)	32
Fig. 2-11-e): Histogram of $\theta_R$ (Data2)	32
Fig. 2-11-f): FFT result of $\theta_P$ (Data2)	33
Fig. 2-11-g): FFT result of $\theta_R$ (Data2)	33
Fig. 2-12-a): Mapping data of Data3	34
Fig. 2-12-b): $\theta_P$ calculated by SVD (Data3)	35
Fig. 2-12-c): $\theta_R$ calculated by SVD (Data3)	35
Fig. 2-12-d): Histogram of $\theta_P$ (Data3)	36
Fig. 2-12-e): Histogram of $\theta_R$ (Data3)	36
Fig. 2-12-f): FFT result of $\theta_P$ (Data3)	37
Fig. 2-12-g): FFT result of $\theta_R$ (Data3)	37
Fig. 2-13: Histogram of $\theta_P$ (1.3km mapping data)	39
Fig. 2-14: Histogram of $\theta_R$ (1.3km mapping data)	39
Fig. 3-1: Illustration of realtime seafloor slope measurement algorithm	42
Fig. 3-2: Flow chart of realtime seafloor slope measurement algorithm	43
Fig. 3-3-a): Integration of $\theta_P$ spectrum in Fig.2- 10-f), b) Integration of $\theta_R$ spectrum in Fig.2- 10-g)	45
Fig. 3-4-a): Integration of $\theta_P$ spectrum in Fig.2- 11-f), b) Integration of $\theta_R$ spectrum in Fig.2- 11-g)	45
Fig. 3-5-a): Integration of $\theta_P$ spectrum in Fig.2- 12-f), b) Integration of $\theta_R$ spectrum in Fig.2- 12-g)	45
Fig. 3-6: Schematic of laser profiling	48
Fig. 3-7: Definition of Camera coordinate system	48
Fig. 3-8: Definition of $k_{water}$ .	49
Fig. 3-9: Definition of $R_c$ .	49
Fig. 3-9: Flowchart of calculating Greenness.	50
Fig. 3-10: Example of Green line detection algorithm applied to an underwater image	50
Fig. 3-11: Active gimbal control mechanism (right) mounted on the payload box (left). The sheet laser and the LED panel at the bottom right of the image and one of the cameras at the bottom left of the image are used for the SeaXerocks mapping system	52
Fig. 3-13: Constitution of PC for gimbal control	52
Fig. 3-14: Double gimbal System	53
Fig. 3-15: Draught of Gimbal system	54
Fig. 4-1: The slope made of wood.	59
Fig. 4-2: Three slopes in the pool (10[deg],20[deg],30[deg])	59
Fig. 4-3: The static experiment was performed with the system as if it were climbing the slope(Case1), going down the slope(Case2), and going forward in parallel to contour line(Case3).	60

Fig. 4-4: Condition of active experiment .....	60
Fig. 4-5: Case1, On 10[deg] , a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ calculated by algorism.....	61
Fig. 4-6: Case1, On 20[deg] , a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ calculated by algorism.....	61
Fig. 4-7: Case1, On 30[deg] , a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ calculated by algorism .....	61
Fig. 4-8: Case1, On 10[deg] , a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ Histogram of difference between calculated inclination and ground truth.. .....	62
Fig. 4-9: Case1, On 20[deg] , a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ Histogram of difference between calculated inclination and ground truth. ....	62
Fig. 4-10: Case1, On 30[deg] , a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ Histogram of difference between calculated inclination and ground truth. ....	62
Fig. 4-11: Case1, a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ , Average and Standard Deviation of difference between calculated inclination and ground truth. ....	63
Fig. 4-12: Case2, a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ , Average and Standard Deviation of difference between calculated inclination and ground truth. ....	63
Fig. 4-13: Case3, a): $\theta_P$ , b): $\theta_R$ , Average and Standard Deviation of difference between calculated inclination and ground truth. ....	63
Fig. 4-14: a):On 10[deg],b)On 20[deg],c)On 30[deg], Histogram of acoustic wave intensity when control algorism is working. ....	64
Fig. 4-15: a):On 10[deg],b)On 20[deg],c)On 30[deg], Histogram of acoustic wave intensity when control algorism is working. ....	64
Fig. 4-16: a) Side view of three slopes made of plywood, b) Calculated angle using baseline 1.37[m]. ....	65
Fig. 4-17: $\theta_P$ result of active experiment. The black line represents the calculated angle from ground truth shown in Fig. 4-16-b), while the blue, green and red lines represent measurements made at 10, 20, and 30cm/s surge speed. The oscillation at 9000mm is an artifact introduced by discontinuities in the experimental setup when control algorism is working. ....	65
Fig. 4-18: $\theta_R$ result of active experiment. The black line represents the ground truth, while the blue, green and red lines represent measurements made at 10, 20, and 30cm/s surge speed. The oscillation at 9000mm is an artifact introduced by discontinuities in the experimental setup when control algorism is working. ....	66
Fig. 4-19: Histogram of wave intensity when the speed is a) 10cm/s, b) 20cm/s, c) 30cm/s. d) is average and standard deviation of wave intensity. when control algorism is working. ....	67
Fig. 5-1: Hyper Dolphin and payload skid with active gimbal system when control algorism is working. ....	71
Fig. 5-2: 3DMapping data in NT12-25 when control algorism is working. ....	72
Fig. 5-3: The inclination of angle(a): $\theta_P$ , (b): $\theta_R$ when control algorism is working.....	72
Fig. 5-4-a): The black line: $\theta_P$ , the red line : $\theta_{P\_Status}$ when control algorism is working. ....	73
Fig. 5-4-b): The black line: $\theta_R$ , the red line : $\theta_{R\_Status}$ when control algorism is working. ....	73
Fig. 5-5: The red line is the difference between angle calculated from mapping data and $\theta_{P\_Status}$ ,the blue line is the difference between angle calculated from mapping data and	

Pitch, when control algorism is working. ....	74
Fig. 5-6: The red line is the difference between angle calculated from mapping data and $\theta_{P\_Status}$ , the blue line is the difference between angle calculated from mapping data and	
Roll, when control algorism is working. ....	74
Fig. 5-7: Vertical axis is the ratio with respect to the number of calculated value within horizontal axis values. ....	75
Fig. 6: New method to measure the inclination of seafloor from 8 coordinate points. ....	77
Fig. A-1: One way beam pattern measured at the focal length of the probe[7]. when control algorithm is working. ....	84
Fig. B-1: 3D visual mapping device SeaXerocks when control algorism is working. ....	85



## 表目次

Table. 1: Acoustic properties of Manganese Crust an Substrate Samples [7] .....	4
Table. 3-1: Rotary device : 「OE10-102,103」 inclination and ground truth. ....	53
Table. 3-2: USB camera : 「Firefly」 inclination and ground truth. ....	54
Table. B: Resolution and dimensional accuracy of SeaXerocks inclination and ground truth. ....	85

# 1 序論

## 1-1. マンガンクラストとは

自国由来のレアメタル資源の必要性が指摘されている現在、コバルトリッチ・マンガンクラスト(以下マンガンクラスト)について、精力的に研究が進められている。

マンガンクラストは、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、2～20[cm]の範囲で層状に付着して形成される化学堆積岩である[1]。分布深度は800m～3000mと、比較的浅く、主成分となる鉄、マンガンに加え、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ている[2]・[5]。日本のEEZ（Exclusive Economic Zone；排他的経済水域）においても広く分布していることが確認されているため、その賦存量を把握することが急務となっている。

マンガンクラストは、生成起源で大きく括ることができる。海水を起源とする Vernadite と、続成起源である Buserite、そして熱水起源である Todorokite の3種類であり、それぞれ組成に違いがある[2]。この中でも、海水起源の Vernadite がコバルトを多く含むため、特に開発ターゲットとされている。

海水起源の場合、質的な空間変化は、pH profile や DO などのグローバルな要因で決まるため、局地的な変化は乏しいと考えられる。マンガンクラストの体積速度に関しては、潮流や堆積物の溜まりやすさ、ローカルな地形変化によって4～7[mm/Ma]の範囲で変動する[6]。よって、賦存量調査の観点から見ると、成分分析などの質的な調査よりも、量的な調査、すなわち、どこに、どれぐらいの厚さで分布しているのかを調査することが重要となる。

現在まで、日本近海のマンガンクラストに対して、多くの調査が行われてきた[7]・[9]。しかし、その分布は未だに把握されておらず、形成メカニズムの解明に至っていない。

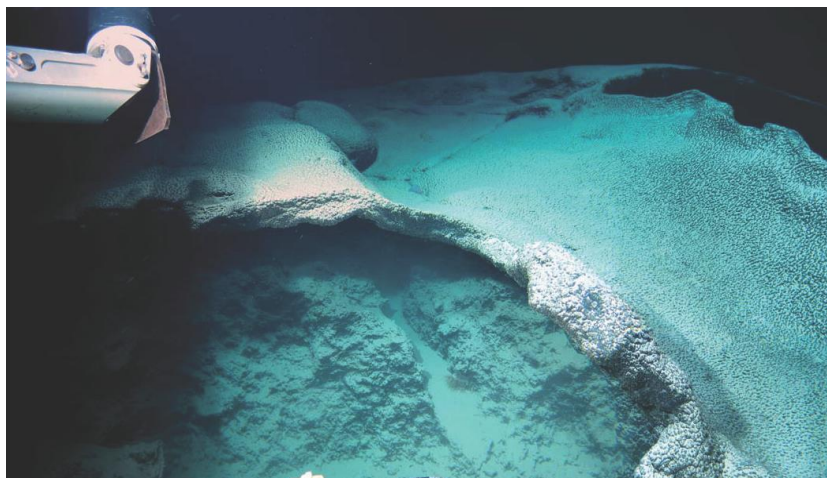


Fig. 1-1 Manganese Crust sampled in NT10-11[7].

## 1-2. 従来の調査手法と連続的音響計測の必要性

従来、マンガングラストの調査では、ドレッジによるサンプリングが多く行われている。ドレッジは、一度にまとまったサンプルを得ることができるという利点があるが、サンプルを取得した正確な位置が不明であり、どのような状態のクラストを取得したかを確認することができない。また、基盤に付着していないクラストも混合してしまうというデメリットがある。

そこで、現在では、油圧の強力なマニピュレータを持つ ROV(Remotely Operated Vehicle ; 遠隔操作無人機)を使用した調査もなされている[8]-[9]。ROV を使用するメリットとして、カメラでサンプリング対象を視認しながら取得できる点、岩石カッターや振動式タガネなどのサンプリング機器の使用によってマンガングラストの表面状態を保ちつつ、基盤岩と共にサンプリングできる点があげられる。

サンプリングで得られたクラストと基盤を化学分析することで、地質的に重要な情報を取得することができる。しかしながら、実際に ROV でサンプリングする場合、一つのサンプルを取得するのに 30 分~1 時間もの時間を要し、失敗する可能性も低くはない。さらに、賦存量調査の観点から見ると、クラスト層の厚さが重要な情報となるが、サンプリングによって得られる情報は、サンプリング地点での情報しかわからず、限定的である。特に、クラストの厚さは場所によって 10~200[mm]で変動する上、海山単位で面的に分布することから、従来の手法では、厚さ情報の調査という点に関して適しているとは言い難い。広大なマンガングラスト分布域の点々とした情報だけでは、面的に分布するマンガングラスト全体を調査するのに多大な時間と経費が掛かってしまう。

そこで、離散的ではなく連続的なデータを得る手法が必要となる。著者の所属する研究室では、音響厚さ計測と 3D マッピングを複合した、総合的な賦存量調査手法の開発を続けている[7],[10]-[17]。まず、3D マッピング装置によって、マンガングラストの分布が視覚的に確認できるため、定量的にその面的な分布を知ることができる。また、厚さデータを取得するためには、ドリリングなど従来手法のほか、音響計測が考えられる。これまで、マルチビームソナー、サイドスキャンソナー、サブボトムプロファイラーなどの技術が露頭のマンガングラストに対して適用されてきた[18]-[20]。しかしながら、通常のサブボトム計測で海底下の地層を探索する際は、数 10[m]下まで音波が届く様に数 kHz から数 10kHz と低周波を用いるため、数 cm の薄いマンガングラストを計測するには分解能が不十分である。よって、1[cm]分解能の超音波発信器を使って厚さを測る方法が考えられ、これをマッピングと同時に移動しながら計測することによって、連続的な厚さ情報が得られると考える。これら 2 つのセンサーから、面積と厚さを取得できるため、サンプリングによって得た比重と成分情報を組み合わせることで、賦存量を計算することができる。なお、マンガングラストの化学組成に関しては、深度による成分、また厚さ方向での成分の変化は見られるが、濃度は厚さのように数 10 倍も変動す

る事はないため、現場計測による連続的な計測においては、厚さと面的分布の優先度が高いと考える。

### 1-3. 先行研究について

本節では、先行研究として、音響厚さ計測装置と、3D マッピング装置「SeaXerocks」について解説する。なお、SeaXerocks についての詳細（得られるデータの解像度など）は、付録 B に示す。

#### 1-3-1 音響厚さ計測プローブ

マンガンクラストの厚さを計測するには、マンガンクラスト表面の反射と、裏面、すなわちマンガンクラストと基盤岩との境界面における反射の時間差から計算する手法が考えられる。Fig. 1-2 には、南鳥島周辺の拓洋第五海山において取得したマンガンクラスト 11 個と基盤岩 13 個の特性を示す。

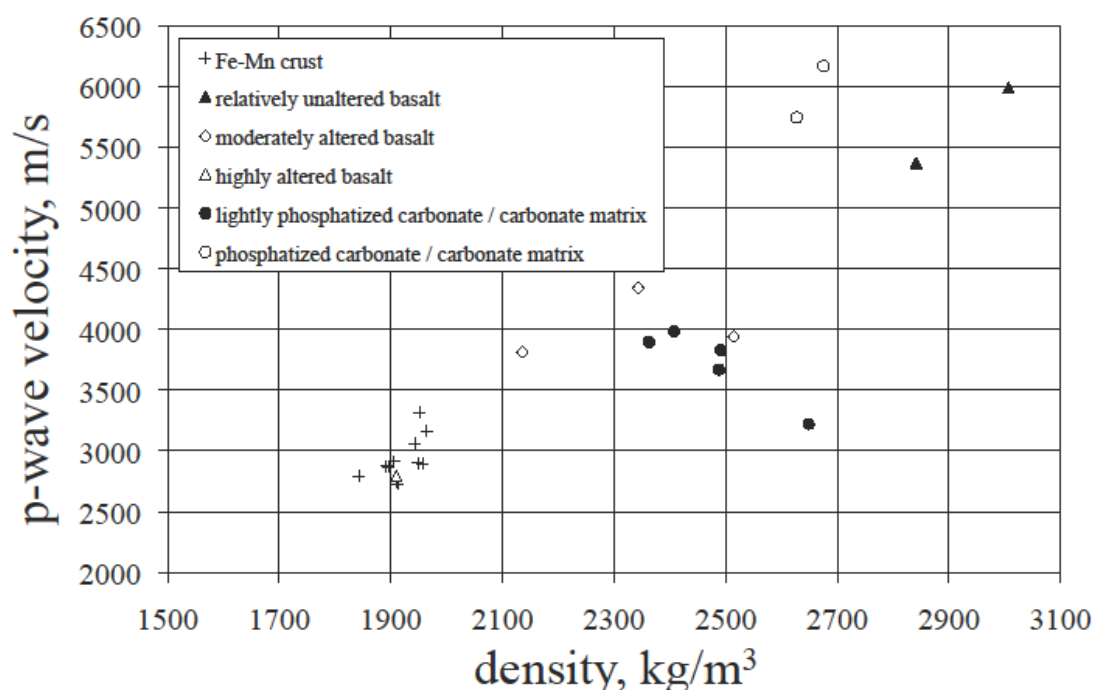


Fig. 1-2 Compressional wave velocity and wet densities plotted for crust and substrate samples obtained at depths of between 1000 m and 3000 m at #5 Takuyo seamount[7].

これより、マンガンクラストの平均音速  $2932[\text{m/s}]$  ( $\sigma = \pm 179[\text{m/s}]$ )、比重は  $1920[\text{kg/m}^3]$  ( $\sigma = \pm 0.42[\text{kg/m}^3]$ ) と計算される。音響反射においてもっとも支配的なパラメータである音響インピーダンス  $Z$  は、音速  $c$  と比重  $\rho$  から以下の式で計算される [21]-[23],[24]。

$$Z = c\rho \quad (1.1)$$

得られたサンプルでは、マンガクラストの音響インピーダンスの平均は  $5.64 \times 10^6 [\text{kg/m}^2\text{s}]$  ( $\sigma = \pm 0.42 \times 10^6 [\text{kg/m}^2\text{s}]$ ) となる。

音速、密度、音響インピーダンス、減衰率を計算し、まとめたものを Table. 1 に示す。

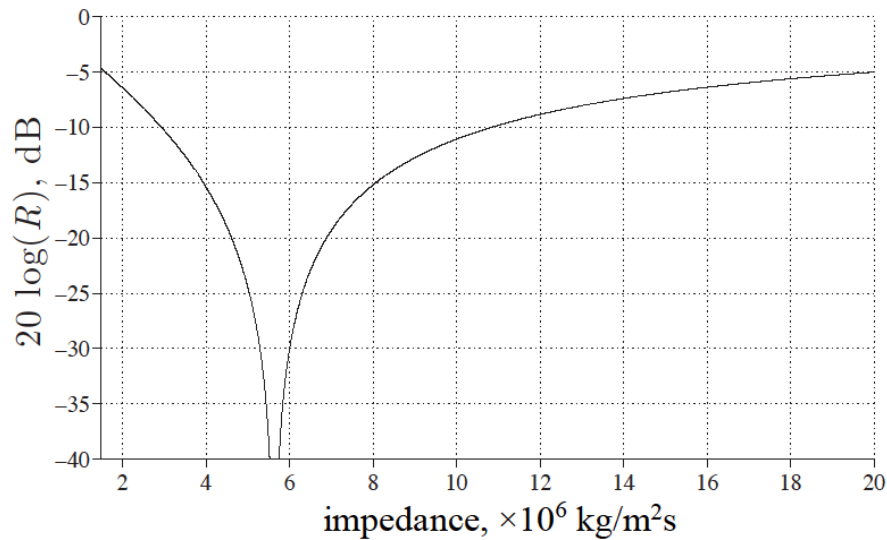
**Table. 1 Acoustic properties of Manganese Crust and Substrate Samples[7].**

Parameters	Fe-Mn crust	Relatively unalt. basalt	Moderately alt. basalt	Highly alt. basalt	Lightly phos. carb. / carb. matrix	Phos. carb. / carb. matrix
Number of samples	11	2	3	1	5	2
$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$1920 \pm 36$	2924	2331	1910	$2479 \pm 109$	2651
$c$ (m/s)	$2932 \pm 179$	5679	4034	2790	$3720 \pm 301$	5954
$z$ ( $\times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )	$5.64 \pm 0.42$	16.63	9.61	5.33	$9.20 \pm 0.42$	15.79
$\alpha$ (dB/(MHz cm))	$6.37 \pm 1.8$	-	-	-	-	-

<sup>1</sup> Standard deviation included only where there are more than 5 samples in the category.

対して、基盤岩は種類によって音響インピーダンスに変化があるが、平均として  $11.1 [\text{kg/m}^2\text{s}]$  となった。

Fig. 1-3 に、マンガクラストの音響インピーダンスを  $5.64 [\text{kg/m}^2\text{s}]$  と仮定した場合に、基盤岩との音響インピーダンスの差によって、平坦な境界面へ垂直入射する超音波の反射強度を示す [21]。



**Fig. 1-3 Rayleigh reflections at the crust-substrate interface for various substrate impedances, assuming an average impedance of  $5.64 [\text{kg/m}^2\text{s}]$  [7].**

Fig. 1-3 より、基盤岩の音響インピーダンスが  $11.1 [\text{kg/m}^2\text{s}]$  であれば、境界面において入射した超音波に対して  $-9.5 [\text{dB}]$  程度の音響反射を起きると計算できる。これは、計

測に十分な反射強度である。Fig. 1-2, 3 より、拓洋第五海山においては、クラストの裏面反射が得られることがわかった。

しかし、先述した通り、従来のサブボトムプロファイラーでは数 cm 程度の厚さのクラストを計測するには分解能が足りない。また、海底面の凹凸高さがクラストの厚さ以上に存在することを考えると、広がりのある音波では表面の反射と裏面の反射が同時に計測されることが考えられる。この場合、表面、裏面の反射を分離することは難しくなる。更に、計算されたクラストの減衰率は  $6.37[\text{dB}/\text{cm}/\text{MHz}]$ [14]と、高いため、MHz オーダーの信号で反射を得るのは困難である。

これらの条件を考えると、音響厚さ計測には以下の条件を満たす必要がある。

- ✓ 1cm オーダーの解像度を分解能
- ✓ ビーム経が狭い
- ✓ 貫通力がある

これらを達成するには、低周波（減衰が少ない）、高周波（細いビーム）の両方の特性をもったパラメトリック波[25]が適していると考ええる。よって、装置を小規模に抑えつつ音波を直径 2cm に絞るため、1MHz の一次波に AM 変調をかけることで 100[kHz] の 2 次波を発生させる。パラメトリック効果によって発生させた 100kHz の音波を用い、0.75m の低高度から計測を行う手法を開発してきた。Fig. 1-4 に開発した音響プローブ、Fig. 1-5 に音響厚さ計測の概念図を示す。

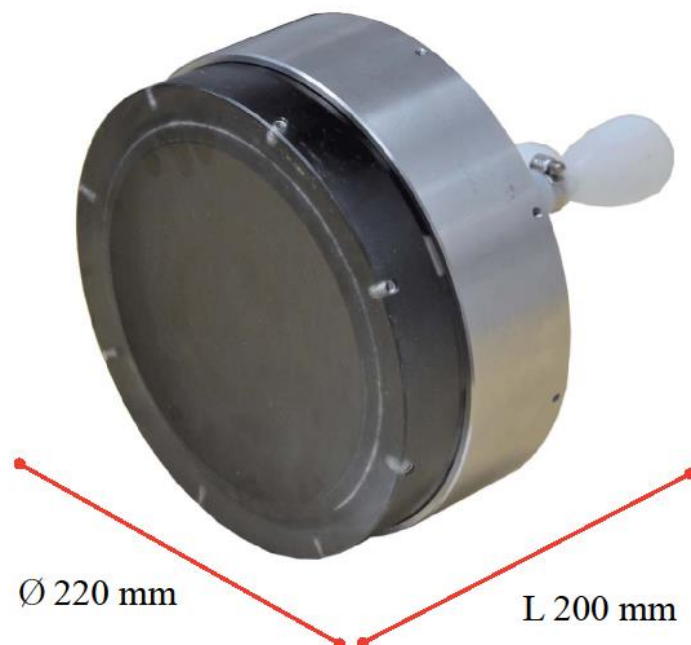


Fig. 1-4 Acoustic Probe[7].

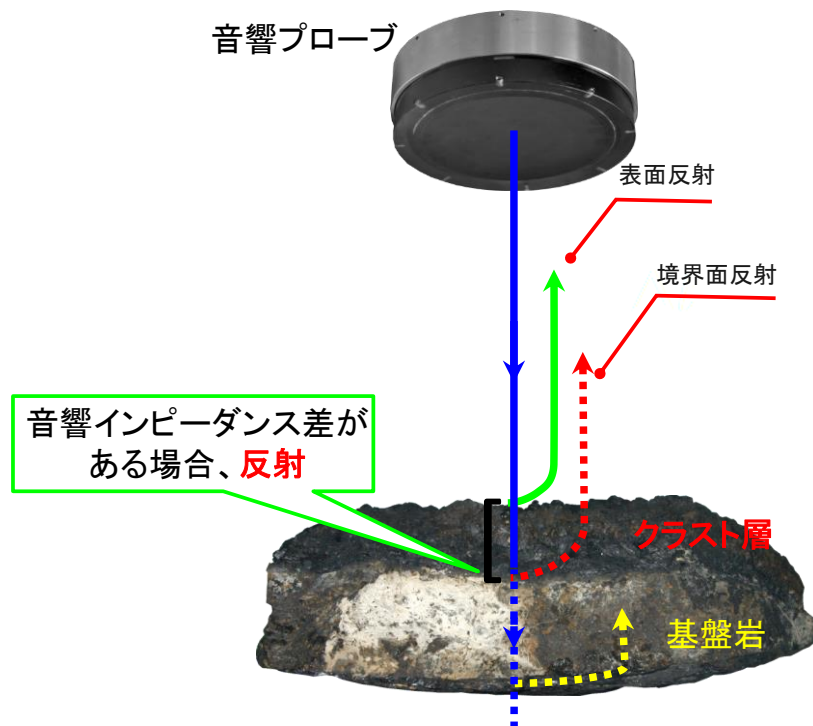


Fig. 1-5 Schematic diagram of acoustic measurement.

2010 年の実航海実験 (NT10-11) では、独立行政法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の海中ロボット「ハイパードルフィン」に搭載し、世界で初めて、マンガンクラストの厚さ情報を音響で取得することに成功した。

また、音響プローブについては、現在まで数点の改良が施されてきた。第一に、一次波の周波数を 2MHz へと引き上げることで二次波を 200kHz とした。これにより、焦点距離を NT10-11 で使用したものと比べ 2 倍(1.5m)とした。第二に、音響プローブ～海底間の距離から焦点距離を自動的に変動させる、オートフォーカス機能を実装した。これら 2 点の改良により、ROV 操縦難度の低減を可能とした。音響プローブと 3D 画像マッピング装置の 2 つのセンサーを海中ロボットに搭載し、同時計測を行うことで、クラストの賦存量の連続的な算定が可能となっている[7]。

### 1-3-2 先行研究における課題点

上記の手法により、クラストの厚さをリアルタイムに高分解能で得ることができる。NT10-11 航海においては、平地においてクラスト厚さを計測することに成功したが、計測領域全てでデータを取得できたわけではなく、局所的に音響反射が低下した箇所が存在した。

具体例を、Fig. 1-6 に示す。a)には、3D 画像を上から見た図を、b)には音響データから得られた波形データを縦軸深度で示したものとなっている。b)はロボットのロール・

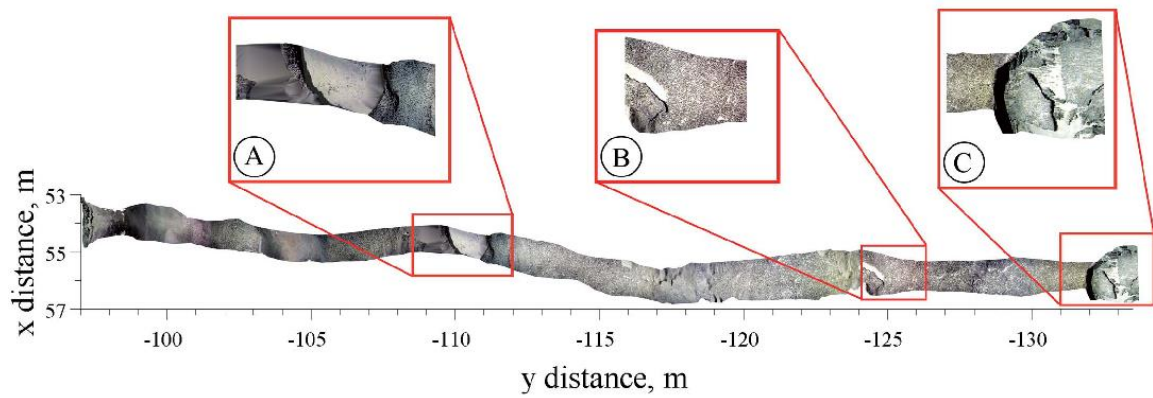
ピッチ・ヨー動作を補正してあるため、海底の傾斜についても確認することができる。音響強度が高いものを濃色で示してあるため、例えば 127[m]～131[m]地点において、表面反射と裏面反射の 2 つの黒い領域が確認できる。視認性を上げるため Fig. 1-6-c) においては、縦軸を表面反射からの時間差で示した。

このデータセットの中で、122[m]～124[m]地点に注目すると、3D マッピングデータにはクラストが確認できるのにもかかわらず、厚さ情報を得られるレベルの音響データが取得できていない。上記の音響システムは、音波を絞るため指向性が高く、垂直に入射できない斜面において反射波の受信強度が低くなり、厚さ計測に支障をきたす場合があると考えられる。また、傾斜地でなくとも、ロボットの Roll、Pitch 運動によって、音波の発射方向は絶えず変化してしまうため、より多くのデータを所得するための工夫が求められる。クラストは、堆積物が溜まりにくい傾斜地に多くあることが知られており、提案されている調査方法の一般化のためには、斜面に対応する必要がある。

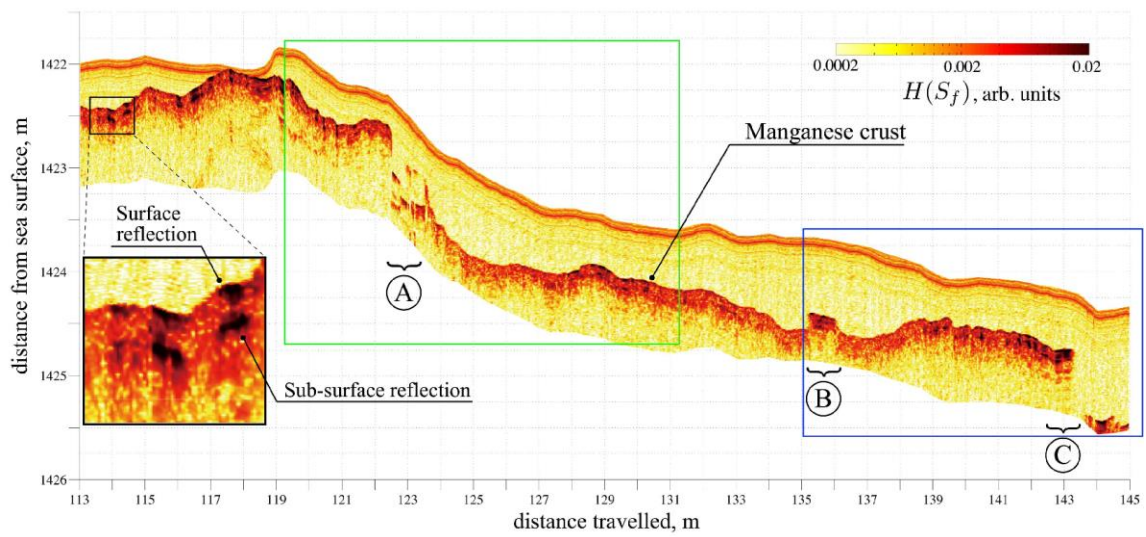
#### 1-4. 本研究の目的

本研究は、音波によるマンガンクラストの調査手法を、傾斜地において、平地と同様な結果が得られるための技術開発、及び手法を一般化させることが目的である。次章では、実サンプルを使用した水槽実験を通して、音響反射低下の具体的な影響を探るとともに、どの程度の影響を及ぼすのかについて考察する。第二章で得られた結果から、音響反射の劣化を防ぐシステムを検討開発する。本論では、音響プローブ自体をジンバル構造に取り付け、海底面への音波入射角を制御するシステムを提案する。Fig. 1-7 に概念図を示す。本システムでは音響装置自体の開発ではなく、安価でデータ取得確率の増加が期待できる。このシステムによって、傾斜地における音響計測を可能とさせることが目的となる。

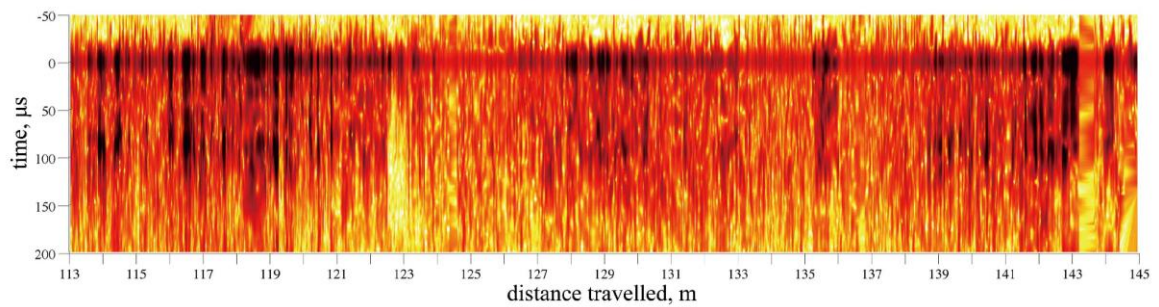




a)



b)



c)

Fig. 1-6 (a)The top view of the 3D visual reconstruction,(b) acoustic data compensated for vehicle motion, (c) acoustic data with respect to the surface of the seafloor.[7].

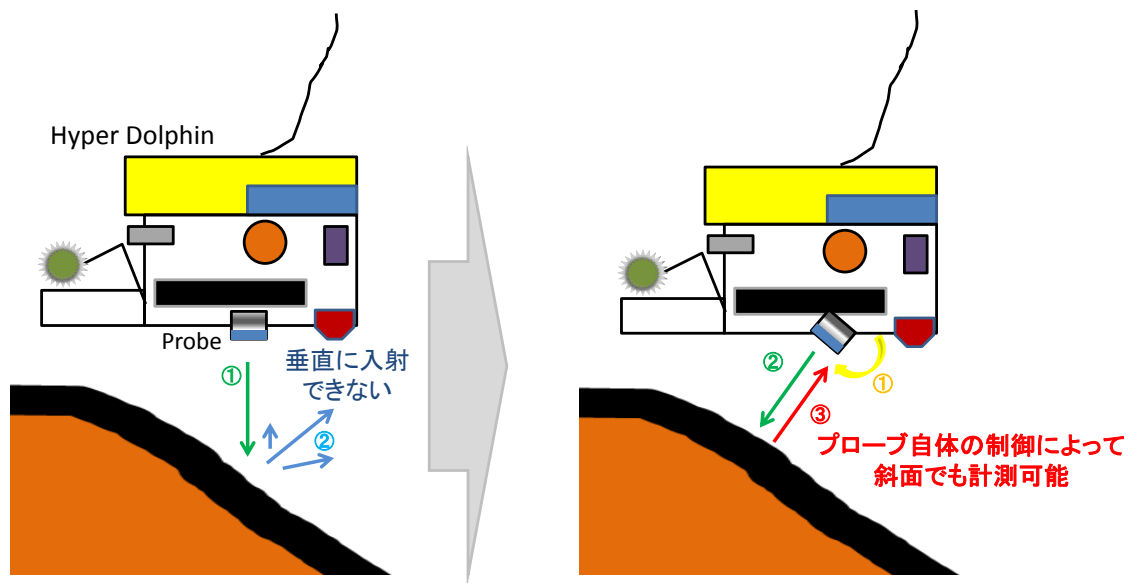


Fig. 1-7 Purpose of this study.

## 1-5. 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

次章では、水槽実験による評価を行った後、マンガンクラストが分布する海域において取得した 3D マッピングデータの座標情報から、海底の傾斜角を計算し、どのような変化が生じているのかを分析する。第三章では、第二章で分析した傾斜角解析結果に基づいて、ジンバル装置の制御アルゴリズムの開発を行う。次に、設計したアルゴリズムを、海中ロボットで動作させるためのセットアップの詳細を述べる。第四章では、開発したアルゴリズム及びセットアップの有効性について、東京大学千葉実験場海洋工学水槽において、確認した結果を示す。第五章では、開発したセットアップを実海域へと展開させた際に得られたデータセットについて、システムのパフォーマンスを考察する。第六章では、結論と今後の課題について述べる。

## 2 入射角の影響評価と海底面傾斜解析

### 2-1. 本章の概要

第1章に示した、平地における音響データとマッピングデータでは、局所的に海底面の傾斜が大きい場所において厚さ計測に十分な音響反射が得られなかった。この原因として、音響プローブの高い指向性により、海底面への入射角に敏感であることが考えられる。なお、ビームパターンについては付録 A を参照されたい。この要因の影響を明らかにするため、本章では、マンガクラストの実サンプルを用いて、入射角を変化させながら音波を入射させることで、実サンプルにおける入射角の影響を直接調査する。

次に、マンガクラスト海域にはどのような傾斜が有るのかを調査する。

マンガクラスト海域の代表として、日本の EEZ 内に位置する拓洋第五海山を対象とする。北太平洋西部に位置する拓洋第五海山 ( $23^{\circ}00'N, 153^{\circ}20'E$ ) は、周辺の深海平原より 4000 [m] 高い 1000 [m] 深度に 2000 [km] 以上の平頂部を持つ平頂海山である。周辺の海洋底の岩石は 1.5 億年前に形成され[26]・[27]、今までの調査でマンガクラストが厚く発達していることが知られている。また、本海山において、海洋開発機構 (JAMSTEC) の調査航海 NT09-02 leg 2 (首席研究者：浦辺哲郎)、NT10-11 及び NT12-05 (首席研究者：Blair Thornton)、海底の 3D マッピング装置 SeaXerocks を用いた、海底面のライン状に投影するレーザスキャン (付録 B 参照) による詳細な 3D データが取得されている。本章では、3D マッピング装置 SeaXerocks で取得した海底面座標情報を解析した。解析した海域は、日本近海でマンガクラストが分布する代表的な平頂海山である拓洋第五海山であり、将来の開発可能性も高い海域であるため、この海域で実用することを前提とすれば、開発対象となる他の海域においても十分に適用可能であると考えられる。

JAMSTEC の研究船「なつしま」航海：NT12-05 航海においては、拓洋第五海山において約 1km 以上もの長距離マッピングデータを取得することができた。本章では、データのスワスは 2m 程度であるため、本章で解析する海底面積は約 2000[m<sup>2</sup>]である。1[km]の長距離のデータの連続したデータに加えて、様々な深度で所得したデータを解析することで、1 潜航における側線の傾斜角分布を把握する事が可能である。解析した測線は多くのマンガクラストが分布していることが確認できるため、将来的に開発を視野にした場合において有益な情報であると同時に、今後の航海で本システムを使用する海域と同様な傾向を示す可能性が高いと考えられる。

## 2-2. 入射角影響実験

### 2-2-1 実験内容

第一章で述べた通り、実海域データから、斜面における反射強度の低下を確認することができた。しかしながら、音響反射低下の要因としては、傾斜以外に、海底面までの距離の変動と底質の変動が挙げられ、入射角の影響がどの程度存在するのかを定量することは難しい。よって、本節では、拓洋第五海山で取得したサンプルに対して、入射角を変動させながら音居計測を行い、具体的な影響を確認した。

まず、入射角として、Fig. 2-1 の様に音波とサンプルの角度差 $\theta$ を定義する。

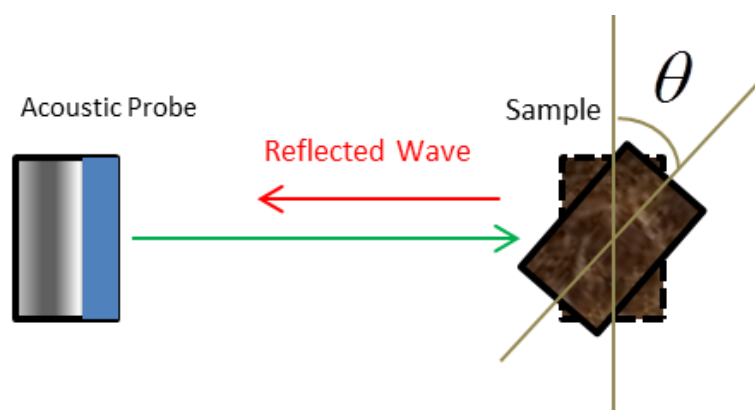


Fig. 2-1 Definition of angle of incidence

ターゲットと音響プローブ間の距離を、焦点距離である 1.5[m]で固定して、サンプルの角度 $\theta$ を-10[deg]から+10[deg]の範囲で変化させて計測した。

使用するクラストサンプルの満たすべき条件として、①サンプリング直後から水中にて保存し、クラストの含水量を保っていること、②表面の凹凸がなるべく均一であることの2点が挙げられる。凹凸の特徴的な変化は表面反射強度に大きな影響を与えてしまい、 $\theta$ の変化以上の入射角変化が生じてしまう可能性がある。すなわち、凹凸にバラツキがある場合、サンプルごとにデータに変化が生じてしまい、凹凸高さによる反射波強度変化の評価が困難となるため、より一般的なデータが得られると考える。以上の条件を満たすサンプルとして、Fig. 2-2 に示すサンプルを選択した。これは NT10-11 航海で、拓洋第5海山で取得したものであり、厚さは約 10 cm である。サンプルの比重は 1920[kg/m<sup>3</sup>]、音速は 2932[m/s]であるため、インピーダンスは  $5.62 \times 10^6$  [kg/m<sup>2</sup> s]である。なお、本実験では、クラスト表面からの反射を議論しているため、基盤がついていないものでも問題は発生しない。

$\theta$ の違いにより、得られる受信波形はどのようなになるのかを調査するため、Fig. 2-2 のマンガンクラスト片に対して以下の条件で音波を当て、受信波形を観察した。

- プローブ～サンプル間の距離：1.5[m]
- 測定周波数：一次波 2[MHz]、二次波 200[kHz]
- サンプリング周波数：2[MHz]

次に、 $\theta$ の値が、音響データに与える影響を具体的に調べるため、実験室において、サンプルに対して音波の入射角を変化させ、その反射波を計測した。固定した音響プローブから、角度が可変なサンプルに対して音波を当て、反射波を計測した。実験サンプルは、表面に凹凸がないアクリル板と、凹凸のあるマンガングラスト片の2種とした。

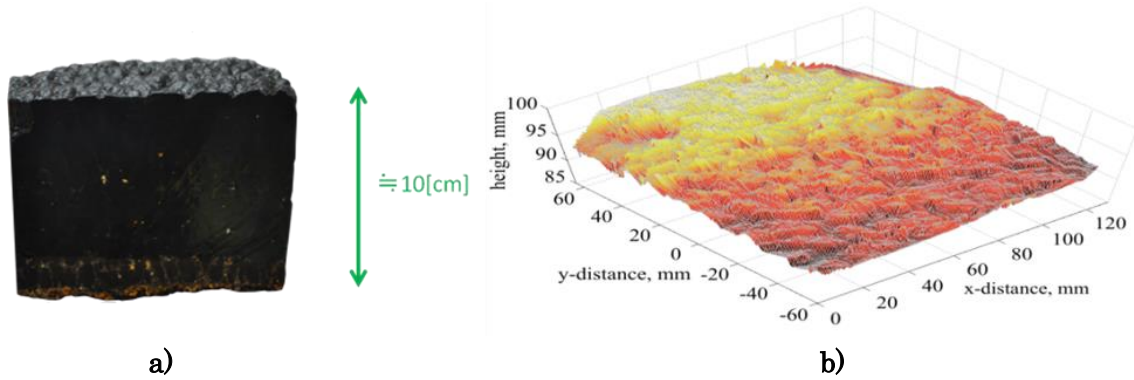


Fig. 2-2 a) Manganese Crust sample from Takuyo Daigo seamount, b) Laser scanned Image of the sample[12].

### 2-2-2 音響データの解析手法について

本章において、音響データの劣化、すなわち反射波の強度減少の評価を行う際は、得られた信号からクラスト表面で反射したと思われるピークを検出し、その強度の強弱で評価する。

また、表面反射波ピークの特定方法は、先行研究において使用したアルゴリズムに則った[7]。

得られる音響データ $S(t)$ は、受信波を 2[MHz]でサンプリングしたものである。 $S(t)$ に対し、反射波を受信できると考えられる時間幅 (3000[μs]～7000[μs]) でバンドパスフィルタをかけたものが、 $S_f(t)$ である。次に、 $S_f(t)$ に対し、ヒルベルト変換をすることで、解析信号へと変換し、受信波の包絡線 $H(S_f(t))$ を得る。

次式によって、 $H(S_f(t))$ の最大値と平均値の割合がある1未満の一定値 $k_{S/N}$ より小さいかを判断する。 $k_{S/N}$ よりも小さい場合、反射波を受信できなかったこととする。

$$\frac{\overline{H(S_f(t))}}{\max(H(S_f(t)))} < k_{S/N} \quad (2.1)$$

反射波があると判断された信号に対し、以下の条件で窓関数を使用しピークを検出する。

$$\sigma_{top} = k_{top} \max(H(S_f(t))) \quad (2.2)$$

$$\text{if} \left( \begin{array}{l} t_k: \{ \max H(S_f(t_i \dots t_{i+n})) > \sigma_{top} \} \\ H(S_f(t_k)) > H(S_f(t_{k\pm 1})) + \delta \end{array} \right) \quad (2.3)$$

$$\text{else } t_i = t_{i+\frac{n}{2}} \quad (2.4)$$

nは窓関数の幅、 $\delta$ は隣り合ったサンプル点との差の閾値となっている。

Fig.2-3, Fig.2-4 に、このアルゴリズムによって検出した音響データの一例を示す。

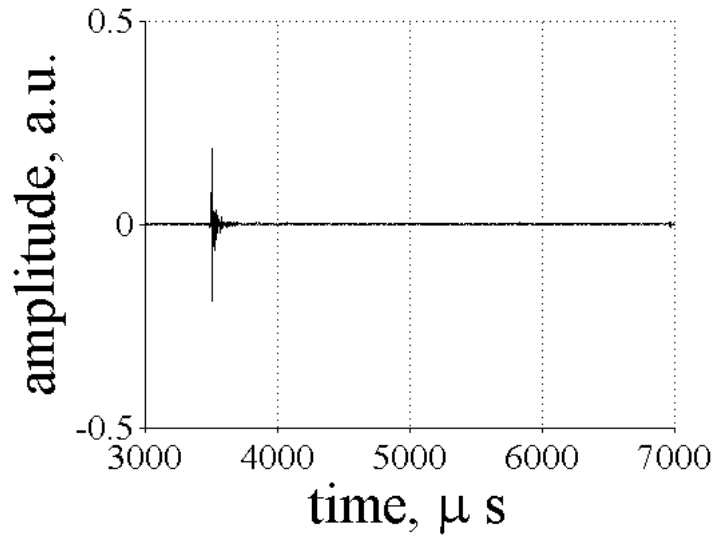


Fig. 2-3 Raw data of Acoustic wave.

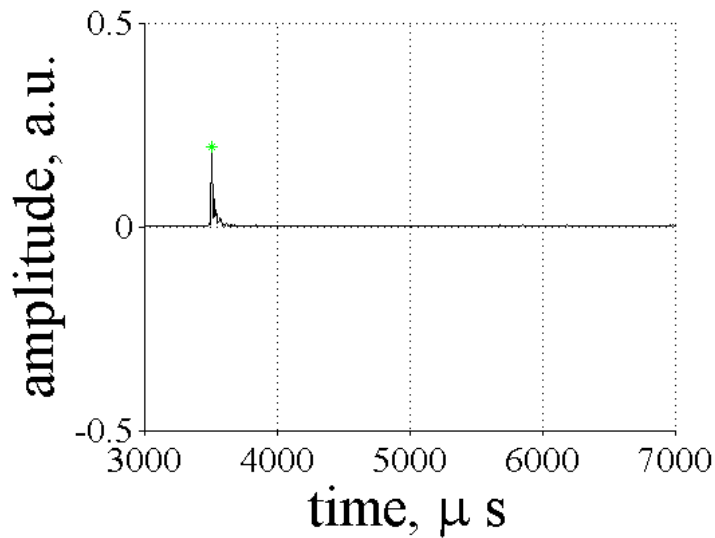


Fig. 2-4 Result of peak detection.

また、波形データにおいては、反射波が観測されない場合においても一定の電気ノイズが観測されるため、反射波のピークとの区別が必要となる。そこで、プローブの音波が発射された方向に何も無い状況で音響計測を行い、その波形から電気ノイズの値を計算した。Fig. 2-5 に計測された電気ノイズのヒストグラムを示す。電気ノイズはガウス分布を示すため、平均値±標準偏差×3 の範囲に 99.73[%]の値を含む。ノイズの強度を以下の式で表す。

$$I_N = \mu + 3\sigma \quad (2.5)$$

$\mu$ を電気ノイズ強度の平均値、 $\sigma$ を標準偏差、 $I_N$ をノイズとした。よって、以降、音響反射強度は、 $I_N$ を基準としたデシベル、すなわち、 $\log(I/I_N)$ で表示する。 $I$ は、検出されたピークの強度である。

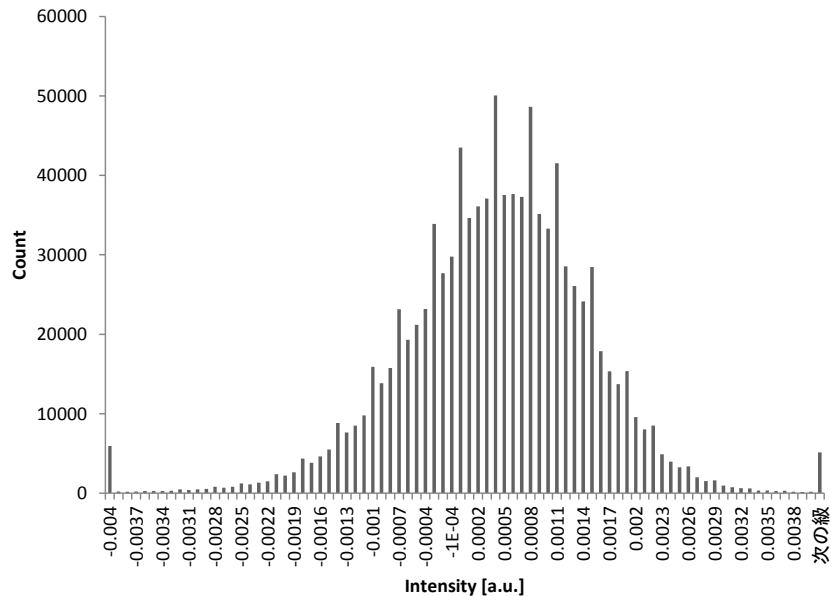


Fig. 2-5 Histogram of noise of acoustic probe.

### 2-2-3 実験結果と考察

Fig.2-6-a)~f)に、受信した音波の生データを、横軸を時間、縦軸を強度でプロットしたものを示す。Fig. 2-6-a) は、マンガングラスト片に対して音波が垂直に入射した時 ( $\theta = 0$ )、Fig. 2-6-f)は、 $\theta = 10$ の受信波形である。

Fig3-a)では、表面反射と裏面反射の 2 つのピークを確認することができる。一方、Fig3-b)では表面反射のピークの強度は小さく、かつ裏面反射も識別することは難しい。これらの図はマンガングラスト片に対して、プローブ～サンプル間の距離を固定して計測したため、サンプル表面の凹凸、音響インピーダンス、音波の減衰は同条件だと考え

られる。受信波形の変化は、入射角の影響であると考える。

入射角変化による受信波形の変化を読み取るために、サンプル表面で反射した音波の強度を入射角ごとに計測する。実験には、Fig. 2-2 に示したクラストサンプル (Surface 1) と、Fig. 2-7-1-a) に示した岩石カッターによって表面を平坦にしたもの、Fig. 2-7-1-b) のサンプル (Surface 2) の 3 パターンを行った。なお、Fig. 2-7-1-a), b) は、同一サンプルの表と裏である。Surface 1, 2 はどちらも自然状態のクラスト表面を保っているが、凹凸の形状に違いがある (Fig. 2-2, Fig. 2-7-1 を参照。凹凸の高さは共に 5[mm] 程度)。

Fig. 2-7-2 に結果を示す。最も表面反射強度が高い値が  $\theta = 0[\text{deg}]$  であるとし、縦軸は 2-3-2 で述べた電気ノイズを基準にデシベルで示した。表面が平坦の場合、 $\theta = 5$  で 10[dB] 以上の強度低下が読み取れる。さらに、 $\theta$  が増加するほど強度が低下する傾向が読み取れる。

対して Surface 1 は、 $\theta = 3$  において、約 10[dB] 低下するが、平坦の時と比べて  $\theta$  の増加と強度の低下が比例していない。これは、表面の凹凸の影響だと考えられる。Surface 2 についても、Surface 1 と同様に凹凸の影響が見て取れる。音波の入射する箇所によっては、 $\theta$  が大きい場合でも強度の低下が少なくなることがわかる。

これらの実験を行ったサンプルで反射強度の低下を、垂直入射の -6[dB] (SN 比 : 20[dB]) 以内に抑えるには、入射角を  $\pm 3^\circ$  程度に抑える必要がある。

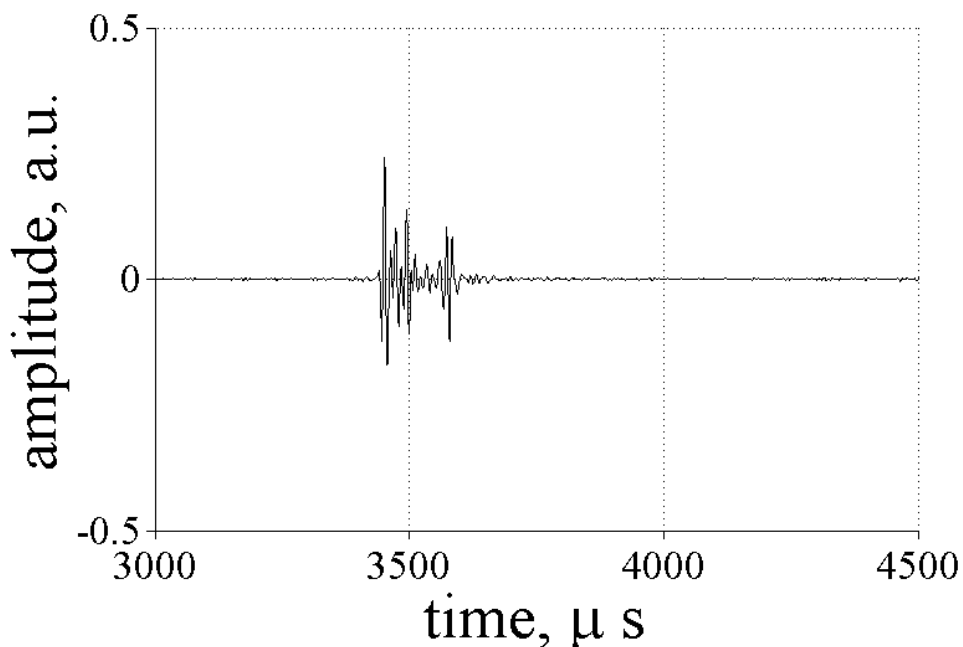


Fig. 2- 6-a) Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at  $\theta = 0$ .



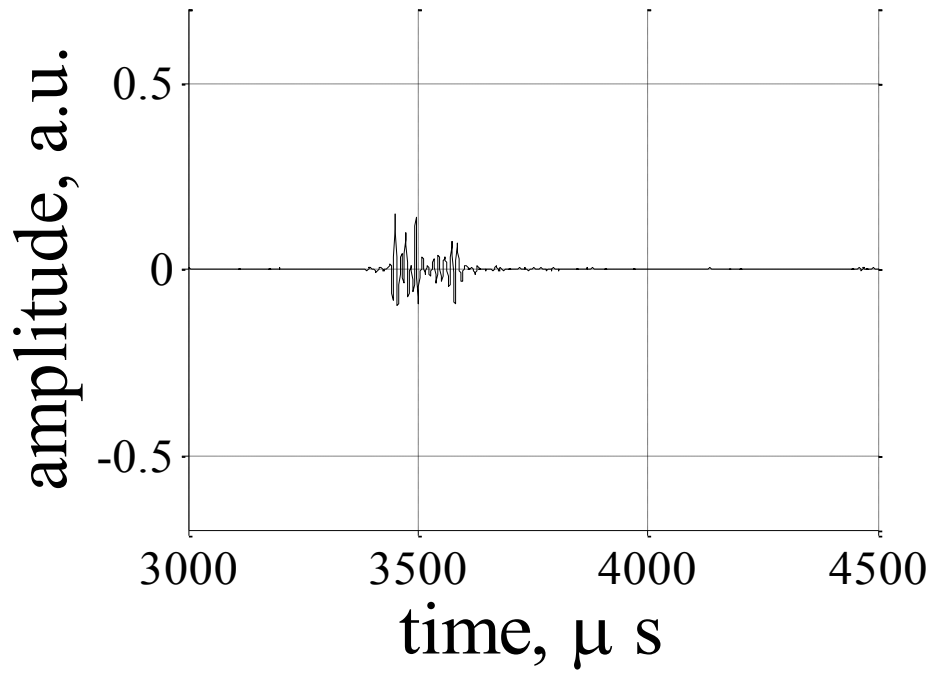


Fig. 2- 6-b) Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at  $\theta = 3$ .

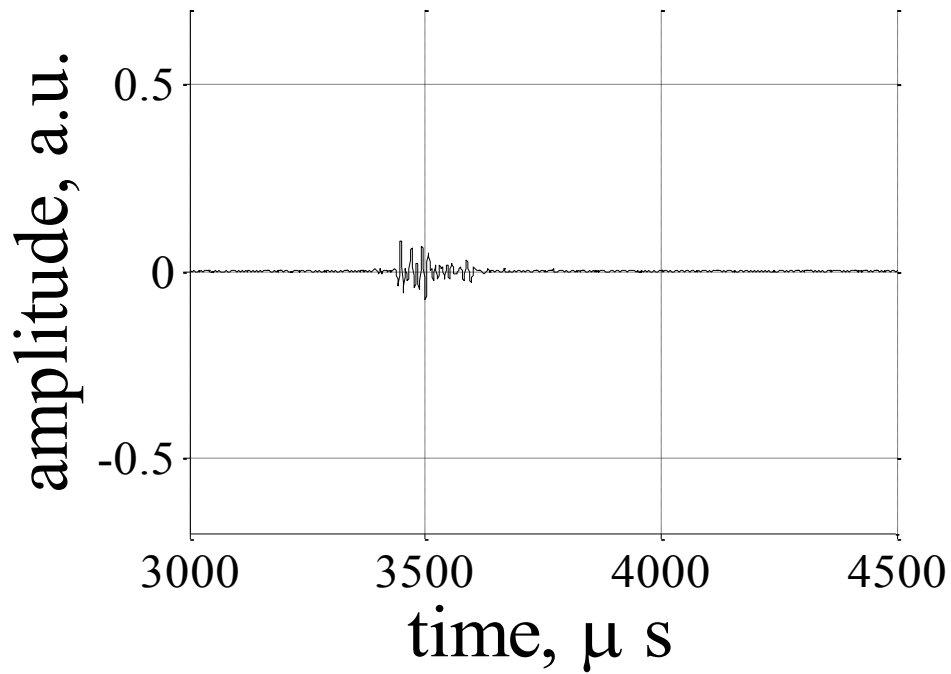


Fig. 2-6-c) Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at  $\theta = 5$ .

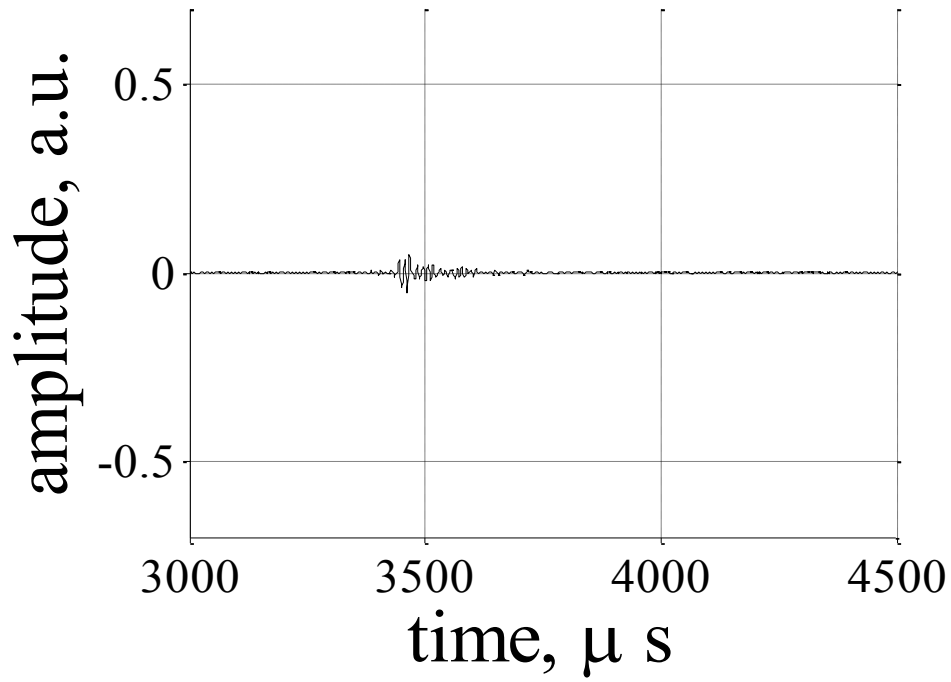


Fig. 2-6-d) Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at  $\theta = 8$ .

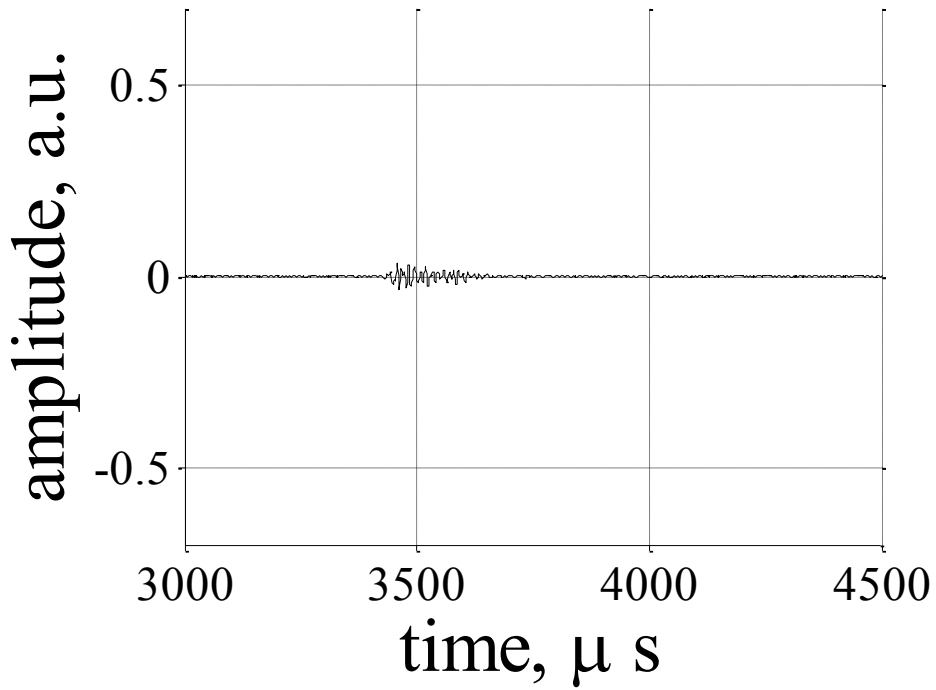


Fig. 2-6-e) Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a manganese crust sample at  $\theta = 10$ .



Fig. 2-7-1 a): a flat surface of manganese crust sample cut by rock cutter, b): a hubble surface maintained natural state(Surface 2).

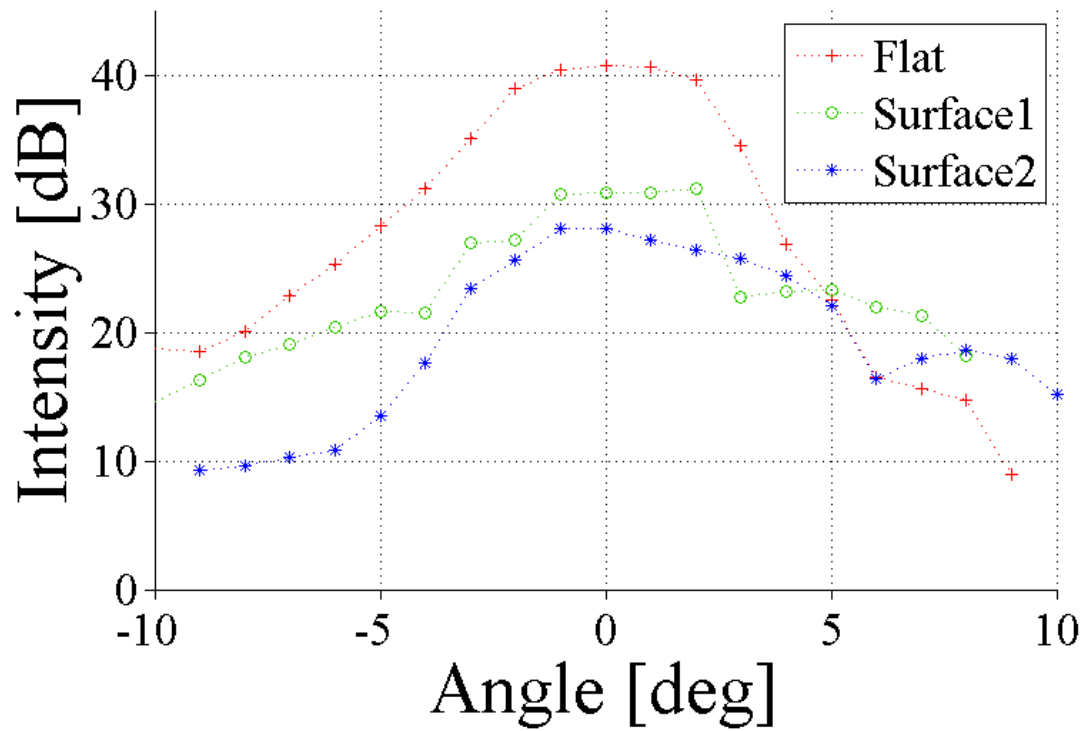


Fig. 2-7-2 Effects of the angle of incidence on the acoustic reflections measured from a flat manganese crust sample (red) , hubble crust Surface 1 shown in Fig. 2-2 (blue) and surface 2(Green).

#### 2-2-4 結論

本実験では、表面状態の異なる 3 パターンについて、反射強度への入射角の影響を確認した。結果として、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 $-6[\text{dB}]$ の強度低下で抑えることができるとわかった。実海域のクラストは次に実海域のマッピングデータから、どういう傾斜があるかを調べることによって、この条件を満たすにはどのようなシステムが必要とされるかを調べる。

## 2-3. 海底面傾斜解析

### 2-3-1 マッピングデータにおける傾斜角算出手法

本研究室では、シートレーザーとマッピング用カメラを使用した 3D マッピング装置：「SeaXerocks」[14]・[17]の開発を行っている。先述の通り、ロボット前方に取り付けた SeaXerocks は、海底面に投影するライン状のレーザー光を、斜めからカメラで観測し、光切断法を採用することにより、高精度、高分解能で海底の座標を読みとることが可能である（分解能については付録 B を参照）。3D 画像は、XYZ の 3 次元座標情報と RGB の色情報を含んでいるため、座標情報を解析することにより、海底面状況を把握することができる。大量の点群の解析手法を、以下に説明する。

傾斜角の評価において、座標系を 2 種類使用するため、以下のように定義する(Fig.2-8)。

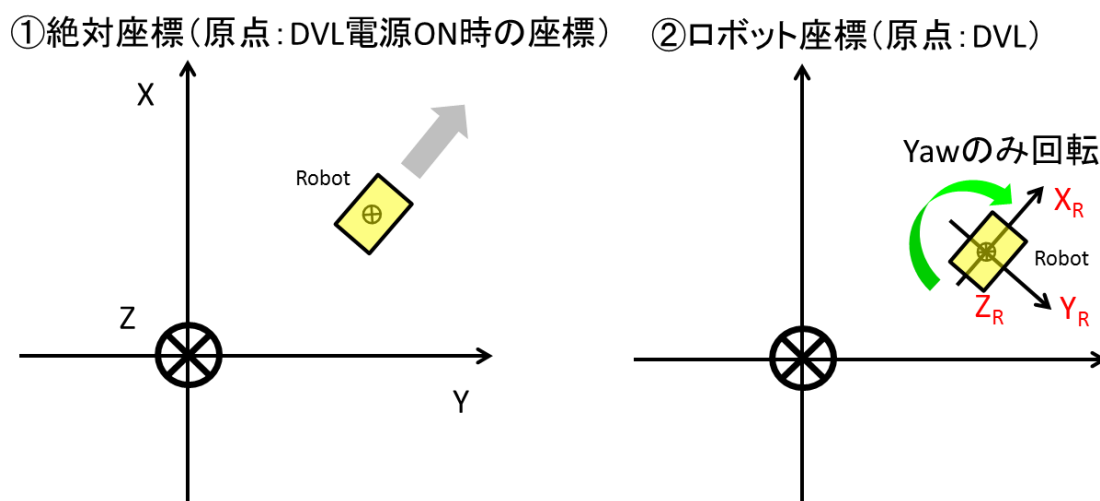


Fig. 2-8 Definition of absolute coordinate system and robot coordinate system.

- ① 絶対座標・・・潜行開始後の、ロボット初回着底点を原点とする座標系。DVL (Doppler Velocity Log: ドップラー式対地速度計) が計測した速度を積分して、X、Y 座標、深度計より Z 座標（下向きを正方向とする）を得る。
- ② ロボット座標・・・絶対座標をロボットの位置まで平行移動した後、ロボットの Yaw 角だけ回転させた座標系。原点をロボットに搭載された DVL (Doppler Velocity Log) の位置を基準とする。

②のロボット座標において、Roll 方向、Pitch 方向へ座標系を回転させない理由として、

傾斜角をロボット底面から見た相対角度ではなく、ロボット進行方向における実際の傾斜を評価する目的があったためである。

傾斜角の評価のため、2種類の傾斜角を算出するため、以下のように定義する。

1.  $\theta_P$ …ロボット座標における、Z-X 平面方向の傾き。
2.  $\theta_R$ …ロボット座標における、Z-Y 平面方向の傾き

これら2つの角度について、解析することで、ロボットから見た海底の傾斜角の評価が可能となる。なお、正方向は Fig.2-9 に示す通りとなる。

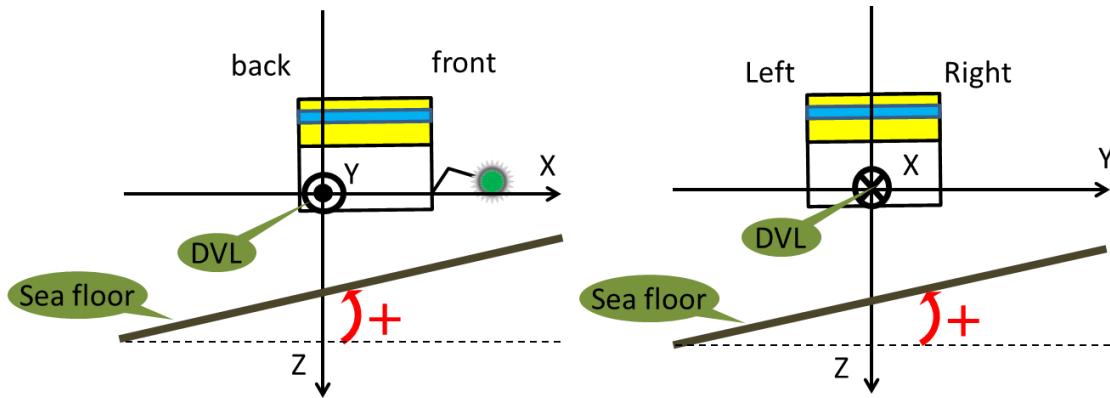


Fig. 2-9 Definition of  $\theta_P$ (left figure) and  $\theta_R$ (right figure)

次に、海底のどの箇所を、どのように計算して傾斜角を求めるのかについて説明する。

海底面の傾斜を読みとるには、特定した場所において、3D データの点群から近似的な面を計算することで求める方法が考えられる。近似面の算出方法として、PCA (Principal Component Analysis:主成分分析) の計算方法である SVD (singular value decomposition : 特異値分解) を使用した[28]。以下に、SVD の基本式を示す。

$$A = U \Sigma V^* \quad (2.6)$$

A を m 行 n 列の行列とした場合、上記の式に分解することが出来る。U は m 行 m 列のユニタリ行列、 $\Sigma$  は 特異値を対角成分に持つ行列、 $V^*$  は n 行 n 列 ユニタリ行列 V の随伴行列である。A の 1~3 列に XYZ 座標、4 列目は全て 1 の行列を SVD 解析することで、近似平面の法線ベクトル  $V_{plane}$  を得る。 $V_{plane}$  は以下の式で定義する。

$$V_{plane} = (v_{px}, v_{py}, v_{pz}) \quad (2.7)$$

よって、各々の角度は、(2.8)、(2.9)で表される。

$$\theta_P = \text{atan}\left(\frac{v_{px}}{v_{pz}}\right) \quad (2.8)$$

$$\theta_R = \text{atan}\left(\frac{v_{py}}{v_{pz}}\right) \quad (2.9)$$

次に、特定する点群の選択方法については、ロボットに取り付けた音響プローブ直下の海底の傾斜が変化をみるため、絶対座標系における真下方向(0,0,1)の海底を選択した。ロボットの位置の変化による傾斜角変化を考察するため、点群から傾斜角を計算する周期は、DVLによる速度情報更新周波数である 5[Hz]とした。

音響プローブの座標  $\mathbf{A}$  (ロボット座標)、発射方向ベクトル  $V_{acoustic}$ 、点群内の任意の点  $\mathbf{B}$  を以下の通りに表す。

$$\mathbf{A} = (x_a, y_a, z_a) \quad (2.10)$$

$$\mathbf{B} = (x_b, y_b, z_b) \quad (2.11)$$

$$V_{acoustic} = (v_{ax}, v_{ay}, v_{az}) \quad (2.12)$$

この時、点  $\mathbf{A}$  と  $V_{acoustic}$  によって定義される空間直線と、点  $\mathbf{B}$  との最短距離は、点  $\mathbf{B}$  から直線へ下ろした垂線の長さとなる。この垂線の長さを求めるために、まず、 $\mathbf{B}$  から直線上の任意の点に向かうベクトル  $\mathbf{V}_T$  は(2.12)の様に求められる。

$$\mathbf{V}_T = ((x_a + v_{ax}t) - x_b, (y_a + v_{ay}t) - y_b, (z_a + v_{az}t) - z_b) \quad (2.12)$$

(2.12)内の  $t$  は、 $\mathbf{V}_T$  と  $V_{acoustic}$  は直交することから、内積は 0 となるため、(2.13)の式を満たす。

$$v_{ax}\{(x_a + v_{ax}t) - x_b\} + v_{ay}\{(y_a + v_{ay}t) - y_b\} + v_{az}\{(z_a + v_{az}t) - z_b\} = 0 \quad (2.13)$$

これを  $t$  について解くと(2.14)が得られる。

$$t = \frac{v_{ax}(x_b - x_a) + v_{ay}(y_b - y_a) + v_{az}(z_b - z_a)}{v_{ax}^2 + v_{ay}^2 + v_{az}^2} \quad (2.14)$$

(2.12), (2.14)より  $V_T$  の各成分がわかり、長さを求めることができる。 $V_T$  の長さが一定値以内の点 B 郡を選択すれば、円筒状に点群を切り出すことができる。

円筒の半径は、30[cm]で固定した。理由としては、以下の2点が挙げられる。まず、使用する音響プローブは、二次波が 200[kHz]で、焦点距離が 1.5[m]で半径 2[cm]まで絞ることが可能なものである。よって、高度が多少上下しても円筒によって選択した領域に確実に入射する様に、2[cm]以上の半径で選択する必要がある。またさらに、「SeaXerocks」によって得られた 3D 画像の解像度は、使用するカメラの解像度と、画像取得時における海底までの距離に依存する（付録 B を参照）。2[m]の高度から平均として 1[cm]程度の解像度で座標を取得するため、点群選択時に設定する円筒の半径が小さすぎると、正確な傾斜角を算出できないと考えられる。すべての方向において、30点程度の点をサンプリングすることによって、高い精度でかつ全方位に指向性がない様に、半径は 30[cm]と設定した。30[cm]円筒内に 1000 点以上含まれない場合は計算しないという条件で解析した。よってこの場合、最低でも 1ヶ所に 1000 点程含まれるため、高精度の PCA が可能である。

### 2-3-2. マッピングデータにおける傾斜分析の内容

傾斜の統計的な分析には合計 1.3km のすべてのデータを用いる。ここでは、分析の手順を解説するため、データセットの中から、15m 程度の長さの代表的なものを 3 つ紹介する。同じデータの解析結果は、同じ図番号として示した。また、Fig.2-10, Fig.2-11, Fig.2-12 のデータセットを、それぞれ、Data1, Data2, Data3 と呼ぶこととする。

これらのデータを選んだ条件として、(i)マンガンクラストが分布していること、(ii)音響プローブ制御が必要となりうる  $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$  程度の傾斜地であること、(iii)表面凹凸の変化が NT10-11 で得られたデータと同程度であるデータを含めることの 3 点を踏まえて 1)~3)の 3 つを選択した。

### 2-3-3. 傾斜角度の概略

Fig.2-10-a), Fig.2-11-a), Fig.2-12-a)は、絶対座標系において、3D 画像を形成する点群を、ロボットの進行距離を横軸、点の Z 座標（海底の深度）を縦軸にプロットしたものである。この図より海底表面の地形を、断面図を見るように確認することが出来る。Fig.2-10-a), Fig.2-11-a), Fig.2-12-a)上部には、SeaXerocks によって得られた 3D 画像で傾斜の断面と、グラフの一部を拡大したものを記載した。

Data1, 2, 3 全てにおいて、複数箇所で急激な傾斜の変化が生じているがこれに関しては、基本的にはマッピングデータにおける点が間隔を開けて存在している場合に生じて



いるアーティファクトが殆どである。しかしながら、実際に凹凸が激しく変化されている場所も確認されている。

Data1 では、20m進行する間に約 12m登っていることがわかるため、その平均の傾斜は約  $30^{\circ}$  となる。さらに、3D 画像で拡大した箇所、急傾斜が確認できる。また、1722.5[m]付近、1727.5[m]付近においても傾斜角の増加が読み取れる。

Data2 では、急傾斜が断面図内に多く確認されることから、傾斜角変化が激しいことがわかる。特に、1467[m]付近、1477.5[m]で大きな高まりが確認できる。拡大した 3D 画像には、 $\theta_R$  プラス方向の傾斜が確認される。

Data3 は、他の 2 つに比べて平坦な地形であるとわかる。3D 画像においても、 $\theta_R$  方向の変化が乏しいことが読み取れる。

#### 2-3-4. 傾斜角度の変化と傾向

本章の目的である、ロボット位置変化による海底傾斜変化を読み取るため、Data1,2,3 に対して 2-4-1 で述べた解析手法を適用した。

Fig. 2-10-b), Fig. 2-11-b), Fig. 2-12-b) に、ロボット進行距離を横軸に、算出された  $\theta_P$  を縦軸にプロットしたもの、Fig. 2-10-c), Fig. 2-11-c), Fig. 2-12-c) は、 $\theta_R$  を縦軸にプロットしたものとなっている。これらの結果より、ロボット位置の変化における、 $\theta_P$ 、 $\theta_R$  の変化を読み取ることができる。Fig. 2-10-a), Fig. 2-11-a), Fig. 2-12-a) と比較することで、妥当な結果が得られているかが確認できる。また、得られた結果からヒストグラムを作成することで、データセットごとの傾斜の傾向を読み取る。Fig. 2-10-d), Fig. 2-11-d), Fig. 2-12-d) に  $\theta_P$  の、Fig. 2-10-e), Fig. 2-11-e), Fig. 2-12-e) に  $\theta_R$  の傾向を示す。

Data1 では、 $\theta_P$  において細かな傾斜変化が読み取れるが、平均は 20 [deg]程度になると考えられる。Fig. 2-10-d) を参照すると、20 [deg] の傾斜の割合が大きいことがわかる。これは、Fig. 2-10-a) において想定した角度と一致している。また、1722.5[m]付近、1727.5[m]付近において  $\theta_P$  が 60 [deg] 近辺まで増加していることがわかる。これは、マッピングデータのノイズの影響から実際の傾斜角よりも大きく算出されたと考えられる。

3D 画像で特徴的であった急傾斜では、 $\theta_P$  に傾斜角変化が確認できない。これは、3D 画像でも確認できる通り、点群が少ないため、傾斜が計算されなかったと考えられる。

Data2 で特徴的であった 1467[m]付近、1477.5[m]の大きな高まりは、 $\theta_P$ 、 $\theta_R$  のグラフ共に確認されている。

Data3 については、Fig. 2-12-c) Fig. 2-12-e) に、 $\theta_R$  方向変化が少ないことが表れている。

### 2-3-5. $\theta_P$ 、 $\theta_R$ の変化周期について

3-3-2 で述べたグラフにより、 $\theta_P$ 、 $\theta_R$  各々の角度変化が可視化された。次に、海底の傾斜角がどのような空間的周期で変化するかを調査する。

Fig. 2-10-b), Fig. 2-11-b), Fig. 2-12-b)、Fig. 2-10-c), Fig. 2-11-c), Fig. 2-12-c) は、先述の通り、ロボットの速度更新周期 5[Hz] で角度を計算している。マッピング速度は約 20[cm/s] であるため、1 サンプルごとに進む距離は約 4[cm] となり、空間的な計算周波数は約 12.5[cycle/m] である。この結果に対して FFT を計算する。

Fig. 2-10-f), Fig. 2-11-f), Fig. 2-12-f) は Fig. 2-10-b), Fig. 2-11-b), Fig. 2-12-b) を FFT した結果、Fig. 2-10-g), Fig. 2-11-g), Fig. 2-12-g) に Fig. 2-10-c), Fig. 2-11-c), Fig. 2-12-c) を FFT した結果を示した。これにより、傾斜角変化の空間周波数を確認できる。また、元々角度の算出に 30cm の円筒の海底への投影面積を使っているため、読み取れる傾斜角の空間周波数の最小値は、 $\left(\frac{1}{0.3}\right) \times 0.5 = 1.67[\text{cycle/m}]$  となる。よって、1.67[cycle/m] 以上の空間周波数で起きている減少のみを参照する。Data1,2,3 共通として、 $\theta_P$ 、 $\theta_R$  共に 1[cycle/m] 以下の低周波部分にも大きなピークが確認できる。よって、Data1,2,3 においては 1[cycle/m] の傾斜角変化を含むことがわかる。どの程度含むのかについての解析は、第三章におけるアルゴリズムの設計にて行う。

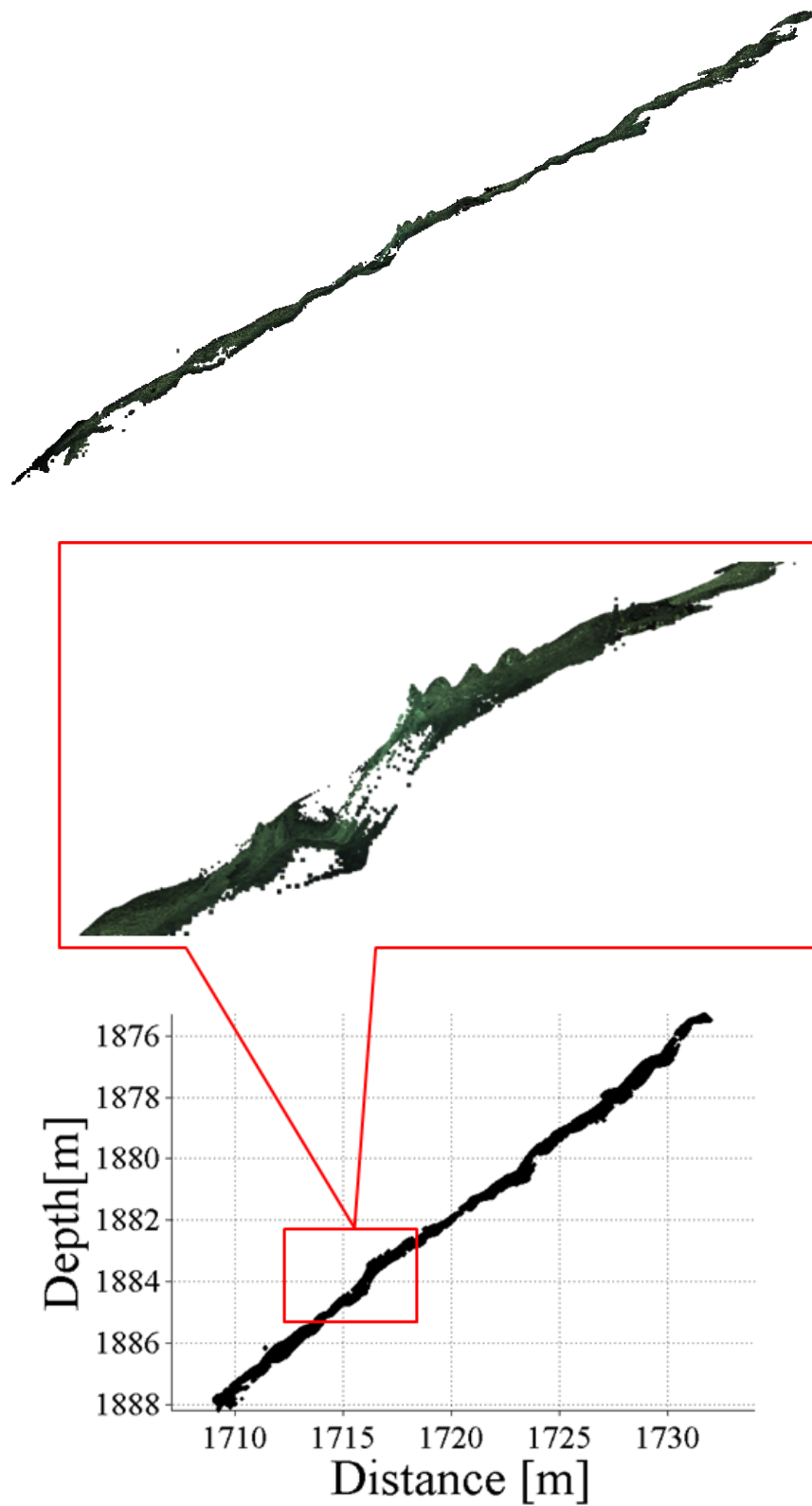


Fig. 2-10-a) Mapping data of Data1

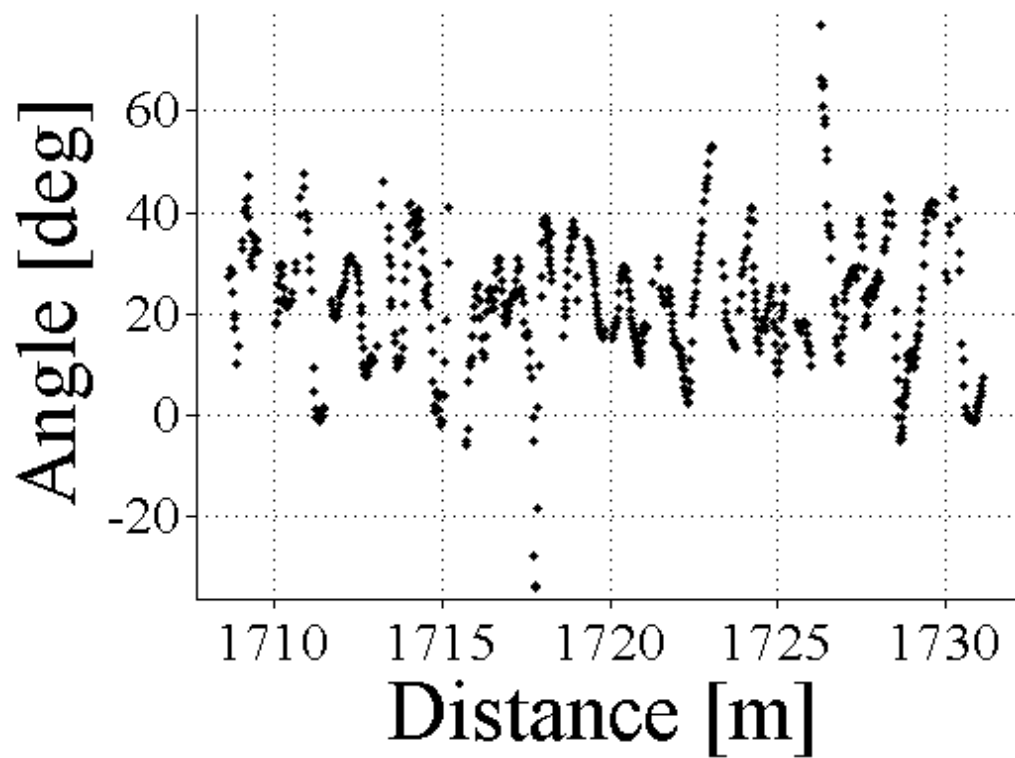


Fig.2- 10-b)  $\theta_p$  calculated by SVD (Data1)

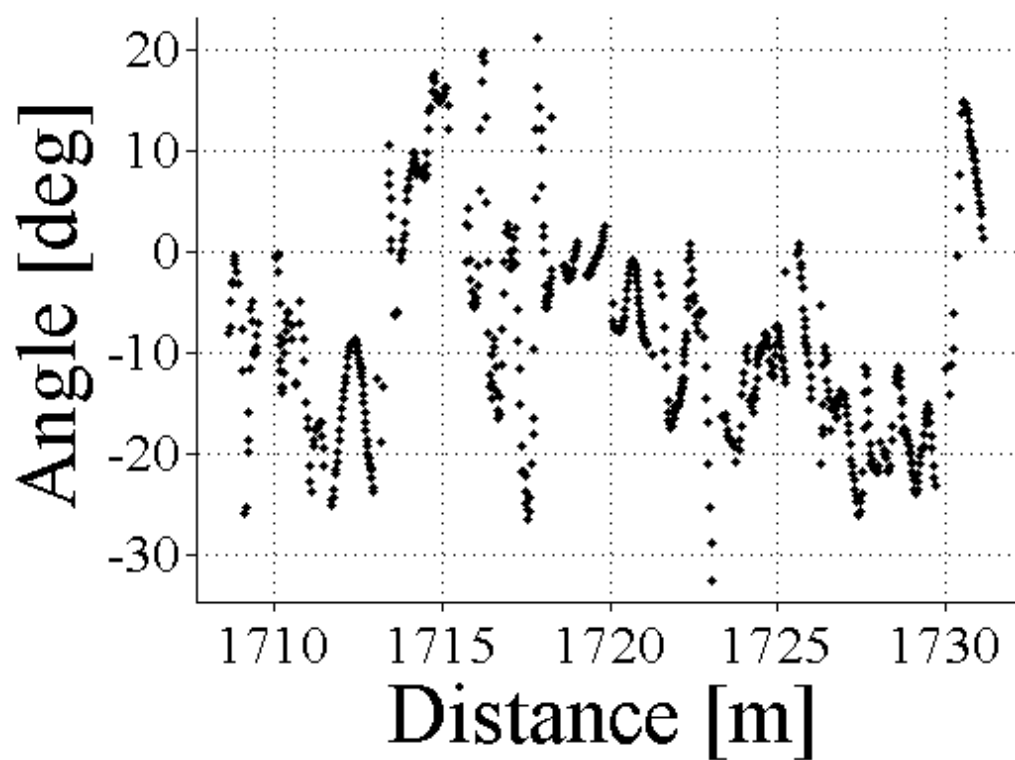


Fig.2- 10-c)  $\theta_R$  calculated by SVD (Data1)

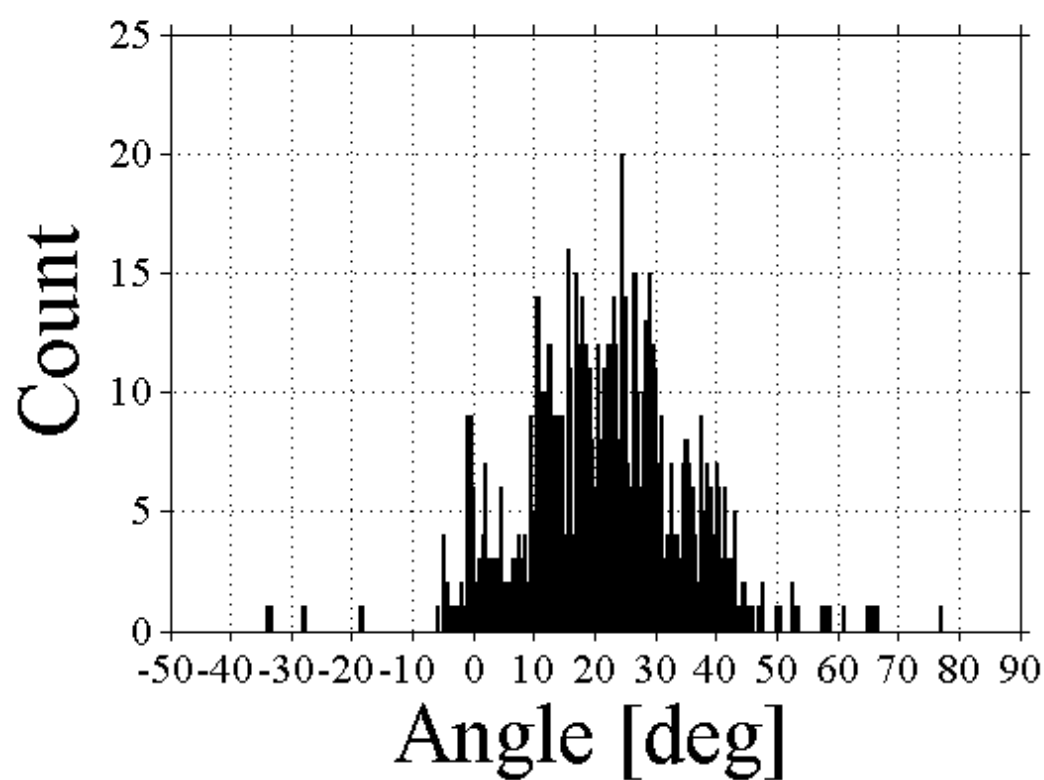


Fig.2- 10-d) Histogram of  $\theta_p$  (Data1)

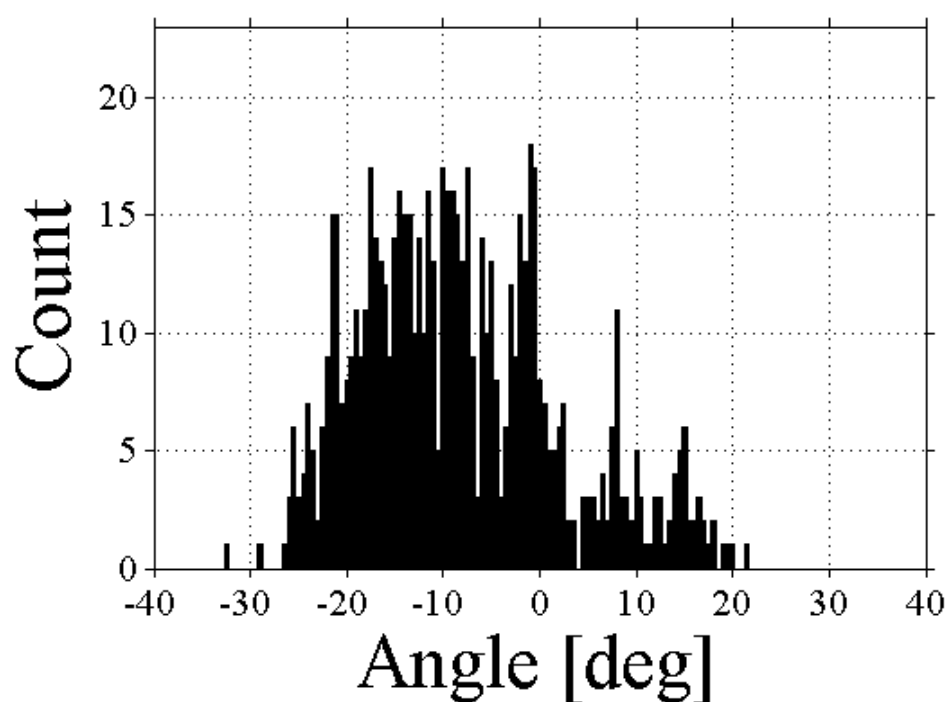
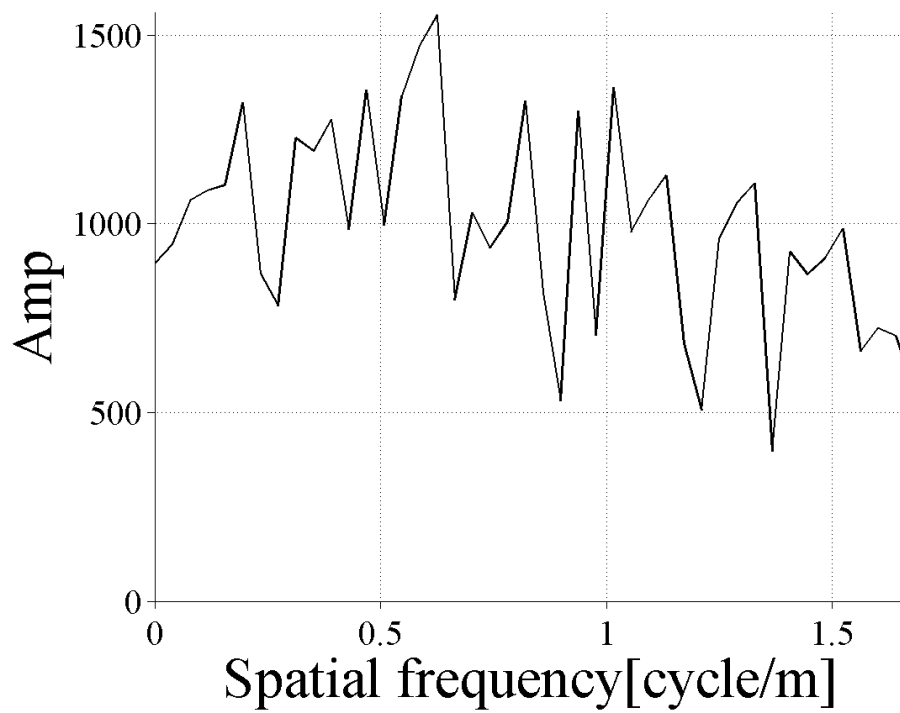
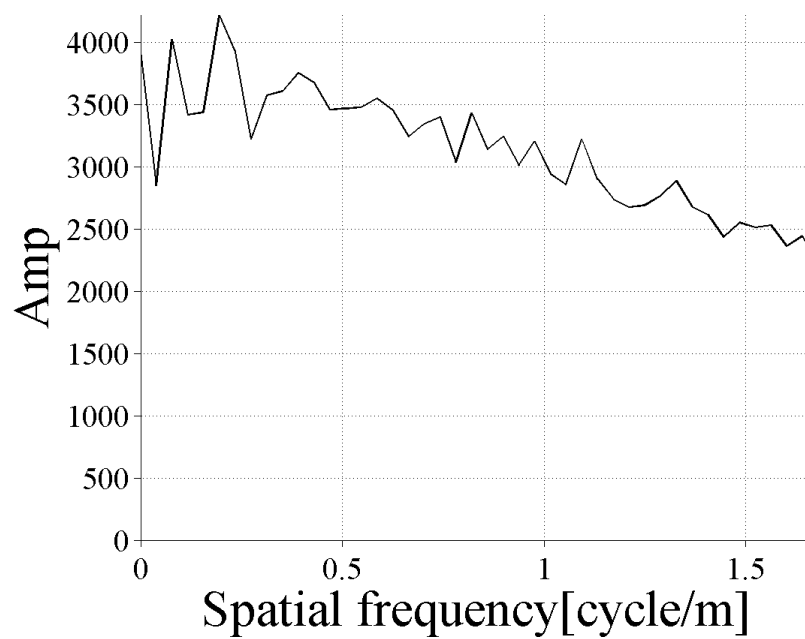


Fig.2- 10-e) Histogram of  $\theta_R$  (Data1)



**Fig.2- 10-f) FFT result of  $\theta_p$  (Data1)**



**Fig.2- 10-g) FFT result of  $\theta_R$  (Data1)**

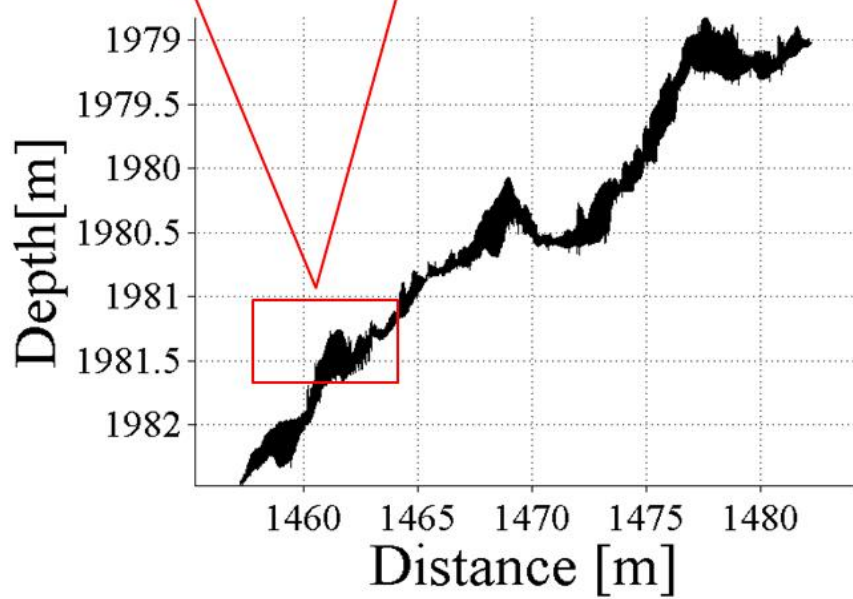
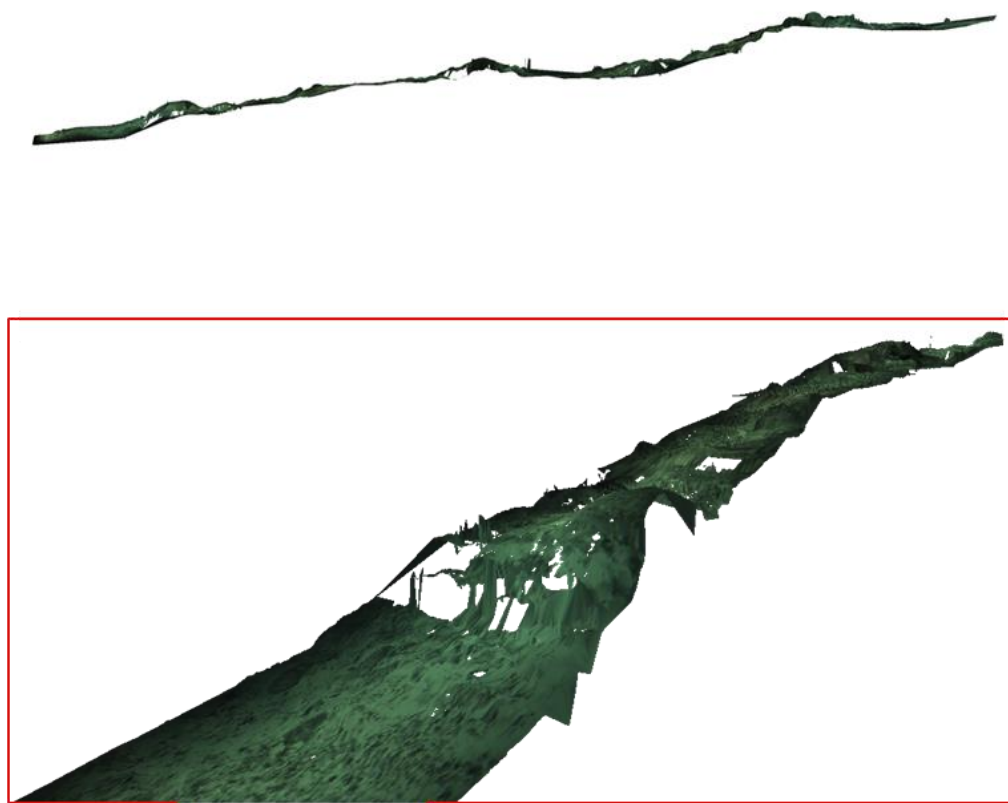


Fig.2- 11-a) Mapping data of Data2

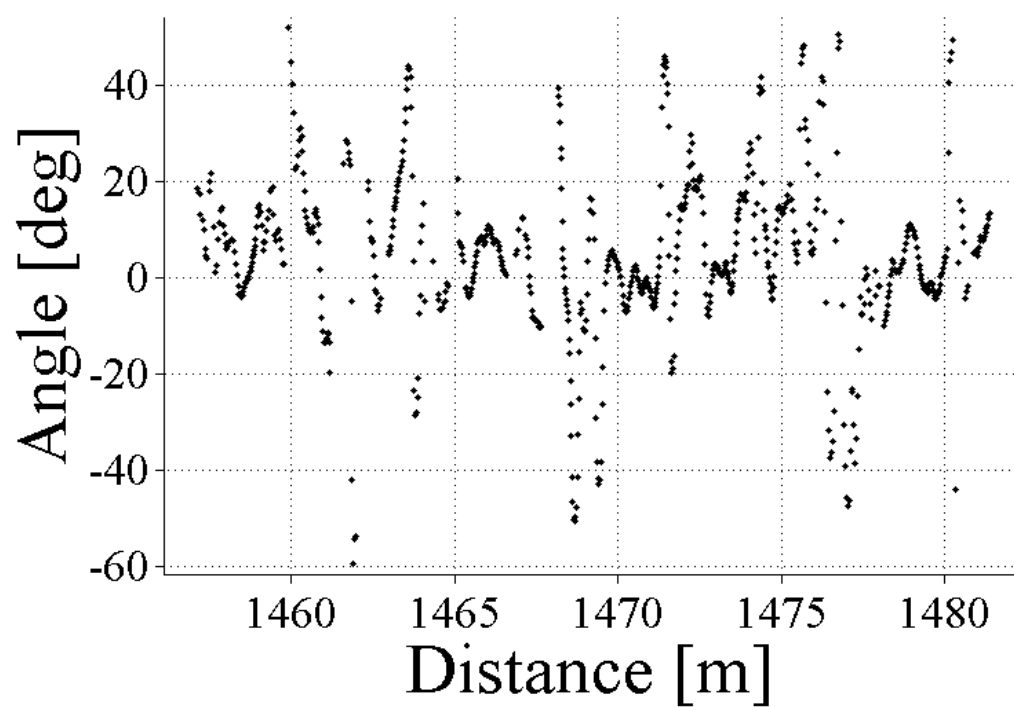


Fig.2- 11-b)  $\theta_P$  calculated by SVD (Data2)

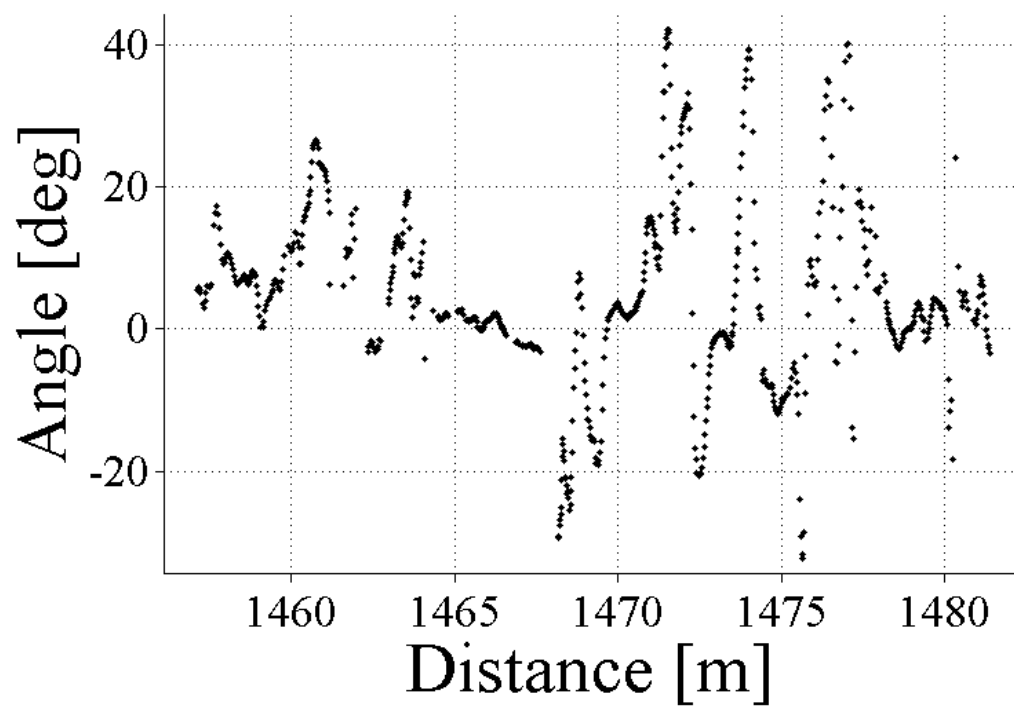


Fig.2- 11-c)  $\theta_R$  calculated by SVD (Data2)



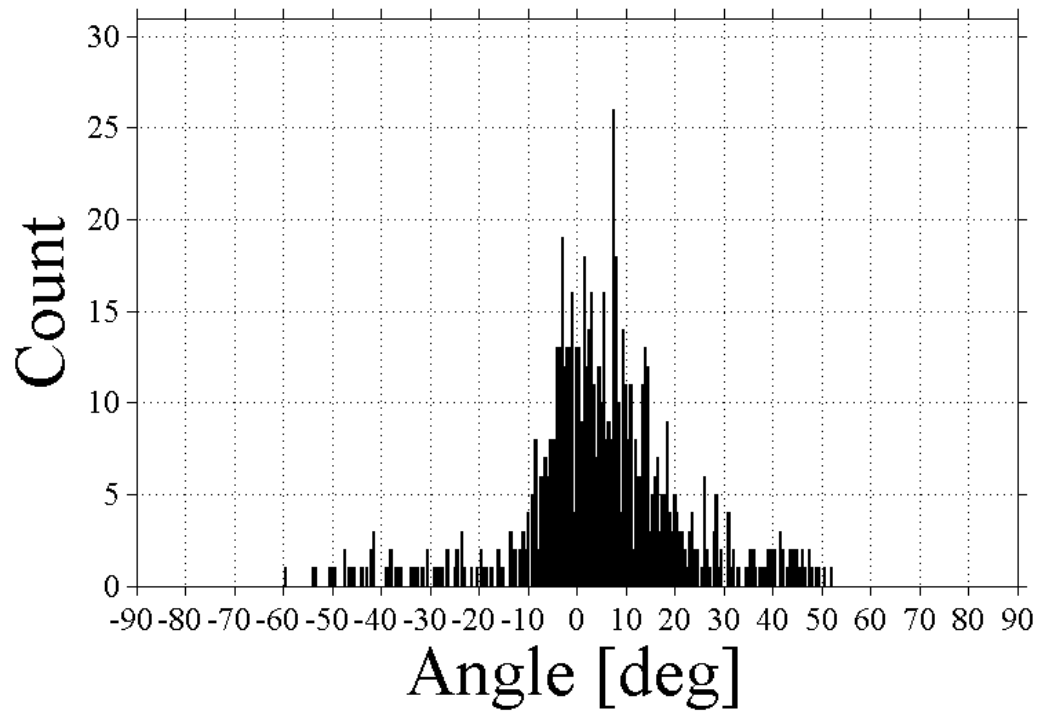


Fig.2- 11-d) Histogram of  $\theta_p$  (Data2)

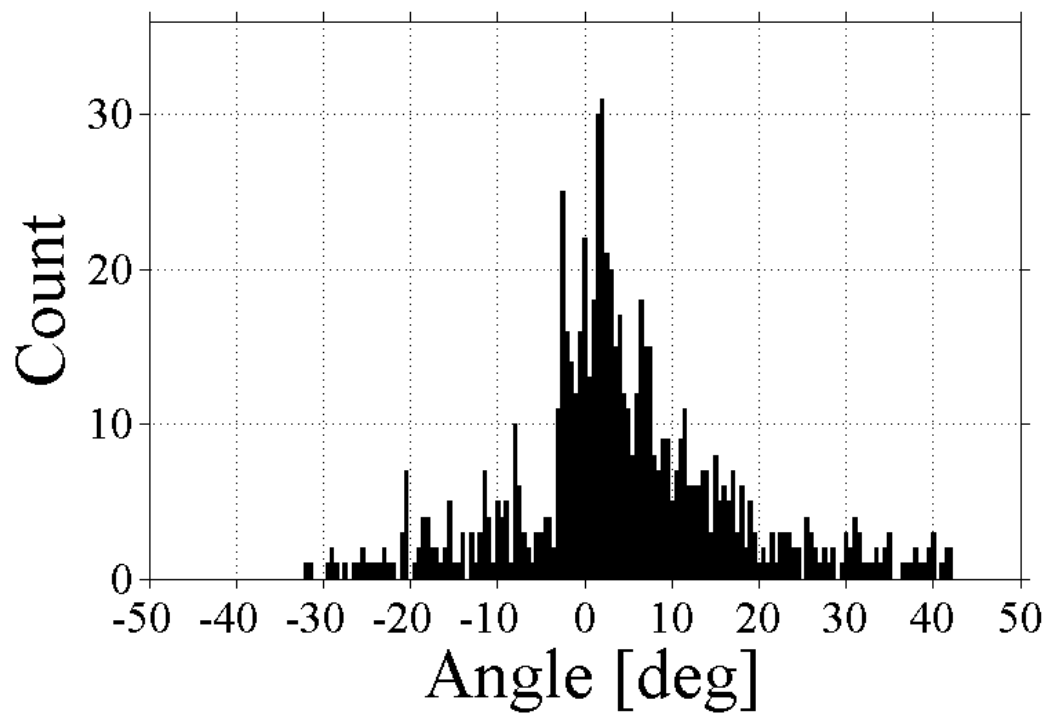


Fig.2- 11-e) Histogram of  $\theta_R$  (Data2)

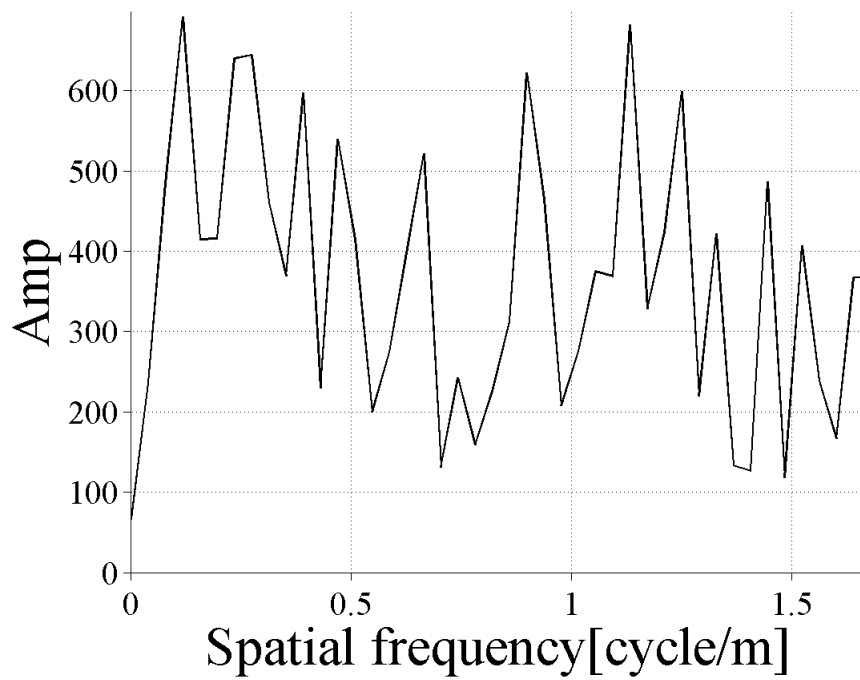


Fig.2-11-f) FFT result of  $\theta_p$  (Data2)

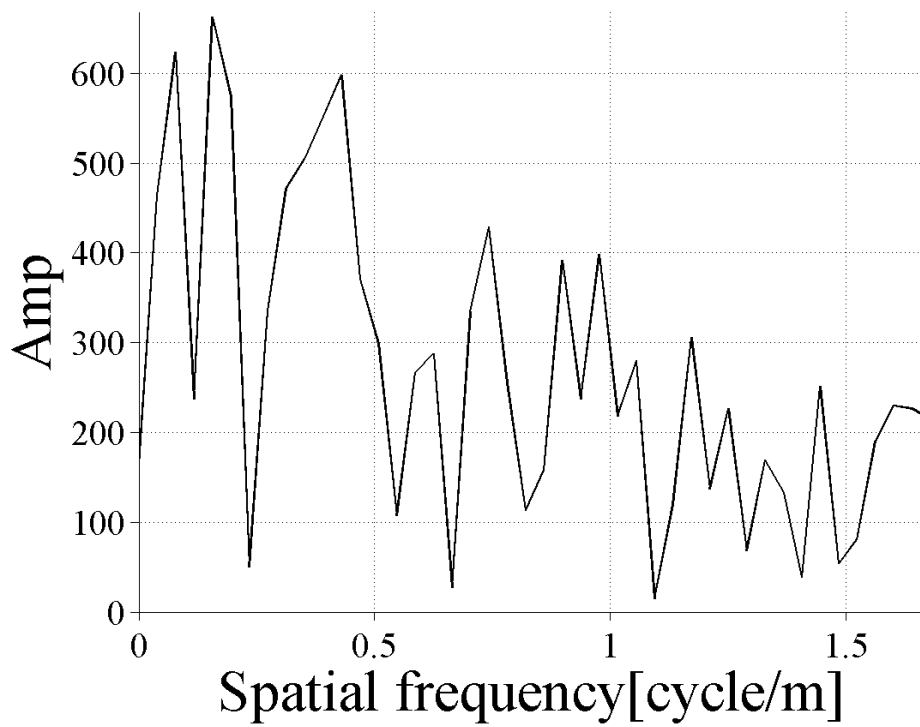


Fig.2- 11-g) FFT result of  $\theta_R$  (Data2)

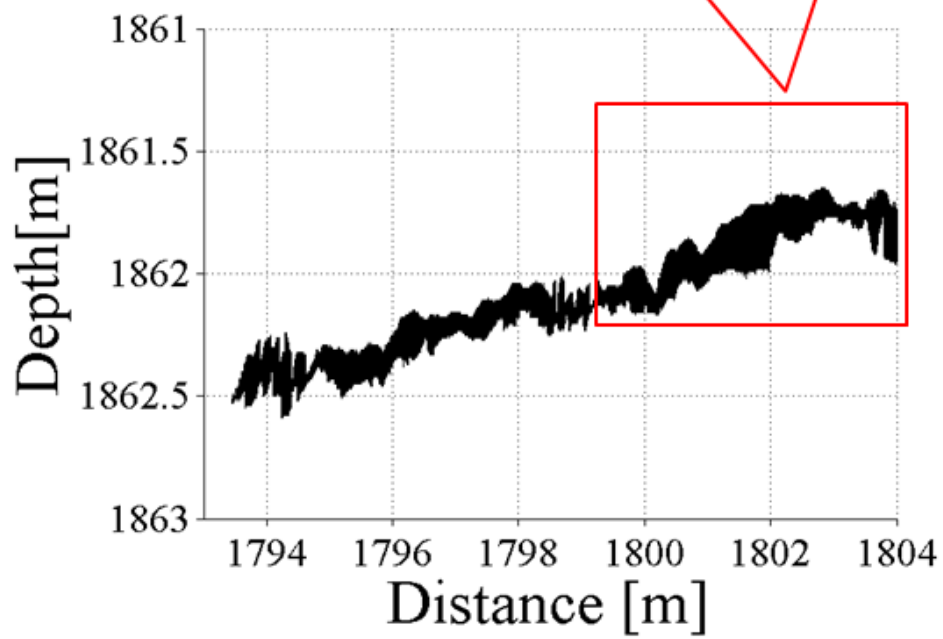
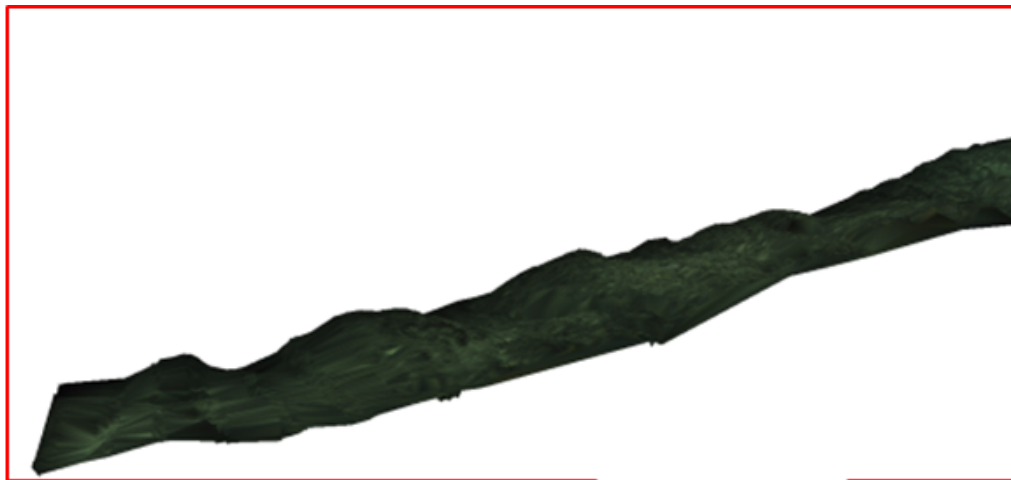


Fig.2- 12-a) Mapping data of Data3

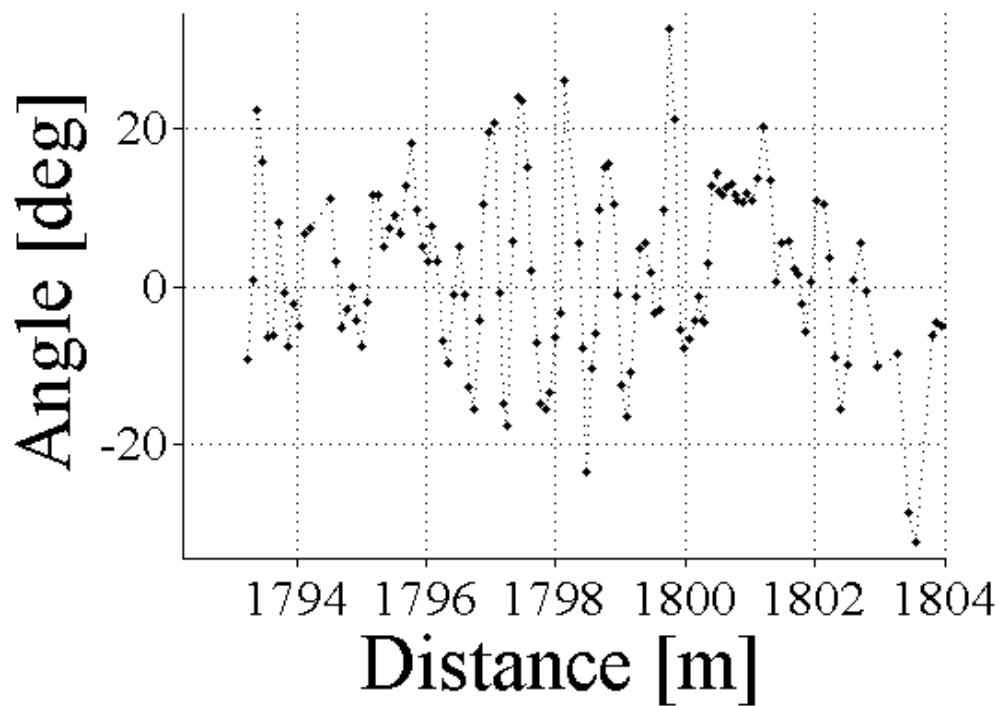


Fig.2- 12-b)  $\theta_P$  calculated by SVD (Data3)

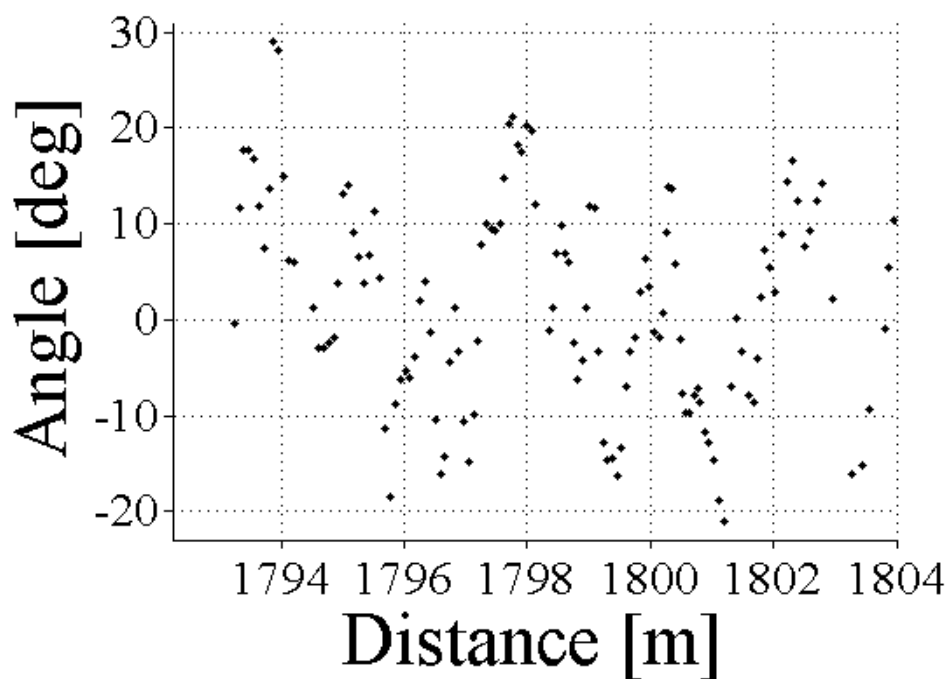


Fig.2- 12-c)  $\theta_R$  calculated by SVD (Data3)

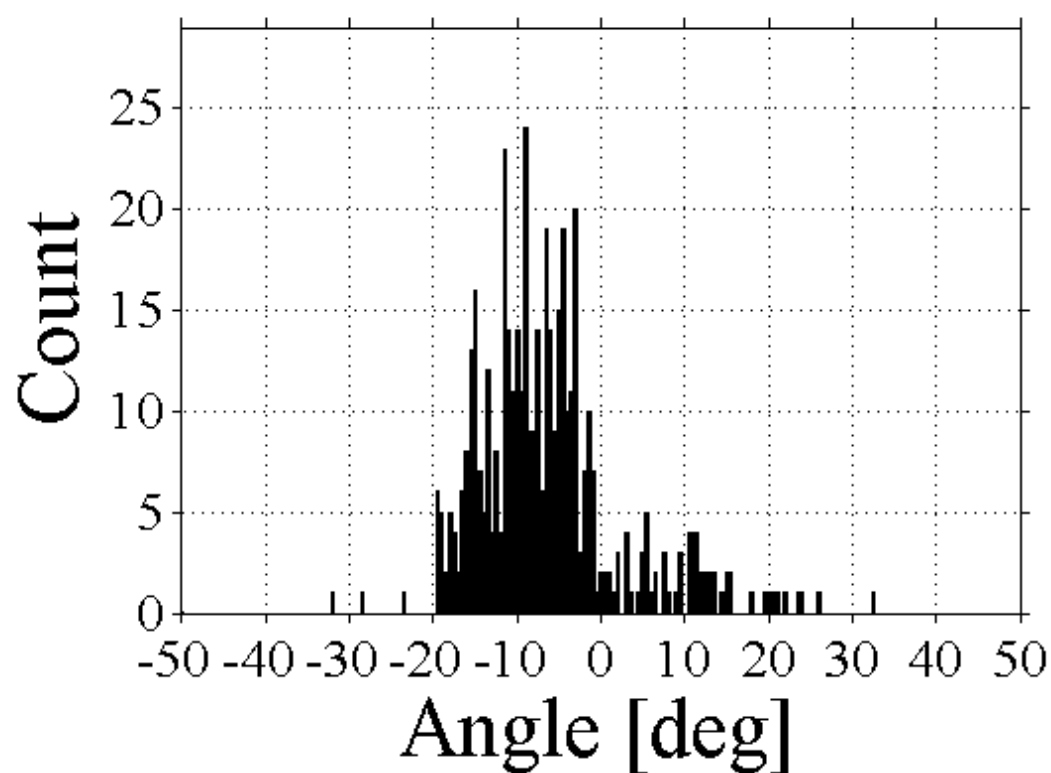


Fig.2- 12-d) Histogram of  $\theta_p$  (Data3)

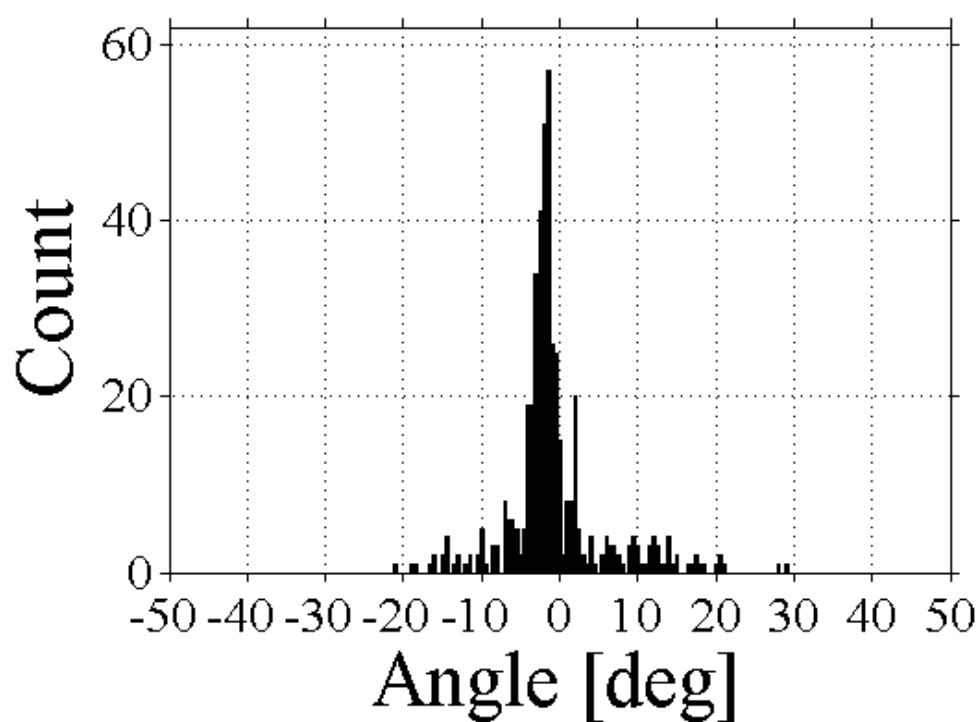


Fig.2- 12-e) Histogram of  $\theta_R$  (Data3)

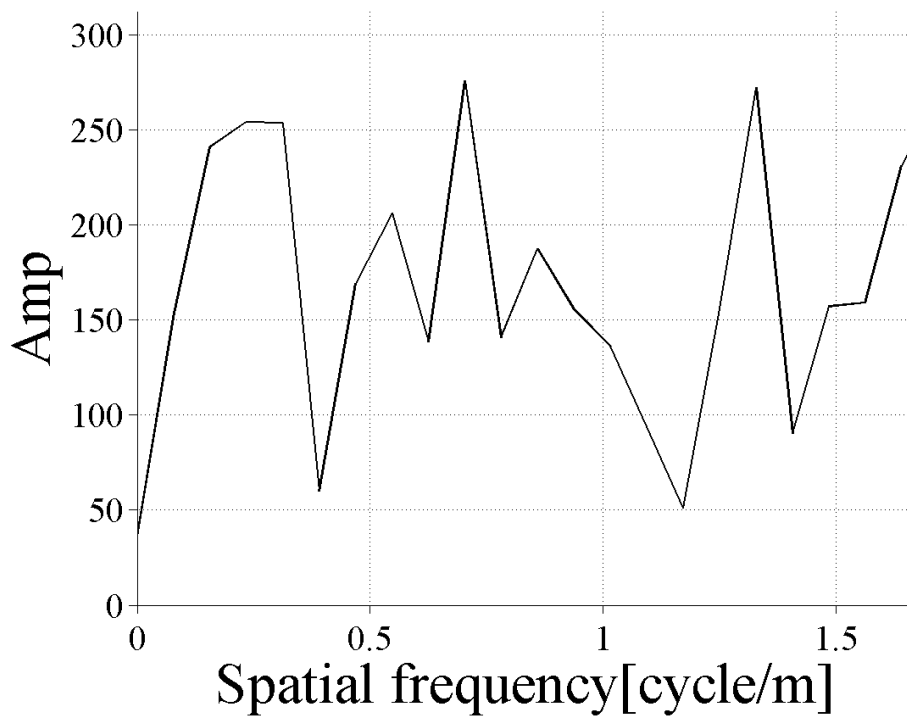


Fig.2- 12-f) FFT result of  $\theta_p$  (Data3)

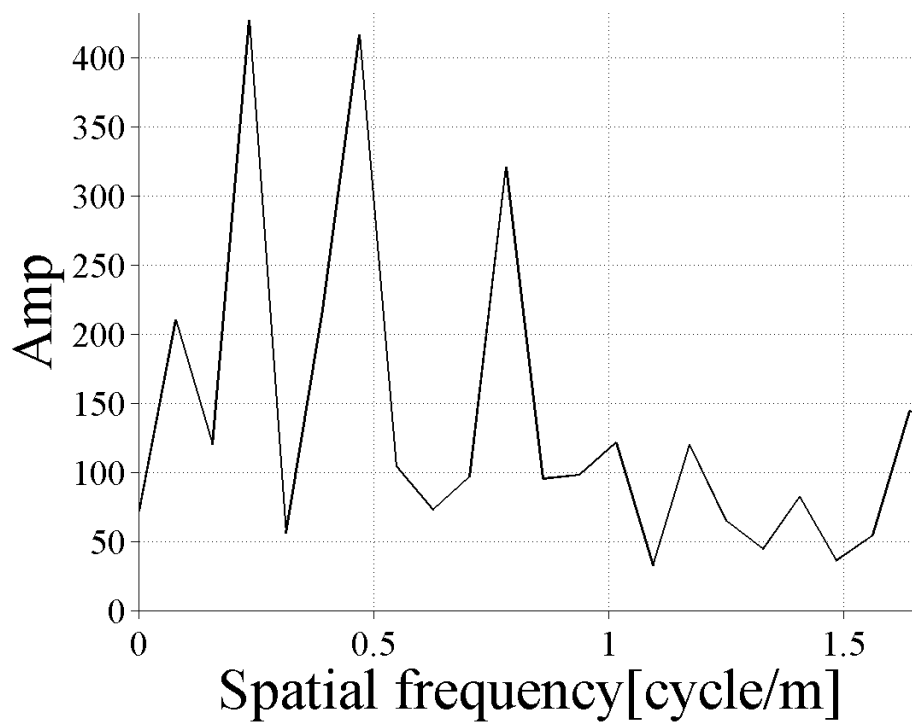


Fig.2- 12-g) FFT result of  $\theta_p$  (Data3)

### 2-3-6. 長距離データ解析

ここまで解析したデータの一部を紹介した。本章で解析したデータは合計 1.3[km]のデータであり、それぞれの傾斜角変化と分布が計算されている。前節では、傾斜角分布を示すヒストグラムを作成したが、これらを 1.3[km]にわたって合計することで、側線の傾斜角分布がわかる。Fig. 2-13 に $\theta_P$ 、Fig. 2-14 に $\theta_R$ の分布を示す。これより、 $\theta_P$ は 10[deg]程度の傾斜が最も多く、-5 から 30[deg]程度の変動が存在する。 $\theta_R$ については、-7[deg]程度の傾斜が多く、-20 から 0[deg]程度の変動が確認された。この差は、調査した測線が等深線を登る形になっていた事を表しているが、今後の同様な調査測線が使われることが考えられているため、本分析で得られた結果を基に、開発する制御システムのスペックを決めることができる。

### 2-3-7 考察

Fig. 2-13, Fig. 2-14 より、SeaXerocks によって得られる点群データから、マンガナクラスト海域における傾斜角情報を統計的に分析することができた。得られたデータから、ロボットの進行方向における  $\theta_P$ 、及び直角方向の  $\theta_R$ についても、距離に対する変動は大きいとわかる。なお、今回分析したデータでは、海山の尾根を等深線に直行するような測線を選択したため、理想的には  $\theta_R=0$  となるはずである。しかし、それでも  $\theta_R$ の影響があるため、調査するロボットの運用手法のみで、超音波を直角に入射させる事は困難であることがわかる。音波進行方向のベクトルと海底面の法線ベクトルとの間の角度差を埋めるには、音響プローブ制御は  $\theta_P$  方向、 $\theta_R$  方向の 2 軸で行う必要性が示された。また、長距離データの解析により、各々の傾斜が $\pm 35\sim 40$ [deg]程度の分布があるため、対応するにはジンバル機構が物理的に稼働可能である必要がある。特に先述した通り、オペレーションの問題から、ロボットは海底を登るように計測をするため、 $\theta_P$ の傾斜角変化が入射角に与える影響がお大きいと考えられるため、次の 3 章では、2 軸制御に必要な性能に着いて考察し、具体的にその性能を満たすための制御アルゴリズム及びハードウェア開発を紹介する。

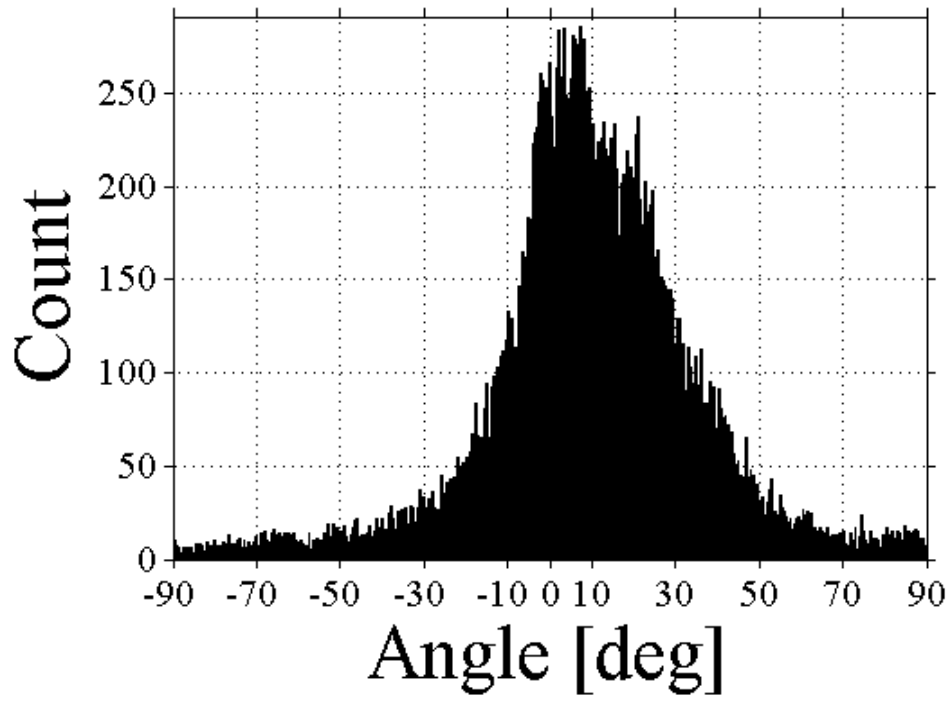


Fig. 2-13 Histogram of  $\theta_p$  (1.3km mapping data).

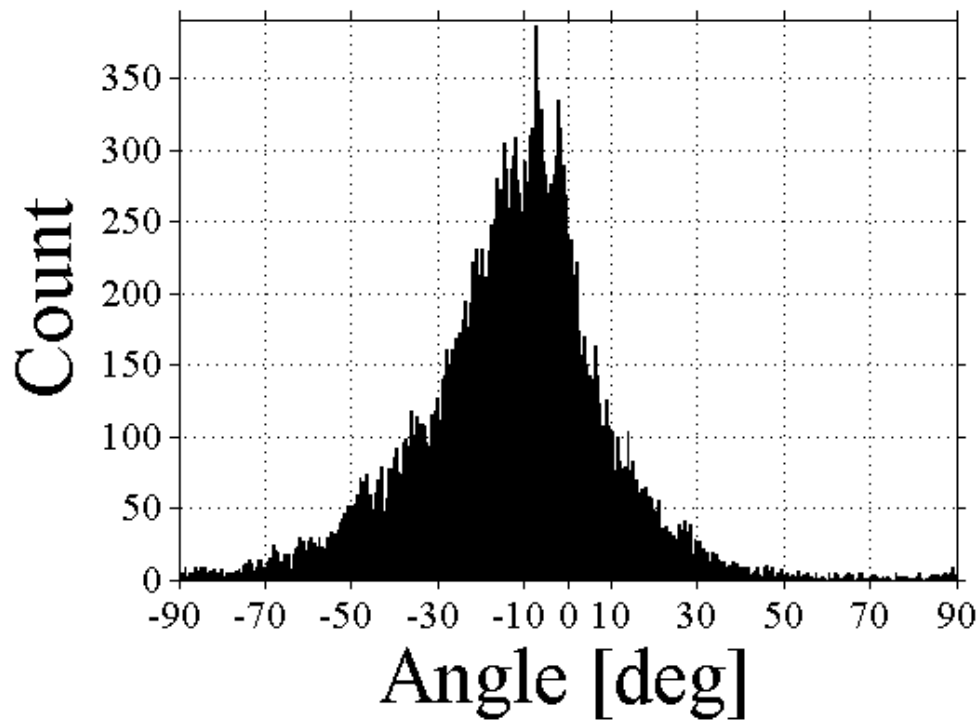


Fig. 2-14 Histogram of  $\theta_R$  (1.3km mapping data).



## 3 制御アルゴリズムと開発したセットアップ

### 3-1. 本章の概要

2章において、傾斜地において、超音波を海底面に直角に入射するには、2軸の制御が必要である事を示した。本章では、実環境で海底の傾斜に追従するための、より詳細なパラメータを把握すると同時に、具体的な制御システムを開発する。本章では、本研究の目的である入射角制御システムの詳細について説明する。海底面の傾斜角情報を得るためには、ロボット底面の複数点から海底面までの距離を計測する必要がある。本システムでは上記の音響装置、マッピング装置に加え、ロボットの前後に測距デバイスを搭載する。入射角制御には、ロボットから見た海底面の相対的座標をリアルタイムで読み取り、ジンバルの動きへと反映させる必要があるため、海底面傾斜変化の解析結果を踏まえた制御アルゴリズムの開発が必要となる。

### 3-2. アルゴリズムの満たすべき条件と、手法概要

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  $\theta_P$ 、 $\theta_R$  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、傾斜角の計算には海底までの距離を計測して近似面を作成することで達成できる。まず、ナビゲーションデバイスとして使用している DVL から算出する手法が考えられる。DVL では、合計 4 つの音響ビームを、ロボット座標系の  $z$  方向から  $30^\circ$  の角度で、ロボット進行方向に対して  $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $315^\circ$  の海底面に向けて発振し、海底面反射時間を測定できる。よって、海底の相対座標を 4 点計測できるため、傾斜角を算出することができる。しかしながら、ビームの進行角度は固定であり、海底からの高度によって近似面の大きさが変化してしまい、傾斜角読み取り精度がリアルタイムに変動してしまう。よって、より安定的に算出する手法として、3D マッピングデバイスの適用が考えられる。

NT12-05 航海で用いた、SeaXerocks 装置は 1[cm]より細かい分解で海底の 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と考える。また、音響プローブよりも前方に取り付けて、自動制御アルゴリズムに利用することで、優れた入射角制御が行える可能性がある。しかしながら、SeaXerocks が取得する点群データは、DVL でロボットの状態を更新される 0.2 秒周期中に 3840 点以上計測される

ため、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。リアルタイムで安定的に動作させるには、処理量の少ない、すなわち少ない情報から傾斜角を読み取って制御するアルゴリズムでなければならない。

ここで、本研究で開発するアルゴリズムでは、音響プローブの前方に、SeaXerocksと同様に光切断法で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、レーザーライン上全ての点の座標を計算すると、処理量が増えてしまうため、検出したレーザーラインを2等分し、各々のセントロイド（面積の中心）の2点を選択し、それらのみの座標を計算する。この場合、ロボットの推進方向に直行した2点が算出されるため、 $\theta_R$ の情報は得られるが、 $\theta_P$ の情報を取得することができない。このため、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。Fig. 3-1にアルゴリズムの模式図、Fig. 3-2にフローチャートを示す。なお、本システムでは、音響レンジセンサとして、調査に用いるロボットにすでに搭載されているDVL(ドプラー式対地速度計)が計測するレンジデータを用いる。DVLでは、合計4つの音響ビームの海底面反射時間の平均値を用いて距離を測定する。

レーザーとDVLのベースラインを大きくすることによって、高精度でロボット直下の海底面の平均的な傾斜を算出することが可能である。しかし、第二章の解析によって、海底面の傾斜角が $\theta_P$ 方向、 $\theta_R$ 方向共に1 m以内の距離で変動することがわかった。上記の処理量の少ないアルゴリズムは、ロボット直下の近似面を基に制御するため、距離による傾斜の変動量を考慮しなければならない。大きな面で近似するほど、海底の細かな地形に対応できないため、近似する面積を小さくする工夫、例えば、DVLとレーザーの距離を近づける、代表点間の距離を小さくすることが考えられる。しかしながら、近似する面を小さくした場合、傾斜を読み取った場所に音波を入射させることが困難となる。さらに、各レンジセンサにおけるノイズの影響が増加する可能性がある。よって、第二章で行った傾斜角解析によって、妥当な大きさを導き出す。

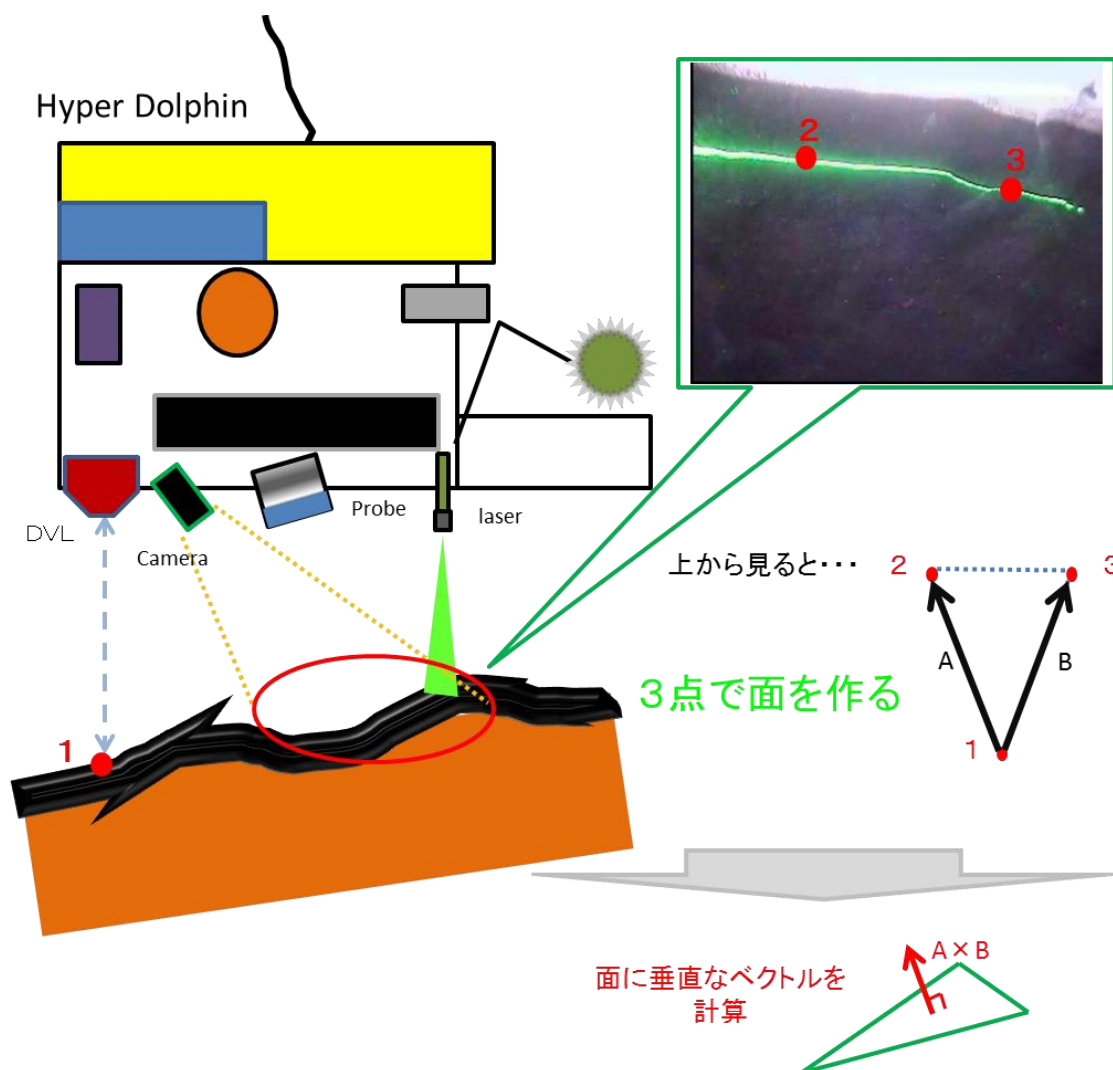


Fig. 3-1 Illustration of realtime seafloor slope measurement algorithm

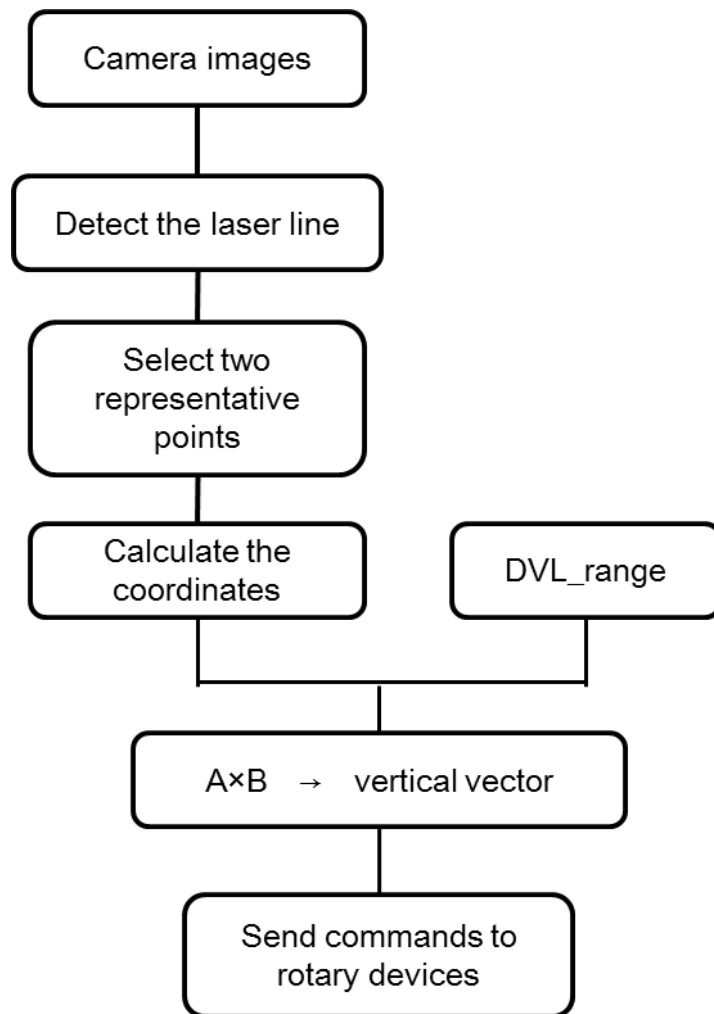


Fig. 3-2 Flow chart of realtime seafloor slope measurement algorithm

### 3-3. 制御アルゴリズムについて

#### 3-3-1 ベースラインについて

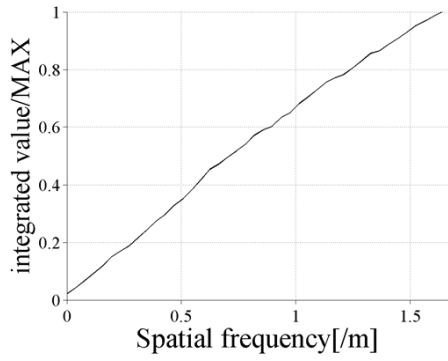
開発した処理量を抑えた制御アルゴリズムでは、まず、システムの前方に取り付けたカメラとシートレーザーから光切断法で海底面座標を取得するが、レーザーライン上の全ての点を計算せず、2つの代表点を選出して計算することで、計算量を大幅に削減した。2点の情報では  $\theta_R$  の角度情報しか計算出来ないため、後に取り付けられた測距装置から海底面からの高度情報を取得し、リアルタイムに海底面傾斜角度を計算、ジンバルの制御に反映するアルゴリズムを開発した。

傾斜を計測する3点を取得するには、 $\theta_P$  と  $\theta_R$  を算出するため、3点の間にある程度のベースラインを設ける必要がある。ベースラインが大きい程、高精度な近似面が形成されると考えるが、一方では細かい凹凸を追従することができないため、トレードオフとなる。妥当なベースラインを決めるにあたり、海底面の傾斜の変動を調べた。ここで、

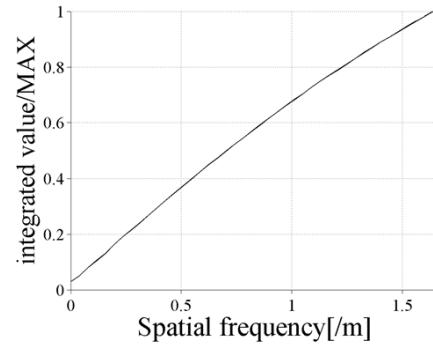
第二章で算出した、海底傾斜変化の FFT 結果 Fig. 2-10~2-11 の f) と g) を参照する。この結果において、ベースラインとして決める空間周波数以下の面積の、全体の割合を見ることで、そのベースラインが何%の傾斜変化に対応できるか判断することができる。どれぐらいのピークを含むかを調べるため、FFT 結果を 0[cycle/m] から積分し、空間周波数が 1.67[cycle/m] までの積分値で全体を割り算した値を縦軸として示した図が Fig. 3-3-a), b), Fig. 3-4-a), b), Fig. 3-5-a), b) となる。Fig. 3-3 が第二章での Data1, Fig. 3-4 が Data2, Fig. 3-5 が Data3 の計算結果であり、各々の a) は  $\theta_P$  の、b) は  $\theta_R$  の結果を表す。縦軸の値が、そのまま対応できる海底の傾斜割合である。

$\theta_R$  のベースラインに関しては、高度 2m で計測する場合、レーザの水中画角は  $64^\circ$  程度であるため、左舷、右舷側の中心点の距離がおおよそ 1.2[m] になるため、約 40~60% の海底面に対応することが可能（空間周波数: 0.42[cycle/m] の値を読み取った）であることが、Fig. 3-3- b), Fig. 3-4- b), Fig. 3-5- b) から読み取ることができる。また、 $\theta_P$  に関しては、ベースラインは DVL~シートレーザ一間の距離になるが、 $\theta_R$  と同様 1.2[m] 程度の長さの場合 40% ほどの傾斜に対応できることがわかる。

また、第二章で述べたように、拓洋第五海山で 3D マッピングを行った NT12-05 航海では、 $30^\circ$  以上の急斜面においても多くのマンガングラストが確認されていたため、 $30^\circ$  以上の駆動が必要だと考えた。ロボットは斜面を登りながら計測する調査を想定し、さらに遠隔操縦式のロボットを用いた調査では進行方向へのピッチが多く見られることから、 $\theta_P$  の方が大きな稼働範囲が必要であると考えた。したがって、作成したセットアップではロボットの Pitch 方向に  $\pm 45^\circ$ 、Roll 方向に  $\pm 30^\circ$  可動するセットアップを開発した。

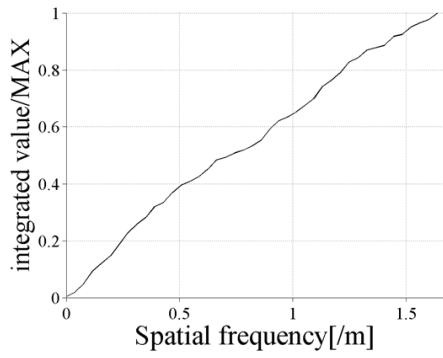


a)

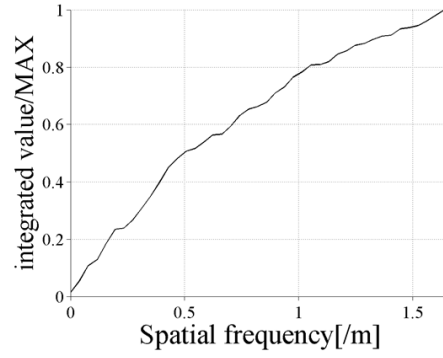


b)

**Fig. 3-3 a) Integration of  $\theta_P$  spectrum in Fig.2- 10-f), b) Integration of  $\theta_R$  spectrum in Fig.2- 10-g)**

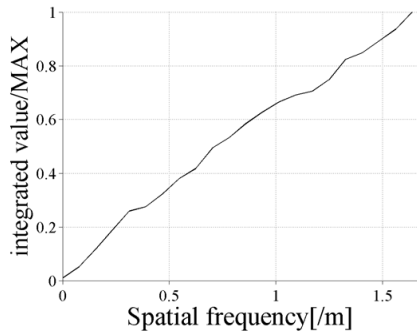


a)

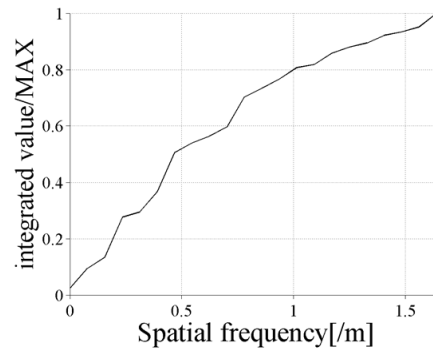


b)

**Fig. 3-4 a) Integration of  $\theta_P$  spectrum in Fig.2- 11-f), b) Integration of  $\theta_R$  spectrum in Fig.2- 11-g)**



a)



b)

**Fig. 3-5 a) Integration of  $\theta_P$  spectrum in Fig.2- 12-f), b) Integration of  $\theta_R$  spectrum in Fig.2- 12-g)**

### 3-3-2. 光切断法による前方座標の算出方法

プローブより前方の情報は、海底面に照射したシート状に投影するレーザーをカメラで撮影し、映像からレーザーの線を抽出、その後レーザー線上の点の海底面座標を三角計算によって算出する手法、光切断法によって行う。選択の理由として、

- ① 高精度な情報を取得可能である点、
- ② 後処理によって海底面の 3D マッピングに必要な情報も同時に取得できる点が挙げられる。光切断法では、カメラ画像のレーザーライン上の点全ての座標情報を取得可能なため、高精度に傾斜角を算出可能だと考えられる。

### 3-3-3 光切断法の原理

本システムにおいて採用した測距法である光切断法の原理を以下に説明する。光切断では、ライン状に投影したレーザー光を、斜めから撮影することによって形状を計測する手法である。本研究で用いるレーザーは、Diode Laser Concepts 社の 200[mW]、90°ファンアングル 532[nm]のグリーンレーザーである。なお、532[nm]では水の屈折率は 1.33 であるため、水中でのファンアングルは 64° 程度である。カメラ画像より、レーザー領域を自動認識する必要がある。

本システムにおいて採用した測距法である光切断法は、シートレーザーとカメラを使用し高精度な座標を得ることができる[16],[29]-[35]。以下に、原理を説明する。

計算にあたり、3つの座標系を使用するため、ここに定義する。(Fig.3-6 参照)

- ① DVL 座標系・・・DVL を原点とし、ロボット前方方向を X 軸とした右手系
- ② カメラ座標系・・・DVL 座標系の原点を、カメラ取り付け位置へ移動させた座標系
- ③ カメラ内部座標系・・・CMOS センサの中心を原点とした座標系 (Fig3-7 参照.)

座標を計算したい海底面上の点を P とする。

P は、カメラ画像内にて抽出したレーザーライン上の 1 点として検出される。この座標を、原点を画像の左上とした座標系において(u,v)とすると、カメラ内部座標系で表した座標は(uc,vc)は以下のように表される。

$$uc = u - middleImageX \quad (3.1)$$

$$vc = v - middleImageY \quad (3.2)$$

また、Fig.3-8のように $k_{water}$ を定義すると、カメラ内部座標系 (3-9Fig.参照) において検出したレーザーライン上の点への方向ベクトルを以下の様に表すことができる。

$$Rc_{in} = (uc, vc, -k_{water}) \quad (3.3)$$

次に、カメラ内部座標系であるRcを、カメラの取付角度 $\theta$  (DVL座標系におけるY-Z平面の角度)、 $\theta$  (DVL座標系におけるZ-X平面の角度)、 $\varphi$  (DVL座標系におけるX-Y平面の角度)で回転させることで、カメラ座標系へと変換する。角度 $\theta$ の回転行列を以下に示す。

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

最後に、DVL座標系へと平行移動させれば、DVL座標系における方向ベクトル $V_{DVL}$ を得る。

また、DVLからシートレーザー間の距離 $t$ は一定であり、かつ既知なため、以下の式でDVL座標系における $P$ の座標値を計算することができる。

$$\mathbf{P} = \mathbf{t} * \mathbf{V}_{DVL} \quad (3.5)$$

### 3-3-4 Greenness

測距用のカメラ画像について、レーザーラインを検出するため、OpenCVを用いた画像処理を行った[36]-[38]。まず、画像全体の色空間をRGBからYCbCrへと変換する。YCbCr色空間では、緑はCbCr共に130以下の領域に存在する。これを利用し、以下の条件で新しいパラメータGreennessを定義する。Fig. 3-10にフローチャートを示す。

Greennessは、YCbCr空間において緑領域における度合いを示す。Yの値が固定されている場合、Cb、Crが共に小さいほど緑領域に近づくため、片方でも大きい場合はGreennessが小さくなくてはならない。よって、Fig. 3-10中の(1)の分岐を計算しGreennessを算出する。また、レーザーラインは、カメラ画像において白色領域

(R,G,B=255)として写る場合があるため、(2)の分岐において一定の輝度値を超えた場合、Greennessの値を小さくする。その後、得られたGreennessの値を閾値で判別し、やすいように任意の定数 $A$ をかけて調整する。全てのピクセルに対しGreennessを算出し、任意の閾値以上を緑領域と認識する。Fig. 3-11は、水中実験で取得されたラインレーザーのイメージとFig.3-10の認識アルゴリズムの解析結果を示す。正しく投影されたレーザーが認識できていることが分かる。



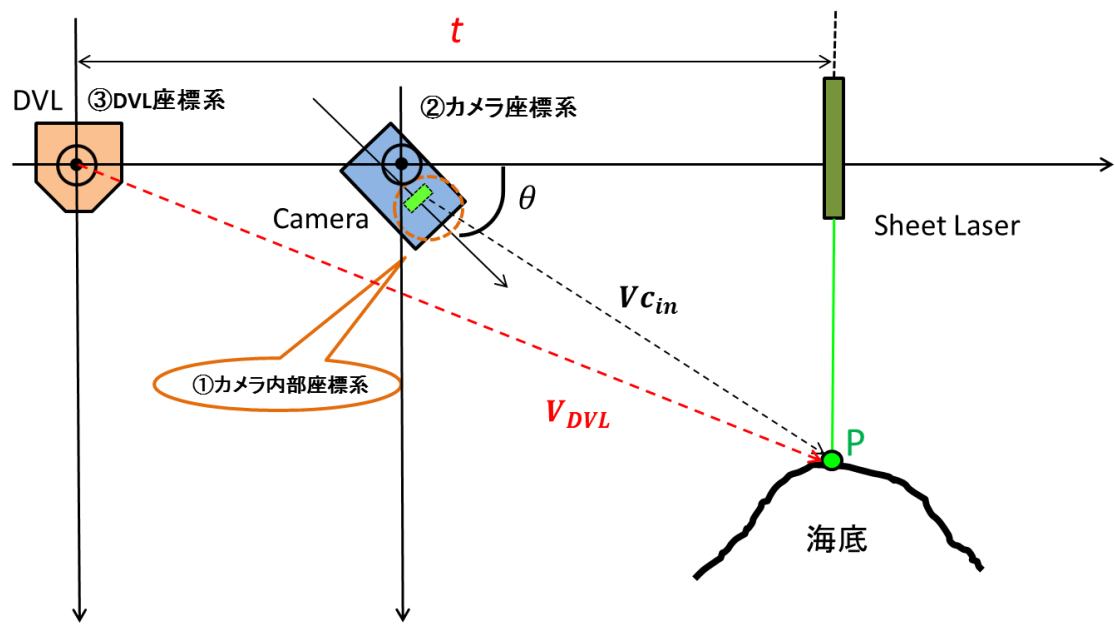


Fig.3-6 Schematic of laser profiling

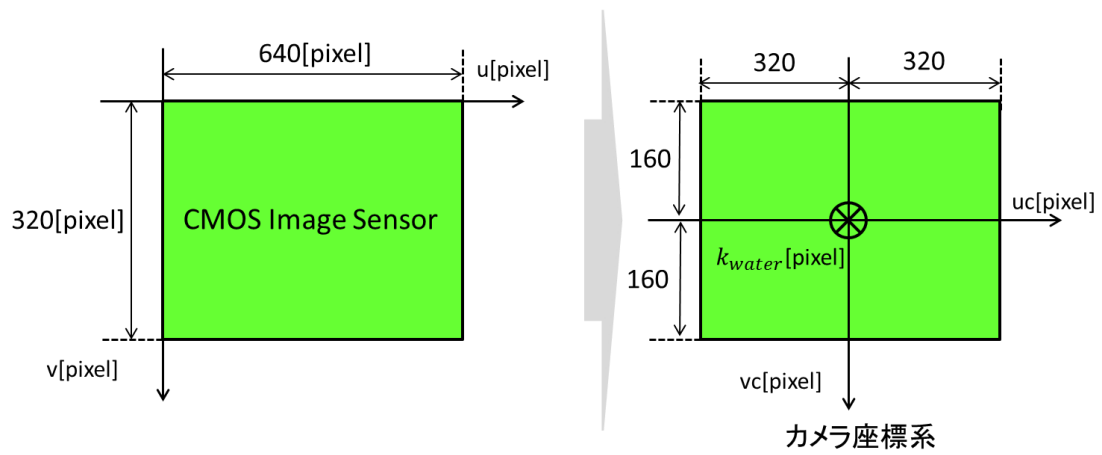
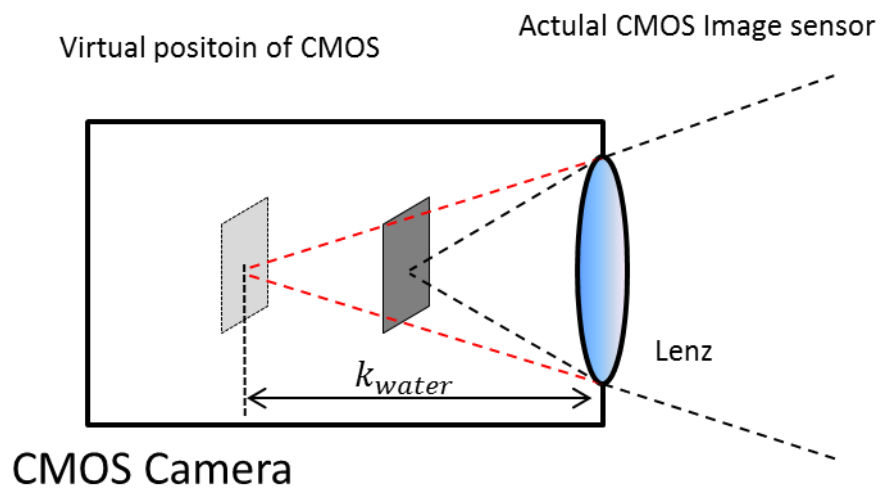


Fig.3-7 Definition of Camera coordinate system



$k_{water}[pixel]$  : The virtual distance between the lens and the CMOS when no correction for Snell's effect is done in water

Fig. 3-8 Definition of  $k_{water}$ .

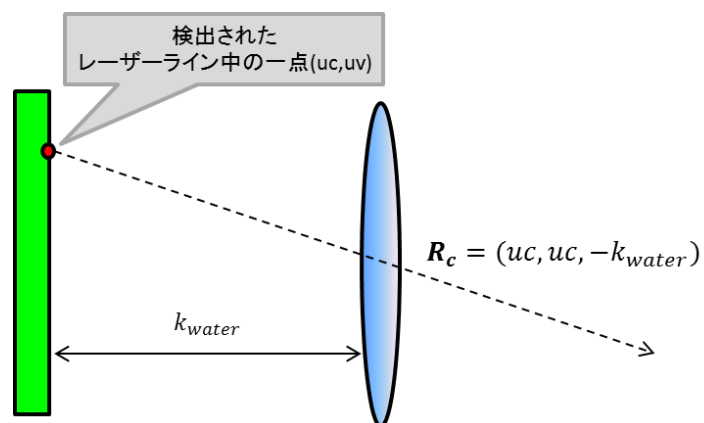


Fig. 3-9 Definition of  $R_c$ .

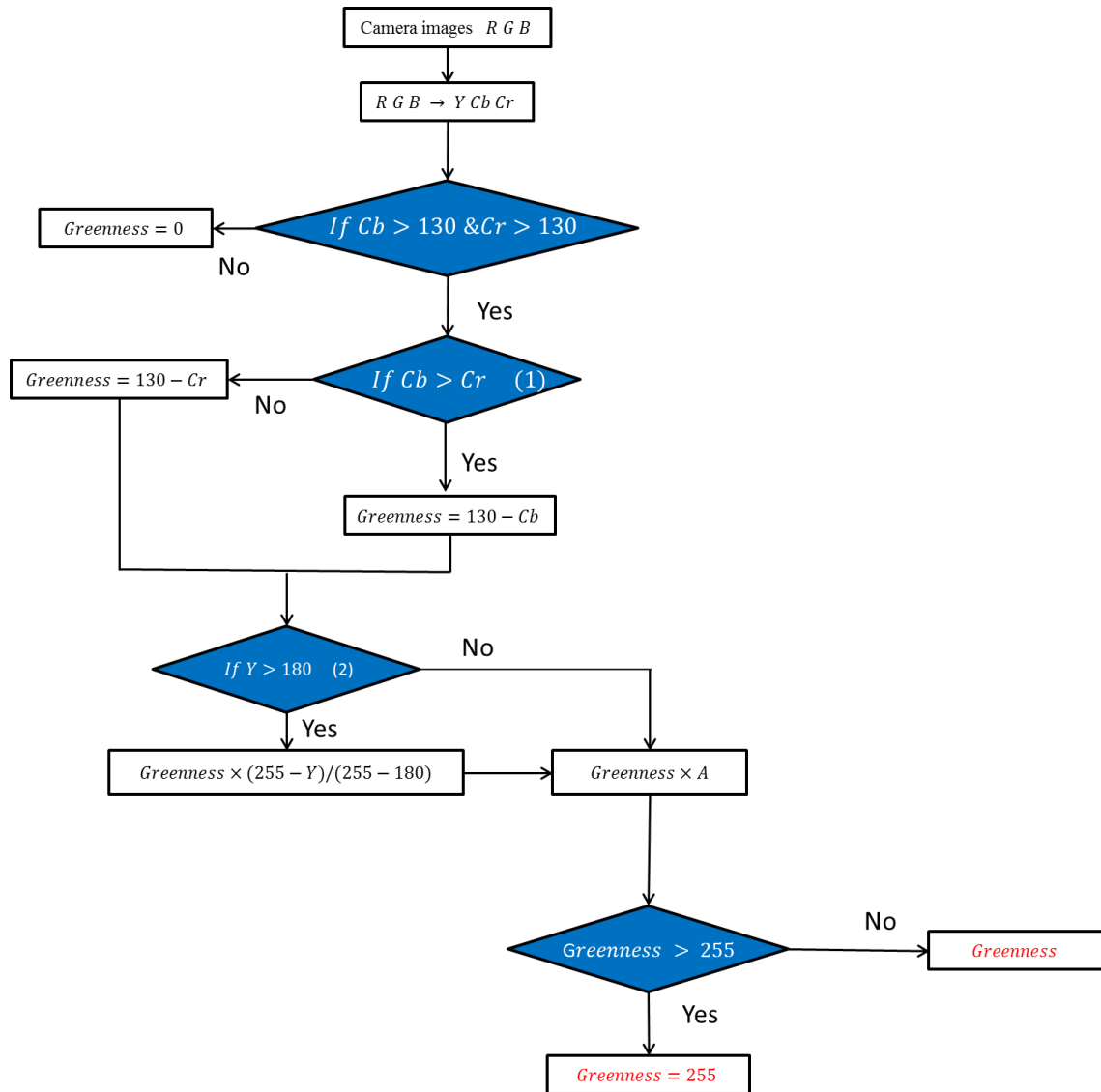


Fig. 3-10 Flowchart of calculating Greenness.

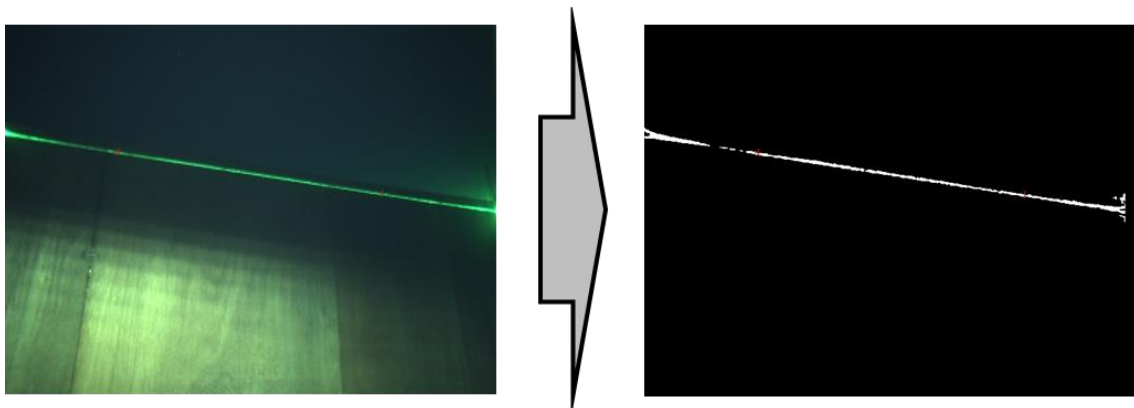


Fig. 3-11 Example of Green line detection algorithm applied to an underwater image

### 3-4. 開発したセットアップ

#### 3-4-1. 全体の構成

現在まで、自動制御アルゴリズムの開発と同時に、音響プローブを取り付けるジンバル機構の設計開発を行った。本研究で開発中の音響計測システムは、独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の海中ロボット、ハイパードルフィンへの取り付けを想定し、ロボットの内部のペイロードスキットに内蔵する形で開発した。Fig.3-12 に、各種機器を搭載したペイロードスキット全体を示す。本システムは、海中ロボット、ハイパードルフィンに搭載することを前提に開発しているため、ハイパードルフィンのペイロードスキット内に各種センサを配置した。スキット内部にはジンバル制御用の PC を搭載し、ハイパードルフィンとは独立して動作する。制御用 PC として、ADVANTEC 社の「PCM-3363」を使用した。Fig. 3-13 に、制御用 PC の構成を示す。耐圧容器に内蔵された PC は、ハイパードルフィンの動作とは独立して制御アルゴリズムを動作させる

#### 3-4-2. ジンバル機構について

設計したジンバル装置を Fig. 3-14 に示す。先述の通り、ジンバルは 2 軸で制御する必要性が示されたため、Fig3-14 に内蔵された 2 つの回転駆動装置、Korgsberg 社の「OE10-102」と「OE10-103」を使用することで実現した。Table3-1 に共通のスペックを示す。回転装置の制御には、備え付けの通信プロトコルを試用した。また、全体の設計図を Fig.3-15 に示す。材質は全てステンレスで作成したため、音響プローブを内蔵した時の重量は、回転駆動装置も含めて 35[kg]程度である。

#### 3-4-3 測距デバイス及び DVL について

使用したカメラは、Point-grey 社の USB カメラ「Firefly」であり、スペックと使用時のパラメータを Table3-2 に示す。 $k_{water}$ については、計測した画角から算出した。

DVL には、TELEDYNE RD INSTRUMENTS 社の「*Workhorse Navigator Doppler Velocity Log*」を使用した。DVL は、下方へ 4 本のビームを発しており、海底面への距離に関してこれら 4 つのビームの平均が高度として出力される。本制御アルゴリズムでは、この高度をロボット後方の海底までの距離として使用する。DVL のビームの周波数は 1200[kHz]であるため、音響プローブの 200[kHz]の 2 次波との干渉の影響は少ないと考えられる。現在まで水槽及び実海域で、DVL～音響プローブ間の距離を 70[cm]程度に配置して動作をしてきたが、干渉は見られなかった。干渉が観測されない原因として、音響プローブは 2[ms]間しか反射を測定しないため、20[Hz]の高周期でマンガンクラストの音響反射を計測するとは言っても 1 秒間で実際に計測しているのは 40[ms]のみであり、4%の時間しか計測していないため、DVL や他の音響機器と干渉する確率が低い。

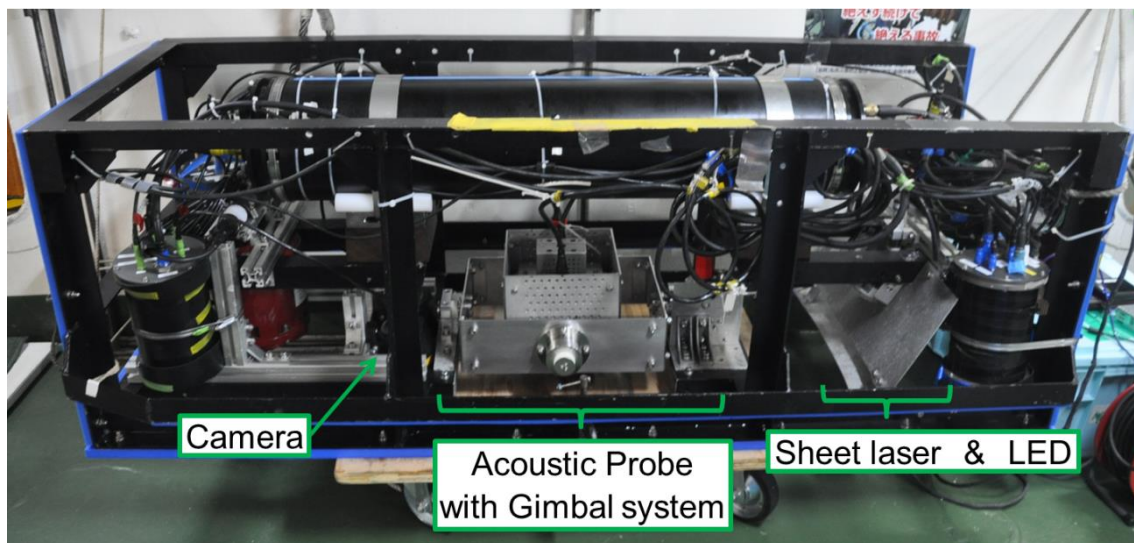


Fig. 3-12 Active gimbal control mechanism (right) mounted on the payload box (left). The sheet laser and the LED panel at the bottom right of the image and one of the cameras at the bottom left of the image are used for the SeaXerocks mapping system

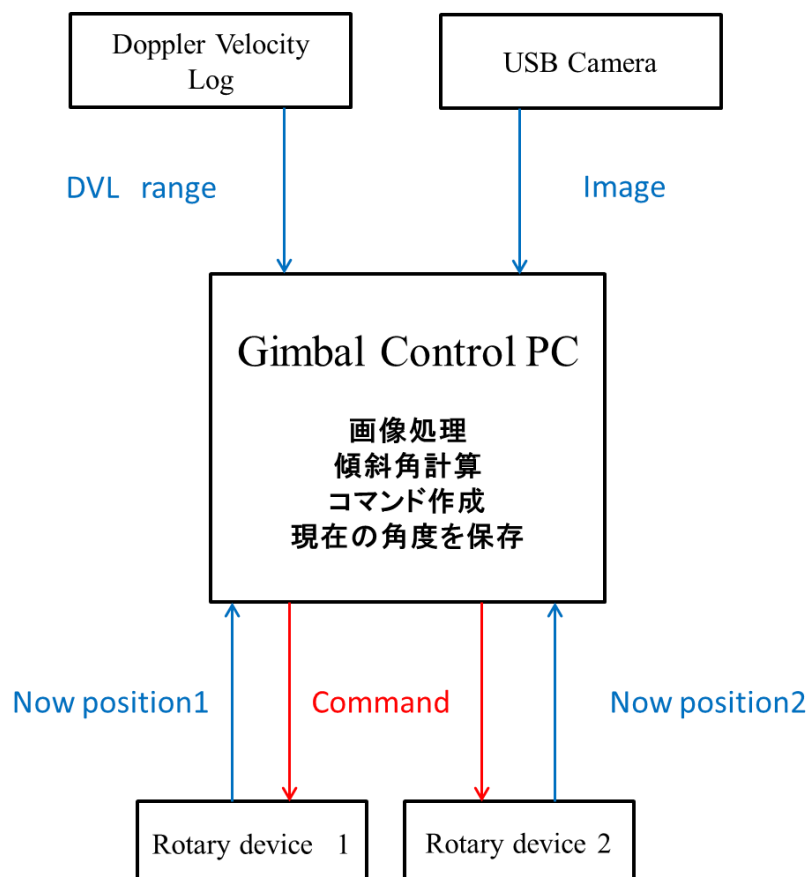
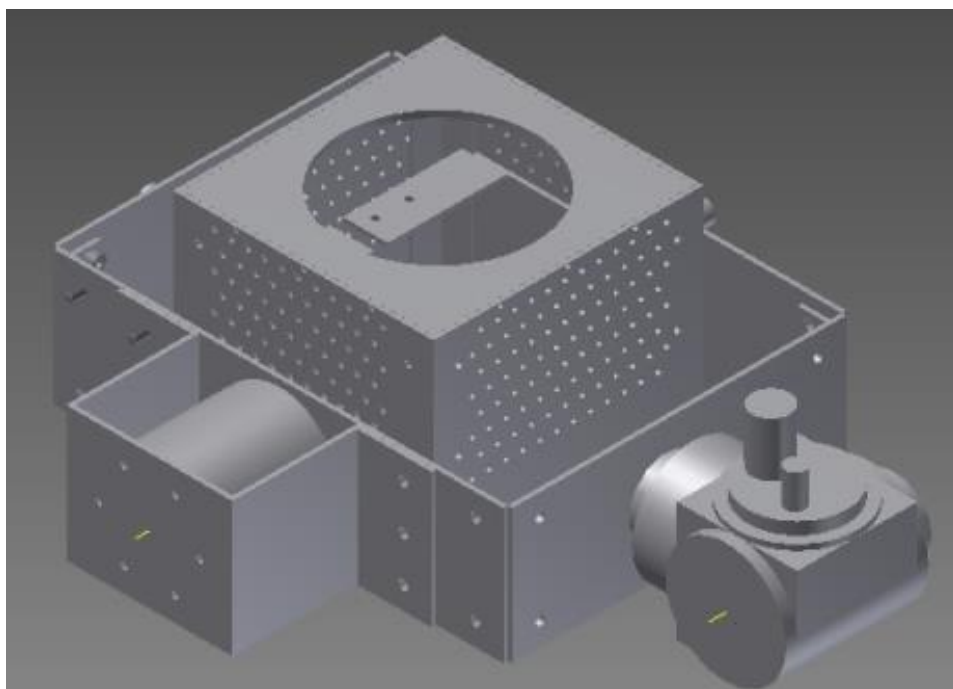


Fig. 3-13 Constitution of PC for gimbal control.



**Fig. 3-14 Double gimbal System**

**Table. 3-1 Rotary device : 「OE10-102,103」**

Max Torque	35[Nm]
Rotary speed	30[deg/s]
Operating Depth	6000[m]
Motor	permanent magnet D.C motor
control method	PID Controller

Table. 3-2 USB camera : 「Firefly」

Baseline between sheet laser and camera	1370mm
Angle of the camera with the vertical	20°
scanning altitude	1.0~2.5m
kwater	489.334pixel
camera resolution	640 × 480

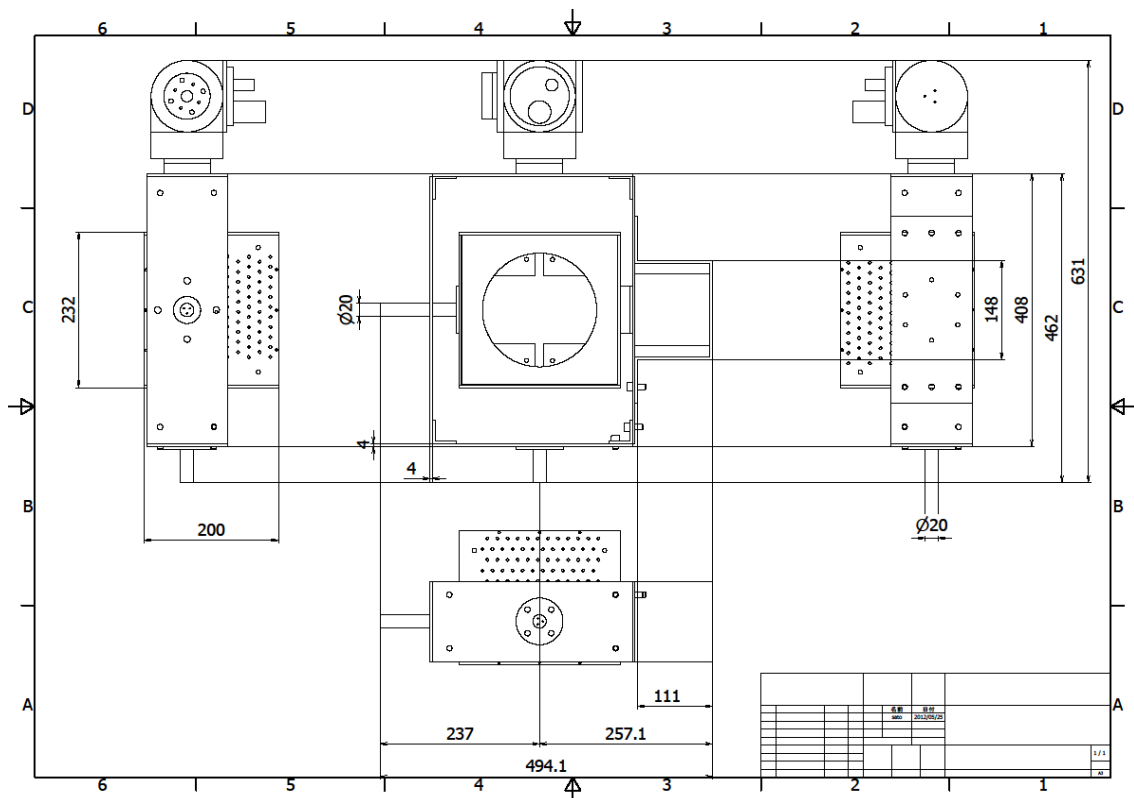


Fig.3-15 Draught of Gimbal system

## 4 水槽実験による制御アルゴリズムの性能評価

### 4-1. 本章の概要

音波の海底面入射角制御システム及びアルゴリズムでは、リアルタイムに海底面の傾斜を読み取り、2方向の傾斜角を算出する。開発したアルゴリズムの有用性を評価するため、東京大学生産技術研究所海洋工学水槽内でハードウェアの動作確認実験を行う。

### 4-2. 水槽実験の目的と概要

水槽実験の目的は、アルゴリズムによって算出された傾斜角の精度、音響データの改善の可否、の2点である。特に、本システムが動作した場合に音響反射強度が増加するかどうか、性能試験として重要なポイントとなる。

音響反射強度を変化させる要因として、ターゲットの音響インピーダンス、ターゲットまでの距離、そして入射角が挙げられる。本実験においては、特に入射角の影響を論点としたいため、淡水と音響インピーダンス差がある素材で計測を行う。また、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の擬似海底面を作成した。斜面の大きさについては、DVLの発する4本のビームが全て斜面に入射するように設計したは10,20,30[deg]の3通りの傾斜角を用意した。Fig.4-1 及び 4-2 に作成した擬似海底面を示す。

本実験では、擬似斜面上で停止した状態で行う①静的実験と、並べられた斜面の上を一定速度で通過させながら行う②動的实验の2種類の実験を行った。静的実験では、各傾斜の上において静止した状態でアルゴリズムを動作させ、傾斜角を読み取る。算出した傾斜角と設計した傾斜角との差から、傾斜読み取り精度を評価する。計測時間は一分で固定した。また、アルゴリズムを動作させると同時にジンバル制御及び音響計測を行う。この音響データと、プローブを真下に向けて固定した場合の音響データを比較することで、音響データの改善が見られるか確認する。また、セットアップを傾斜面の上に静止させる条件を Fig. 4-3 に示す。斜面を登る様に静止した条件ではロボット座標における Z-X 方向の評価、斜面を横目に見る様に静止した条件では Y-Z 方向の評価を行うことができる。

次に、動的实验では、Fig. 4-4 の様に水中に配置された擬似海底面の上を、一定速度で動作させた。本システムを実海域で展開する際は、3D マッピングも同時に行なっているため、約 20[cm/s]一定で計測を行う。よって、移動速度は 10[cm/s]、20[cm/s]、30[cm/s]の3つを行い、実際の移動速度での計測精度を調べると共に、速度が違の場合の精度変化を調査する。



## 4-3. 静止実験について

### 4-3-1 実験結果

アルゴリズムの計測精度について結果を示す。Fig.4-3 の Case1 において、10[deg] 斜面での計測結果を Fig.4-5、20[deg]での結果を Fig.4-6、30[deg]での結果を Fig.4-7 に示す。a)が  $\theta_P$  の計算結果、b)が  $\theta_R$  の結果を表し、横軸を時間、縦軸を計算された角度で示した。Case1 は、斜面の等高線に対して垂直な向きで停止しているため、 $\theta_P$  は斜面の設計傾斜角、 $\theta_R$  は 0 が Ground truth となる。結果として、誤差は $\pm 3$ [deg]以内で計測できていることが確認できる。次に、これらの結果に対し、Ground truth からの差を算出後、階級幅 0.5[deg]のヒストグラムを作成した。これにより、平均値と標準偏差を求めることで計測誤差の分布を確認することができる。なお、計測時間を固定しているため、計測回数はすべての条件において同じ値である。ヒストグラムを Fig.4-8,9,10 に、計測誤差の平均値と標準偏差を Fig.4-11 に示す。平均値については傾斜角によってばらつきがあるが、 $\pm 4$ [deg]程度に収まっている。また、標準偏差はどの傾斜の上でも同程度の値であるため、算出角度が傾斜角によって変化しないことが読み取れる。

Case2 は、Case1 と同じセットアップを用いて、斜面を下る形でシステムが静止しているため、Ground truth は条件 1 の  $\theta_P$  の符号が反転するのみである。Fig.4-12 に、角度誤差の平均値と標準偏差を結果として示す。

Case3 では、Case1、2 の状態から 90[deg]回転し他状態で静止しているため、 $\theta_P$  は 0、 $\theta_R$  は斜面の設計傾斜角が Ground truth となる。計測した結果を Fig.4-13 に示す。作成したグラフは実験条件と同じとした。

Case1,2,3 共通して、計測誤差は $\pm 4$  [deg]以内であることがわかる。また、標準偏差については、共通して 1[deg]以内となっていることも読み取れる。

次に、Case1 において、アルゴリズムの動作と同時に行なった音響計測データを示す。静止実験は、全ての条件において一分間の計測を行ったため、20[Hz]で行った音響計測により 1200 波のデータが得られた。このデータ群に対して、第二章で述べたピーク検出を行い、表面反射強度を検出し、分布をヒストグラムで表した。反射強度は、第二章と同様に、ノイズ強度とのデシベルで示した。結果を Fig.4-14 に示す。これらより、30[dB]~40[dB]程度の音響反射を得られていることがわかる。それぞれ、2つのピークが発生しているのは、ジンバルの回転装置が、計算した角度で静止することができず振動する、ハードウェア上の問題によって発生している。

ジンバル制御アルゴリズムを操作させない場合、すなわちプローブが真下に固定されている場合の音響反射データを解析した。これについては、上述と同様にヒストグラムを作成した結果を Fig. 4-15 に示す。これらを Fig. 4-14 と比較することで、ジンバルコ

ントロールによって、反射強度が約 30[dB]増加していることがわかる。

#### 4-3-2 考察

Case1,2 において、角度誤差は $\pm 4$  [deg]程度と判明したが、使用した耐水ベニヤは、厚さ 1 c mであるため、水中でのたわみによって傾斜角度に $\pm$ 数[deg]程度の誤差が生じている可能性がある。音響反射の強度から、どの傾斜条件でも同様な強度が得られているため、Ground Truth との誤差は、水中でのベニヤのたわみが原因である可能性が高いと考える。計測される角度の標準偏差については、斜面角度、実験条件にかかわらず、全て 1[deg]以内になっていることから、条件による計測のバラつきは小さいとわかる。

先述の通り、傾斜角読み取り精度は擬似斜面の誤差に律速してしまうため、音響反射強度の増加からジンバルシステムの有効性を判断する。表面反射強度については、ジンバル制御の有無によって 30[dB]程度の大きな違いが見られ、さらにどの傾斜においても同様の反射強度が得られており、開発したシステム及びアルゴリズムが有効であることが実証できた。したがって、ジンバル制御によって音響データの改善効果があると確認できた。

### 4-4. 動の実験について

#### 4-4-1 実験結果

Fig. 4-16-a) に、動の実験における擬似斜面の断面図を示す。このように斜面が並んでいる場合において、セットアップの前後方向のベースライン、1.37[m]で傾斜角を計算した値を Fig. 4-16-b)に示す。4200~6000[mm]地点において、海底の斜面は $-10$ [deg] $\rightarrow 20$ [deg]と急激に変化するため、1.37[m]のベースラインで傾斜を計算すると実際の斜面と比べゆるやかに変化する。また、8000[mm]~10000[mm]地点では、斜面の設置において Fig. 4-4 に示すような実験セットアップによる隙間が発生しているため、読み取りに大きな乱れが発生している。通常の海底ではこのような問題は発生しないと考える。

Fig. 4-17 に計測された横軸：進行距離、縦軸： $\theta_P$ の変化として、速度の違いを色分けして示した。同様に、Fig. 4-18 には $\theta_R$ を、速度の違いを色分けして示した。

10[cm/s]の場合においては、Fig. 4-16-b)の計算結果に比べて遅れて計算されていることがわかる。また、速度が大きいほど、グラフが進行方向にシフトしていることが確認できる。前章に示した通り、1.37[m] のベースラインでは、それ以下の凹凸に追従することはできない。今回の実験において並んでいる擬似斜面は急激に変化するため、3000[mm]~3700[mm]地点では、 $+20$ [deg]の傾斜を読み取るのに遅延が生じている。また、8000[mm]~10000[mm]地点の隙間によって、傾斜角読み取り結果が乱れるが、通常の海底ではこのような問題は発生しないと考える。これらの結果から、移動速度に

よる音響反射強度の変化を読み取るため、8000[mm]～10000[mm]地点の音響データを除去し、得られた反射強度のヒストグラムを作成した。それぞれの条件でのヒストグラムを Fig4-19 に示す。これらより、速度が速いほど小さい音響反射を得る回数の割合が上昇している傾向が見て取れる。この傾向を確認するため、得られた反射強度データに対し、平均値と標準偏差を計算したのが Fig. 4-19-b)となる。これより、速度の上昇と共に、得られる音響反射強度の平均値は減少し、かつ標準偏差の減少が読み取れるため、ヒストグラムから読み取れた傾向が妥当であるといえる。また、平均値の減少は、10[cm/s]と 30[cm/s]の際を比較すると 3[dB]程度となっている。

#### 4-4-2 考察

アルゴリズムの制御周期は約 1.5[Hz]であるため、読み取った傾斜角をジンバルの動作に反映するのに約 700[ms]のズレが発生する。これより、ジンバル動作へのズレが発生し、Fig. 4-16-b)の結果より遅れて計算される。また、Fig. 4-17,18 における速度増加によるグラフのシフトに見て取れる様に、速度が速いほどズレは増加する。これによって発生する角度誤差によって、高い音響反射を得られる割合が減少すると考えられる。しかしながら、10[cm/s]の時と 30[cm/s]の時の平均反射強度差は 3[dB]となっている。これは、静的実験で確認した制御アルゴリズムによる反射強度の増加と比べると小さい。よって、実展開の際に大きな支障は発生しないと考えられる。

#### 4-5. 結論

静止実験を通して、傾斜角読み取り精度が $\pm 4[\text{deg}]$ 以内、そして誤差の標準偏差が $\pm 1[\text{deg}]$ 以内であることが示された。よって、傾斜角の違いによる、読み取り性能のばらつきは小さいことがわかった。

また同時に行った音響計測によって、30[dB]程度の反射強度の増加が見られた。よって、本システムの有効性が確認できた。

次に行った動的实验では、速度の違いによって角度読み取りに遅延が生じることがわかった。しかしながら、得られた音響データの解析により、速度の上昇によって、高い強度の音響反射を得られる回数が減少し平均値下がるが、減少量は 3[dB]程度と、小さいことがわかった。よって、速度の上昇によって受ける影響は少なく、実海域においての有用性が示された。



Fig. 4-1 The slope made of wood.

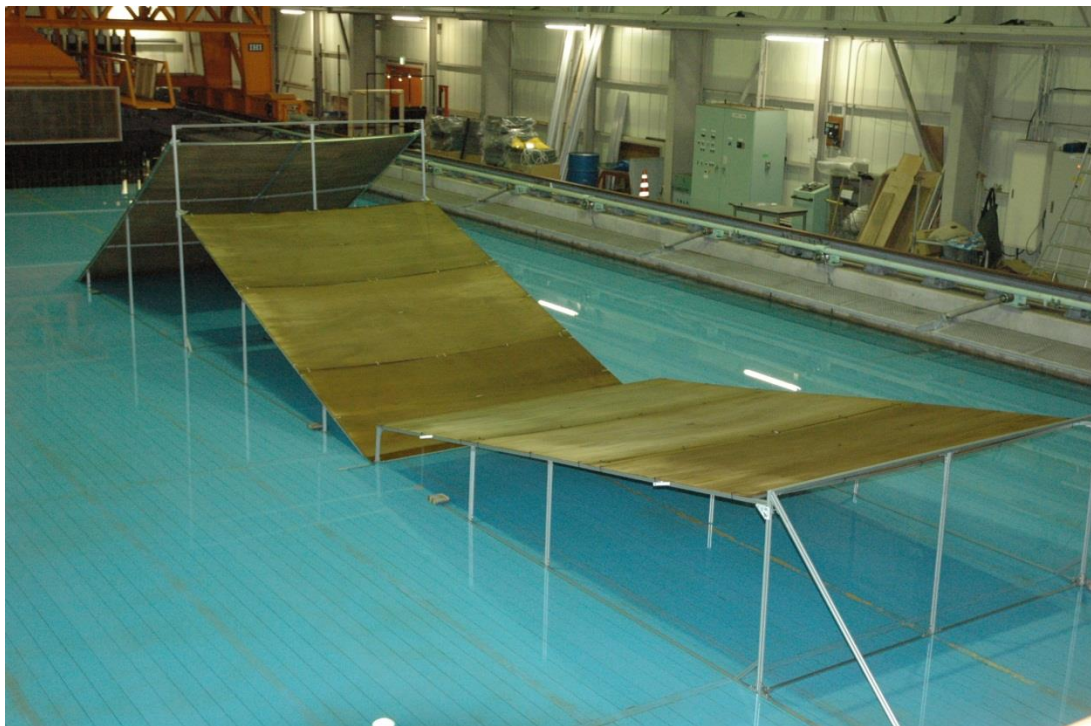


Fig. 4-2 Thress slopes in the pool(10[deg],20[deg],30[deg])

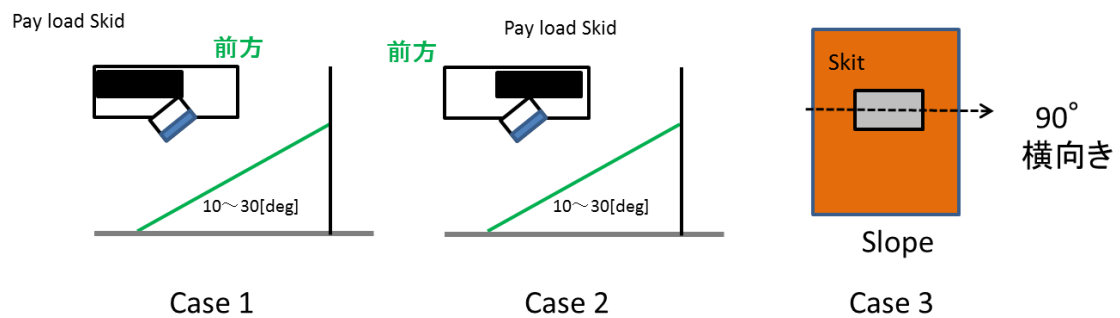
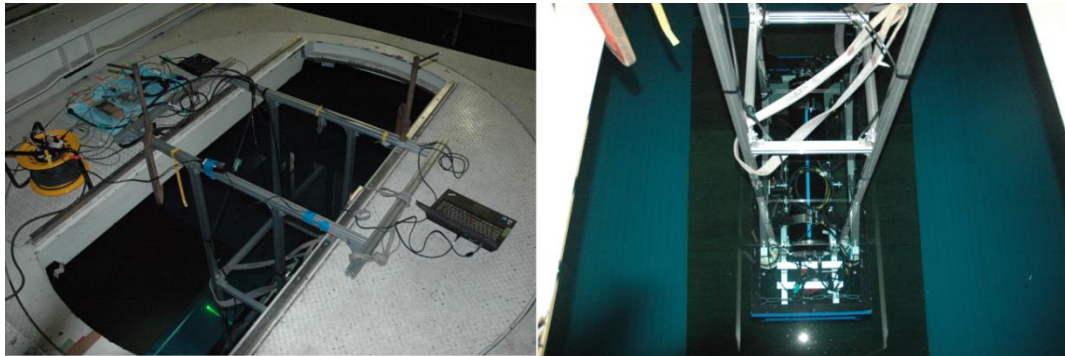


Fig. 4-3 The static experiment was performed with the system as if it were climbing the slope(Case1), going down the slope(Case2), and going forward in parallel to contour line(Case3).

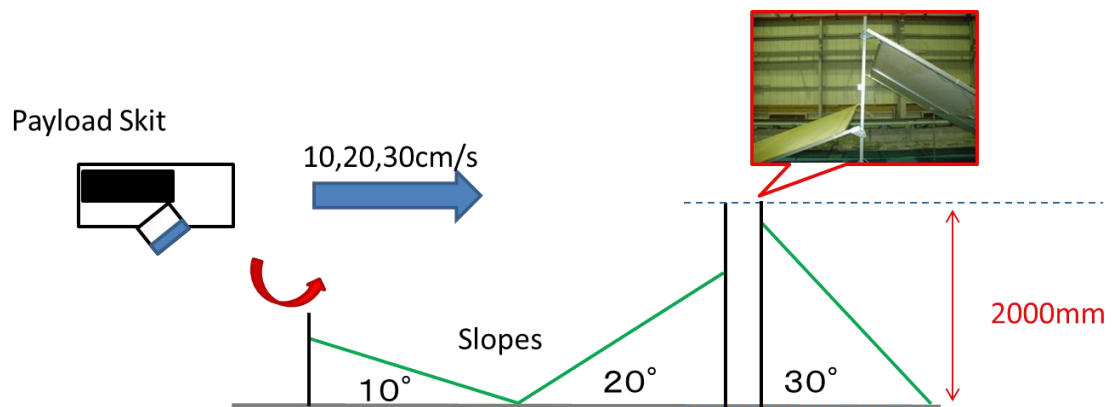
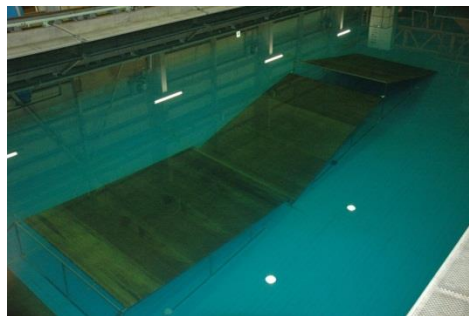


Fig. 4-4 Condition of active experiment

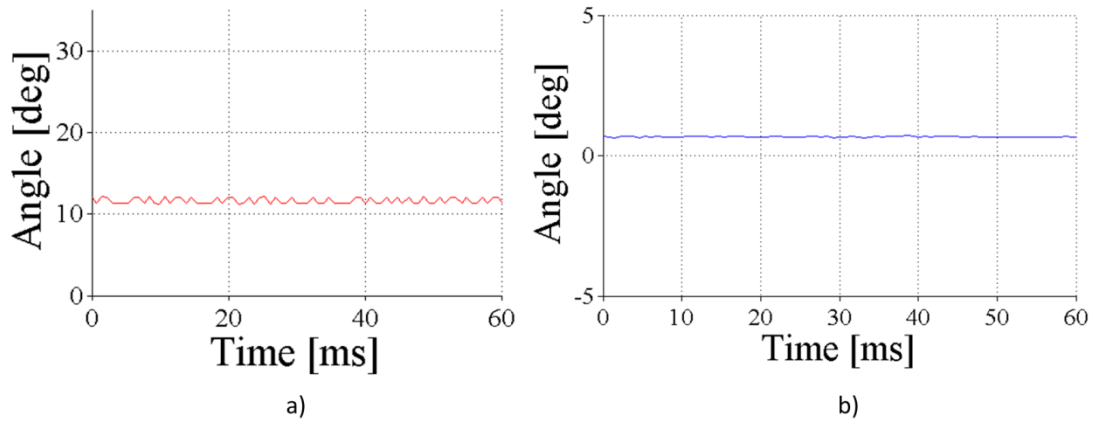


Fig. 4-5 Case1, On 10[deg] , a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$  calculated by algorism

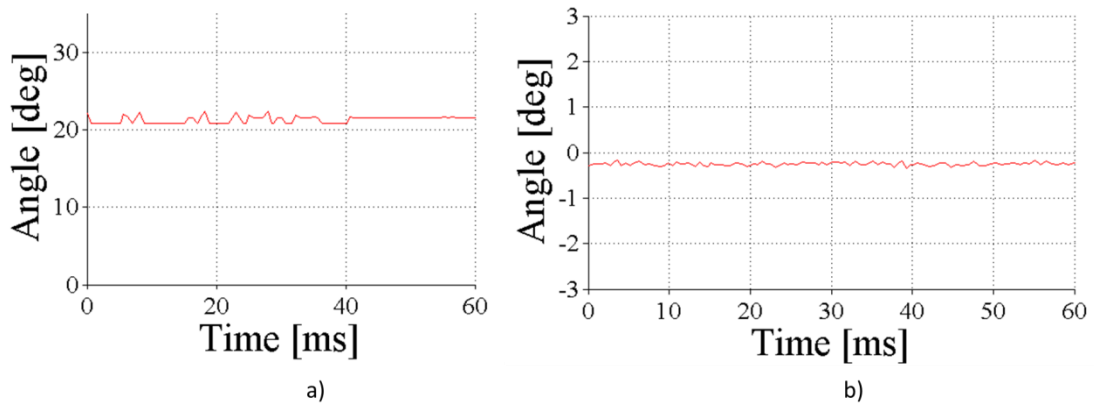


Fig. 4-6 Case1, On 20[deg] , a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$  calculated by algorism

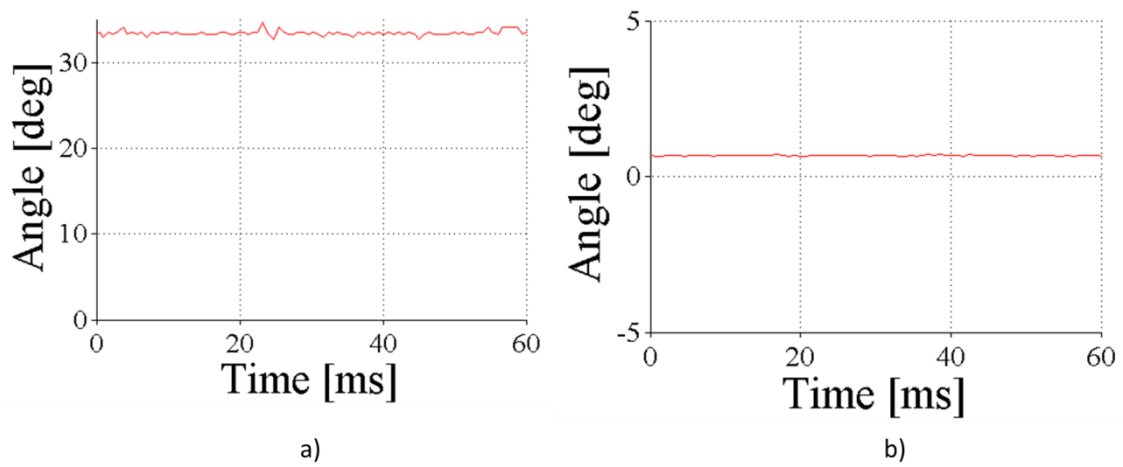
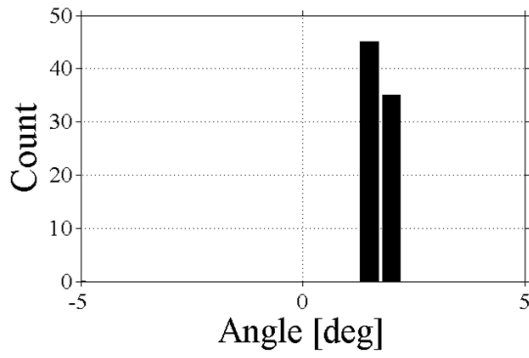
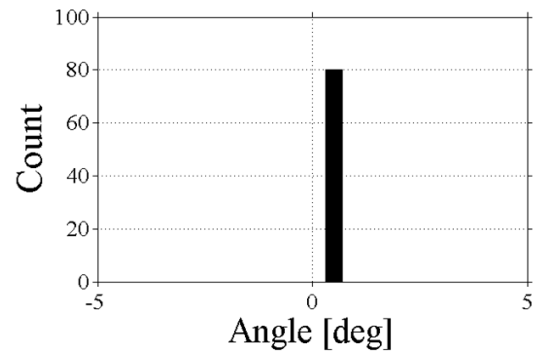


Fig. 4-7 Case1, On 30[deg], a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$  calculated by algorism



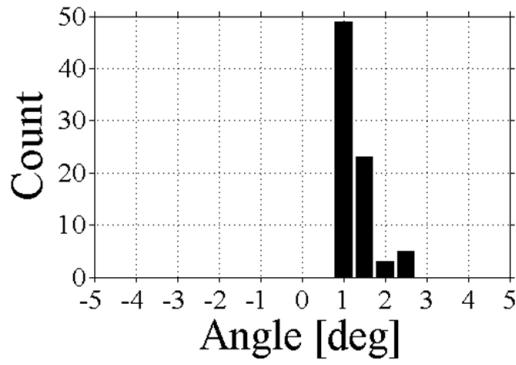


a)

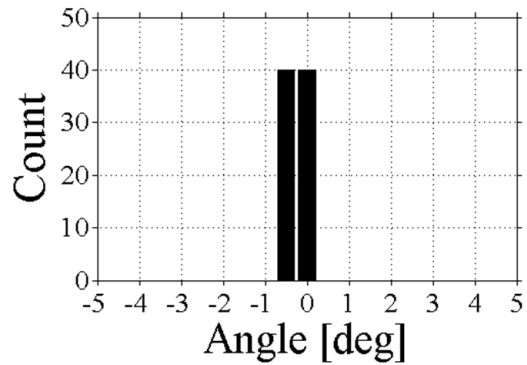


b)

**Fig. 4-8 Case1, On 10[deg], a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$  Histogram of difference between calculated inclination and ground truth..**

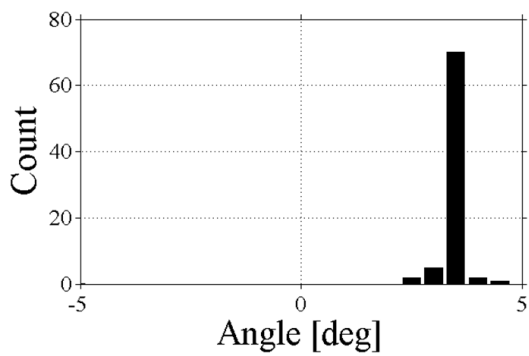


a)

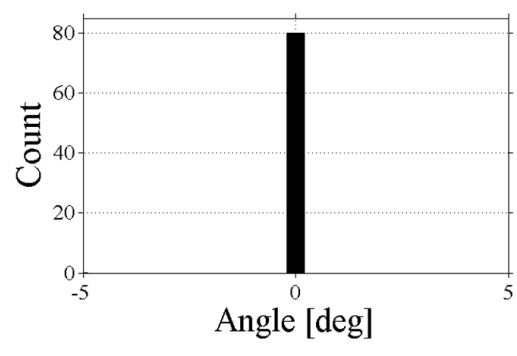


b)

**Fig. 4-9 Case1, On 20[deg], a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$  Histogram of difference between calculated inclination and ground truth.**



a)



b)

**Fig. 4-10 Case1, On 30[deg] , a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$  Histogram of difference between calculated inclination and ground truth.**

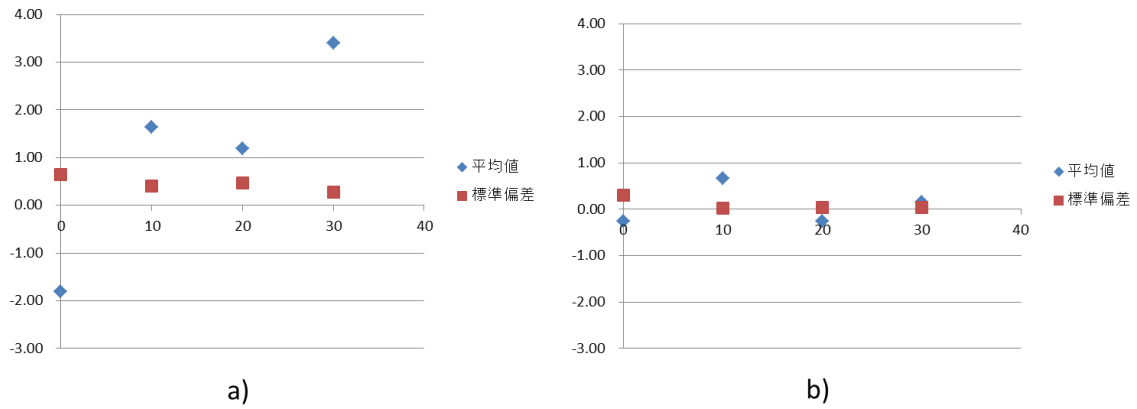


Fig. 4-11 Case1, a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$ , Average and Standard Deviation of difference between calculated inclination and ground truth.

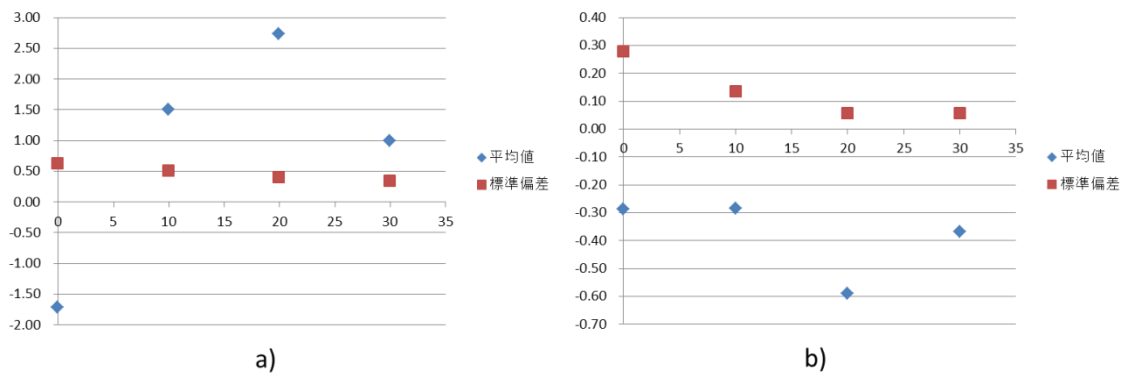


Fig. 4-12 Case2, a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$ , Average and Standard Deviation of difference between calculated inclination and ground truth.

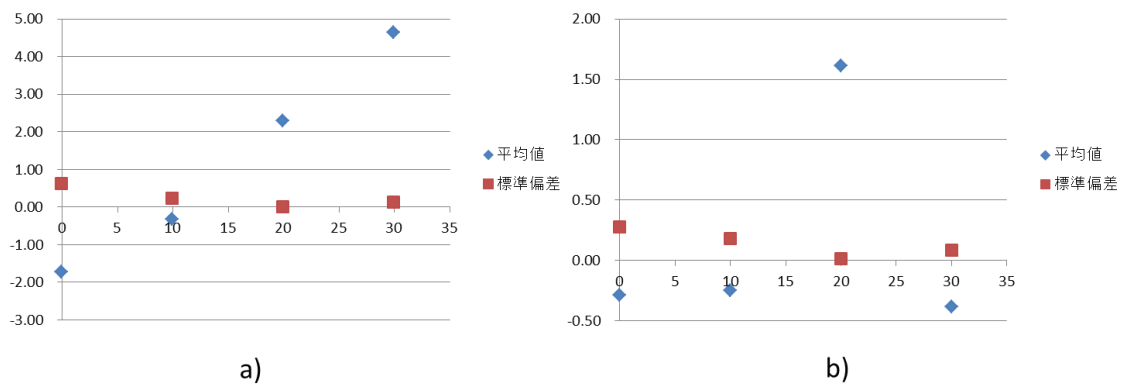


Fig. 4-13 Case3, a):  $\theta_P$ , b):  $\theta_R$ , Average and Standard Deviation of difference between calculated inclination and ground truth.



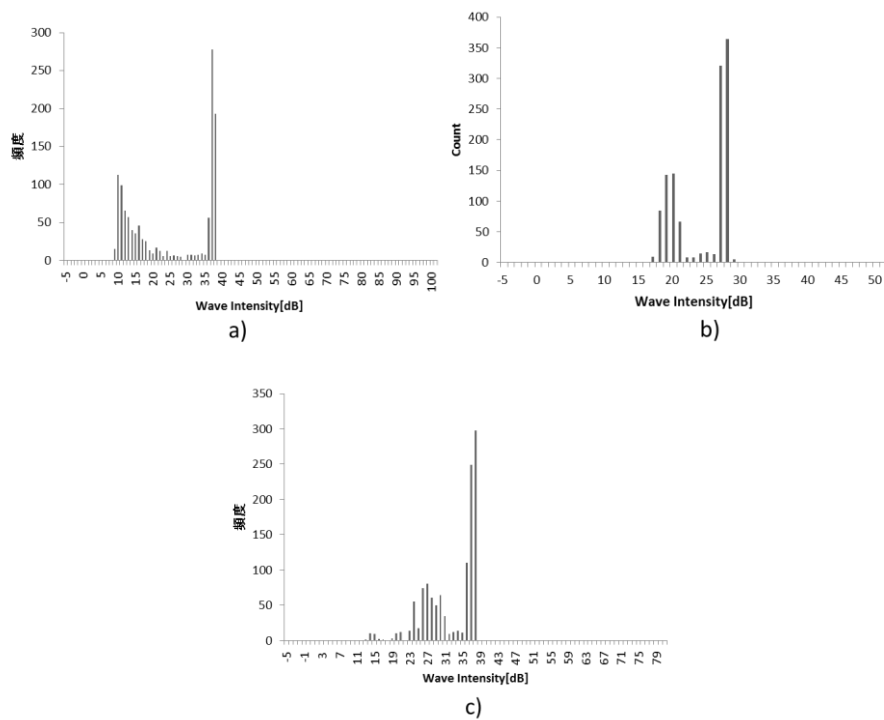


Fig. 4-14 a):On 10[deg],b)On 20[deg],c)On 30[deg], Histogram of acoustic wave intensity when control algorithm is working.

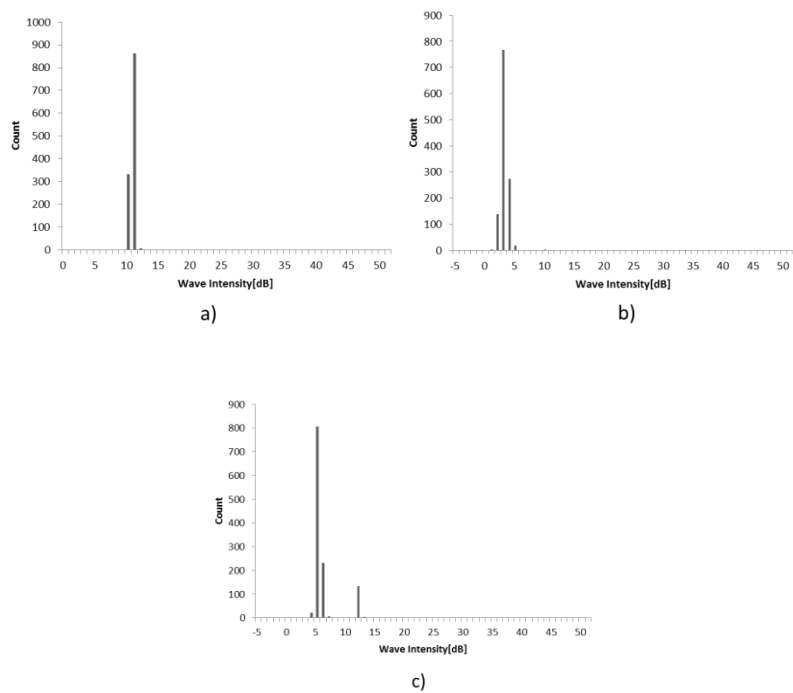


Fig. 4-15 a):On 10[deg],b)On 20[deg],c)On 30[deg], Histogram of acoustic wave intensity when control algorithm is working.

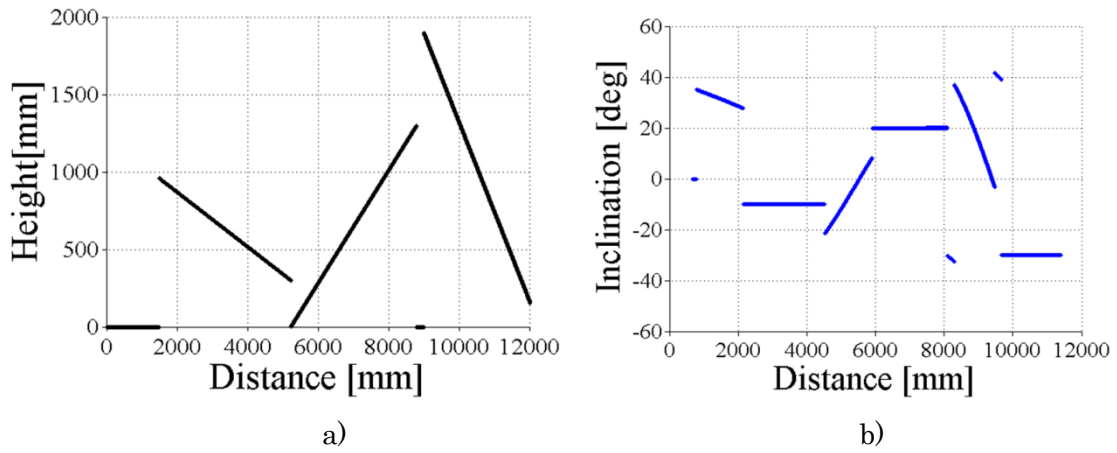


Fig. 4-16 a) Side view of three slopes made of plywood, b) Calculated angle using baseline 1.37[m].

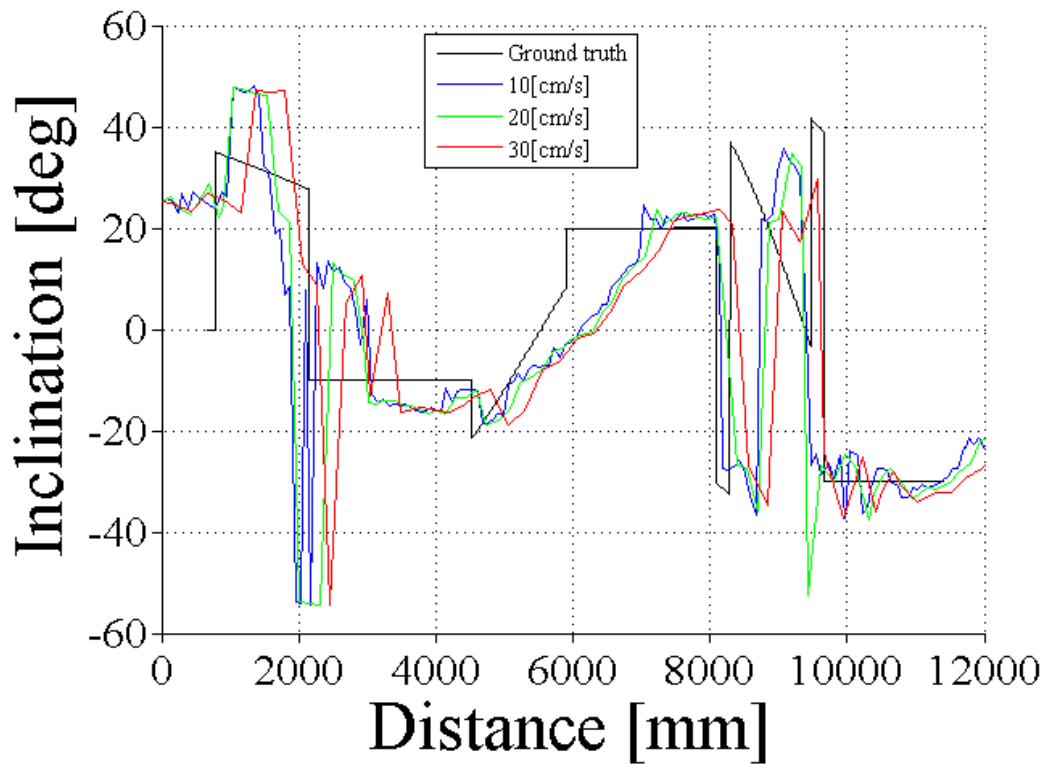


Fig. 4-17  $\theta_P$  result of active experiment. The black line represents calculated angle from ground truth shown in Fig. 4-16-b), while the blue, green and red lines represent measurements made at 10, 20, and 30cm/s surge speed. The oscillation at 9000mm is an artefact introduced by discontinuities in the experimental setup

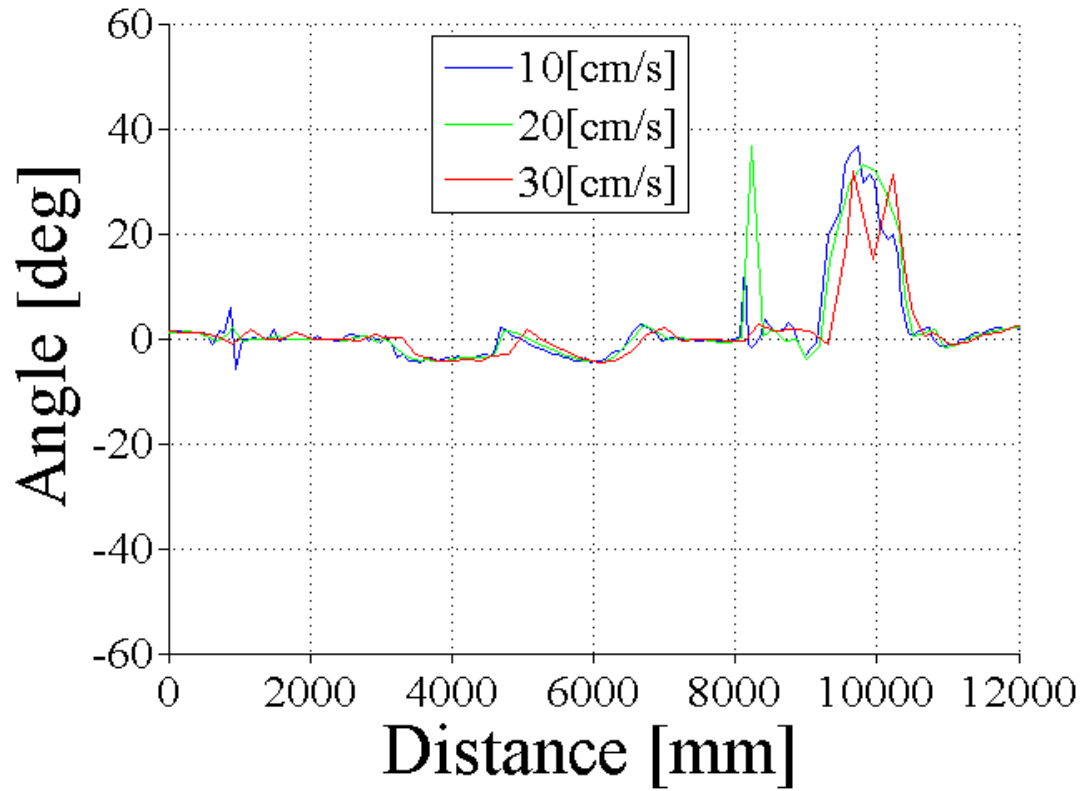
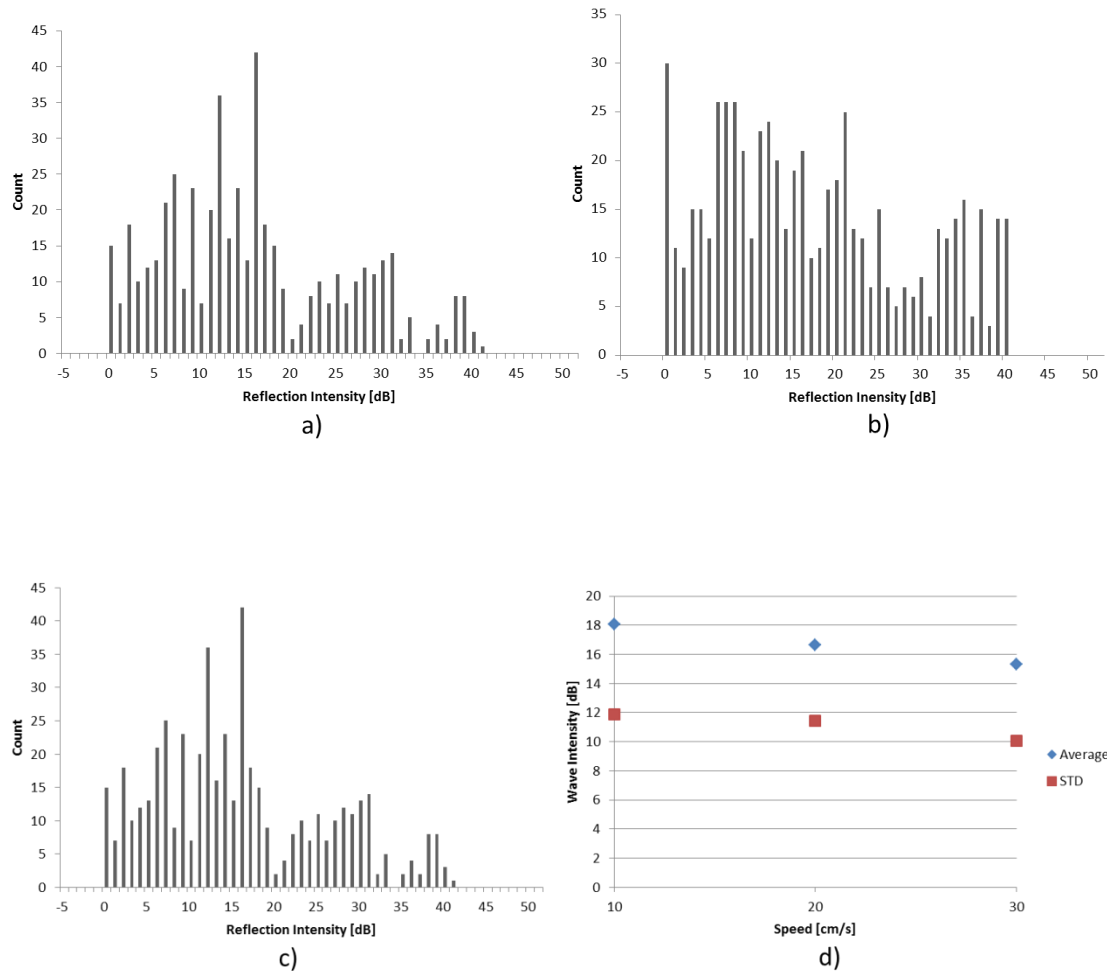


Fig. 4-18  $\theta_R$  result of active experiment. The black line represents the ground truth, while the blue, green and red lines represent measurements made at 10, 20, and 30cm/s surge speed. The oscillation at 9000mm is an artefact introduced by discontinuities in the experimental setup



**Fig. 4-19** Histogram of wave intensity when the speed is a) 10cm/s, b) 20cm/s, c) 30cm/s. d) is average and standard deviation of wave intensity.

## 5 実海域における動作試験

### 5-1. 本章の概要

本章では、2012 年に行われた調査システムの実海域展開について述べる。実海域データの評価の方法として、開発した傾斜計測アルゴリズムによるリアルタイム傾斜推定結果と、後処理によって分析した SeaXerocks のマッピングデータから算出した海底面の傾斜角を比較する。ここで出る角度誤差を、制御を行わない場合生じる角度誤差と比較することによって、開発した手法の有効性を検証する。

### 5-2. 実海域実験概要

本研究で開発したシステムは JAMSTEC の NT12-25 航海において、フィリピン海本北部に位置する大東海嶺で実海域展開を行った。元々の計画では、100m 以上の深度差を示す傾斜地において滑走路状のマンガンクラストが多く確認された流星海山において、7 潜航が予定されていた本航海であるが、天候不順により調査海域の変更を余儀なくされ、大東海嶺において本システムを展開する結果となった。

### 5-3. 航海の内容

NT12-25 航海では、第 3 章で説明したセットアップを JAMSTEC の ROV ハイパードルフィンに搭載し、調査を行った。ペイロードスキットに格納されたジンバルシステムは、スキッド内部に搭載された PC によって制御されており、ハイパードルフィンとは独立して動作する。Fig5-1 に、NT12-25 で使用したハイパードルフィンと、ペイロードスキッドを示す。

### 5-4. 実験結果

#### 5-4-1 マッピングデータから得た傾斜角

本節では、実海域で取得したデータの一例を示す。ジンバルシステムを動作させた時の 3D マッピング画像と、断面図を Fig.5-2 に示す。この図より、調査海域はクラストが分布していること、表面凹凸の存在が確認できる。

読み取りアルゴリズムの、実海域におけるパフォーマンスを評価するため、Fig.5-2 に対して、第二章で行った傾斜角解析を行い (Fig5-3)、傾斜読み取りアルゴリズムによって計算された海底傾斜角と比較した。なお、開発したジンバルシステムは、拓洋第五海山で得られたデータをベースに、 $\theta_p$  方向には  $\pm 45[\text{deg}]$ 、 $\theta_R$  方向には  $\pm 30[\text{deg}]$  の稼働させることを前提に開発した。元々、本航海で調査する予定であった流星海山も同程度の傾斜があると思われる。Fig.5-2 の 3D 画像から、クラストは存在するものの、

その形状は礫状であることが見て取れる。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、その周期も短いことがわかる。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、海底傾斜に装置が対応できるスペック（ $\theta_P$ 方向に $\pm 45[\text{deg}]$ 、 $\theta_R$ 方向に $\pm 30[\text{deg}]$ ）を超えている場所に関して評価は行わない。

#### 5-4-2 制御アルゴリズムから得た海底傾斜の絶対角度

実海域における、本アルゴリズムの性能を評価するため、以下の解析を行った。

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。アルゴリズムから得られた $\theta_P$ 方向の相対角度を $\theta_{P\_Cal}$ 、 $\theta_R$ 方向の相対角度を $\theta_{R\_Cal}$ とすると、海底の絶対角度は以下の式で計算することができる。

$$\theta_{P\_Status} = \theta_{P\_Cal} + \text{Pitch} \quad (5.1)$$

$$\theta_{R\_Status} = \theta_{R\_Cal} + \text{Roll} \quad (5.2)$$

得られた $\theta_P$ 方向の絶対角度を $\theta_{P\_Status}$ 、 $\theta_R$ 方向の絶対角度を $\theta_{R\_Status}$ 、ロボットのロール角度とピッチ角度を $\text{Pitch}, \text{Roll}$ とする。

Fig.5-4-a),b)の黒い点群にマッピングデータから計算した傾斜角、赤い点群に $\theta_{P\_Status}$ 、 $\theta_{R\_Status}$ を示す。このグラフより、 $\theta_P$ 、 $\theta_R$ 共に変化が激しいことが確認できる。この領域において、傾斜角読み取りアルゴリズムでは、細かい変化に追従することはできていないが、大まかな傾斜角を読み取ることができている。

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を計算する。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。マッピングデータから得た傾斜角との差を計算する。よって、以下に示す2つの項目を比較する。

- ① マッピングデータから得た傾斜の絶対角度と $\theta_{P\_Status}$ 、 $\theta_{R\_Status}$ との差
- ② マッピングデータから得た傾斜の絶対角度と、 $\text{Pitch}, \text{Roll}$ との差

①、②を比較することで、 $\theta_P$ 、 $\theta_R$ 各々における角度差の低減効果を確認する。

計算結果を Fig.5-5 に示す。これより、228[m]付近、232[m]付近、236[m]付近、240[m]付近で、制御なしに比べて角度差が10[deg]～40[deg]の減少が見て取れる。Fig.5-6においても同様な傾向が確認できる。

次に、垂直入射からの角度差の軽減効果を評価するため、音波の進行方向ベクトルと海底面の垂直ベクトルとの角度差を計算した。これについても、制御アルゴリズムの有

無によって角度差にどのような変化が生じるのか解析した。

Fig. 5-7 に解析結果を示す。縦軸は、横軸で示された角度以下の角度差が計測された回数の、全計測回数に対する割合を示す。赤線がアルゴリズム有り、青線が無しの場合を表す。第 2 章において、音響反射強度を維持するためには角度差が $\pm 3[\text{deg}]$ 以内に保つ必要性が示されているため、Fig.5-7 において横軸  $3[\text{deg}]$ の値を読み取り、性能を評価する。制御なしの場合、角度差が  $3[\text{deg}]$ 以内に収まる割合は約  $0.5[\%]$ となるのに対し、制御有りの場合は  $3[\%]$ となっている。よって、制御アルゴリズム角度差低減効果が確認できる。また、同グラフより、横軸が  $3[\text{deg}]$ 以上の場合においても、制御アルゴリズムの有無による割合の差がはっきりと読み取れる。

## 5-5. 考察

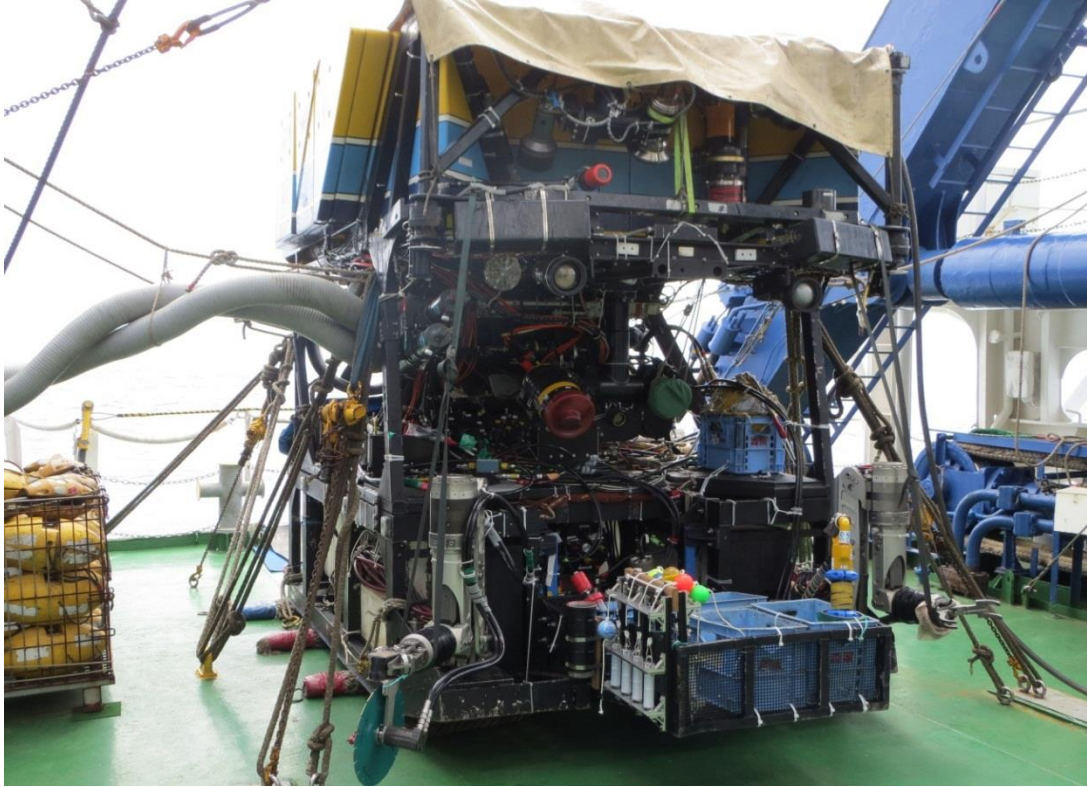
本アルゴリズムの適用によって、 $\theta_p$  ,  $\theta_R$  どちらの方向においても、入射角度差低減が確認できた。また、垂直入射からの角度差においても、制御制御アルゴリズムの効果が示された。

本データセットにおいては、 $3[\text{deg}]$ 以内の割合は制御有りにおいても  $3[\%]$ と低くなっている。これは、Fig. 5-2 においても確認できるように、調査海域のクラストは起伏が激しい産状となっており、本セットアップで使用したベースラインの長さでは追従し切ることが難しかった。しかしながら、第四章で述べた通り、平坦な傾斜において入射角度影響の低減効果が示されている。したがって、本システムの適用目標である流星海山や拓洋第五海山などの滑走路上の平坦なクラストが分布する海山においては、 $3[\text{deg}]$ 以内の割合は、 $10\sim 30[\%]$ へと増加すると考えられる。

## 5-6. 結論

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、入射角制御を行うことができた。 $\theta_p$  、  $\theta_R$  どちらに関しても、制御しない場合よりも入射角の影響を軽減することが確認できた。

また、NT12-25 航海の調査海域である大東海嶺は、流星海山と比較して凹凸が多く、細かい周期での傾斜角の変化が激しいため、ベースラインとして設定した  $1.37[\text{m}]$ では、細かい傾斜に追従することはできなかった。しかし、ベースラインより長い空間スケールの傾斜地には正確に追従し、傾斜地において、平地と同様なパフォーマンスを実現することができたと考える。本システムによって、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。



**Fig. 5-1 Hyper Dolphin and payload skid with active gimbal system**



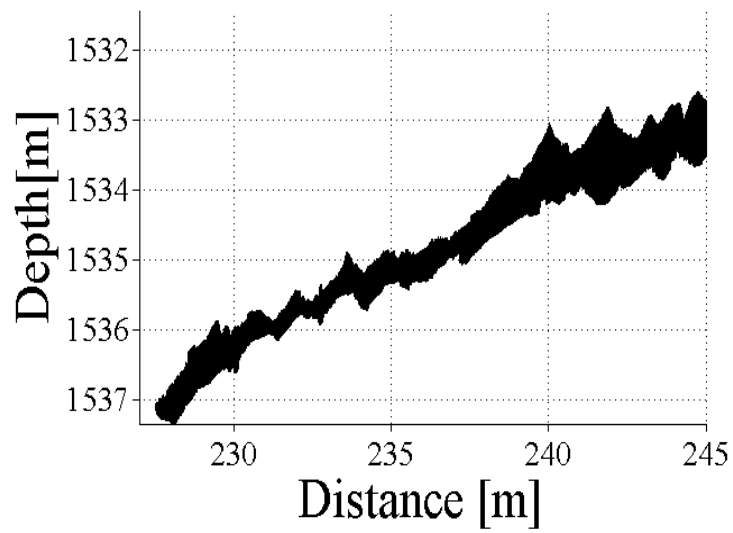
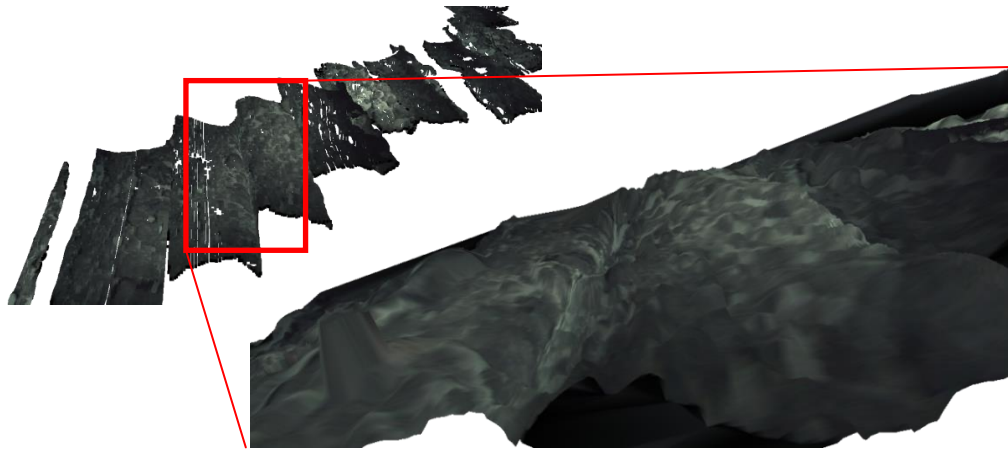


Fig. 5-2 3DMapping data in NT12-25

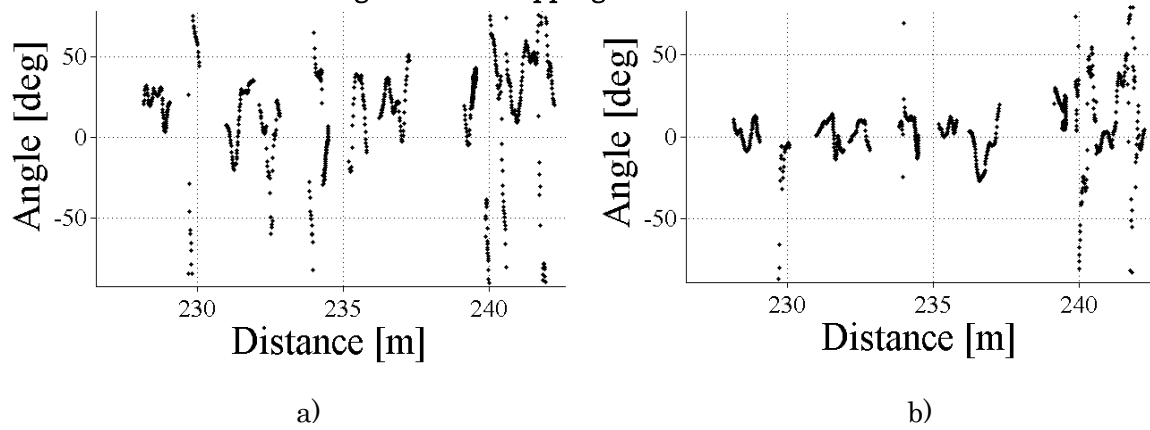


Fig. 5-3 The inclination of angle (a):  $\theta_P$ , (b):  $\theta_R$

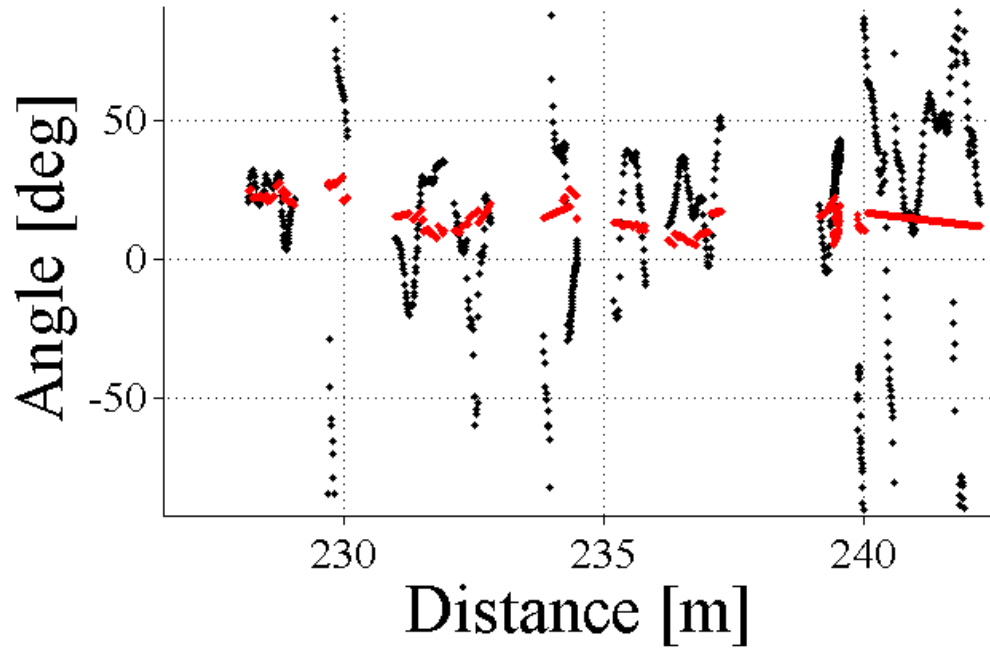


Fig. 5-4-a) The black line :  $\theta_P$ , the red line :  $\theta_{P\_Status}$

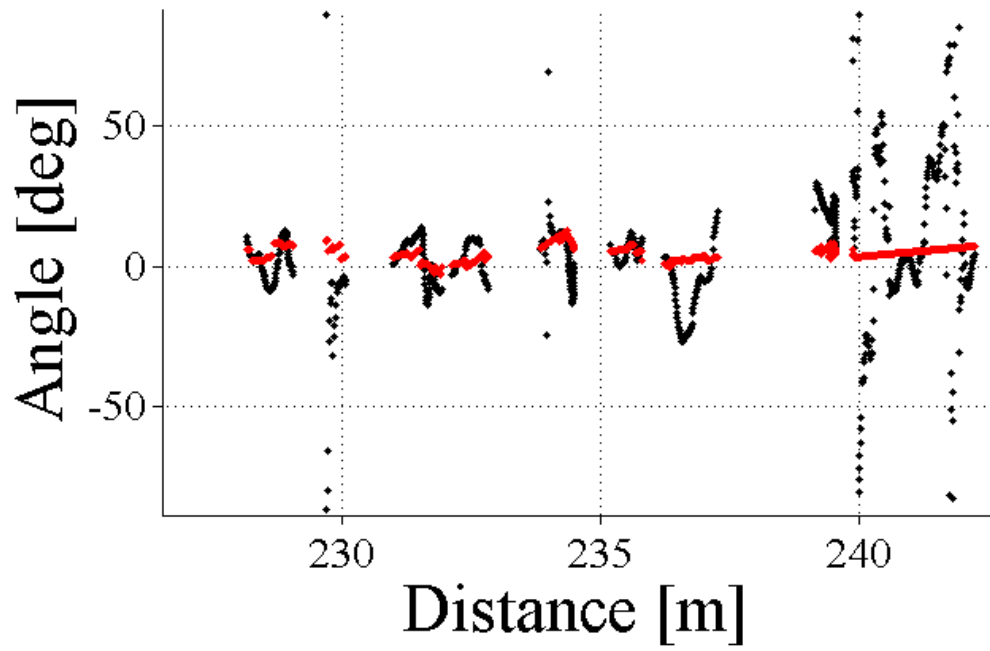


Fig. 5-4-b) The black line :  $\theta_R$ , the red line :  $\theta_{R\_Status}$

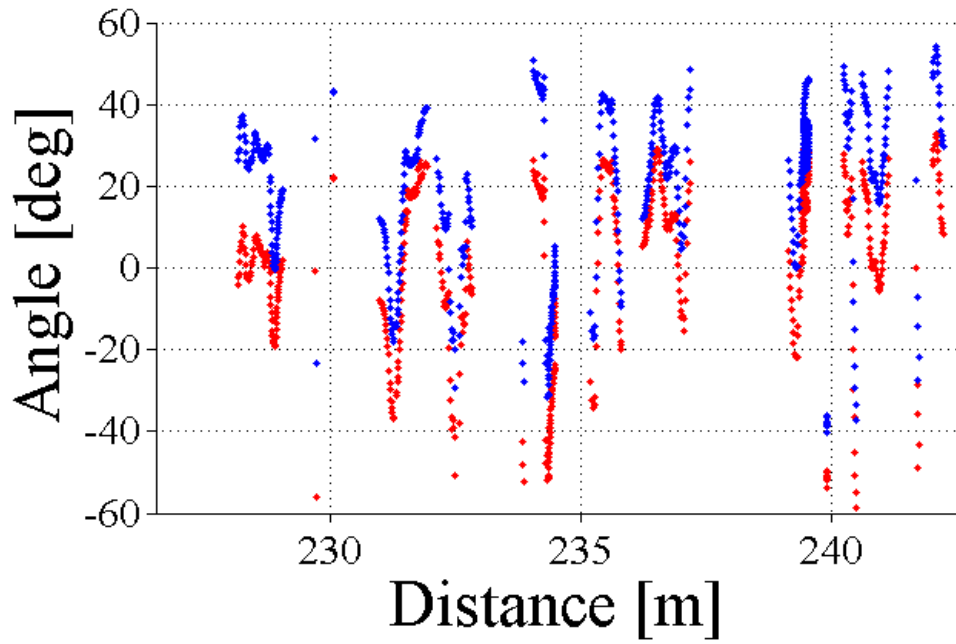


Fig. 5-5 The red line is the difference between angle calculated from mapping data and  $\theta_{P\_Status}$ , the blue line is the difference between angle calculated from mapping data and  $Pitch$ .

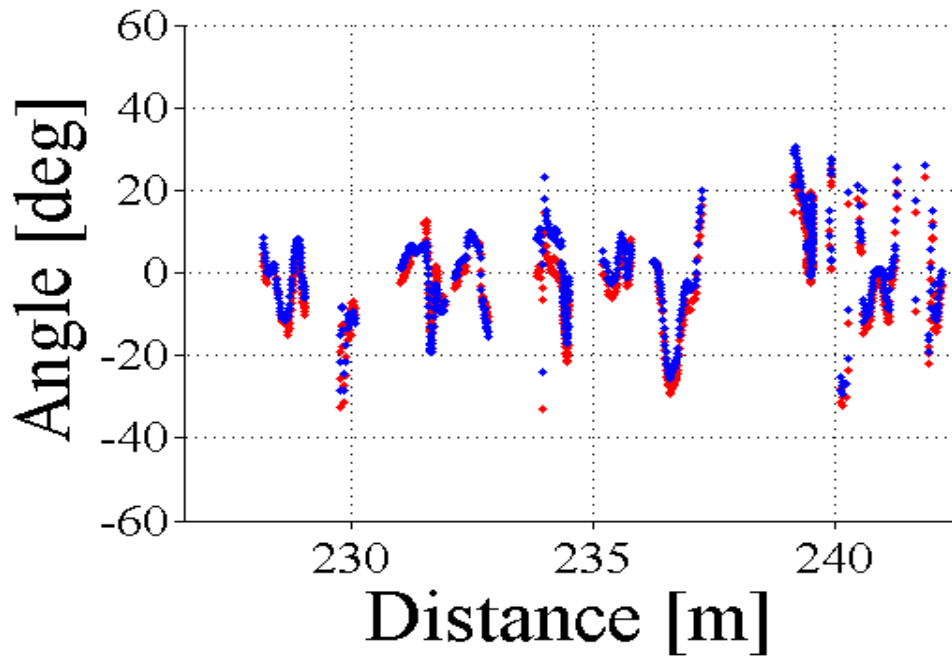
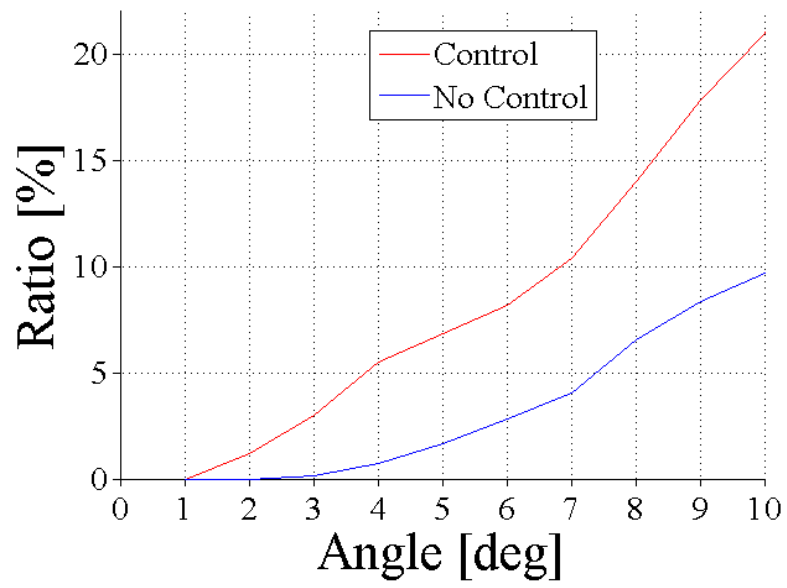


Fig. 5-6 The red line is the difference between angle calculated from mapping data and  $\theta_{R\_Status}$ , the blue line is the difference between angle calculated from mapping data and  $Roll$ .



**Fig. 5-7 Vertical axis is the ratio with respect to the number of calculated value within horizontal axis values.**

## 6 結論

### 6-1. 結論

マンガクラストは、日本近海に数多く確認され、新たなレアメタル資源として期待されている。従来に用いられてきたドリリングやサンプリング以外の厚さ調査手法は未だ確立されておらず、新たな賦存量調査手法の開発が求められている。このため、東京大学の生産技術研究所では、音響厚さ計測と 3D マッピングを組み合わせた、効率的なクラスト調査手法の研究開発を行ってきた。

NT10-11 航海においては、平地においてクラスト厚さを計測することに成功したが、局所的に音響反射が低下した箇所が存在した。本論では、マンガクラストへの音響反射強度が、クラストへの入射角に大きく影響していることを、実サンプルを用いた実験を行う事によって実証し、傾斜地においても音響計測を適用可能とさせるシステムの研究開発を行ってきた。

音響反射強度の低下要因の一つである、海底への斜め入射に対応するため、音響プローブ本体に 2 軸で回転できるジンバル装置を取り付け、海底面へ常に垂直に入射するように自動制御するシステムを提案した。ジンバル制御アルゴリズムの設計においては、海底の傾斜角読み取り手法が重要であり、リアルタイムに傾斜を把握する必要性から、2 軸での傾斜計測を可能とする最小限の 3 点を用いて制御するシステムを提案した。この 3 点のベースラインを決めるにあたり、拓洋第五海山において計測した、1km 以上の長さのマッピングデータを解析し、結果に基づいて入射角自動制御システムを開発した。前方のレーザー測距デバイス、後方の音響測距デバイスから、合計 3 点の海底面座標を取得し、傾斜角を算出するシステムを開発し、水槽実験によって傾斜読み取り精度と音響反射強度の改善を確認した。

NT12-25 航海において、装置の実海域試験を実施した。3D マッピングデバイス、音響プローブ共に正常に動作し、データを取得することに成功した。また、リアルタイムに音響プローブを制御することによって、海底面追従によって入射角度誤差の軽減が可能である事を実証した。これによって、今まで平坦な海底で取得したマンガクラストの厚さ計測データが、傾斜地においても取得できるようになったと考える。もともとマンガクラストは、堆積物が多い傾斜地において多いことが知られており、今後、本研究で開発した装置によってマンガクラストの調査能力が大きく向上したと考える。

### 6-2. 今後の課題

本航海においては、天候不順により、予定していた調査海域における展開ができなかった。調査海域である大東海嶺のマンガクラストは、開発の対象として期待される流星海山や拓洋第五海山よりも凹凸が激しく、本システムでは細かい変化には追従しきれ

なかった。よって次の段階として、今年 6 月に予定されている流星海山での調査によって、開発の対象として有望なマンガンクラスト海域に対しての本システムの有用性を検証する。また、本システムを用いれば、音響プローブデータからマンガンクラスト層の厚さを知る事ができる。また、大東海嶺のような、複雑なクラスト地帯のマッピングデータを分析し、このような海域にも対応できるシステムの技術的課題を抽出する必要があると考える。複雑な海底地形の傾斜を算出するには、より小さい近似面を作成する必要があるが、先述している通り、音波を入射させるためには、ある程度大きな領域を算出しなければならない。よって、傾斜読み取りの課題への対策として、算出領域の大きさを保ちつつ、細かい変化を読み取る手法の開発が必要である。今後の方針として提案する手法の概念図を Fig. 6 に示す。現在は海底の面は 3 点のみで近似しているが、前後方向のベースラインを大きく取ったまま読み取り座標点を増加させることで、計測領域を保ったまま、小さな近似面を複数算出する。扱う座標点を 3 点→8 点と増加させたとしても、SeaXerocks を座標読み取りに使用するのと比較したら処理量の増加量は格段に小さく、十分にリアルタイム制御が可能だと考える。

また一方、Thornton et al. (2013)では平地において、厚さ情報と 3D 画像からマンガンクラストのボリューム分布を把握することが可能であった。また、本研究によって、傾斜地においても同様な結果が得られる事が期待できる。調査手法として、今後、現場計測による定量的なボリューム情報を、サンプリングによる化学組成の分析データと組み合わせることによって、海底面の金属資源の量とその分布をしらべ、即線上の金属資源の溶存量を把握する、新たな調査方法が実現できると考える。このような情報を、地質的な知見と合わせる事によって、海山単位での正確な金属資源の溶存量を算出することが実現できると考える。

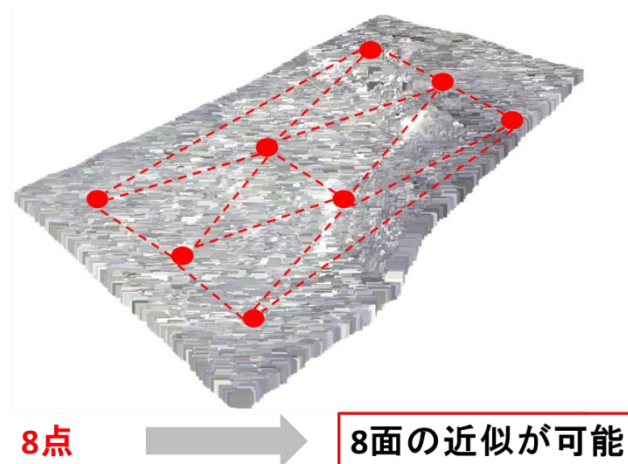


Fig. 6 New method to measure the inclination of seafloor from 8 coordinate points.

## 謝辞

本研究は、現在まで多くの方々の協力によって支えられてきました。ここで感謝の意を表したいと思います。

東京大学指導教員の浦環教授には、時には厳しく、時には優しく、研究に対して多くのアドバイスを頂きました。海中ロボット技術の面白さを教えて頂き、実りある2年とさせて頂きました。また、研究室に入ってすぐに行われた、海中ロボットを用いた被災地調査に同行させて頂き、非常に貴重な体験をさせて頂きました。成長できる機会を多く頂いたこと、誠に感謝しております。

ソーントン・ブレア特任准教授には、実海域試験から研究生活まで、あらゆる活動において多大なご助力をいただきました。航海直前の追い込みにおいては、私のあらゆる至らないところをカバーして頂きました。また、発表や論文について、懇切丁寧なご指導を賜り、自分だけでは到底到達できないだろう段階まで引き上げて頂きました。

副指導教員の飯笹幸吉教授には、海底鉱物資源の専門家のお立場から、多くのご指導を賜り、研究を進める上で大きな刺激を受けました。また、2度の副指導面談では、お忙しい中、長時間のご指導を賜り、非常に参考とさせて頂きました。

高川真一特任教授には、発表練習において非常に参考となるご意見を多数いただきました。様々なご指摘により、より一歩進んだ研究へと進むことができたと思います。

巻俊宏准教授には、研究室に入って間もないころから誠にお世話になりました。また、研究についても多くの貴重なアドバイスを頂きました。

ボーデンマン・アドリアン特任研究員には、実海域実験の準備から、船の上での実験活動までお力をお借りいたしました。また、研究に対しても多くのアドバイスとご助力を賜りました。

西田祐也特任研究員には、水槽実験において多大にご助力頂きました。お忙しい中、朝から実験に付き合っていただき、無事実験を終えることができました。

坂巻隆技術専門職員には、千葉実験上での水槽実験で非常にお世話になりました。時には早朝から手伝っていただくことも有り、お力なくしては実験を成功させることはできなかったと思います。

杉松治美特任研究員には、あらゆる事務手続きにおいてお世話になりました。快適な研究生活を過ごすことができたこと、感謝しております。

金岡秀特任研究員には、研究活動が忙しい時に優しく励まして頂きました。

能勢義昭氏には、工学設計の基礎を教えていただきました。

修士課程同期である安井風太君には、研究室仲間としてお互いに刺激を受けつつ、現在まで過ごすことができました。また、千葉での実験においても手伝っていただき、非

常に心強く感じました。

修士1年の関根司君、白久・レイアス・樹君には、千葉での実験に長時間お付き合い頂きました。彼らの力がなければ、実験自体を始めることさえ出来なかったと思います。

この他にも、多くの方々にお世話になり、現在まで進んでいくことができました。お力添えしていただいた全ての方々に、心からの感謝を捧げたいと思います。最後になりますが、就職している年齢にもかかわらず大学院に通わせてくださる両親、祖父母にも心から感謝します。



## 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] 臼井 朗 : “海底鉱物資源—未利用レアメタルの探査と開発—” オーム社, p. 198, (2010)
- [3] P.A. Rona, “Resources of the seafloor,” Science, vol.299, pp. 673-674, 2003.
- [4] A. Usui, and M. Someya, “Distribution and composition of marine hydrogenetic and hydrothermal manganese deposits in northwest Pacific,” in Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits, No.119. Nicholson K., Hein J., Buhn R., Dasgupta S., Ed. Geological Society Special Publications, 1997, pp. 177-198.
- [5] J.R. Hein, A. Koschinsky, P. Halbach, F.T. Manheim, M. Bau, J.K. Kang, and N. Lubick: Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific, In Manganese Mineralization, Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits, K. Nicholson, J. R. Hein, B. Buhn, and S. Dasgupta (Eds.), Geological Society Special Publication No.119, 123-138. 1997.
- [6] A. Usui, I. Graham, R. Ditchburn, A. Zondervan, H. Shibasaki, and H. Hishida, “Growth history and formation environments of ferromanganese deposits on the Philippine Sea Plate, northwest Pacific Ocean,” Island Arc, vol.16, no.3, pp. 420-430, 2007.
- [7] 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.
- [8] 臼井 朗, 佐藤久晃, 西圭介, 得丸 絢加, ソーントン ブレア, 坂口綾, 杉山敏基, 井上南美, 仁田原翔太, 加藤真悟, ”北西太平洋域マンガングラストの生成環境と成長プロセス: ハイパードルフィンによる詳細マッピングと微細スケール解析—九州パラオ海嶺・流星海山および小笠原海台・東海山”, ブルーアース 12, BE12-31, 2012 feb.
- [9] 仁田原 翔太, 加藤真吾, 山岸明彦, ”拓洋第5海山と流星海山の鉄—、マンガングラストの微生物群衆の比較解析”, ブルーアース 12, BE12-P62, 2012 feb.
- [10] B.Thornton, A.Bodenmann, A.Asada, T.Sato, and T.Ura”Acoustic and visual instrumentation for suvey of manganese crusts using an underwater vehiclle”, in Proc. MTS/IEEE OCEANS12 , 2012, Hampton Roads.
- [11] B.Thornton, A.Asada, T.Ura, A.Bodenmann, D.Kirimura, K.Ohira”in situ acoustic

- measurements of manganese crust thickness from an ROV at #5 Takuyo seamount”, The 22<sup>nd</sup> Ocean Engineering Symposium, March 17-18, 2011.
- [12] Blair Thornton, Akira Asada, Tamaki Ura, Mehul Sangkar, Katsumi Ohira, “A case study to demonstrate remote acoustic measurement of ferro-manganese crust thickness”, 21<sup>st</sup> Ocean Engineering symposium, Aug.6-7, 2009.
- [13] B. Thornton, A. Asada, T. Ura T., K. Ohira, and D. Kirimura, “The development of an acoustic probe to measure the thickness of ferro-manganese crusts,” in Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf., 2010, Sydney, 100118-019.
- [14] A. Bodenmann, B. Thornton, T. Ura, M. Sangkar, “High Resolution 3D Mapping of the Seafloor Using One Camera and a Sheet Laser”, The 22<sup>nd</sup> Ocean Engineering Symposium, March 17-18, 2011.
- [15] A. Bodenmann, B. Thornton, T. Nakatani, and T. Ura “3D Colour Reconstruction of a Hydrothermally Active Area Using an Underwater Robot”, In Proc of MTS 2011
- [16] A. Bodenmann, B. Thornton, and T. Ura, “3D mapping of the seafloor in color using a single camera: Benthic mapping based on video recordings and laser profiling to generate colored 3D reconstructions of the seafloor,” Sea Technol., vol. 51, no. 12, pp. 51–53, 2010.
- [17] Adrian Bodenmann, Blair Thornton, Mehul Sangkar, 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.
- [18] D.E. Karig, M.N.A. Peterson, G.G. Short, “Sediment-capped guyots in the Mid-Pacific Mountains,” Deep-Sea Research, vol.17, pp. 373-378, 1970.
- [19] J.R. Hein, F.T. Manheim, W.C. Schwab, and A.S. Davis, “Ferromanganese crusts from Necker ridge, Horizon Guyot and S.P. Lee guyot: Geological considerations,” Marine Geology, vol.69, Issue 1-2, pp. 25-54, 1985.
- [20] R. Le Suave, C. Pichocki, G. Pautot, M. Hoffert, Y. Morel, M. Voisset, S. Monti, J. Amosse, A. Kosakevitch, “Geological and mineralogical study of Co-rich ferromanganese crusts from a submered atoll in the Tuamotu Archipelago (French Polynesia),” Marine Geology, vol.87, Issue 2-4, pp. 227-247, 1989
- [21] E.L. Hamilton, “Sound Velocity, Elasticity, and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific - III. Prediction of In situ properties,” NUC TP 145, 79 p., 1969.
- [22] 海洋音響学会（編）. “海洋音響の基礎と応用”, 成山堂書店, apr 2004.
- [23] R/J/ユーリック, “水中音響の原理”, 共立出版, 1978
- [24] 富島康夫, 山崎哲夫, 半田啓二. “コバルト・リッチ・マンガン鉱床の工学的特性評価に関する研究”. 資源と素材, Vol.114, p7-12, 1998.
- [25] P.J. Westervelt, “Parametric acoustic array,” J. Acoust. Soc. Am., vol.35, no.4, pp.

535-537, 1963.

- [26] R. D. Muller, M. Sdrolias, C. Gaina, and W. R. Roest, "Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust," *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol. 9, no. Q04006, 2008, DOI:10.1029/2007GC001743
- [27] 浦辺 徹郎, 臼井 朗, ソーントン ブレア, サンゲカー メヒュール, 加藤 真悟, 喜多 純子, 柏原 輝彦, 窪田 薫, 中村 淳路, 烏田 明典, 得丸 絢加: 拓洋第5 海山を覆うマンガンクラスト-巨大低品位レアメタル海底資源の詳細産状と品位分布-, *ブルーアース'* 10, BE10-29, 2010
- [28] G. Golub, and C. E. Reinsch, "Singular value decomposition and least squares solutions," *Numerische Mathematik*, vol.14, no.5, pp.403-420, 1970.
- [29] 近藤逸人, 卷俊宏, 浦環, 能勢義昭, 坂巻隆, 稲石正明. "自律型水中ロボットによる構造物観測システムー光切断法を用いた測距システムによる相対航法ー". In *Proceedings of ROBOMECH'04*, pp.2A1-L2-28, Nagoya, jun 2004.
- [30] H. Kondo, T. Maki, T. Ura, Y. Nose, T. Sakamaki, and M. Inaishi, "Relative navigation of an auv using a light-section ranging system," in *Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. ICARCV2004 8th*, vol. 1, 6-9 2004, pp. 425 – 430 Vol. 1.
- [31] H.Kondo, T.Maki, T.Ura, Y.Nose, T.Sakamaki , and M.Inaishi, "Structure Tracing with a Ranging System using a Sheet Laser Beam", In *Proceedings of UT'04* pp.83-8, Taipei, apr 2004.
- [32] H.Kondo et. Al., "Relative navigation of an autonomuous underwater vehicle using a light-section profiling system," *Proc.of IROS 2004*, 2, pp.1103-1108, 2004.
- [33] 小川 泰広, "自律型水中ロボットの等深線追従手法に関する研究", 修士論文, 東京大学, 2011, feb.
- [34] T.Maki, T.Ura, Y.Ogawa, "AUV NAVIGATION FOR CONTOUR LINE TRACKING", In *Proceedings of UUST2011*, August, 2011.
- [35] 李 枢浩, "海底熱水チムニーの三次元形状モデルの作成に関する研究", 修士論文, 東京大学, 2010, feb.
- [36] Zhengyou Zhang and Zhengyou Zhang. "A flexible new technique for camera calibration" *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, pp. 1330-1334, 1998
- [37] 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム , "OpenCV プログラミングブック", *毎日コミュニケーションズ* , 2007.
- [38] 末松良一, 山田宏尚, "画像処理工学", コロナ社, 2000.
- [39] M. Johnson-Roberson, O. Pizarro, S.B. Williams, and I. Mahon, "Generation and Visualization of Large-Scale Three-Dimensional Reconstructions from Underwater Robotic Surveys," *J. Field Robotics*, vol.27, no.1, pp. 21-51, 2010.

- [40] O. Pizarro, R. Eustice, and H. Singh, "Large area 3-d reconstructions from underwater optical surveys," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, vol.34,No.2, pp. 150-169, 2009.
- [41] R. Garcia, R. Campos, and J. Escartin, "High-Resolution 3D Reconstruction of the Seafloor for Environmental Monitoring and Modelling,"in *Proc. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011 IEEE/RSJ International Conference on, San Francisco, 2011.

## 付録 A 音響プローブのビームパターン

### 1 概要

本章では、音響プローブのビームパターンについて、先行研究から引用する。

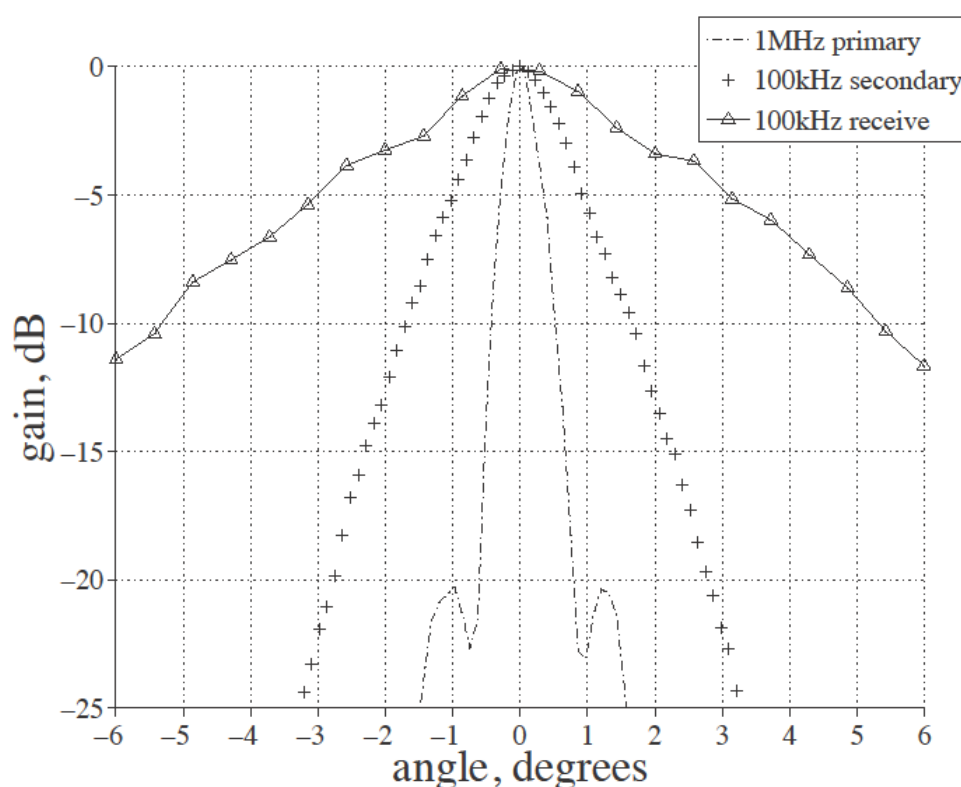


Fig. A- 1 One way beam pattern measured at the focal length of the probe [7].

### 2 Fig.A-1 について

Fig.A-1 に、NT10-11 航海で使用した音響プローブのビームパターンを示す。本プローブは 1[MHz] の 1 次波に AM 変調をかけることで 100[kHz] の低周波を発生させる。パラメトリック効果によって、サイドローブのない音波ビームが得られていることがわかる。焦点距離は 0.75[m] である。

NT12-25 航海で使用した音響プローブは、1 次波が 2[MHz] で 2 次波は 200[kHz] となっている。これにより、焦点距離が 2 倍の 1.5[m] となっていることから、ビームパターンを計測することが困難であり、計測がなされていない。しかしながら、直径 2[cm] の穴を開けた板を焦点距離において音響計測をした所、サイドローブは確認されなかった。よって、本プローブにおいても鋭いビームパターンが発生していると考えられる。

## 付録 B 3D マッピング装置「SeaXerocks」の概要

本章では、第二章以降、海底面の傾斜角を算出するのに使用したマッピングデータを取得するマッピングデバイス「SeaXerocks」について、詳細を述べる。マッピング方法は、ステレオビジョンなどが考えられる[39]-[41]が、高精度座標が得られる光切断法を選択した。

### 1-3-2 3D マッピング装置「SeaXerocks」

FigB-1 に 3D マッピング装置である SeaXerocks の全体図を示す。SeaXerocks は、一台のカメラとシートレーザー、LED ライトから構成されており、1 つのカメラ画像から、海底面座標と海底面色情報の 2 つの情報を取得する。

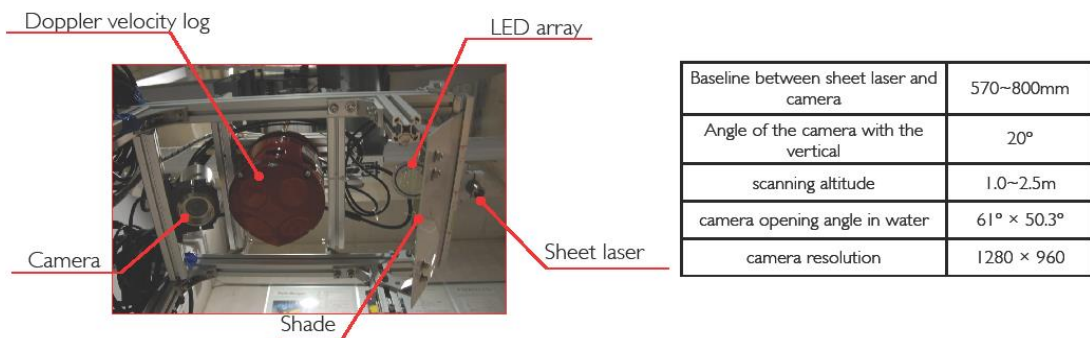


Fig. B-1 3D visual mapping device SeaXerocks

カメラ画像の半分はシートレーザーのみ、もう半分は LED で照らされた海底が写っている。シートレーザーのみが映し出されている領域から、光切断法によって海底面座標を計算する。また、同時に搭載されたナビゲーションデバイス、DVL(Doppler Velocity Log)より位置情報が 5Hz で更新されるため、LED に照らされた海底が映っているカラーの領域から、計算した海底座標における色情報を割り出し、重ね合わせる。結果として、カラーの 3D マッピング画像を得ることができる[16]。

Table B に得られるマッピングデータの解像度を示す。

Table B Resolution and dimensional accuracy of SeaXerocks.

	resolution@2m	accuracy
longitudinal	~ 6.6mm	~ 1%
transverse	~ 2.1mm	~ 6%
vertical	~ 4.4mm	~ 3%