

黒島海丘の合成開口インターフェロメトリ海底地形計測

Bathymetry Mapping at Kurosima Knoll with Synthetic Aperture of Interferometry Sonar

浅田 昭*・浦 環*・小山 寿史*・坂 卷 隆*・能 勢 義 昭*・
小 原 敬 史**・永 橋 賢 司**・中 川 拓 郎***・田 中 照 喜***

Akira ASADA, Tamaki URA, Hisashi KOYAMA, Takashi SAKAMAKI, Yoshiaki NOSE,
Takashi OBARA, Kenji NAGAHASHI, Takuro NAKAGAWA and Teruki TANAKA

1. はじめに

ここ数十年間、深海底の海底地形を把握するために、海面からのリモートセンシング、つまり、船底に装備したマルチビーム音響測深機を使った海面から探査が、世界的に広く行われてきた。しかしながら、一つの音響ビームは、ビーム幅という指向特性を持っており優れたものでも1度から2度ぐらいのものである。1度のビーム幅は距離1000 m離れた地点では17.5 mにも広がるというように、深さが増すにつれて分解能が劣化する。最近では、自律型海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle) や Remotely Operated Vehicle (ROV) に、高周波のマルチビーム音響測深機を装備し、海底に接近して航走し、分解能を上げて調査する機器開発が進められている¹⁾。サイドスキャンソナーは、もっとも幅広く利用されてきた海底の音響画像調査を行うソナーであり、我々の自律航走ロボット r2D4 にも装備された。

r2D4でも安く、高性能の地形調査を行いたいというニーズから、このサイドスキャンソナーを利用し、インターフェロメトリという位相差計測を行う装置を付加して、海底の起伏を正確に計測する研究開発を開始した。元々、サイドスキャンソナーにインターフェロメトリ機能を加えた海底地形調査手法というのは古くから行われていた手法であったが、2列のトランスデューサを使って計測する方法^{2,3)}が一般的であり、数十から数百のアレイを使用したマルチビーム音響測深機に比べ性能面で劣ることから、実用機器としての使用実績は少なかった。我々は、L字型に3個の受波素子を配置することにより、性能面の向上を図り実用性能を高めることができた。また、合成開口手法を組み合わせるにより、送受波器の直下付近で計測できないというマイナス面を改善することに成功した。これらの手法開発と、実際に計測された海底地形データについ

ての報告を行う。

2. L字アレイ手法によるインターフェロメトリ計測

新規に開発された r2D4 は 2003 年 7 月に建造され、海洋海嶺における熱水活動の観測・探査を目的とした実用型の AUV である^{4,5)}。空中重量は 1 トン、全長 4 m、潜行最大深度 4000 m、航続時間 12 時間の性能を持つ。図 1 に示されるように、100 kHz と 500 kHz の作動周波数を持つ Klein System 2000 サイドスキャンソナーの送受波器を挟んで、アレイ間隔をおよそ 3 波長と 13 波長に拡張した L 字配列のハイドロホン片側を 3 個ずつ AUV に装備した。インターフェロメトリシステムは、サイドスキャンソナーが 100 kHz の音響パルス波を横方向の海底に向かって放射し、海底からの散乱エコーを L 字配列のハイドロホンで受信し、位相差を計測することによって、時間領域で細かく分断された散乱波がどの方向から到来したものであるかを計測し、その計測結果から海底の横断面地形を詳細に計測するものである。これまでは、直線状にアレイを配置する 2 個のアレイが基本形であり 7 波長まで間隔を上げたものがあつたが⁶⁾、L 字型に 3 個配置することにより、3 組の位相計測結果が得られるので到来方向角を決定するあいまいな部分を除去できる。これまで河川、港湾での計測試

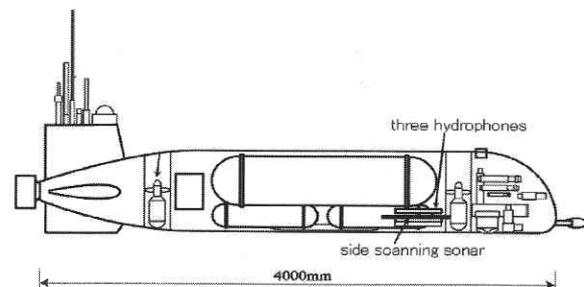


Fig. 1. Three-row hydrophones and a side scanning sonar transducer mounted on the autonomous underwater vehicle r2D4 for swath bathymetry measurement

*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

**三井造船株式会社

***株式会社エス・イー・エイ

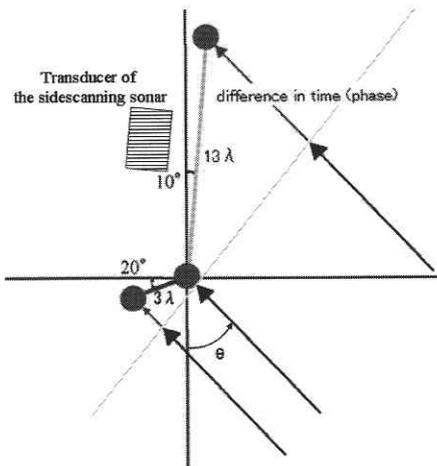


Fig. 2. Interferometry measurement using three row hydrophones in an L shape for estimating arrival direction of backscatter waves from the seafloor

験，佐渡沖での AUV の潜行試験を経て，沖縄石垣島の南に位置する黒島海丘で 2003 年 12 月に計測を実施した。

AUV は海面では GPS による測位を採用するが，水中では Photonic Inertial Navigation System (PHINS)⁷⁾ を装備し，ドップラーログの情報と組み合わせて高精度の慣性航法を行うように設計されている。

図 2 はサイドスキャンソナーの送受波器を挟み，無指向性のハイドロホン逆 L 字型に配置し，到来方向角 θ に相当する海底からのエコーを受信している状態を示す。この場合における，13 波長間隔広げた 1 組のハイドロホンによって計測される到達時間差 Δt_{13} と到来方向角 θ_{13} の関係は下式によって表される。

$$C \Delta t_{13} = 13\lambda \sin(90^\circ - \theta_{13} - 10^\circ) \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta_{13} = 80^\circ - \sin^{-1} \frac{C \Delta t_{13}}{13\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

ここで，C は音速， λ は波長である。同様にして， Δt_3 と残りの組の時間差も求められる。これらの時間差は，位相として，又は，時間として求めても良いが，波長の整数倍のバイアス値を加える必要がある。これらの未知の整数バイアスが存在するため，図 3 に示すように幾つかの候補角を持つが， Δt_{13} ， Δt_3 ともう一組の計測時間差から正しい方向角を容易に特定することができる。つまり， Δt_{13} と Δt_3 から候補となりうる到来方向角を重ねた場合，真の到来角は一致した角度となる。さらに，直線配列に比べ，L 字型に配列したハイドロホンは偽の候補角が重なる危険性が低いという特徴を持つ。 θ_{13} は高分解能の到来方向角として得られるが，そのバイアス決定のためには別の組 Δt_3 のから角度 θ_3 が必要となる。

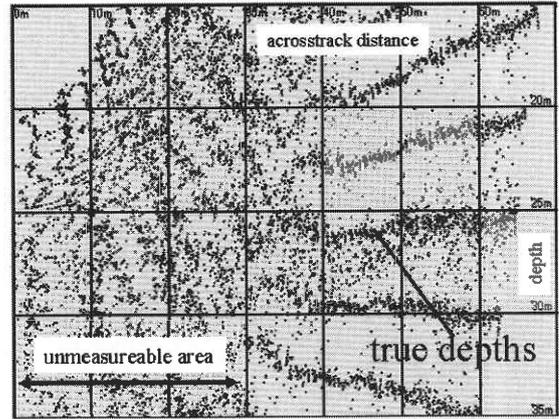


Fig. 3. Bathymetry plots estimated from two pairs of hydrophones at intervals of three and thirteen wavelength. Depth is below the AUV. Naturally, a true swath bathymetry profile from one pair coincides with one from another pair.

3. 合成開口手法による地形計測精度の改善

図 3 は黒島海丘の直上を航走したデータの内，溝地形付近のインターフェロメトリ計測結果を示す。横距離が 30 m より遠くの海底地形では，13 波長と 3 波長間隔の測深点一致し，良好な測深結果を示す。縦方向に 6 層に見える測深点は 13 波長間隔の組から計測された結果で，この図の中で水深 26 m 付近にのみ集まっているのが 3 波長間隔の組から計測された結果である。一方，横距離 30 m 以内では，13 波長と 3 波長間隔の測深点が全く一致せず地形計測が行えていない状態であった。これは，ソナーの真下近辺では，横距離と音波の往復伝搬時間を見たとした場合，横距離が変化しても往復伝搬時間はほとんど変化しない状況が起りやすい。つまり，僅かな往復伝搬時間の差が大きな横距離の変化を生むので，計測の劣化を招きやすいことを表している。海底が凹地，あるいは，ソナーから見て上り傾斜の場合には，このように広い範囲の海底からの散乱波が僅かな時間範囲にまとまって返ってきて，地形計測に劣化をもたらす現象がさらに起りやすくなる。

このため，合成開口手法によって，ソナーの真下付近の改善を試みた。この結果，図 4 に示すように期待通り海底地形計測の劣化が著しく改善された。この例においては，横距離 17 m 以上では良好に海底地形計測が行えることが分かる。このようにして，30 ピングのデータから海底地形断面を計測し，図示したものが図 5 である。

通常の合成開口処理は高分解能探査を実現するため，小さな開口長の送受波器を用いて直線状に移動しながら海底からのエコーを集め，後処理によって仮想的に非常に長い開口長の送波器でフォーカス探査するのが基本原理である。しかし，以前マルチビーム音響測深機の送受波器の長い開口長をそのまま使って合成開口処理を行った⁸⁾ のと同

じく、本インターフェロメトリソナーは使用周波数 100 kHz、開口長がおよそ 40 cm の送波器、開口長が 8 cm のハイドロホンを使用している。40 cm の送波器はおよそ 1 度 (-3 dB) のビーム幅を形成するため、予め、使用するハイドロホンの合成開口効果の評価に加え、アジマス方

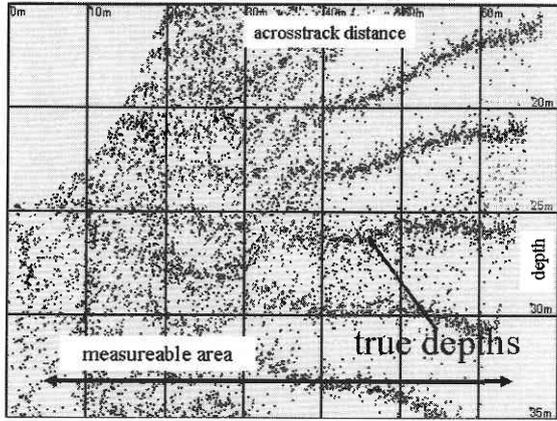


Fig. 4. Improved bathymetry plots by means of the synthetic aperture technique. Unmeasurable area disappeared with the result that the limited synthetic aperture brought about successfully bathymetry measurement.

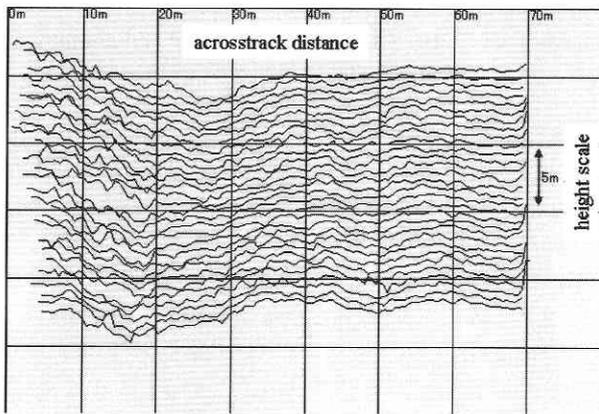


Fig. 5. 30-pings of bathymetry profiles after the limited synthetic aperture processing on the top of Kuroshima knoll at a depth of 560 m.

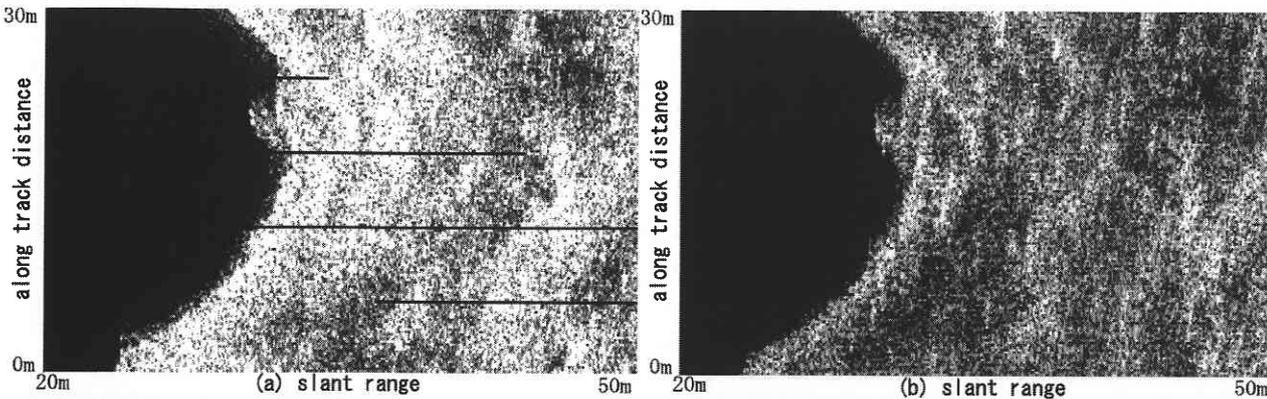


Fig. 7 (a) Backscatter image using an interferometry hydrophone and (b) backscatter image after the limited synthetic aperture processing on the top of Kuroshima knoll at a depth of 650 m. Black lines in (a) were caused by the interference with the SSBL.

向角に対する放射強度、位相変化の推定計算を行った。図 6 に示すようにフォーカス点から見た場合、主ビームの全幅内に見える位置にあるハイドロホン信号を合成開口処理に使用すれば、位相差変化が無く、送波ビームの合成開口効果が得られることが期待できる。このため、各フォーカスポイントから見て +/- 1.5 度以内に位置するハイドロホン信号を合成開口処理に使用した。合成開口処理は、相対位置関係の上で成立するので、PHINS から計測される速度 3 成分に加え、ロール、ピッチ、ヨー角の変化がもたらす速度変化を修正して処理を行った。ソナーの真下付近の地形計測を合成開口処理により改善するため、海底地形からフォーカスラインの位置を決める必要がある。図 6 は、図 5 の処理を行ったときの送波器の移動を表しており、フォーカスラインは各ピング毎に決め、そのピングした時の送波器の直交平面と海底との交差するラインが最も精度よく決まる理想フォーカスラインとなる。この理想ライン上のポイント毎に、ハイドロホン信号を抽出し距離補正を行って合成開口処理を行った。

今回の観測においてはサイドスキャンソナーの送受波

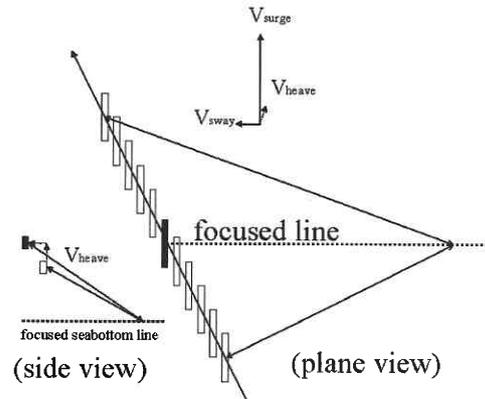


Fig. 6. Velocity correction of the transducer in the synthetic aperture processing. Backscatter waves from each point on a focused seabottom line were sampled correctly in the light of velocities, roll, pitch and yaw motions from the PHotonic Inertial Navigation System (PHINS).

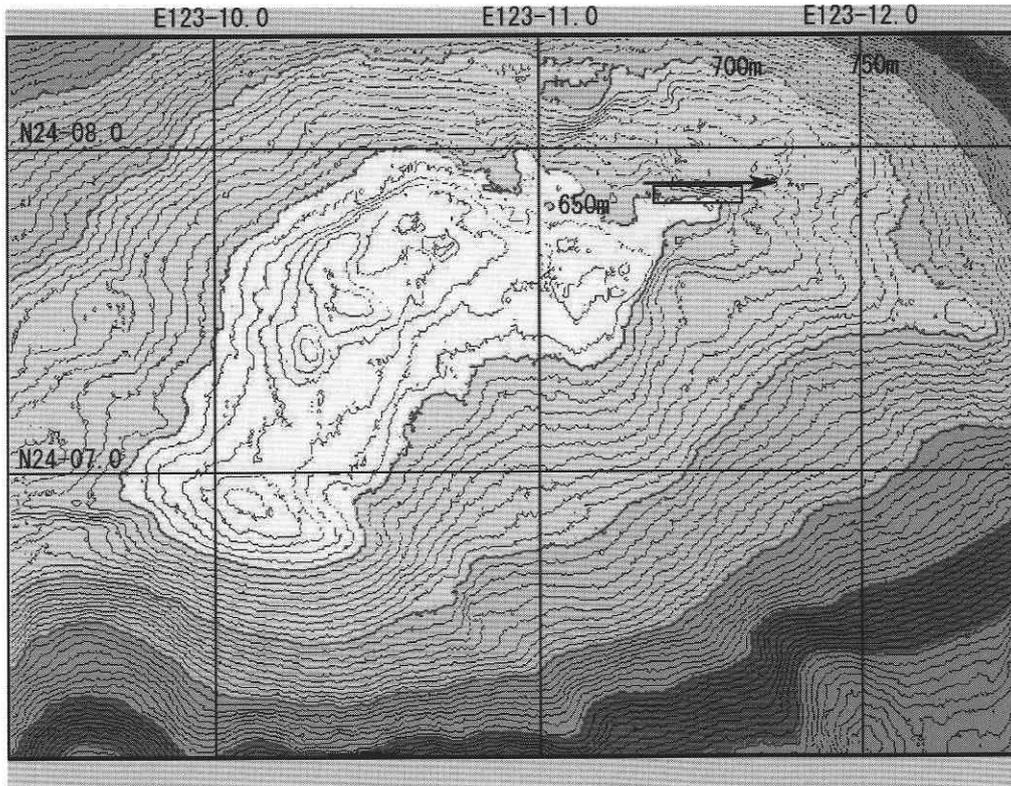


Fig. 8 Contour chart shows the 10 m grids model of Kurosima knoll surveyed with Sea Beam 2100 by Japan Marine Science and Technology in May 2003. Contour interval 5 m. A small box is the trial area of the interferometry synthetic aperture on the ascent slope of Kurosima knoll. An arrow is the trajectory of the AUV in December 2003.

器の長さをそのまま使用しているため、送受波器の移動距離は数秒間に制限されてしまうので、合成開口処理の分解能向上の効果は低下する。しかし、逆に数秒間の相対位置精度は非常に安定しているため、PHINSからの速度情報をそのまま使用することが可能であった。AUVは流れの少ない海中を低速で安定して航走することができるので、合成開口処理にとって適したビークルといえる。

3つのハイドロホン別々に合成開口処理を行い、それらの信号を用いて、信号の到来方向角を求めて、横距離と水深の断面にしたのが、図5である。同じデータから、信号の強度に着目して、音響画像として作成したものが、図7(a), (b)である。(a)はアレイの中心に位置するハイドロホンで受信した音響強度を横軸を実横距離、縦軸を移動距離として画像化したものである。図7(b)は合成開口処理を行った後の音響画像を示す。合成開口処理を行った後の方が明らかに細かな海底の様子が読み取れることが分かる。

4. 黒島海丘山頂部の海底地形計測結果

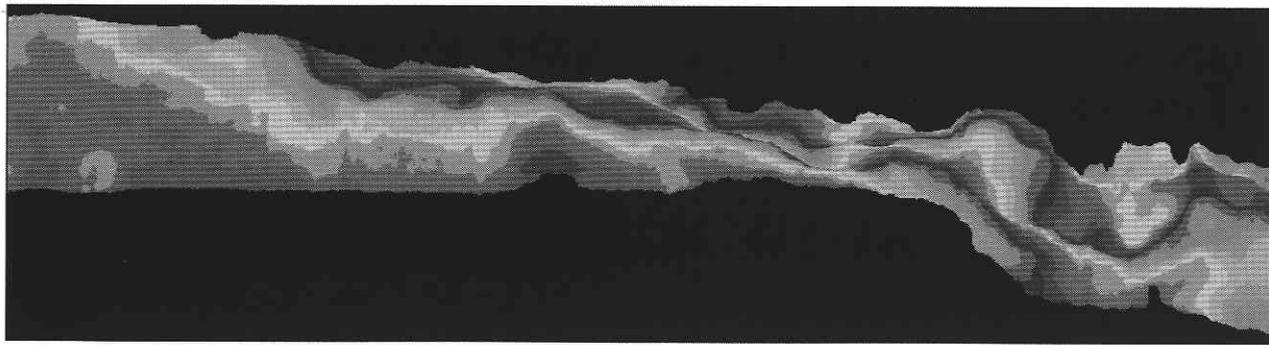
図8は海洋科学技術センターのYK 03-05 Leg1 (主席研究者布浦拓郎)による、マルチビーム音響測深機を使って計測された黒島海丘の5 m間隔の等深線図である。10 m間隔のグリッド地形モデルを作成し、この等深線図を描い

た。実際の海底に照射されたビームの間隔からすると、5 m間隔のグリッドは処理できる最高分解能といえる。この図の黒枠部分(南北100 m, 東西800 m)について、合成開口処理を行って海底地形計測を行った。この部分は、海底地形が航走するAUVの右側に位置し、登り傾斜となっていたため、インターフェロメトリ計測単独ではソーナ一直下近傍で著しい計測劣化が生じていた。このため、右舷のソーナ一のみを用いて合成開口処理によってどの程度の品質の海底地形計測が行えるか評価を行った。

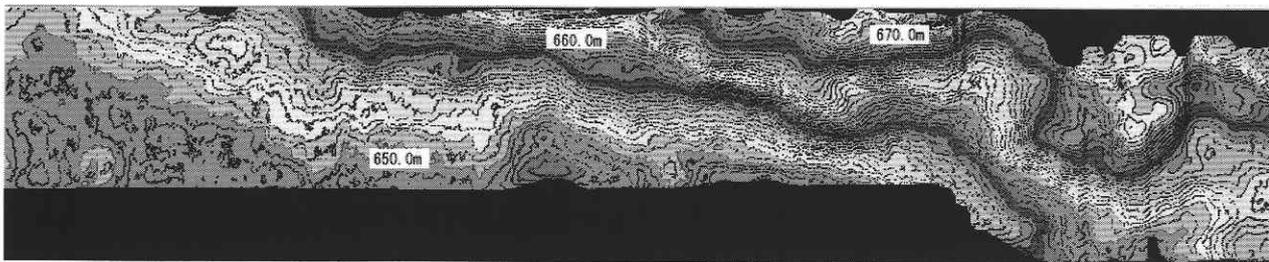
合成開口処理を行った3つのハイドロホン信号を使い海底地形計測を行った結果、0.3 m間隔の2800×350グリッド海底地形モデルを作成することができた。このグリッドモデルを基に図9の0.5 m等深線間隔の海底地形図を作成した。実際に、海底上25 m付近に接近して地形を計測しているため、海底上650 mも離れた海面から計測した海底地形図(図8)とは比較にならないほど詳細な海底地形が捉えられている。幾つもの小さな高まりや斜面の谷状の地形が分かる。

5. 考 察

本研究開発の特徴としては、(1)13波長にハイドロホンの間隔を拡げたことにより海底からの散乱波の到来方向角を高分解能で計測することができた、(2)L字型に配列



(a) Three dimensional view of a part of Kurosima knoll



(b) Contour chart

Fig. 9 (a) Three dimensional view and (b) contour chart of the top of Kurosima knoll after the limited synthetic aperture processing at a depth of 650 m. Contour interval 0.5 m. Detailed bathymetry grids of 800 m \times 100 m at an interval of 0.3 m were prepared finely.

した3つのハイドロホンにより3組の到来方向角の候補の中から真の到来方向角を決定できたこと、(3) インターフェロメトリ計測が最も苦手とする直下近傍での凹地地形や上り傾斜面の計測を効果的に改善することができた点を挙げることができる。また、従来あまり行われていなかった、直下近傍の画像の分解能を高めることに効果があることが分かった。これまでインターフェロメトリ計測研究開発のために、計6個のハイドロホン信号を16ビット、400 kHz サンプリングでハードディスクに収録して、後処理によって計測手法を開発、地形を計測してきた。今後は一時処理をリアルタイムで行い、収録データ量を軽減することが必要である。この手法は、ナローバンドのパルス信号、もしくはブロードバンドの信号を使うというように、相手のサイドスキャンソナーがどのようなものであっても対応可能であり、今後の応用価値が高いと思われる。

従来のインターフェロメトリソナーでは、サイドスキャンソナーと同じ送受波器を2つ並列に配置するものが標準であったが、鉛直方向において位相変化が大きくなるため、我々が使用したようにペンシル型の、鉛直方向に対して無指向性のもののほうが位相計測の精度が高いと推定される。

悩ましい点であるが、合成開口方式の海底地形計測ソナーにとって、実開口のサイドスキャンソナーと同じ送受波器をそのまま使用する場合と、送受波器をマスクして開口長を短くした場合とでは、どちらがより高性能なソナー

一となりうるのかを試験することが課題として残っている。また、これまで手法開発に主眼をおいてきたため解析処理に多大の時間を必要としたため、解析ソフトウェアの高速化を図らなければならない。

謝 辞

本研究プロジェクトは、文部科学省研究助成学術創成研究「深海知能ロボットの研究」の一環として行われたものである。黒島海丘の調査計画を立てるにあたり、事前に海洋科学技術センター（現海洋研究開発機構）のYK 03-05 Leg1（布浦拓郎主席研究者）によるマルチビーム音響測深機を使って計測されたデータを提供いただいたことに感謝の意を表す。

(2004年9月16日受理)

引用文献

- 1) Robert A. Tony George, Andrew W. Hill, James A. Thomson and Philippe Jeanjean: High-Resolution AUV Surveys of the Eastern Sigsbee Escarpment, 2002 Offshore Technology Conference, Houston Texas U.S.A., May 2002.
- 2) Denbigh, P. N.: Phase Only Side-Scan Sonar for Underwater Mapping, *Acoustic Letters* 1, pp. 84-87, 1977.
- 3) Blackington, J.G., D.M. Hussong, and J.G. Kosalos: First Results from a Combination Side-Scan Sonar and Seafloor Mapping System, (SeaMark II), *Proc. of the Annual Offshore Technology Conference 15*, pp. 307-311, 1983.
- 4) 浦 環：自律型海中ロボット r2D4 の製作と佐渡沖および

研 究 速 報

- 黒島海丘海底観測, 日本ロボット学会誌, 22, 6, 709-713, 2004.
- 5) 浦 環ほか: 新しい自律型海中ロボットで熱水地帯をくまなく探る—ここに至るまでの成果と音響工学的な課題—, 海洋音響学会誌, 29, 4, pp. 225-232, 2002.
- 6) Cloet, R. L., S. L. Hurst, C.R. Edwards, P.S. Phillips, and A. J. Duncan.: A sideways-Looking Towed Depth-Measuring System, *Journal of Navigation*, 35, pp. 411-420, 1982.
- 7) Napolitano F., Y. Cottreau, T. Loret, A. Chapelon, and T. Gaiffe. PHINS: the first inertial navigation system based on fiber optic gyroscopes, *Proceedings Stuttgart international Conference on Gyroscope Technology*, 2002.
- 8) Asada, A and Yabuki T. Synthetic aperture technique applied to a multi-beam echo sounder, *Earth Planets Space*, Vol. 53, pp. 321-326, 2001.