海底地形のマルチビーム音響探査と可視化技術

浅 田 昭*

Multi-beam Echo Sounding and Seafloor Imaging

Akira ASADA*

Abstract

Precise seafloor bathymetric surveys began with the appearance of the multi-beam echo sounder. It was able to observe the seafloor topography in detail using multi-beam sounding technology. To this day, the multi-beam sounding technology is revealing many significant seafloor features.

In recent years, multi-beam technology for shallow and deep waters has significantly advanced. Also, the processing and application technology for multi-beam bathymetric data has significantly advanced, corresponding to the progress of peripheral technologies, such as dynamic motion sensors and GPS. The synthetic aperture technique has been successfully applied to the multi-beam echo sounder, SeaBeam 2000, and has shown features of the seafloor in considerable detail. Furthermore, the three-dimensional acoustic-image animation technique has been developed using SeaBeam 2000 swath bathymetry and IZANAGI side-scanning sonar data. The animation around the earthquake focus sea area provides us with a lot of seafloor topographical information efficiently and accurately.

Key words : multi-beam echo sounder, synthetic aperture, seafloor imaging

キーワード : マルチビーム音響測深, 合成開口, 海底画像

I. はじめに

わが国において精密な海底地形調査が本格的に始まったのは、面的に水深測量を行うマルチビーム音響測深機の導入時期に対応している。マルチビーム音響測深機とは、船の左右一列に指向性の鋭い音響ビームを、例えば121本など多数配列して、船の進行とともに一度に多数点の水深を計測する調査機器である。このマルチビーム音響測深技術の導入により海底地形を詳細に見てとれるようになり、次々と海底の神秘のベールを剥がし海底地形学の進展に大きく貢献してきた。海の底に

は、巨大な谷や海山など、地球の変動の歴史を物語る数多くの地形が存在していた。

近年、マルチビーム音響測深技術は浅海から深海域用のものまで高性能、多機能化し、これらから得られた海底地形データの解析、利用技術も周辺技術の進展とともに目覚しく進展している。利用形態も、海図作成、海洋調査・研究、海底資源探査、物理探査、港湾・浚渫工事、海底線敷設調査、パイプライン調査、ダムの維持管理など非常に多岐にわたっている。また、生産されたデータセットも徐々に公開され、利用・解析技術も進展している。一般的に、マルチビーム音響測深機は

* 東京大学生産技術研究所

* Institute of Industrial Science, University of Tokyo

周波数が高いほど分解能は高いが対応水深は浅く限られ、周波数が低くなると分解能は低くなるが計測可能水深は増大する。大雑把にいうと、450 kHz のマルチビーム音響測深機は水深 100 m までを高分解能で計測し、200 kHz は水深 300 m まで、50 kHz は水深 3,000 m まで、12 kHz は水深 11,000 m まで計測可能である。

ここでは、これまでの主な調査成果例と、最新のマルチビーム音響測深技術、合成開口手法を適用して高分解能で海底地形を計測する技術開発、視覚的に海底地形をわかりやすく表示する 3 次元音響画像アニメーション手法について紹介する。

II. 主な海底地形調査例

1983 年に海上保安庁水路部がわが国で初めて導入したマルチビーム音響測深機 (SeaBeam) は水深 11,000 m まで計測可能で、船の左右両方向に一列に並んだ 16 本の指向性の鋭い音響ビーム (−3dB 指向幅 2.7 度) を使用し、一度に 16 点の海底の水深を計測するという当時としては画期的な超高性能調査機器であった。

Mogi and Nishizawa (1980) は、1976 年、1977 年の延べ数ヶ月に及ぶシングルビームの音響測深器による測量結果を念入りに解析し、銚子沖の第一鹿島海山 (水深 3,550 m) の西側半分が崩れ日本海溝 (水深約 8,000 m) にもぐり込んでいると解釈した。太平洋プレートがはるか東方から日本海溝まで移動し、日本列島をのせたプレートの下

にもぐり込みしているという、プレートテクトニクス理論を裏付ける証拠として注目を浴びた。その後 1983 年に行われた SeaBeam による海底地形調査では、海山もぐり込みの詳細な様子を 1 日もかからず鮮明に捉えることができた。図 1 は最新のマルチビーム音響測深機 SeaBeam 2112 による測量結果を示す。

1984 年には、世界で最も深い、日本の南方約 2,700 km に位置するチャレンジャー海淵の SeaBeam 測量を行い (西田ほか, 1985), 世界最深部の水深は 10,920 m であることを確定した (図 2-右)。マルチビーム音響測深機は面的に海底を測量するので、どこが最深部かを突き止めるのに非常に有効であった。

房総半島の南東沖合いには、それまでのシングルビームの音響測深結果から複雑な海底崖 (房総海底崖) が存在するものと思われていた。ところが 1984 年に SeaBeam で調査してみると、実は巨大な蛇行谷が海底に横たわっていることが発見された。この谷は全長約 100 km, 谷幅約 3,000 m, 谷の深さは 1,000 m を越す巨大なものであった (図 2-左)。すなわち、マルチビーム音響測深機の導入により、きわめて複雑な地形を面的に正確に捉えることができた事例である。

図 3 はこれまでの数々の調査で明らかになった、わが国周辺の海底地形の鳥瞰図である。シングルビームの音響測深データとマルチビーム音響測深データを統合、編集して作成した 500 m メッシュ

図 1 マルチビーム音響測深による第一鹿島海山の陰影鳥瞰図。
高さ方向は水平方向に対し 2 倍に誇張、北から俯角 30 度で眺める。

図 2 マルチビーム測深による房総半島沖の海底大蛇行谷の陰影鳥瞰図（左）とチャレンジャー海淵世界最深部のワイヤーフレーム鳥瞰図（右）。

図 3 日本周辺の海底地形鳥瞰図。

シングルビームとマルチビームの音響測深データを統合、編集した 500 m メッシュデータから作成（浅田，2000b）。陸部は米国地質調査所の GTOPO-30 を使用。

データから作成したものである（浅田，2000b）。この 500 m メッシュデータは日本海洋データセンターから公開している。陸部は米国地質調査所の GTOPO-30 を使用している。

III. マルチビーム音響測深機の高性能化

マルチビーム音響測深機の計測手法（浅田，1997）はクロスファンビーム方式に基づくものである。まず，図 4 に示すように海底に向け音波（送波ファンビーム）を照射し，次に受波スリット（受波ファンビーム）で海底をのぞく。この結果，音波の当たった海底のうち，受波スリットの

中に捉えた部分のみのエコーを得ることができる。つまり，送波ビームと受波ビームのクロスした部分の鋭い音響ビームで海底を調べたことになる。水深は，音波を発射した時から，海底で反射し受信されるまでの時間を計測することによって計測される。次に，海水中の音速プロファイルを使い音響ビームの音線屈折補正を行って水深と横距離を計測するものである。

例えば，12 kHz の音波を使い水深 50～11,000 m を計測するマルチビーム音響測深機 SeaBeam 2112 は，1 つの送波ファンビームと 151 個の受波スリットを 1 度間隔で作ることにより，150 度幅

図 4 クロスファンビーム方式によるマルチビームの形成。

図 5 スプリットビームと多重ビームを使ったビーム内海底エコーパルスの高分解能計測。

の水深を一度に計測する。このマルチビームで一度に計測する幅を SWATH 幅という。船は横一列の水深測量を行いながら前に航行しているので、船の進行とともに海底地形を面的に捉えることができることになる。

マルチビーム測深の場合、海底からのエコーの立ち上がりを計測するという方法は図 5 を見ても好ましくないことがわかる。つまり、予め設定されたビームの傾き角度値に対応したビーム幅の中心のエコーを捉えることが好ましい。この目的のため Farr (1980) はビーム信号から海底のエコーの中心受信時間を計測する方法として、エコーの振幅荷重平均時間、つまりエコーの音圧振幅の時

間積分の重心点を受信時間とみなす方法で計測する手法を実用化した。この方法は標準的手法として多くのマルチビーム測深機に採用されてきた。

最近では、マルチビーム音響測深機の精度を上げるために、図 5 のように、1 つのビーム内から発生する海底エコーパルス群をさらに時間で分離して、エコーパルス信号の到来方向をビーム幅よりさらに高分解能で計測する手法が用いられるようになってきた。例えばビームが左右に 2 度の広がりを持っていても、ビーム内を 0.1 度で分離計測する等である。ビームの中心軸が同一方向を向き、ビームの基点が少し離れたベアービーム（スプリットビーム）で同時に受信し、両者の信号の

位相差から到来方向を計測するもの（240 kHz の SeaBat 8101 他）や、FFT を使って形成した多数のオーバーラップするビーム群から海底エコーパルスの到来方向を計測するもの（12 kHz の SeaBeam 2112）（Talukdar *et al.*, 1992）などがある。

しかしこれらの方法は、平坦な海底の場合、直下付近に向いたビームでは、そのビーム内の海底細部から反射するエコーはみな略同じ時間に受信されるため、細分離どころか計測すらできないという欠点を持つ。また、急斜面などでも斜面に直交するビーム付近で同じ現象が引き起こされる。このように海底からのエコーが略同じ時間に返ってくるビームにおいては、エコーの振幅荷重平均時間の方法が正確に計測できるため、計測方法を併用し精度の高い方を選択することとしている。サイドスキャンソナーから発展した2列の受波アレイで位相差を計測し測深する方法も海底地形計測に使われているが、この場合略同じ時間に返ってくる海底エコーが存在すると、その付近において計測不能となることがある。

通常、受波アレイのビームステアリングは、各ハイドロホンへの音響入力信号が無限遠からの平面伝搬波と仮定してビームフォーミングを行っている。これに対し、瞬時瞬時の往復伝搬時間ごとに音源の距離を計算して球面拡散波として取り扱うダイナミック・ビームフォーキャストを取り入れた SeaBat 8125（455 kHz、前後1度×120度 SWATH 受波0.5度×240ビーム、水深計測分解能6 mm）は、近距離のビーム信号の品質を向上し、従来最も苦手であった鉛直に立ったポールも正確に捉えることができたと報告している。

SeaBeam 2120（20 kHz、最大150度 SWATH）の送波ファンビームは、フォーキャストビーム法により、水深約6,000 m以深では左右のビーム幅の広がりや絞って音響エネルギーを狭いビーム幅に集中させることにより、9,000 m水深でも40度 SWATHを可能とする効率的な送波ビーム幅調整を行っている。

Simrad EM12（12 kHz、最大150度 SWATH）、EM1000（95 kHz、最大150度 SWATH）、EM300

（30 kHz、最大150度 SWATH）、SeaBeam 3000（12 kHz、最大150度 SWATH）他は、マルチビームにより海底をできるだけ面的に均一に捕そくすることを目的として、アクティブなピッチ、ヨーイング補正を送波ファンビームに施している。つまり、ピッチングにより送波ファンビームが前後に揺れること、ヨーイングにより送波ファンビームが左右に回転動揺することを防いで安定化しようとするもので、前後・左右方向ともマルチビームの揺れを無くするものである。音響画像等はリアルタイムのプリントのひずみが無くなる。この補正技術は、送波ファンビームを幾つかに分離して、測線に直交する線上に並べるようにしている。

音波を使い海底の“写真”を撮ったものを音響画像とよぶ。最も一般的な計測装置はサイドスキャンソナーであるが、マルチビーム音響測深機も、最近ではこのサイドスキャン機能が付加されている。今まで水深計測では音波の往復伝播時間のみを計測し、海底からのエコーの強さの情報は利用していなかった。先に紹介したビーム内の海底エコーパルスを時間で分離して計測する方法を使えば、高分解能の非常に多くの海底エコーパルスの、時間と到来方向角、エコー信号の強さ（音響画像）情報が同時に得られる。この場合、サイドスキャンソナーに比べ、位置の計測がしっかりしているので、画像の位置誤差によるひずみが生じない良さがある。通常のサイドスキャンソナーは、海底を平坦面と仮定して横距離を単純に三角関数で計算しており、地形の凹凸、傾斜などにともなう様々なひずみが生じている。

また、到来方向角により海底エコーの強さは大きく変化するため、補正して均質な画像にする必要がある。海底の低質や表面の粗さによってエコー信号の減衰パターンが異なってくるため、計測した海域のデータから3種類ほど見本パターンを予め用意し、実際の計測データの減衰パターンと最も相関のよいものを使って補正すると、良質の海底音響画像が得られる（Asada, 1993）。

SeaBeam 2112.004 は、12 kHz のマルチビーム測深機にナロービームのサブボトムプロファイリング機能を加えたものである。これは、12 kHz と

4 kHz の送波アレイを船底キール上に並列に配置し、受波ハイドロホンアレイを共用するものであり、クロスファンビーム方式により 4 kHz のナロービームを作り、深海でも高分解能で海底表層 75 m 位の地質構造を調査できるようにしたものである。海底下の地層を探索するには低周波の音波が使われるため、ビームが横に広がり海底からのエコーが長くなるので、特に深海では、地層の分解を著しく低下させていた。

浅海用マルチビーム音響測深技術の向上と普及を支える周辺技術も進んでいる。最近では、キネマティック GPS により、船の 3 次元位置がセンチメートル精度で 0.5 秒間隔で計測できるようになった。傾斜計を発展させ、より瞬間的な動きに対応させるため、3 軸に配置した加速度計と角速度センサーを組み合わせた小型のダイナミックモーションセンサーなどの開発と普及、さらに GPS と結合して加減速時、旋回時の補償を行うことにより、精密に船体、送受波器の動揺を捉えることが可能となった。合わせて、送受波器の上下動も 5 cm 程度で計測できる。最近では、GPS 方位計測、光ファイバーを使ったダイナミックモーションセンサーの開発と実用化などが進んでいるが、小型で装備し安いことが肝要とされている。これらを上手く取り入れた場合でも、現状では上下動の計測誤差の標準偏差は 25 cm 程度である。今後、各センサーの適正な空間配置、時間の整合などをより精密に改善することにより、さらに精度は向上するものと期待される。

IV. マルチビーム音響測深の合成開口処理

プレートの沈み込みと地震発生のメカニズムはこれまで様々な地球科学的な調査によって次第に明らかにされてきた。しかしながら、海底での地殻変動に関するデータは非常に少なく、震源海底で起こっている地殻変動と地震との関係はよくわかっていない。陸上では人工衛星や航空機の電磁波を使った合成開口手法により、断層地形の調査や、合成開口で観測した両電磁波間の干渉解析により地震前後の活断層の変動を捉える (Massonnet *et al.*, 1993) 研究が行われている。

海域においても海底の地形変動を高精度で観測することを目指して、SeaBeam 2000 (Capell and Kiesel, 1989; Asada, 1992; Talukdar *et al.*, 1992) のマルチビーム音響測深機の合成開口手法による送信ファンビームの指向性改善、高分解能の海底検出手法の開発を行い、実データによる検証を行った (Asada and Ueki, 1998)。

SeaBeam 2000 は対象水深 50 m ~ 11,000 m, SWATH 幅 120 度の海底地形計測装置である。合成開口は正弦波信号の重ね合わせ処理に基づくビームホーミングであることから、12 kHz (波長は 12.5 cm) の SeaBeam 2000 の合成開口には、位相合成効果が保証される ± 45 度、つまり動揺を含めた移動位置計測において距離精度として $1/8$ 波長 (1.5 cm) 程度 (Cutrona, 1975) が要求される。さらに、送波器が合成開口長の距離を移動する間、2 度の送波ファンビーム (海底に照射される音波) のフットプリント (被照射部分) が十分な重なりを持つ必要がある。このため、船首方位角の動揺 ± 1 度以下で直線航走する必要がある。また、送波器アレイ長が 4.3 m であることから、おおよそ 4.3 m 程度の間隔で発信して海底からのエコー信号を収録することが望ましい。このためには、水深 1,000 m 相当の海域では発信 (ピング) 間隔が 5 秒と推定されるため、0.8 m/s の低速航走が望まれる。

1998 年 11 月に水路部の測量船「海洋」を使い、相模湾の小田原南方沖 10 km ~ 20 km の海域において SeaBeam 2000 の後処理による合成開口を目的とした基礎データを収録する試験を行った。海域から 10 km ~ 20 km 西に離れた真鶴岬と 100 km 離れた春日部に GPS の基準局を設置し、測量船のキネマティック GPS (Leick, 1995) 航走データを収録した。同時に SeaBeam 2000 の動揺検出器 (HIPPIY120C) とレーザージャイロ (JIMS-200R) の 2 種類の動揺センサーの計測を行った。つまり、GPS による水平移動と鉛直動揺計測、動揺検出器による鉛直動揺計測とロール、ピッチ、船首方位角の計測を行いながら、8 km の測線をできる限り低速 (1.6 m/s) で直進航走した。この間、舵は固定して動かさないようにして直進航走

図 6 マルチビーム音響測深機に合成開口手法を適用する方法。
送波ファンビームを、基準軌道からの送・受波器のずれを補正して動揺を抑えた受波ビームで分割し、
動揺の無いクロス部分ごとに合成開口処理を施す。

を試みたところ、最初は風と流れと船の推力のバランスが悪く1時間ほど円弧を描き、その後やっと真南に方向が安定して直進することができた。この間、全体の半数にあたる42本のハイドロホンアレイの受信信号を低ノイズで連続して収録した。

SeaBeam 2000の合成開口の目的は、前後2度×左右120度の送波ファンビームを合成開口により0.3度幅(30m長の送波器に相当)にすることである。つまり受信収録したハイドロホン信号を使い、後処理により仮想的に30m長の送波器アレイを作ることにある。これにより、前後方向のビームの分解能は向上し、合わせて前章で紹介した最近の手法を使って左右方向の分解能を向上させれば微細な地形を捉えることができる。

今回の合成開口手法では、図6に示すようにクロスファンビーム方式により前後2度×左右120度の送波ファンビームを左右4度幅の受波ファンビームで分割し、分割された送波ビーム(前後2度×左右4度)ごとに合成開口処理を施して前後方向を高分解能化(前後0.3度×左右4度)した送波ビームを作る方法をとった。実際の信号処理においては、この分割された送波ビームとは、受波ビームにあたる。さらに、左右方向を高分解能化するため、この4度幅の受波ファンビームを左右0.5度間隔で221個並べ、110度幅をカバーす

る受波ファンビームを作成した。

使用した動揺センサーのカatalog精度は、HIPPY(25 Hz計測)についてはロール、ピッチ角は0.05°、鉛直動は1 cm(0.033 Hz~0.5 Hz)、レーザージャイロ JIMS-200R(5 Hz計測)については方位角は0.05°、ロール、ピッチ角は0.1°、鉛直動は10 cm(分解能)である。動揺データについてはデータ通信による時間遅れと時間的揺らぎの修正を行った。これら動揺計測中はGPS時計による時刻計測を行ったが、測定項目ごとに異なる時間遅れの現象が起こるため、最終的にはキネマティックGPSの高度計測データ(HIPPYの位置に換算後)と、HIPPYの上下計測データの波形を合わせることで精密に各測定項目ごとの時間同期をとり、HIPPYとレーザージャイロのロール角の波形合わせにより時間同期をとった。この基礎データを収録する試験時、つまり合成開口処理を行った測線の航走時、ロール角は±1.3度、ピッチ角は±1.3度、上下動は±50 cm、船首方位角は±1度の動揺であった。また、GPSの上下動計測データをHIPPYの位置に換算し、波形合わせを行った際に振幅差が1波長(12.5 cm)程度みられた。このため、送受波器の動揺誤差は1波長程度は存在すると推定された。

データレコーダ(RX8016)3台には、それぞれ14本のハイドロホンと、SeaBeamの発信TTL

図 7 SeaBeam 2000 装置が計測した海底地形断面の縦配列 (a) と合成開口処理後 (b)。
相模湾真名鶴沖 10 km に位置し、水深は約 900 m。合成開口処理により詳細な地形、谷筋や段状の地形が見えるようになった。

パルス信号を接続して 48 kHz サンプリングで記録した。データレコーダ (RX8016) 3 台は同期誤差が ± 100 ms 程度あったため、TTL パルスの立ち上り波形記録の相関処理により SeaBeam の発信と 3 台のレコーダの同期ずれを $0.02 \mu\text{s}$ の分解能で解析、修正した。また、TTL パルスは GPS による 1 ms 分解能の時刻計測を行った。

まずハイドロホン信号から有用な信号のみを抽出するため、32 サンプル長の FFT を使ってハイドロホン信号から 12 kHz 成分のみの複素信号を準備した。このハイドロホン信号から、キネマティック GPS 位置計測、ロール角、ピッチ角、ヨー角、ヒープ値情報を使用し、受信間隔 1 ms ごとに個々のハイドロホン位置を計算し、音波の往復伝搬時間に相当するビーム軸上の位置に 42 ハイドロホンが個々に焦点を合わせたメモリシフトと内挿による距離補正を行い、同時に動揺補正を行い、最終的に動揺の無い受信ビームを形成した。このようにして 5 ピングの中心位置にビームの起点を固定し、0.5 度間隔、 ± 55 度幅、1 kHz サンプリングの 221 本のマルチビーム受波信号を作成した。

5 ピング $\times$ 221 ビームの信号データを使い、各ビームごとに仮想的に送波アレイを合成開口し、8 倍の開口長を実現し、通常 2 度の送波ファンビームを 0.3 度の指向幅に向上させることができた。さらに、多数のオーバーラップする受波ビーム群から海底エコーパルスの到来方向を計測する方法

に S/N による海底検知の良否判定機能を加えたソフトを作成し、図 7 (b) に示すように詳細な海底地形計測を行うことができた。この結果、合成開口効果により詳細な谷筋、テラス地形などが見えるようになり、かつ計測地形の S/N も大幅に向上し幅広い地形計測が提供された。総合的な送受波器の動揺計測精度がおよそ 1 波長 (12.5 cm) と推定されたため、合成開口のオートフォーカス処理ソフト (相関処理により合成開口効果が最大となる位相補正量を自動的に求めながら合成開口を行う) を作成して使用した。1 波長程度に動揺を抑えた受信ビームを形成しておけば、オートフォーカス処理により良好な合成開口効果を得ることができることがわかった (Asada and Yabuki, 1999)。

V. 海底地形の可視化技術

富山湾から北海道西岸にかけての日本海東縁部一帯では、1940 年に積丹沖地震、1964 年に新潟地震、1983 年に日本海中部地震、そして 1993 年に北海道南西沖地震と近年大きな地震が立て続けに発生しており、地震の空白域が存在するという指摘がなされるなど注目を浴びている海域である。海上保安庁水路部は北海道南西沖地震の後、科学技術振興調整費により日本海東縁部で発生する地震発生と関連した断層地形などの変動地形を明らかにすることを目的とし、SeaBeam 2000 による

図 8 IZANAGI サイドスキャンソナーの調査法 (徳山ほか, 1991)。

海底地形調査、並びに東京大学海洋研究所と共同で IZANAGI サイドスキャンソナー (徳山ほか, 1991) による音響画像調査を実施した (加藤・浅田, 1998)。また、日本水路協会海洋情報研究センターとの共同開発により、音響画像と海底地形を重ね合わせた 3 次元のリアルアニメーション手法の開発を行った。この手法を使って、北海道南西沖地震の震源海域を中心として、その南部から北部一帯の SeaBeam 2000 で計測した海底地形データと IZANAGI サイドスキャンで計測した音響画像データを重ねた 3 次元リアルアニメーションの作成を試みた (浅田, 2000a)。この結果、アニメーション化された画像は静止画による地形・音響画像よりはるかに情報量が多く解析能力が高いことが実証された。

調査は図 8 に示すように、水深 100 m にサイドスキャンソナーの曳航体を沈めた状態で、船速 7~8 ノットで曳航しながら行われた。海底の音響画像は曳航体の左右 5 km づつ、計 10 km の幅を計測した。使用音響周波数は 11 kHz と 12 kHz である。測線は北西・南東方向に設定し、間隔は 9 km とした。

作成したアニメーション音響画像は、反射が強いほど黒く、弱いほど白く表すようにし、曳航体の直下付近では画素の分解能が極端に劣化するため白抜きとした (細い帯となって現れる)。音響

画像では、一般に柔らかい軟泥質の海底は白く、ごつごつした露岩は黒く表現される。砂地の海底は濃い灰色に表される。谷筋や崖斜面は表層の柔らかい泥状の堆積層が流れ落ちて反射強度の強い岩や砂利が露出しているため、黒く表される。また、海底地形に対応して濃淡が現れる。つまり、海底の傾斜面において、反射面が曳航体に向い合っている場合は散乱波は強く、反射面が曳航体の方向と平行する方向に近づくほど弱くなり、反射面が後ろ向きになると散乱波が無くなる (音波のシャドウ) ため白抜けとなる。このような、地形効果による濃淡が生じる。斜面に平行に走行して左舷を高い方に見て走行した場合、左舷側の画像は強く、右側は弱くなる。例えば、谷を斜交して航走した場合、つまり谷が左の計測画像から右の計測画像に移るとき、左計測画像で谷を形成する片側斜面が登りに見えていたのが右計測画像では下り斜面として見えるため、谷斜面の白黒画像が反転する。3 次元アニメーションでは地形モデルの上に音響画像を張り合わせているため、このような地形効果にともなう視覚的矛盾点がかなり緩和されて見やすくなっている。

SeaBeam 2000 により計測された海底地形データと IZANAGI サイドスキャンにより計測された音響画像データを重ね合わせ、3 次元海底音響画像を解像度を下げずに、自由な位置において自由

な方向を眺めることのできる3次元アニメーションを作成した。この作成には、SmoothMove Panoramas for 3D studio MAXというソフトウェアと超高速の画像処理計算機を使用した。概略の処理内容は以下のとおりである。

1) 北緯39度50分から43度20分、東経138度30分から140度の区域における、170mメッシュの762個×2,295個の海底地形グリッドと、同一区域の17mピクセルサイズの音響画像データ(水深間隔500mごとに段彩情報を設定したRGB画像データ)を用意した。

2) アニメーションパスを設定し、デジタル映像やCG画像を球体的パノラマ画像に変換する技術を使い、アニメーションパス上の1ポジションごとに上下前後左右6方向のレンダリング画像、つまり球面スクリーン状の全画像(PANデータファイル)を生成した。

3) こうして作成したPANデータファイルを使い、アニメーションパス上をスムーズに前進・後進可能で、停止した任意のポジションから360度×360度の全球面方向に視点を変更可能な、3次元海底音響画像アニメーションを提供することを実現した。

この3次元海底音響画像アニメーションを使用すると、個々の海底地形や音響画像を単独で見たものより、はるかにわかりやすく海底で起こっている変動を観察することができる。

口絵5は、作成したアニメーションの1コマの1画面分の表示例である。このアニメーションでは、1コマは球状スクリーンであり、それを6分割した1画面である。白黒の音響画像に比べ水深に対応してカラーを使って段彩したので、地形の高低差、起伏が視覚的にわかりやすくなった。奥尻島北部の奥尻海嶺(口絵5-1)は長年に及ぶ東西圧縮の断層運動によって千メートルほど隆起して形成された海嶺と考えられ、今回の地震の震源分布に一致している。また、南から見た奥尻島東部のゆるやかな海底斜面に続く奥尻海盆(口絵5-2)には、北海道松前半島西方(画面右奥)の急崖からもたらされたと考えられる混濁流跡がくっきりと描かれている。西から見た奥尻島斜面(口

絵5-3)では、奥尻島の西側は急傾斜面になっており、表層の堆積物が流れ落ちた幾つもの黒い帯や斜面が見える。

このアニメーション音響画像では、実際に飛行機に乗って陸上の山岳地帯を観察するような感覚で、海底地形の変動の痕跡を手にとるように観ることができる。しかしながら、サイドスキャンソナーが持つ幾つかの問題が存在するので注意が必要である。実際には音波が届いていない場所に、海底の多重反射、もしくは背景雑音を、もっともらしく海底の画像として扱ってしまう場合が生じる。これは急傾斜の大陸斜面、急斜面を持つ海山などの裾を航走した場合に起こる。顕著な例は、海山の山頂が島になっているのに、島をも覆ってしまう海底画像を作ったり、陸域まで画像が覆ってしまう例である。曳航深度が100mなので、100mより浅い海底の音響画像は通常は捉えられないはずである。このため、水深100mより浅い海域のサイドスキャンソナー画像は、画像の無い部分と同じく白抜きとした。

VI. おわりに

広範囲の海底を手にとるように見る、これを実現したのがマルチビーム音響測深技術であり、今日まで着実に海底調査が進んでいる。しかし、海洋は広く未だに調査されていない海域は数多く残されている。また、最新の機器は高分解能となり、再度調査してみると、さらに正確なかつ詳細な地形が現れてくるのが現状である。SWATH幅も広がり、過去において取り残し区域が残ってしまった箇所、データのばらつきが大きく品質の悪い測量区域などがある。また、GPS技術の進展により合成開口手法が可能となり、船体の動揺も正確に捉えられるようになったおかげで、浅海域から深海域まで海底地形調査の精密計測が可能となってきた。加えて、最新のコンピュータグラフィック技術を使用して、海水を取り払い飛行機で陸上の地形を見るように、海底を自由に、かつ、高詳細度で表すことが可能となってきた。しかしながら、海底は未知の世界であり、海底探査技術は更なる発展が期待される分野である。

文 献

- Asada, A. (1992): Sea Beam 2000 Bathymetric surveying with interferometry. *Sea Technology*, **33-6**, 10-15.
- Asada, A. (1993): New bathymetric surveying and processing system based on SeaBeam 2000. 水路部研究報告, **29**, 1-32.
- 浅田 昭 (1997): マルチビーム測深の原理. 水路部技報, **15**, 73-93.
- 浅田 昭 (2000a): 海底音響画像アニメーション—北海道南西沖地震の震源海底—. 水路技術講演集, **13**, 55-63.
- 浅田 昭 (2000b): 日本周辺の 500 m メッシュ海底地形データとビジュアル編集プログラム. 海洋調査技術, **23**, 21-33.
- Asada, A. and Ueki, T. (1998): Synthetic aperture analysis using a multibeam echo sounder. *J. Acoust. Soc. Japan.*, (E) **19**, 259-268.
- Asada, A. and Yabuki, T. (1999): Acoustic ranging system for ocean bottom geodesy and synthetic aperture technique of a multi-beam echo sounder. *Proc. Intern. Workshop on Recurrence of Great Interplate Earthquakes and its Mechanism*, 26-28.
- Capell, W.J. and Kiesel, K.C. (1989): An extend capability multibeam bathymetric mapping system. *IEEE Conf. Proc. OCEANS' 89*, 1124-1136.
- Cutrona, L.J. (1975): A comparison of sonar system performance achievable using synthetic aperture techniques. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **58**, 336-348.
- 加藤幸弘・浅田 昭 (1998): 日本海東縁部の変動地形. 日本海東縁部の変動地形, 月刊地球, **8**, 510-514.
- Farr, H.K. (1980): Multi-beam bathymetric sonar: SEABEAM and HYDROCHART. *Marine Geodesy*, **4**, 77-93.
- Leick, A. (1995): *GPS satellite surveying*. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 560 p.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**, 138-142.
- Mogi, A. and Nishizawa, K. (1980): Breakdown of a seamount on the slope of the Japan trench. *Proc. Japan Academy*, **56**, Ser. B, 5, 257-259.
- 西田英雄・宗田幸次・近藤 忠 (1985): シービームによるチャレンジャー海淵の水深調査. 最近の海底調査, 日本水路協会, **5**, 25-28.
- Talukdar, K., Capell, W. and Zabounidis, C. (1992): Sidescan survey results from a multibeam sonar system-SEA BEAM 2000. *Marine Geodesy*, **15**, 63-79.
- 徳山英一・山本不二夫・芦 寿一郎・植木俊明・八木下晃司・平 朝彦 (1991): 広域測深型サイド・ルッキング・ソナーによる海底探査 IZANAGI を例として. 日本音響学会誌, **47**, 57-62.

(2000 年 9 月 18 日受付, 2000 年 11 月 21 日受理)