IZANAGI 海底画像ソナーシステムの原理とその実例

Principles and Applications of IZANAGI Oceanfloor Imaging Sonar System

徳山 英一*, 山本富士夫*, 芦 寿一郎*
植木 俊明**, 清川 昌一*, 月岡 哲***
徐 垣*, 平 朝彦*

H. TOKUYAMA, F. YAMAMOTO, J. ASHI T. UEKI,
S. KIYOKAWA, S. TSUKIOKA, W. SOH, A. TAIRA

1. はじめに

地球の面積2/3を占める海底については、まだまだ未調査の海域がたくさんあり、この意味で、地球は月や火星より“未知の天体”であると言ってよい。地球をよりよく知るには、海底のリモートセンシングが不可欠であるが、光は水中で極度に減衰するため、音波を用いるのが有効である。IZANAGI oceanfloor imaging sonar system は、水深10,000m までの海底音響画像と海底地形図とを同時に作成する最新のサイドスキャンソナー型海底リモート・センシング機器である(山本他, 1989)。この音響画像と水深図とを組み合わせることにより、海底の詳細な地形・地質情報を得ることが出来る。本システムの基本原理は、まず、海面下の曳航体(Towfish)から、両舷方向に扇型に制御された音波(11/12kHz)を発信する。音波が海底や海底面上の人工物に達すると、そこで反射波と散乱波が発生する。発生した散乱波のうち、再度曳航体に戻ってくる音波(後方散乱波)を受信することによって、海底面の形状や底質を航空写真に似た面的な音響画像として捉えるシステムである。海底からの後方散乱強度の強弱から、海底面の画像を作成する点においては通常のサイドスキャンソナーと同じであるが、本シ

テムはその機能に加えて測深能力を有する点が大きな特徴である。IZANAGI の性能および機能は次の通りである。

- 1) 海底の音響画像と地形図の両方のデータ取得が可能である。
- 2) 使用する音波の周波数は右舷12kHz, 左舷11kHz で、浅海300m から超深海10,000m までの探査が可能である。
- 3) 探査幅は可変であり、使用目的に応じて1km から40km までの範囲で5段階の選択が可能である。
- 4) 最大10knots (通常は7-8knots) までの船速で海面下100m 前後で曳航することが出来る。送受波器を海面下約100m に置くことにより、表層海水の温度、塩分濃度等による影響を軽減し、さらに、船の動揺と雑音を防ぐことが出来る。
- 5) 可搬式であることから、ある基準を満足する船であれば調査船として使用することが出来る。
- 6) データ取得時の故障に対する対策が施してある。

IZANAGI を曳航速度8knots, かつ探査幅を20km で使用した場合、1日で約7千km²の海域をカバーする音響画像を作成することができる。

2. IZANAGI データの取得法

2.1 IZANAGI 曳航システム

図1にIZANAGI システムの曳航概念図を示す。本システムのトランスデューサは、一般のマルチ・ナロービーム測深機(例えばSeaBeam)のような船底取付け

* Ocean Research Institute, University of Tokyo
** On leave from Sanyo Techno Marine, Inc.
*** University of Electro-Communications
「写真測量とリモートセンシング」Vol. 29, No. 2, 1990

OUTLINE OF IZANAGI TOWING SYSTEM

図1 IZANAGI システム曳航概念図

ではなく水中曳航方式を採用している。曳航体（写真1）は曳航ノイズを最小限にするために流線形をしており、音響インピーダンスが水と等しい材質からなるカバーで保護されている。トランスデューサは片側二

列ずつ、一列が32素子で構成されている。発信ビームは両舷方向に70°、また、そのビーム幅は2°である。曳航体は扇形に発信された音波が、再度曳航体に戻ってくる音波の列を受信する。したがって曳航体の安定は、

写真1 IZANAGI 曳航システム

良質な記録を得る上で極めて重要であり、そのために以下のような対策が採られている。

- 1) 曳航体は上部に浮力材 (Syntactic Floatation) を入れ、浮力を重心の約30cm上に行っている。
- 2) 船の垂直の動揺を抑えるために、曳航体とデプレッサーとの間に比重が海水と等しいアンビリカル・ケーブルを用いている。
- 3) 曳航体後部にブライドル (15m) とドログ (500 m) のロープを取付けることにより、曳航体を後方に引っ張る力を与えている。

またオフライン処理による音響画像と水深図の補正を行なうために、曳航体にはローム、ピッチ、ヨーイングのセンサーおよびCTDが装備されており、それらのデータは実時間でロギングされている。

曳航システムは、専用の Launch/Recovery System (LRS) によって投入・回収が行なわれる。本システムは、動力源である油圧式のパワーバックとウィンチ、LRSの3つから構成される。投入・回収作業は携帯型の遠隔操縦装置を用いることにより、3人程度で行なうことができる。

曳航時にケーブルが切れた場合の回収手段として、緊急リカバリー・システムがデプレッサーに付いている。これは曳航ケーブルが切れ、曳航体がデプレッサーの重量によって500m以深に沈められたときに水圧によるデプレッサーの切り離しが行なわれるように設計されている。

2.2 船上機器

船上機器は、曳航体の制御とデータの一時処理を行なうコントロール部とデータの記録を行なうロギング部の2つに大別される。コントロール部では曳航体の制御を行なうとともに、曳航体から送られてくるばう大な受信データのうちから、片側1,024ピクセルのサイドスキャン・データと128組の電気的角、斜距離データ (後述する) を抽出する。こうして海底からの後方散乱強度の変化 (強弱) に対応した濃淡イメージがグレイスケール・レコーダーに出力される。ロギング部は2台のコンピュータから構成されている。1つはコントロール部からのデータを光ディスクへの記録書込みを行ない、もう一方はハウスキーピング・データ (水深、曳航体の姿勢情報) のカラープリンターへの出力に用いられる。船上でのトラブルを予想して2台のコンピュータは同機種が使用されており、どちらかのコ

ンピュータが故障しても一台のみでデータのロギングとプリンターへの出力が可能である。また、船上機器が船の航行計器とオンラインで接続されているため、リアルタイムで船速・斜距離補正を行なったデータを出力できる。

2.3 測深方法

後方散乱強度の変化による音響画像は、測深データと組み合わせることにより初めて有効なデータとなる。IZANAGIは通常のサイドスキャンソナーとしての機能の他に、同一のトランスデューサでマルチナロービーム測深システムのように、船の進行方向に直交する多くの地点での測深が可能である。図2は、海底からの反射波が送受信器に入射する際の様子を示している。曳航体は送受波素子を上下2列 (A列、B列) に一定の間隔をもって配置しており、送波は2列同時に受波は独立に作動する。A列とB列とで独立に受波した信号間の位相差 (electrical phase angle; ϕ) と受信波の入射角 (acoustic arrival angle; θ) は図のような簡単な関係式で表現される (Blackinton, 1983)。したがって、受信波の入射角とその到達時間から曳航体と反射点の水平距離と垂直距離が計算され、さらに反射点の水深値、および位置を求めることが出来る。A列とB列の間隔Dは $C / (FD) = 2$ となるように設計されている。実際の作業は平坦な海底において、あらかじめ作成された electrical phase angle から acoustic arrival angle への変換テーブルを用いて acoustic arrival angle が求められる。これを各海域で行なうことにより、水温補正を施すことができる。測深が出来る探査幅は水深の3.4倍である。これは斜距離が水深の2倍以上になった場合、直下の2回反射により、受信波のS/N比が下がることによる。ところで、従来のマルチナロービームの探査幅は水深の約1.2倍であるので、IZANAGIのそれは非常に広いことが分かる。この方法による反射点の水深および位置の決定は、曳航体の動揺に対して非常に敏感である。特にヨーイングはその影響が強く、水深図に歪みをもたらしてその精度に影響を与える。このため前述のロール、ピッチ、ヨーイングおよびCTDのデータを用いてオフライン処理による音響画像と水深図の補正が行なわれている。

(J.G.Blackinton <1983>)

図2 アンクル測定原理

3. IZANAGI オフライン・データ処理システム

IZANAGI システムでは、リアルタイムで斜距離補正と船速補正を行なうため、船上で縦横比 1 : 1 のイメージが得られる。このため、もし海底面が平坦な海域で曳航体が直進していれば縦横方向に歪みの無いイメージを作製することができる。しかし実際のリアルタイムのイメージは海底面の起伏の変化や、曳航体の蛇行などの影響により、歪みを含んだ画像となってしまう。さらに、一般にはリアルタイムの船位のデータが不正確であるために、地図化するのは困難である。したがって、IZANAGI システムでは光ディスクにデジタルでロギングされたデータをもとに、図 3 の手順でオフラインによる処理を行なって幾何学的な位置精度の高い画像を作成することができる。

3.1 前処理

光ディスクにロギングされているデータには、画像データの他に水深データ、音波発信位置決定用データ（曳航体水深、ヨーイング、ピッチング、ローリング、船位データ等）の情報が収められている。まず最初に画像データと水深データとを分離し、平面のデータとして保管する。画像データの中に含まれている本来の海底からの音圧強度情報以外のノイズもスムージング、

ローパスフィルター等の処理によって取り除かれる。

3.2 幾何補正

船上で記録器に出力される画像は、航跡を直線と仮定し、記録器の紙送り速度によって制御されている。しかし、実際には船が蛇行しているために同一の対象物を何度も捉えたり、逆にヌケたりすることがある。画像データは記録媒体に格納されているので、このデータを利用して画像データを本来の位置に並べ直す作業を行なう。IZANAGI では、曳航体自身が三軸の傾きおよび平面的な水深情報を取得しているため、これらのデータから地形の DTM (Digital Terrain Model) 情報を取得できる。そこで、この DTM および曳航体の位置並びに三軸の傾きの情報をもとに、画像データの幾何補正を行なう。これにより、海山や断層等も三次元的に把握することができるようになる。

3.3 モザイク

幾何補正された画像を測線毎に張り合わせてみると、隣接する部分に濃淡の違いが出てくる。そこで、各測線ごとの画像を計算機に入力し、画像の接合を行なう。接合範囲は画質の劣るラインの両端部の画像を使用しないように決定し、累積傾度曲線による濃度補正を行なう。それでも接合部分がはっきりするようであれば、平滑化などの画質補正を行なう。また、極端

図3 IZANAGI 画像処理のフローチャート

にコントラストが無い地点を選んで、画質強調処理をする。こうして測線ごとの画像ではなく、連続した一連の画像として完成させる。また出力図法は、UTM とメルカトル図法の2種を採用している。

3.4 底質分類

サイドスキャンソナーの画像は、底質の変化（反射率）に対応した後方散乱波の強弱を表現したものであることから、底質の分類が可能と考えられる。しかし、実際には典型的な泥質域、砂または礫質域や火山岩域、石灰岩域等を選び、その場所での採泥やボーリング等によって得られた音響物性のデータと音響画像とを比較することが不可欠である。現在のところ、底質分類について実用に足る処理方法は確立されていず、今後に残された大きな課題である。

4. IZANAGI によるいくつかの実例

後方散乱強度にもとづく海底音響画像から、従来の測深技術では識別不可能な海底微細地形を知ることができる。また、海底面の反射率の違いから底質がある

程度判別することが可能である。図4は御前崎沖約100 km 南方、水深が3,500—4,000m の海底における IZANAGI による後方散乱画像である。この海域は、御前崎から四国沖にかけて東北東・西南西に伸長した南海トラフと呼ばれる海溝の東端にあたり、南のフィリピン海プレートが日本列島の下に沈み込みを始める場所である。南海トラフの東端では南縁にトラフの伸長方向と平行に銭洲海嶺とよばれる海底の山脈が存在し、トラフはあたかも幅20—30km の U 型の溝状の地形を示す。後方散乱画像からは、トラフ底の平坦面に蛇行した幅数km の溝が発達しており、その両側が堤状にやや高まっているのが読み取れる。この溝は富士川から連続して海域まで延長する海底のチャンネルであり、両側の高まりは自然堤防である。自然堤防の上には、数列の波形のうねりが観察される。またトラフの北斜面には、南西に張り出した貝殻状の構造が多数見られる。この構造は逆断層地形であり、フィリピン海プレートが日本列島下部への沈み込みに伴う圧縮力により、地殻が破壊されたものである。このような破壊により、巨大地震が発生すると考えられる。低周波を用いた反射地震音波探査によって得られた垂直方向の

図4 御前崎沖、南海トラフ域のIZANAGI 音響画像

断面図によると、これらの逆断面は表層の堆積物を変形させていることから、活断層と考えられる。つまり、この海域での活断層の分布図をIZANAGIによる音響画像から作成することが可能である。

図5は銭洲海嶺上の海底火山体である。この山体の反射率は周囲の底質と比較して著しく高いことから、表面は硬い火山岩が露出していると推定される。また、この山体の斜面には放射状に延びた縞模様が見られるが、これは陸上の火山のすそ野でよく見られる土石流などによる堆積地形と考えられる。図6は、図5と同

じ海域から取得されたIZANAGIによる水深図である。この地形図から海底火山は、ほぼ同心円状の形状を持つかなり急峻な山体であり、サイドスキャンイメージと組み合わせると火山体の地形・地質構成を読み取ることが可能である。

図7は駿河湾に発達する扇状三角洲（fan delta）の前置斜面部である。この斜面は富士川の延長にあたり、大変みごとなチャンネル網が見られる。チャンネル内部の反射強度が強いのは内部の底質が周囲と比して砂レキ質であるためである。

図5 銭洲海嶺上の海山のIZANAGI 音響画像

図6 図5と同海域，同縮尺のIZANAGI 水深図

図7 駿河湾に発達する扇状三角州のIZANAGI音響画像

以上のようにIZANAGIを用いることにより、海底の微細地形を地図化することができる。さらに、底質分布を明らかにすることも可能であることから、海域における地質調査に多大な貢献をするものと期待される。

5. 謝 辞

この論文を書く機会を与えていただいた、海上保安庁水路部の土出昌一氏に感謝いたします。また、データ取得およびその処理に協力していただいたD. Hus-

song 博士、G. Blackinton 博士を初めとする Seafloor Surveys International の各氏、および三洋水路測量㈱の諸氏に感謝します。

引用文献

J.G. Blackinton, 1986: Bathymetric mapping with SeaMARC II an elevation-angle measuring side-scan sonar system, Ph.D., Dissertation, University of Hawaii.
山本富士夫, 徳山英一, 依光和夫, 平朝彦, 1989: 海底イメージングシステム IZANAGI の概要, 海洋調査技術, Vol. 1, No. 2, p 45-51