

水路技術の進展と電子海図への取組[†]

—この 10 年の歩み—

寄高博行^{*1}, 岩本暢之^{*2}, 金田謙太郎^{*3}, 笹原 昇^{*4}, 清水潤子^{*1}, 三宅武治^{*5}, 小森達雄^{*6}

Progress in hydrographic and oceanographic technology,
and action to electronic navigational charts[†]

Hiroyuki YORITAKA^{*1}, Nobuyuki IWAMOTO^{*2}, Kentaro KANEDA^{*3}, Noboru SASAHARA^{*4}
Junko SHIMIZU^{*1}, Takeharu MIYAKE^{*5}, and Tatsuo KOMORI^{*6}

Abstract

140 years passed since modern surveys in Japan was started in 1871. Various technologies have progressed in the fields of hydrography and oceanography in these ten years.

A はじめに

水路部研究報告第 38 号（2002 年 3 月発行：水路部創立 130 周年記念号）から 10 年が経過した。発行直後の 2002 年 4 月に、海上保安庁水路部は海上保安庁海洋情報部へと改編され、新たな業務執行体制をとることとなった。この 10 年間の調査としては、1983 年に開始した限界確定のための大陸棚調査に勢力を傾注しており、2004 年からは大型測量船 2 隻を専従させるとともに、屈折法地震探査を本格導入し、2008 年にほぼ 25 年かけた調査を終了した。この大陸棚調査で培われた技術は、現在行われている領海・排他的経済水域における海洋調査で活用されている。

この 10 年間の主な新技術としては、2003 年に

導入された航空レーザー測深機があげられる。また、それ以前の 2000 年に開始された GPS/音響測距結合方式の海底地殻変動観測は、この 10 年間で精度の向上が図られてきた。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に関する調査においては、海底地殻変動観測と航空レーザー測深が重要な役割を果たしている。

本稿ではこの他、それぞれの分野について、全てではないが、この 10 年の技術の歩みをたどることとした。海底地殻変動観測については別稿（佐藤・藤田，2012）での紹介がある。

B 測深技術の進展

極浅海域の測量を行うために、航空レーザー測

[†]Received November 28, 2011 ; Accepted January 26, 2012

*1 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

*2 企画課 Administration and Planning Division

*3 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

*4 測量船 昭洋 Survey Vessel SHOYO

*5 海洋情報課 Oceanographic Data and Information Division

*6 航海情報課 Chart and Navigational Information Division

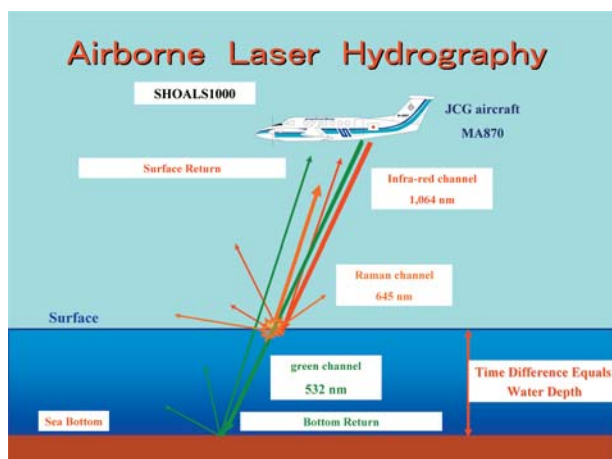


Fig.B 1 Measurement principle of airborne LIDAR bathymetry.

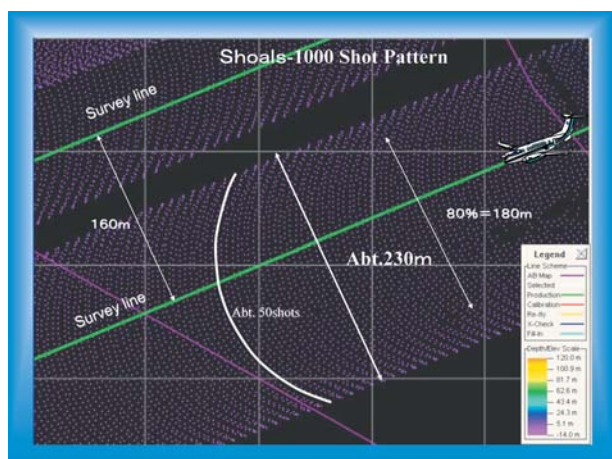


Fig.B 2 Scan pattern of SHOALS-1000.

深機が2003年に導入された。導入された航空レーザー測深機は、カナダOPTECH社製のSHOALS-1000システムで、試験運用時の様子が戸澤・他(2004)で報告されており、計測方法については、小野・柴田(2012)で説明されている。SHOALS-1000は、その名の通り、1秒間に1000回のレーザー光を発射する。波長532nmの緑パルスレーザーと、1064nmの近赤外パルスレーザーを同時に発射し、海面で反射して返ってくる近赤外レーザーと、海底まで到達して返ってくる緑パルスレーザーの、往復時間の差から水深が求められる(Fig.B 1)。測定原理については、浅田・他(2003)に詳しく述べられている。SHOALS-1000は、常時海面との入射角度が一定となるように、準円弧型走査法(Fig.B 2)を採

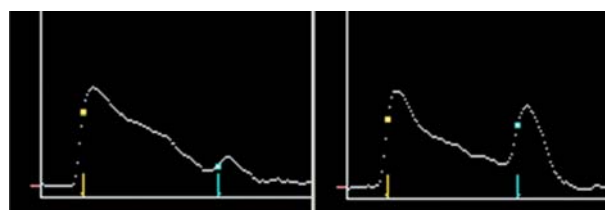


Fig.B 3 Reflected wave-form from low-visibility water (left panel) and high-visibility water (right panel).

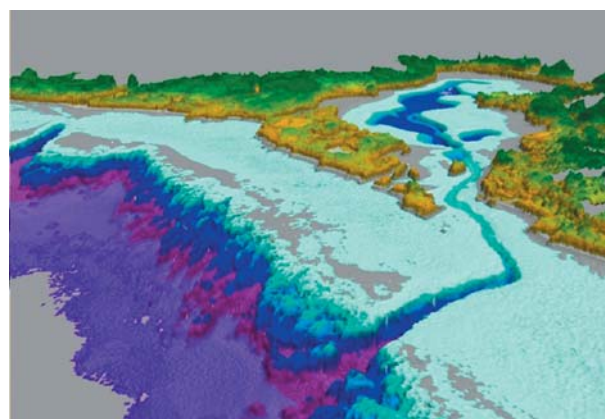


Fig.B 4 Bathymetric and topographic chart with airborne LIDAR bathymetry.

用し、 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \sim 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ の測深密度で、最大水深50mまでの測深が可能である。ただし、測深限度は透明度に左右され、透明度の2倍程度である。透明度の異なる海域における測定例をFig. B 3に示す。測量時の速度は約160ノット(約300km/h)で、測深幅は高度 $\times 0.58$ で計算され、通常は高度400mから測量を行うので、測深幅は230m程度となる。航空機レーザー測深機は、陸上も同時に測量できる能力を生かし、船舶での測量が困難な極浅海域において成果をあげている(Fig.B 4; 岩本, 2011)。

C 地殻構造探査技術の進展

海洋情報部で実施している「地殻構造探査」とは、屈折法地震探査と反射法地震探査を組み合わせ、主に地殻と最上部マントルの速度構造(速度分布)を求める探査のことである。反射法探査は、海中で弾性波を人工的に発生させ、海底下で反射してきた波を測量船で曳航しているストリー

マケープルによって収録する探査である (Fig.C 1)。海洋情報部では、人工弾性波の発生装置として、2,000 psi (約 13.8 MPa) の高圧空気を海中で放出する「エアガン」を主に使用している。ストリーマケープルは、ハイドロフォンで構成される受振器が単一のものと複数あるものとの分類され、前者をシングルチャンネルストリーマケープル、後者をマルチチャンネルストリーマケープルと呼ぶ。屈折法地震探査は、エアガンから発生した弾性波が海底下で屈折してきたものを、海底に設置した海底地震計で収録する探査である (Fig. C 2)。海底地震計には、屈折波だけではなく、海底下で反射してきた反射波も収録される。

反射法地震探査は (屈折法と比較すれば) 垂直方向に伝播した波を解析するため水平方向の構造の変化を捉えやすく、また、海底下に反射面がないと解析できないため、堆積層の構造は精度よく

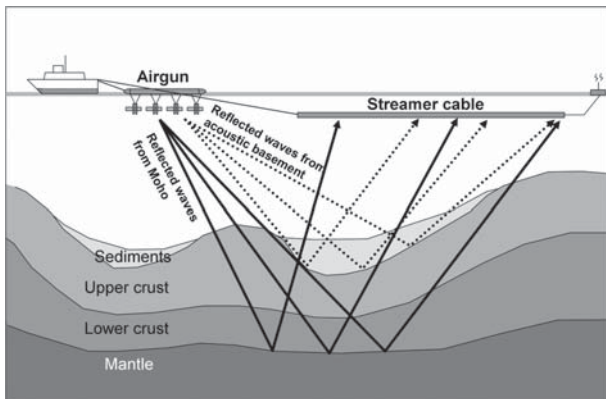


Fig.C 1 Schematic diagram of seismic reflection experiments.

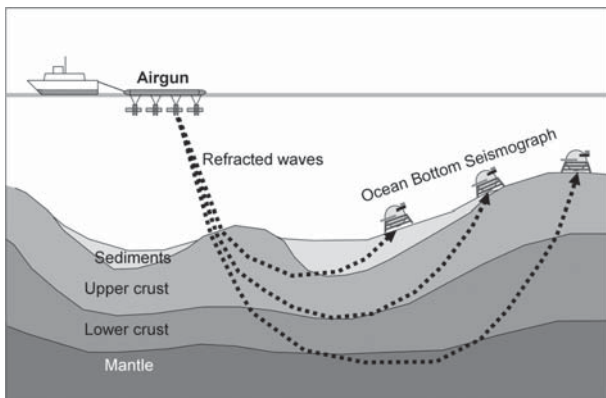


Fig.C 2 Schematic diagram of seismic refraction experiments.

求まるものの、地殻深部の構造は求まりにくいといった特徴がある。それと反対に屈折法地震探査では、主に水平方向に伝播する屈折波と広角反射波を解析するため、反射法地震探査と比較して垂直方向の構造の変化を捉えやすく、深部構造まで求まるが、海底地震計の設置間隔、水中直達波の影響、海底地震計の分解能等の理由により浅部構造は精度よく求まりにくい。そのため、両地震探査を組み合わせることで、地殻・マンツルの精度の高い速度構造モデルを求めることができる。

1 調査方法

海洋情報部では、1980 年後半頃より、数台の海底地震計を用いた小規模な地殻構造探査を実施しており、成果 (e.g. 浅田・他 1989; 沖野・他, 1994, Nishizawa and Asada, 1999) を重ねる中、少しずつ海底地震計の台数を増やしていった。

今から 10 年前の 2002 年には、海洋情報部と海洋研究開発機構 (JAMSTEC) との共同研究として、伊豆・小笠原弧において大規模な合同調査が実施された。本調査では、海洋情報部からは「昭洋」、JAMSTEC からは「かきれい」が参加し、海底地震計を両機関から約 10 台ずつ程供出した。発震船は、大容量エアガンを搭載していた「かきれい」が担当し、総容量 12,000 inch³ (1,500 inch³ × 8; 196.6 ℓ) のアレイを使用してマルチチャンネル反射法及び屈折法地震探査を実施した。同時に、「昭洋」もマルチチャンネルストリーマケープルを曳航して「かきれい」に追従し、発震船とは別の船が曳航するストリーマケープルで弾性波を収録する COP (Constant Offset Point) 二船式反射法地震探査も実施した (残念ながら解析は難航し、結果は出ていない)。取得した屈折法データは海洋情報部が、反射法データは JAMSTEC が解析し、その結果は Nishizawa et al. (2006) にまとめられている。

2002 年 6 月にロシアの大陸棚延伸申請が国連大陸棚限界委員会から提出データ不十分の指摘を受けて却下されたため、大陸棚データの充実を図

る必要性が生じ、海洋情報部はその一環として大規模な地殻構造探査を2004年度から実施していくことにした。2003年度後半には、翌年度からの本格的な地殻構造探査の実施に先立ち、その探査仕様を決定するための事前探査を二度実施した(金田・他, 2005 a (当該報告書には「2004年度」と書いてあるが、「2003年度」の誤りである))。調査は「昭洋」と「拓洋」の2隻体制で実施し、6,000 inch³ (1,500 inch³×4; 約 98.3 ℓ) の大容量エアガンを扱える「昭洋」を発震船とした。エアガンの発震間隔は、「昭洋」のコンプレッサー能力と弾性波の水中残響時間を考慮した結果、200 m と決定された。両調査を通じて海底地震計73台を3 km 間隔で設置した。解析に当たり、海底地震計設置間隔の妥当性を評価する目的で、海底地震計設置間隔を3 km 及び6 km の場合で解析結果を比較した。その結果、陸域から海洋へ地殻の厚さの遷移を調べるにあたり、6 km の海底地震計設置間隔で十分であることを確認し、今後の海底地震計設置間隔を5 km とすることにした。また、本調査では測線上を往復発震することで発震間隔100 m の記録を取得し、隣接するショットを重合して海底地震計記録の向上を図ったが、調査時間の割には有意な記録の向上が認められなかったため、今後の調査においては往復せず、発震間隔を200 m とすることにした(金田・他 2005 b)。

2004年度からは委託を受けた民間会社(大陸棚調査株式会社)も大陸棚延伸に向けて地殻構造探査を実施することになった。民間会社が買い入れた調査船「大陸棚」は地殻構造探査に特化した船舶で、容量の異なる大小のエアガンを36基配備し、各々時間をずらして発震させることでエアガン波形のバブルを抑制することができる総容量8,040 inch³ (131.8 ℓ) のチューンドエアガンアレイ(Fig.C 3)を搭載していた。また、長さ6,000 m、受振点480 chのマルチチャンネルストリーマケーブルを積載しており、高品質の反射法地震探査記録を取得できる設備を有している(林田・他, 2005)。大規模な調査であったため、発震船

の他に、海底地震計を投入・揚収するための専用船が3隻準備された。

特化した調査船に合わせ、新型の海底地震計を民間会社に貸与することにした。海洋情報部がこれまで使用していた海底地震計ではサンプリング周波数100 Hz, A/D変換16 bitで信号を収録していたが、新型海底地震計はサンプリング周波数200 Hz, A/D変換24 bitで記録を取得することが可能になった。海底地震計回収作業に対しては、電触により海底地震計が錘から切り離されるまでの時間が大幅に短縮され、また錘から離れると同時に海底地震計が調査船に浮上信号を送信する機能が追加される等、安全かつ効率的に作業が進むように設計されている。また、従来の海底地震計と比較して錘の大きさが小さく、より多くの海底地震計を調査船に積載することができるように

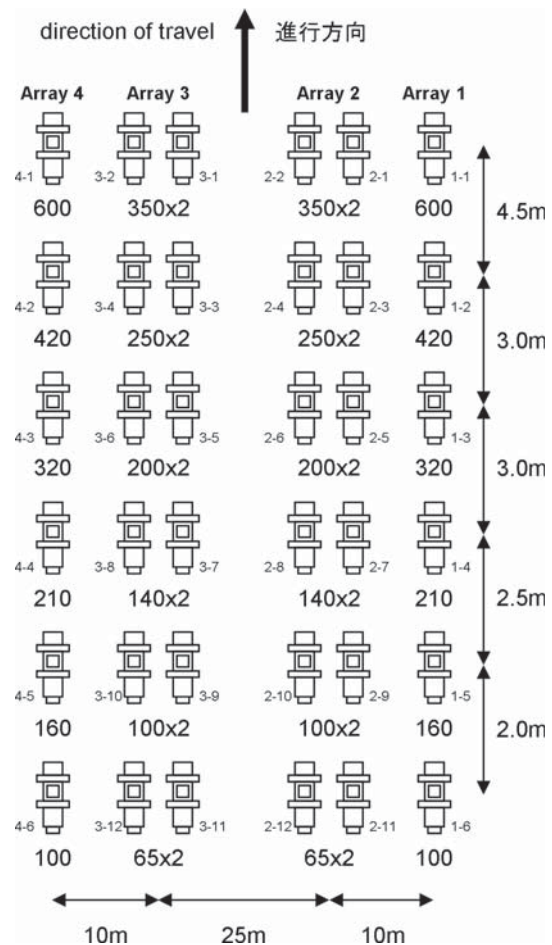


Fig.C 3 Geometry for the 8,020 inch³ tuned airgun array.

なった。新型海底地震計の回収率は非常に高く（2004年度においては100%回収）、また、調査測線数も大きく増加し、海底地震計を100台以上設置する調査（金田・他、2006）も計画されたことから、海洋情報部が実施する調査（直営調査）においても2004年度後半から新型海底地震計を使用している。

民会会社による初めての探査では、人工震源としてエアガンの他にダイナマイトも用いることにした。薬量250 kgと500 kgをそれぞれ1発ずつ爆発させ、大東海嶺群の厚い地殻深部や最上部マントルを伝播してきた地震波の記録を取得しようと試みた。しかし、チューンドエアガンを震源とした際でも地殻深部を伝播してきた地震波を十分に取得することができたため、次回以降の調査では、環境や安全性の観点等から、発破の使用を止めることにした。

2006年度には「昭洋」に新しいストリーマケーブル（ケーブル長3,000 m、チャンネル数240）が導入され、これまでにシングルチャンネル反射法探査しかできなかった直営調査においてマルチチャンネル反射法探査が実施できるようになり、より鮮明なモホ面や地殻内反射面のイメージの取得が可能になった。

2004年度から本格化した海洋情報部の地殻構造探査は、2004年度13測線、2005年度18測線、2006年度35測線、2007年度32測線を実施し、総測線長は約30,000 km、使用した海底地震計はのべ約5,100台に上った。これらの調査を通じ、九州・パラオ海嶺の構造（Nishizawa et al., 2007）、沈み込みの構造（Nishizawa et al., 2009 a; 2009 b）、背弧海盆の構造（Ohara et al., 2007; Nishizawa et al., 2011）、太平洋海盆の構造（Oikawa et al., 2010; Kaneda et al., 2010）等、海底下の地殻構造断面が数多く取得され、大陸棚延伸に向けた資料となるだけでなく、地球科学分野への学術的貢献にも大きく寄与することになった。

大陸棚調査が終了した2008年度以降は、領海・EEZ調査の枠組みの中、引き続き地殻構造探査は実施されている。海底地震計を用いた屈折

法地震探査においては大陸棚調査と同じ方法・仕様で実施されているが、反射法地震探査では、観測すべき対象が地殻深部の構造から堆積層の構造へと変わったため、より高周波のエアガンレイ（350 inch³×3; 17.2 l）を使用している。

2 屈折法地震探査の解析方法

屈折法地震探査のデータ取得から解析までの手順を簡単に述べると、まずエアガン発震により生じた波が海底地震計に到達するまでの時間（走時）を測定し、全てのエアガン発震に対する観測走時が説明できる地殻・マントル内のP波速度の分布（速度構造モデル）を決定する。速度構造モデルを構築するには、通常、一測線あたり半年～1年以上の解析時間を必要とする。

上述の通り、屈折法探査では地震波の到達時間を測定することから、解析には1 msec単位の「精密な時間」の取得が必要になる。従来海洋情報部が使用していた海底地震計は内部時計が安定していたため、船上において海底地震計投入前・揚収後の時刻補正をすれば十分であった。しかし、初期の頃の新型海底地震計は内部時計が不安定であったため、適切ではなかった補正プログラム（MCXO）の除去、水晶の交換（アニーリングが十分でなかった？）、温度補正テーブルの再測定等を行って内部時計を安定化させた。また、船上における時刻補正以外にも、海底地震計に収録された屈折法及び反射法地震探査のエアガン発震記録を利用して時刻補正を実施し、精度の高い時刻の取得に成功している。

海底地震計の着底位置は解析に重要な情報であるが、投入されてから着底するまでの自由落下中に水平方向に最大1000 m以上も移動する場合もあるため、海底地震計の着底位置＝投入位置とせず、精密に求めるべきである。構造探査初期の頃は、海上の異なる3点において水中音響を用いて船から海底地震計までの距離測定を行い、測定位置と距離から海底地震計の位置を求めていた。2000年頃からは、測定位置、距離の他に、水温、海底地形、発震データ、時刻補正等の情報

を加えたインバージョン解析 (Oshida et al., 2008) を用いて、より精度の高い着底位置を算出することにしている。

内部時計の時刻補正を行い、着底位置を決定した後、海底地震計の連続した記録データから解析に使用する範囲を切り出し、構造モデルを構築するための屈折波・反射波の走時を読み取っていく。この走時の読み取りには経験・習熟度が必要で、適切に読み取ることができないと誤った構造モデルが構築されてしまう可能性がある。

構造モデルの構築方法は、波線追跡法によるフォワードモデリングとトモグラフィックインバージョンの2つに大きく分類される。波線追跡法によるフォワードモデリングでは、まず速度構造モデルを作成し、そのモデルにおいてエアガンから発震された弾性波が海底地震計に到達するまでの理論時間を求め、読み取った観測記録と比較をする。観測記録と計算値がずれていたならば、再度モデルを修正して同様のことを繰り返し、全ての海底地震計の記録が説明できるまでモデルの修正を続けていく。トモグラフィックインバージョンは、初期モデルと、読み取った全ての海底地震計の観測記録をコンピュータに入力し、計算値と観測記録の差の合計が最少になるようなモデルを自動的に計算させる方法である。この二つの方法を適切に用いて構造解析が行われている。海洋情報部では、フォワードモデリングには Modeling (Kubota et al., 2009)、トモグラフィックインバージョンには tomo 2d (Korenaga et al., 2000) を使用している。tomo 2d では反射波を考慮したインバージョンも実施できるが、海洋情報部では屈折波初動のみを使用した解析を実施している。

大陸棚調査で地殻構造探査が始まった頃は、トモグラフィックインバージョンだけ用いれば速度構造モデルが簡単に構築できると考えられていた。というのもモデルの構築にかかる計算時間が、解析者が試行錯誤を繰り返し計算するフォワードモデリングと比較して圧倒的に短かったからである。しかしながら、トモグラフィックインバージョンも万能ではない。トモグラフィックイ

ンバージョンは観測走時と計算走時の差の合計が小さくなるように計算するため、極端に述べれば、一部で観測走時と計算走時が大きく乖離している構造モデルでも、他の部分で整合していれば差の合計は小さくなるため、そのモデルが解となる可能性がある。また、計算の結果得られるモデルは、連続的で滑らかな構造を持つため、実際に認められる不連続な速度構造 (例えばモホ面、巨大な断層等) を作り出すことができない。さらに、トモグラフィックインバージョンでは不明瞭な遠方からの信号を有効に利用することが難しい。海底地震計の記録は 200 km 以上離れた地点からのエアガン発震を記録していることがあるが、そのような記録は深部構造の重要な情報源であるものの S/N が低い場合が多く、観測走時を精度よく読みとることが困難である。以上のことから、トモグラフィックインバージョンでは大局的な構造を求め、フォワードモデリングで精密な構造を求める解析手順を採択することにした。

トモグラフィックインバージョンで算出される解は最初に与える初期モデルに大きく依存するため、適切な初期モデルを構築することが重要である (適切でない場合、ローカルミニマムな解に落ち着いてしまうことがある)。そのため、まずマルチチャンネル反射法探査で取得された地殻構造を参考に初期モデルの堆積層を構築し、堆積層以深の構造は恣意性を排除するように、連続的に水平成層となる構造をとることになっている (Fig.C 4)。また、最初のトモグラフィックインバージョンの実施時に全ての観測走時の読み取り値を与えてしまうと、深部を伝播してくる波の影響により浅部構造が精度よく求まらないことが多い。その

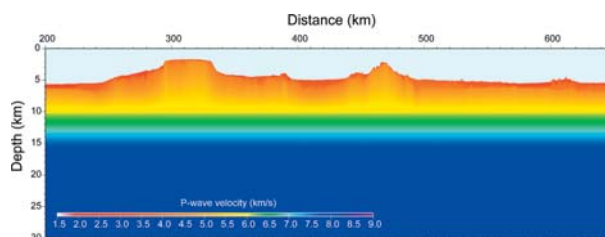


Fig.C 4 Initial model of tomographic inversion.

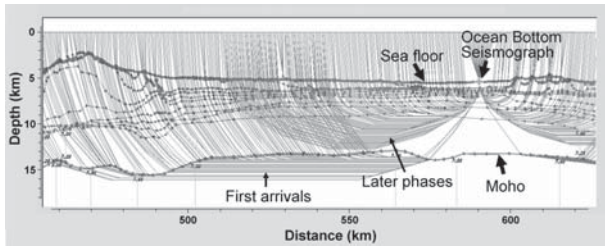


Fig.C 5 Traveltime calculation of refracted wave later phases.

ため、まず、個々の海底地震計に近い観測走時の読み取り値だけを用いたインバージョンを行って浅部構造を求め、その後、徐々に与える観測走時の読み取り値の範囲を広げてインバージョンを実施し、段階的に深部まで構造を求めていく手法を選択した。

暫くは上述の方針で解析を続けていたが、様々な測線の解析を続ける中、フォワードモデリングでは計算のできない信号が観測記録中に度々認められるようになった。フォワードモデリングのソフトではグラフ理論を用いた計算を行っているため (Kubota et al., 2009), 屈折波・反射波とも一番早く到達する波の走時しか計算ができないという難点があった。そこで、Modeling に特定のレイヤー内の屈折後続波を計算する機能を付与し、初動以外の信号も計算可能なようにした (Fig.C 5)。その結果、レイヤー内の速度勾配が求められるようになり、より詳細な構造モデルが構築できるようになった。

また、特に、複雑なモホ面を持つ海山・海嶺下においては、上述の機能でも計算できない遠距離 (> 100 km 程度) からの信号が数多く確認された。そのため、有限差分法により理論波形を計算するソフトウェア E3D (Larsen and Schultz, 1995) を導入し、フォワードモデリングでは説明のできない信号も計算してモデルの妥当性を検証することにした (Fig.C 6)。E3D は様々な波を考慮して理論波形を計算するソフトウェアであるが、計算時間がコンピュータのノード数にほぼ比例する仕様となっており、ノード数の少ないコンピュータでは長時間の計算が必要となる。そのた

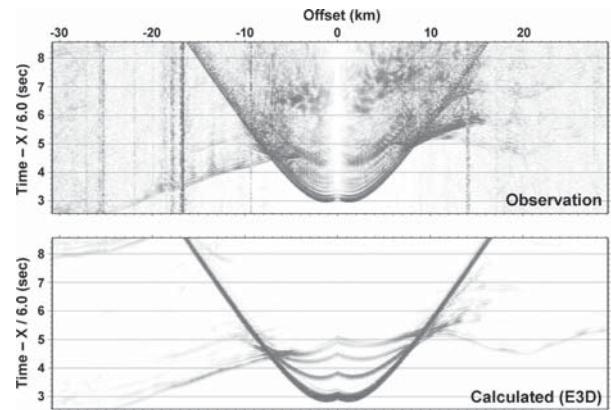


Fig.C 6 Comparison an observed seismic record with a synthetic seismicogram calculated by E 3 D.

め、計算対象となる海底地震計を絞ってモデルの確認作業を実施している。

大陸棚調査における初期の解析では、モホ面からの反射波のみ解析に利用していたが、海底地震計には地殻内・マントル内からの反射波も明瞭に記録されており、このような反射波も考慮した構造モデルの構築が望ましい。しかし、調査測線数が多く、解析時間が限られている中、全ての反射波を利用して構造を求める時間的余裕がないため、Fujie et al. (2006) による反射波マッピングを用い、反射波の反射位置を構造モデルに投影することで、モホ面以外の反射面の位置を簡易的に決定する手法を採用した。

大陸棚調査では特に地殻の厚さと最上部マントルの速度に着目し、上述の手法で地殻構造探査の解析が実施されてきたが、領海・EEZ 調査では特に地殻の層構造を解明することが主目的となり、解析手法をさらに洗練する必要性が生じた。また、調査海域は海底地震計に遠方からのエアガン発震が記録されにくい海域であり、初動インバージョンによる解析がそれほど有効ではなくなった。そのため、地殻は基本的に堆積層、上・中・下部地殻の4つの層で構成されていると仮定し、その境界面からの反射波の有無をフォワードモデリングにより確認しつつ、浅部側の層から順を追って解析を進める方針をとった。

領海・EEZ 調査の調査海域では厚い堆積層が広がっているため、堆積層の構造を適切に求める

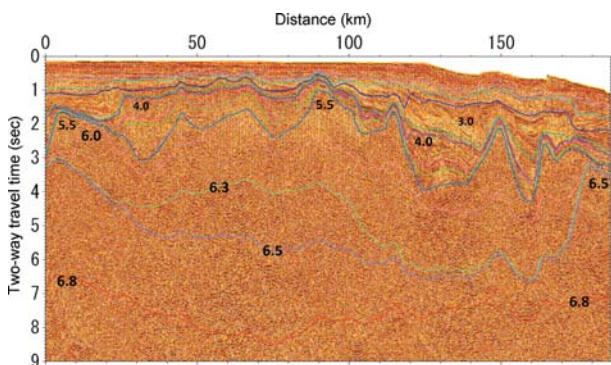


Fig.C7 Superposition of a velocity structure model on a seismic reflection profile. Numbers in the figure mean P-wave velocities (km/s) of equi-velocity contours.

必要がある。そのため、フォワードモデリングで構築された構造の深度軸を時間軸に変換し、マルチチャンネル反射法地震探査の解析結果に重ね合わせ、堆積層の構造の妥当性を確認することにした (Fig.C7)。この手法は大陸棚調査における解析でも用いていたが、堆積層が薄い太平洋側の海域を対象とする解析では、重ね合わせて解析を進めることの意義が乏しく、さほど重要ではなかった。

堆積層の構造が求まると、屈折波と反射波を用いて地殻の層構造化を進めていく。領海・EEZ調査の対象海域は地殻変動の影響を多大に受け、規模の大きい断層が多数認められることから、地殻内の反射面が必ずしも連続して存在するわけではない。そこで確実に反射面が認められる領域のみ層構造化するよう配慮した解析を実施している。そのため、2~3台程度の海底地震計の記録にしか認められないような反射波は、構造モデルの複雑化を防ぐため、あえて構造に反映しない等の措置をとることがある。

領海・EEZ調査における地殻構造探査の解析は、地殻構造が複雑であるため非常に困難であり、今後も新しい解析手法を導入していくことになるであろう。

3 最後に

10年前には手探り状態で進めた地殻構造探査

であったが、現在では海洋情報部が実施する海洋調査の柱の一つとなり、堆積層から最上部マントルに至る詳細な速度構造モデルを様々な海域で次々と提示している。これらのモデルの中には地球科学の分野に新たな知見を与えるものも数多く存在している。今後も技術の発展に伴い調査・解析手法も進展し、より精度のよい構造モデルが構築されていくことは想像に難しくなく、日本周辺の海洋基盤情報の充実に大きく貢献することが引き続き期待される。

D ジオイド・地衡流算出技術の進展

海洋情報部では1960年代から船上重力測定を開始し、船上重力計を装備する測量船により約50年間継続してきた。その主な目的の一つは、日本周辺の海域ジオイドを決定することである。

ジオイドは重力の等ポテンシャル面の一つであり、地球表面における平均水面の形状に近似するが、地衡流等の存在のため完全には一致しない。この一様ではないジオイドを決定することは測地学における重要な研究テーマであり、また、決定されたジオイドは海流などの海洋循環モデルの構築に役立つのみならず、海洋速報などにおいて海流予測に活用することができる。

日本では Ganeko (1980) が、人工衛星の軌道解析から求められた全球重力ポテンシャルモデル (以後、GGM : Global Gravity potential Model とする) である GEM-10 (Lerch et al., 1977 ; 22次の球面調和関数) と船上重力測定で得られた局所的な重力値をブロック平均したデータから、日本周辺の海域ジオイドモデルを算出した。その後、福田 (1995) や Kuroishi (1995) などのように、観測解析技術他の進歩に伴い高精度のジオイドモデルが提案されている。一方、海洋情報部では蓄積された船上重力データなどを用いて、海域ジオイドモデル (笹原・他, 2006 b), さらに改善されたモデル MGM 2008 (笹原・他, 2008) を構築した。

構築された海域ジオイドモデルの精度検証は必須であるが、陸域の GPS / 水準ジオイドのよう

な絶対値による直接的な検証が海域では困難であり、間接的手法を取らざるを得ない。その手法の1つとして、ジオイド高とアルティメータ海面高との差による力学的海面高 (Sea Surface Dynamic Height: 以後 SSDH とする) と CTD (Conductivity-Temperature-Depth) データの力学計算結果との比較が挙げられる。その検証では MGM 2008 による SSDH と CTD によるものとの間で非常に良い相関関係がみられた。

地衡流は SSDH から簡易な計算式により算出することができる。MGM 2008 の SSDH から算出された黒潮周辺の地衡流の流向は、海洋速報による黒潮流軸の形状と良く合致した。(笹原・他 2006 b)。

アルティメータ海面高は衛星データアーカイバ AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) からダウンロードし、これと MGM 2008 ジオイド高から求めた SSDH により地衡流を算出しており (笹原・他, 2007), この地衡流は海洋速報作成のための資料として活用されている。

本稿では、計算に必要な船上重力データの誤差補正含む海洋情報部におけるジオイドと地衡流の算出技術の進展についてまとめて紹介する。

1 ジオイド算出手法

(1) 重力データの作成

「remove-restore 法」によりジオイドを算出するには、重力異常データの長波長成分と短波長成分が必要となる (笹原・他, 2006 b)。MGM 2008 では長波長成分は人工衛星観測より得られた GGM 02 (Tapley et al., 2005), 短波長成分は地球表面上で観測された重力データ、特に海上では船上重力データを用いた。

海洋情報部では 1960 年代から船上重力観測を継続しており、JODC (Japan Oceanographic Data Center: 日本海洋データセンター) には国内外のデータが収集されている。ジオイド算出に用いた船上重力データは、1962~2004 年の約 320 万データであり、これらに以下の処理を施した。

- ① 測地系・正規重力・基準網の統一
- ② 移動平均によるスパイクノイズの除去
- ③ COE (Cross Over Error; Wessel and Watts, 1988) 補正
- ④ アルティメータ重力値による補正

作業の詳細については、笹原・他 (2006 a) を参照されたい。Fig.D 1 に上述した処理を施す前、Fig.D 2 に施した後の船上重力データによる

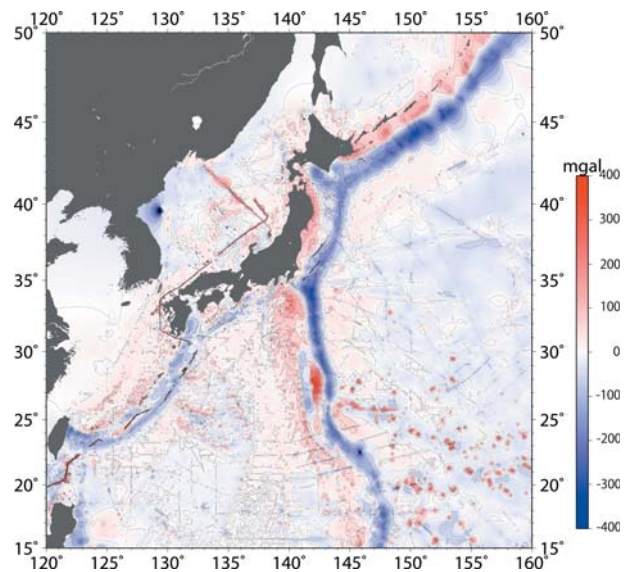


Fig.D 1 Gravity anomaly map around Japan using the sea gravity observation (before the evaluation and compensation).

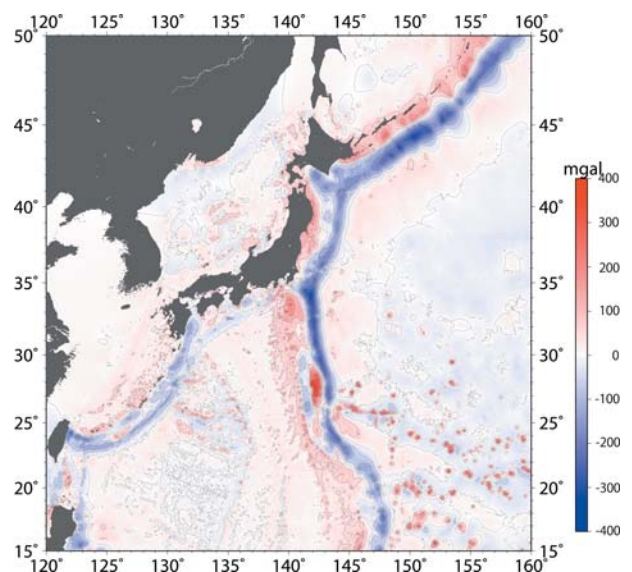


Fig.D 2 Corrected gravity anomaly map around Japan using the sea gravity observation.

重力異常図を示す。

また、ジオイド算出領域において船上重力データが均等に存在しないため、データの疎い領域をアルティメータ重力 (Sandwell and Smith, 2005; V15.1) により補間した。

陸上重力データについては、日本重力 CD-ROM 第2版 (産業技術総合研究所, 2004) のデータを用い、これに Faye 異常値 (大野, 1987; 地形補正を加えたフリーエア異常値) とする操作を加えた。

これら船上・アルティメータ海上重力と陸上重力データを混合し、GMT (Wessel and Smith, 1998) の blockmedian により 1分格子間隔でブロック平均し、GMT の surface によりテンション 0.75, 格子間隔 1分でスプライン補間を加えた。Fig.D 3 にこの混合重力異常値の分布図を示す。

(2) ジオイド算出手法

前述した「remove-restore 法」は、既知のジオイドの長波長成分を除き、未知の成分であるジオイドの短波長成分のみ計算する手法である。それは、長波長成分に GGM による重力値、短波長成分に海陸混合重力異常値から GGM 重力異常値を除去 (remove) したものをストークス積分し、求められたジオイド高の短波長成分に GGM

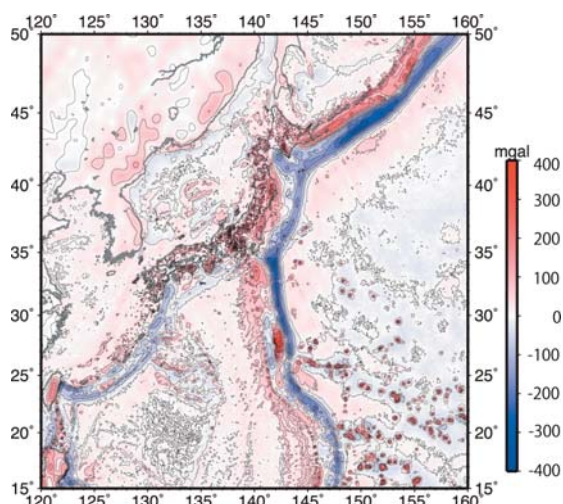


Fig.D 3 Gravity anomaly map around Japan combining sea and land data sets.

ジオイド高を復元 (restore) する算出手法である (笹原・他, 2008)。このジオイド高に、間接効果補正とスケール決定による補正値を加え、最終的なジオイド高とした (笹原・他, 2006 b)。

2 ジオイドモデルの精度検証年周期変動

実際の海面の傾きと海流との力学的平衡によって生じるジオイド面と実海流面とのずれである SSDH は、ジオイドモデルによるジオイド高とアルティメータ海面高との差により計算される (以後、SSDHgeo とする)。アルティメータ海面高は AVISO のものに平均水面高を加える等の処理を施した値を使用した (笹原・他, 2008)。

また、SSDH は無流面 (ある水深でまったく流れがないと仮定した面) から海面までの水柱の高さであり、CTD データを用いた力学計算によって求められる (以後、SSDHctd とする; 寄高・他 1999)。

これら SSDHgeo と SSDHctd を比較した結果、太平洋、特に黒潮が通過する海域は良く一致するが、太平洋の東北沖や日本海について一致度が良くないことが判明した (笹原・他, 2008)。

3 ジオイドによる地衡流

SSDH は海域ジオイドモデル MGM 2008 のジ

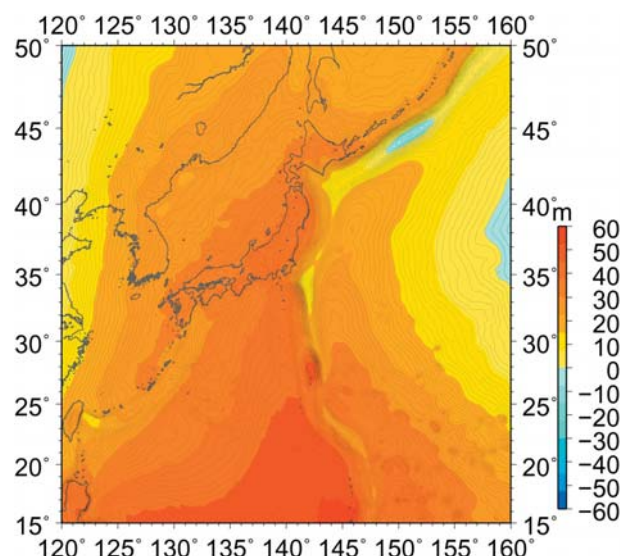


Fig.D 4 Geoid undulation around Japan. Contour interval is 1 m.

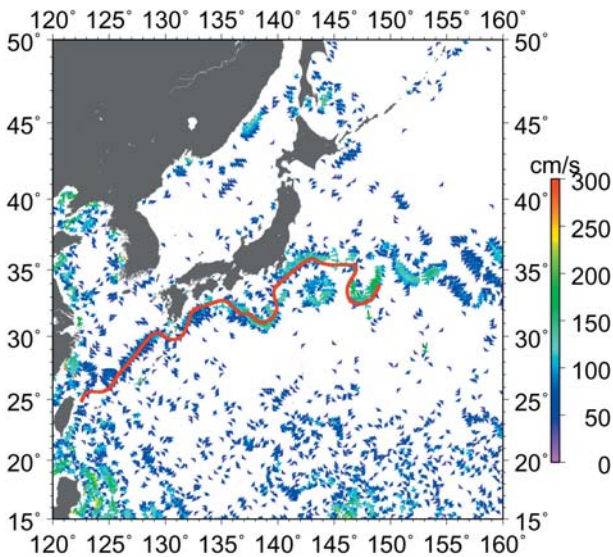


Fig.D 5 Vector of geostrophic current with SSDH of Marine Geoid model and altimeter SSH (AVISO) in May 11, 2005. A red line shows the current axes of the Kuroshio with Quick Bulletin of Ocean Conditions.

オイド高と AVISO のアルティメータ海面高から求められるが、この SSDH から地衡流平衡の式により東西・南北方向の流速を求めることができる。さらに、これら流速のベクトル計算により地衡流の流向・流速が算出可能である（笹原・他, 2007）。

Fig.D 5 に SSDH による地衡流流速ベクトルの分布図を示す。Fig.D 5 をみると、地衡流流速ベクトルと海洋速報による黒潮流軸が良く一致していることがわかる。

海洋情報部では地衡流算出のためのプログラムを作成、ワークステーションにインストールし、日本周辺海域の地衡流の流速ベクトル分布を毎日、自動的に算出している。このベクトルデータは、日刊される海洋速報の作成のための資料として活用されている。

4 今後の課題

ジオイドモデルの精度向上の対策の1つとして、船上重力データの整備が挙げられる。例えば、モデルの精度評価が低い海域である太平洋の東北沖、日本海は船上重力データの観測密度が疎

く、古い観測期間のものが多い。精度の低い海域で、新たに船上重力観測を密に行う必要がある。

また、地衡流の算出には同化プログラムによる手法があり、海洋情報部でもこの手法の開発を試みているが、より精度の高い地衡流算出にはプログラム等の改良を進める必要がある。

E 海象観測・環境調査技術の進展

1 測流

流れの測定は船舶搭載 ADCP、流速計の係留、アルゴスシステムを利用する漂流ブイで行われてきた。これらの観測データは、海難発生時の漂流予測にも用いられるが、観測データのない海域については、前章で作成されたジオイドに基づく地衡流が用いられるようになった（斉藤, 2011）。また、短期の漂流実験には、アルゴスシステムを利用するブイに代わって、1998 年度に導入されたオーブコム衛星を利用するブイが多く用いられるようになってきた。このような変化の他、測流技術の進展・成果として以下の事項があげられる。

(1) 海洋短波レーダ

この 10 年間における進展の一つに海洋短波レーダの導入が挙げられる。2000 年に関係省庁で開始されたミレニアム・プロジェクト「高度海

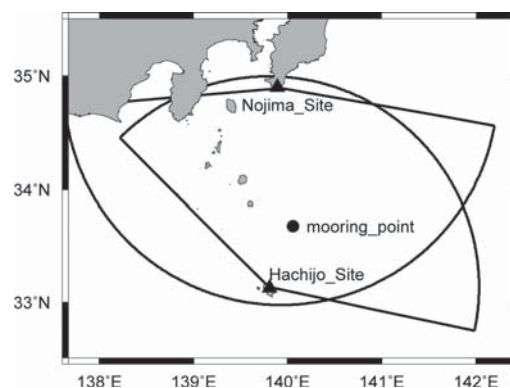


Fig.E 1 Map of observation site. Solid triangles indicate locations of HF radar remote sites. Coverage of each radar site is shown as a sector form. Solid circle indicates a mooring point of ADCP (Kinoshita et al., 2004).

洋監視システムの構築」の中で導入した海洋短波レーダは、国内では初めて5 MHzの周波数帯を用いる長距離型が選択され、2001年に房総半島野島崎と八丈島に設置された。以降、200 kmを越える測定により、伊豆諸島周辺と房総半島南方における黒潮の常時監視が行われている（木下・他 2004；Fig.E 1）。翌2002年には、周波数帯が異なる中距離型の短波レーダが三浦半島荒崎と伊豆大島に設置され、相模湾の流況監視を行ってきた。

(2) 2軸電磁ログ

主に高速型の巡視船に装備されるようになった電磁ログは、2対の電極を直交させて配置することにより、対水速度の水平2成分が測定可能となる。2004年に、この2軸電磁ログによる対水速度からGPSによる対地速度を差し引く海流演算装置が導入された。送受波器の船首方向に対する回転による誤差（アラインメント誤差）が卓越する音波ログと比較して、対水速度の測定誤差（スケール誤差）も問題となる電磁ログのデータ補正法が提案され（田中，2007），運用されている。現在はセンサーの経時変化等の誤差要因について、検討が行われている。

(3) 海浜流の観測

離岸流によると思われる海浜事故があとを絶たないことを受け、2002年度から大阪大学と第八管区海上保安本部の共同により、2003年度から3年間は、鹿児島大学、日本水路協会、第十管区海上保安本部が加わり、離岸流の実態調査が行われた（古河・山城，2003；日本水路協会 2004，2005，2006）。調査においては、流速計、波高計、漂流ブイに加え、シーマーカーと呼ばれる染料を流して海浜流を可視化するという手法がとられた（Fig.E 2）。

(4) 深層流の観測

1993年にロシアが公開した白書により、旧ソ連・ロシアによる放射性廃棄物の日本海における



Fig.E 2 Observation system using balloon with video camera (upper panel) and sea-marker (lower right panel) (Furukawa and Yamashiro, 2003).

海洋投棄が明らかとなったことから、海洋情報部では1994年から日本海において人工放射性核種の分析を行うとともに、深海流の測定を実施してきた。観測は、海底からの立ち上げ方式の係留計に接続した流速計を用い、海底面から50 mおよび100 m上の2層を測定した。深海流の測定については、2010年6月に終了し、日本海の日本側のほぼ全域に及ぶ広大な海域で26点の観測データが取得された。

観測された深層流の時系列データの解析により得られた深海における平均流は、水深の浅い方を右に見て流去する反時計回りの平均流が存在し、先行する研究と一致していたほか、新たに二つの特徴的な流れがあることが分かった。その一つは、大和堆周辺の深海底で2ヶ月周期成分が卓越していたこと。二つ目は、富山深海長谷で年間を通して谷を南に向かう流れが見出されたことである（福島，2007；福島・小嶋，2011）。

2 海水観測

第一管区海上保安本部の海水情報センターでは、極軌道気象衛星NOAAに搭載された改良型高分解能放射計（AVHRR）のデータなどを用いて海水分布を作成していたが、AVHRRでは雲の下が観測できず、海水の分布は不明であった。

2006年打ち上げの陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)に搭載されるフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ(PALSAR)は雲の下も観測できる能動センサーとして、海水観測への利用が期待されていた。PALSAR/ALOSの海水観測への利用に向け、水路部(当時)と宇宙開発事業団(当時)では、1998年度からカナダのRADARSAT衛星や地球資源衛星「ふよう1号」(J-ERS1)に搭載された合成開口レーダ(SAR)のデータを利用した共同研究を行った。ALOS打ち上げ後は、データの検証を行いつつ、定期的な観測及び海水速報への利用が実施されるようになった(福島・他 2008; Fig.E 3)。ALOSは2011年5月に観測を終了したが、海水観測には重要なデータであることから、2013年度打ち上げ予定の陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)にも搭載されるPALSARデータの利用が検討されている。

3 環境調査

海洋情報部は、「水路の測量及び海象の観測に関連して行う海洋の汚染の防止のための科学的調査」を環境調査と呼称し、①「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」第46条に基づき、我が国が管轄する海域において油分、PCB、重金

属等の調査を実施する「海洋汚染調査」、②流況及び水質等の調査、赤潮等の発生や挙動の監視を実施し、汚染メカニズムの解明を進め、海の再生に向けた効果的な施策の実施及び検証に資するため実施する「環境保全調査」、③日本近海における海水、海底土について、人工放射性物質の分布状況の把握、経年変化等を調査する「放射能調査」を実施している。この項では、これらの環境調査に関連して実施された調査手法の開発や、調査により集積された環境データの活用等について述べる。

(1) 海水・海底堆積物の分析法の開発

海洋汚染調査においては、従来調査を行ってきた油分、PCB、重金属等に加え、2001年度より有機スズ化合物の一種で船底塗料として使われその後禁止されたトリブチルスズ化合物(TBT)について、海底堆積物中濃度の調査を開始している。調査開始にあたっては、環境庁(当時)の作成した暫定マニュアル等を参考に、当部の扱う試料の特性に合わせ、抽出段階を追加する等の改良を加えた分析方法を開発した(清水・野坂 2005)。TBTについては、先行して調査を行ってきた油分、PCB、重金属に比べると、より

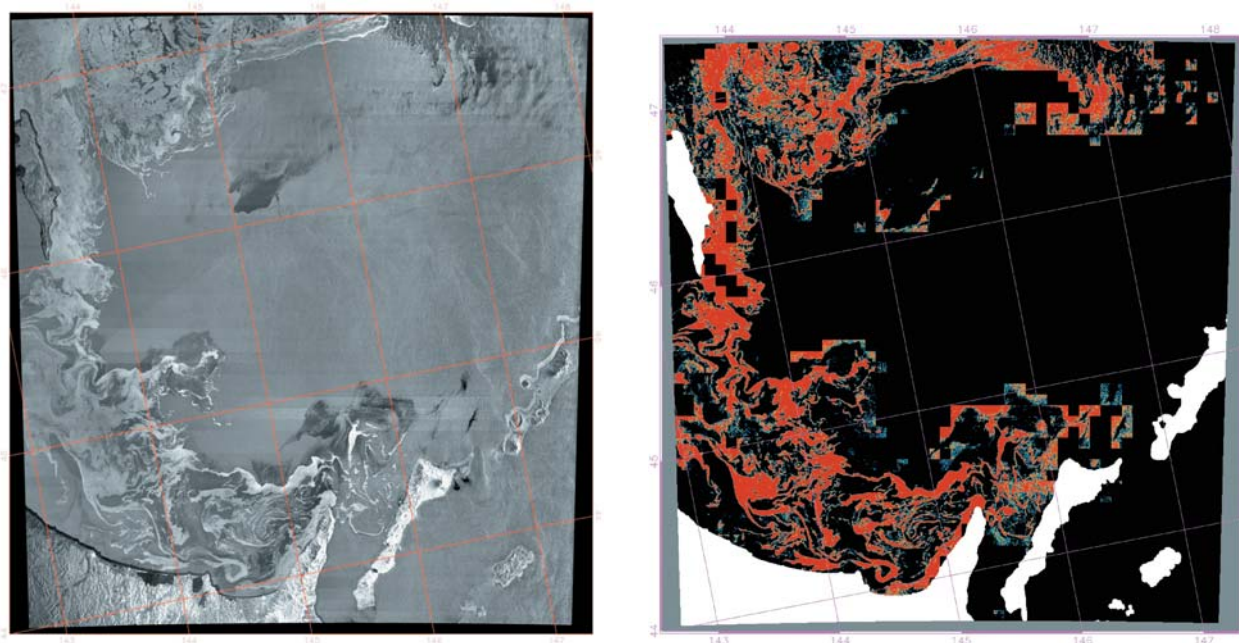


Fig.E 3 PALSAR (ScanSAR) image (left panel) and sea ice concentration (right panel) (Fukushima et al., 2008).

湾奥において高い濃度を示す傾向があることがわかった(清水・野坂, 2005)。

海洋汚染調査および南極地域観測隊や西太平洋海域共同調査の海洋観測においては, 硝酸塩等の栄養塩分析を実施してきた。従来は海水や濃度既知の標準溶液を試験管にとり, 試薬で発色させて吸光度を測定するバッチ方式で分析を実施してきたが, 操作が煩雑で, 分析に時間を要し, 反応条件を一定に保つことが難しかったこと, また大量の廃液が出ることから, 現在では連続反応・分析を実施する自動分析装置を用いた方法を導入している。自動分析装置の導入については, 栄養塩にくわえ, 後述する火山変色海水の調査のための分析を想定し, フローインジェクション法による硝酸塩, ケイ酸塩, 鉄の分析条件の検討が行われ, 岡野・並木(2002), 岡野(2003, 2004)により報告されている。

環境保全のための調査ではないが, 海域火山活動に伴う変色海水の化学分析も行ってきた。変色海水は, 海底火山から放出された酸性熱水が海水によって中和された結果生ずる沈殿物によるもので, 火山活動の消長に対応して化学組成が変化するため, その化学分析は海底火山活動の状況を把握する有効な手段の一つである。従来は, 化学分析において, 採取した変色海水試料に塩酸を添加

し, 一昼夜加温して沈殿物を共存している海水中に溶解した後, 鉄・アルミニウム・ケイ素の測定に供していたが, 火山の噴火の状態を緊急に知りたいときには時間がかかりすぎる点が欠点であった。そこで, 作業量の軽減とスピード化のため, 変色海水から沈殿物を分離し, 塩酸と蒸留水を加えて電子レンジにより加熱溶解する方法を開発している。(野上・他, 2004)。同手法は今後, 自然界の変色海水の分析例を増やすことで実用性が高くなることが期待される。

(2) 海水・海底堆積物における有害汚染物質濃度の経年変化

油分, PCB, 重金属等については, 水質汚濁防止法(1970年公布)等に基づく規制がなされているが, 海洋情報部による30年以上の長期にわたる海洋汚染調査データによると, ごく例外の海域および物質を除いて我が国沿岸の汚染濃度は全般的に低下傾向であること, また濃度の低下傾向は1980年代まで顕著であったものの, 1990年代以降は緩やかであることがわかった(清水・他, 2008)。このような汚染濃度変化の傾向は, 2002年に東京湾で実施した海底堆積物中の残留性有機汚染物質の調査からも認められており(清水・他, 2005), 一旦海域に負荷された汚染物質

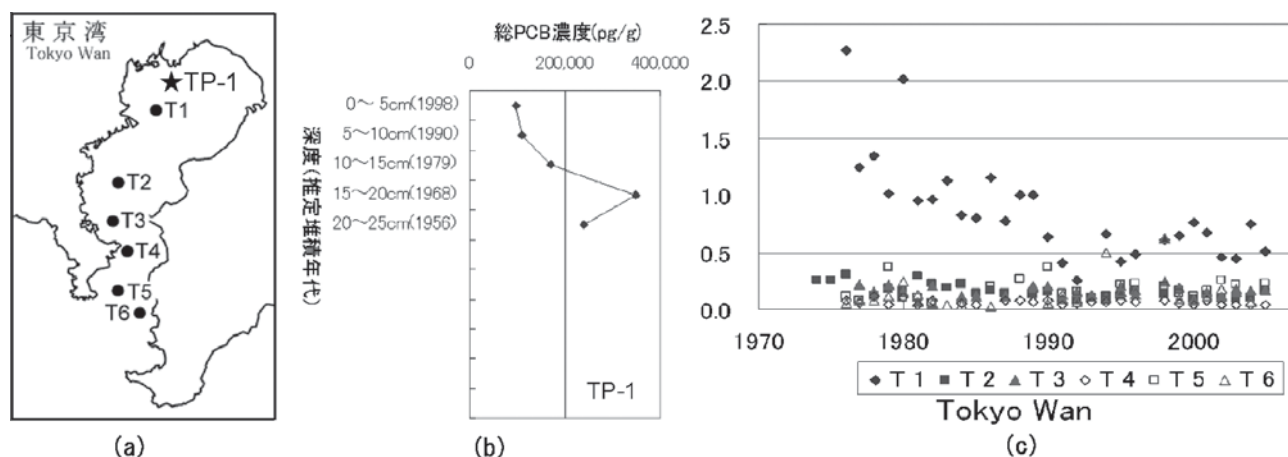


Fig.E 4 (a) The sampling points of Tokyo Bay. (b) Vertical PCBs concentration in the sediment at TP-1. Accumulation years are estimated from sedimentation rate (Shimizu et. al., 2005). (c) Temporal changes of PCBs concentrations of surface sediment at T 1 to T 6 (Shimizu et. al., 2008).

は海底表層堆積物にとどまり、海洋環境は容易には元に戻らないといえる。

放射能については、1950年代から大気中核実験による大量の放射性物質の降下が我が国周辺において問題になり、1961年10月の閣議決定に基づき、放射能対策本部が設けられて、放射能調査及び研究等の強化が図られる中、海洋情報部による調査が開始された。大気中核実験が全面的に中止され、環境中の放射性物質は減少しているとされている。海洋情報部の調査結果によれば、半減期の長いストロンチウム-90及びセシウム-137の経年変化は、ともに各年で多少の変動はあるが、長期的には減少傾向であり、近年では横ばい傾向で推移している（海上保安庁海洋情報部、2010）。2011年3月には東日本大震災の影響で福島第一原発の事故により大量の放射性物質が放出され、環境中への拡散が懸念される場所であるが、海洋情報部の調査における分析は検出下限がサブmBq/L以下という非常に低レベルの濃度を把握するものであることから、これまでの数十年にわたる海洋における調査は、事故前の状態を知る重要なバックグラウンド値を与えており、事故後の変化の把握においても重要な調査データを提供するものと思われる。

(3) 沖合海水における残留性有機汚染物質調査

環境中における有害物質の濃度を正確に知るためには、試料採取方法が重要である。特に低濃度の汚染物質の正確な濃度分布を知るためには、非常に大量の環境試料を高濃縮するため、試料採取時点におけるコンタミネーションの防止や十分な回収率を確保することが課題となる。海洋情報部では、2008年度から2010年度までの3カ年、環境省の移替研究経費（公害一括）により実施された「沖合海域におけるPOPsの汚染実態の解明に関する研究」において、沖合海域におけるPOPs（残留性有機汚染物質：Persistent Organic Pollutantsの略称）調査のための技術開発に取り組んだ。

POPsは、高残留性、生物蓄積性、長距離移動

性を持つ汚染物質を総称する名称で、ダイオキシン類、PCB、DDT等十数種類が残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（以下POPs条約と略す）によって指定されている。POPsはその特性故、環境中におけるごく低濃度の分布を知ることが、地球規模での環境汚染を理解し、環境を保全するために重要であるが、沖合海域の海水については試料採取・分析が困難であることからその汚染実態はほとんど知られていなかった。

そこで、本研究においては、海水中におけるごく低濃度のPOPsについて、大量の海水を現場で濃縮して実験室に持ち帰り、高分解能ガスクロマトグラフ高分解能マススペクトルメトリーによる高精度分析を行う方法を採用することとした。本手法ではPOPs条約に指定、または指定される見込のある有機塩素化合物及び有機臭素化合物を対象とした。

濃縮に用いる装置は、河川水や水道水中のダイオキシン類の調査のために開発された装置に改良を加えることにより新たに開発した。具体的な改良点としては、ダイオキシン類以外のPOPsも高率で捕集できるよう、捕集材に従来のポリウレタンフォームプラグに加えて活性炭素フィルタを用いた点、及び、海域におけるシップタイム節約のため、試料濃縮速度を2倍とした点である。本システムの開発により、2000Lの海水を調査海域の現場において12時間弱で濃縮処理でき、海水中において0.001pg/Lという非常に低濃度のPOPsの定量が可能となった（清水・他、2010）。

本システムにより東シナ海において海水中POP濃度の調査を実施したところ、多種類の有機塩素系POPsが検出・定量され、POPs種類による分布の特徴の差異などが見られている（渡邊・他、2011）。一方、POPsの中でも有機フッ素化合物であるペルフルオロ化合物は、有機塩素系のPOPsに比べると少量（4L程度）でも沖合海域における濃度検出が可能であり、濃度分布、時間変化を把握することが比較的容易であることから、東シナ海での調査において三次元的に調査点を配置して分布調査を実施し、汚染起源推定

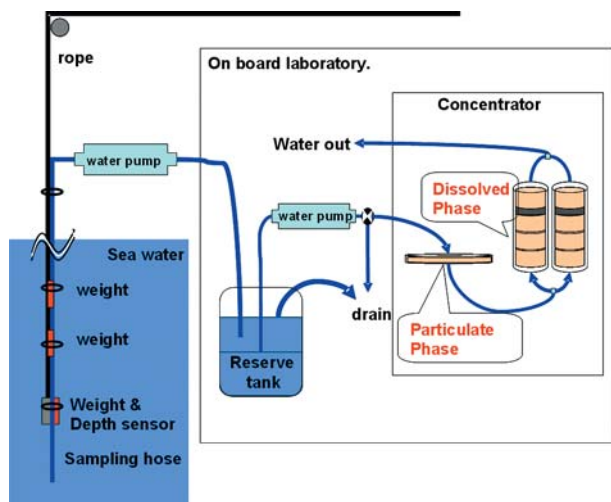


Fig.E 5 Schematic design of the On-site large volume water sampling system, designed for persistent organic pollutants in offshore waters.

や、トレーサーとしての活用を試みている。(山尾・他, 2010)

近年東アジア諸国においては経済発展が著しく、有害物質による環境汚染が問題となっていることから、沖合海水における POPs 汚染の調査手法は、東シナ海・日本海等の我が国周辺海域における周辺諸国からの越境汚染の監視への活用が考えられる。

(4) モニタリングポスト観測

全国海の再生プロジェクトでは、富栄養化による慢性的な赤潮の発生や、有機汚濁による酸素の消費によって貧酸素水塊が生じ、水産動植物へ大きな影響を与えるなどの問題が発生している閉鎖性の高い海域の問題の改善のため、海上保安庁及び国土交通省を中心とする関係省庁及び自治体が連携して、汚濁負荷削減対策、海域の環境改善対策、環境モニタリング等の諸施策を推進、総合的に海洋環境の保全に取り組むもので、2003年に始まった「東京湾再生プロジェクト」を皮切りに現在全国4か所「東京湾、大阪湾、伊勢湾、広島湾」で行われている。海洋情報部では、それぞれの湾が含まれる海域を管轄している第三、四、五、六管区海上保安本部所属の測量船による水質モニタリングの実施、人工衛星による各湾における赤潮等の監視を行っているほか、東京湾においてはモニタリングポスト観測を実施している。

東京湾のモニタリングポストは湾奥の千葉港沖に位置する千葉灯標に設置され、海上風、海潮流・水質（水温・塩分・溶存酸素量・クロロフィル濃度・濁度）の鉛直分布を連続観測している。観測データについてはリアルタイムでインターネットに公表され、広く一般においても利用でき

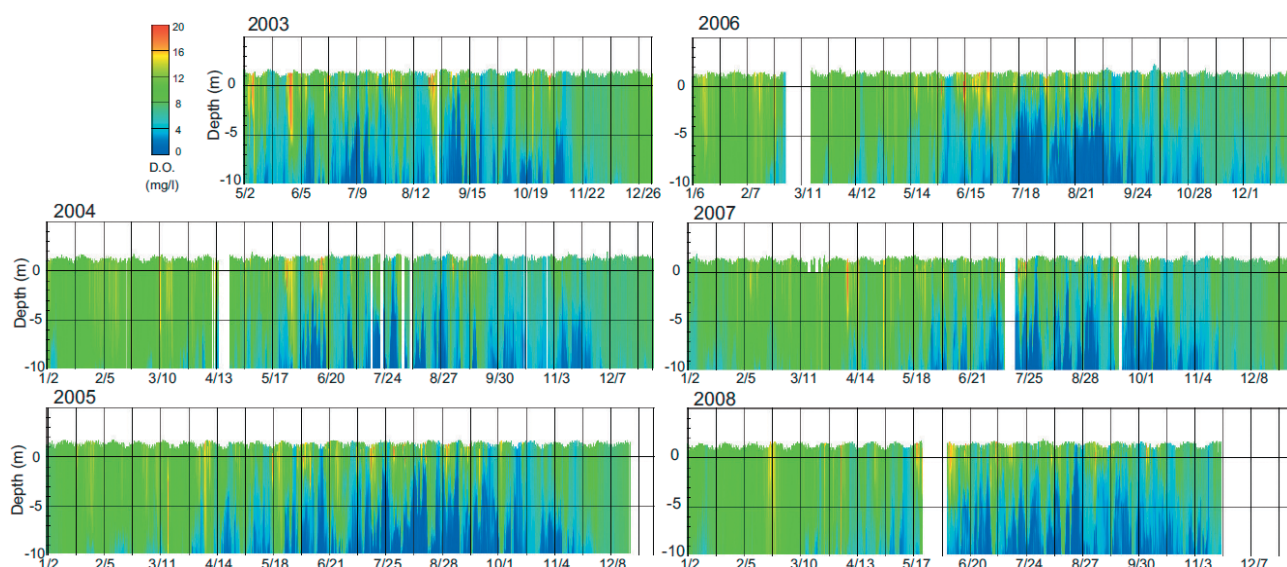


Fig.E 6 Temporal changes of vertical distribution of dissolved oxygen concentrations measured by Monitoring Post at Tokyo Bay.

る。

海洋情報部では時間的に密で詳細なデータを取得できるモニタリングポストの特性を生かし、溶存酸素量変化と水塊の物理構造の関係や、塩分変化と流速の関係、流速に対する海上風の影響を明らかにしている（山尾，2004）。また、季節的な貧酸素水塊の発生・消滅（時期，期間）から年変化の要因の考察や、底棲生物の生息環境としての底層溶存酸素量の短時間変化の評価（山尾，2006），さらに、東京湾再生プロジェクトにおける各種施策の効果を評価するため、気象条件による海水の流動を取り除いた東京湾の水質改善状況を評価する方法などの検討も行われている（渡邊・山尾，2010）。

海の再生の実現には、環境保全・再生のために取られている各種施策の有効性の評価予測をおこなっていくことが必要であり、数値シミュレーションの実施が効果的である。数値シミュレーションを正確なものにしていくには、水質の時系列データ、鉛直プロファイルといったデータの取得が不可欠である。海の再生プロジェクトの開始により、従来環境省、国土交通省、地方公共団体等において行われてきた各種観測に加え、東京湾のモニタリングポスト観測など海洋情報部による環境保全調査が開始され、着実に実施されることで、環境保全データの充実に大きく貢献している。

F 海洋情報提供をめぐる進展

海洋情報部では、水温や塩分等の海洋データをオンラインで提供する JODC 海洋データオンライン提供システム（J-DOSS）を 1995 年 9 月に公開した。これはインターネットがまだ発展途上の時期に、政府機関としては早期に構築した画期的なシステムであった。翌 1996 年には、このシステム構築に対して経済産業省の情報化月間推進協議会より優秀情報処理システムとして表彰を受けている。しかしながら、これらの海洋データの提供はテキストベースでのデータのダウンロードであったため、例えば海流データをダウンロードし

たユーザが、それを地図上に表示させたい場合は、ユーザ自らそのテキストデータを処理し図化するが必要であった。

一方、1995 年 1 月の阪神・淡路大震災を契機に、政府において地理情報システム（GIS）に関する本格的な取組が始まった。地図とデータベースを統合した GIS を利用することで、震災による災害や復旧の状況等が簡単に素早く表示可能となり、震災からの復興のための迅速な意志決定に貢献した。

1998 年 4 月、海洋情報部に沿岸域海洋情報管理室が設置され、大規模油流出事故等の災害発生時における油防除等の作業効率の向上を図るため、沿岸海域の基盤情報を整備し提供することとなった。海洋情報部が保有する電子海図等の情報及び各省庁・自治体等が保有する沿岸域の情報を提供するにあたって、地図や写真画像等の図形情報とその内容を表す属性情報が一体となった空間情報として沿岸海域環境保全情報データベースを管理することとした。

この沿岸海域環境保全情報システムは、GIS エンジンとして MicroImage 製の TNT Atlas を採用し、スタンドアロンで使用するパッケージ型ソフト（以下「Ceis Atlas」）として 1999 年 4 月に完成した。しかしながら、スタンドアロンによる情報提供ではデータの更新、配布において種々の制約があった。情報技術革新に伴い GIS の世界も、スタンドアロン型から統合型、そして Web 対応へと推移したことから、「Ceis Atlas」を Web-GIS によるデータ提供システムへと再構築することとした。この Web-GIS システムは GIS エンジンに英国 CadCorp 社製の SIS-ASC を採用し、当初は油防除関係機関及び地方自治体をユーザとして Ceis Net の名称で 2003 年 6 月から試験運用を開始した。

Web-GIS によるデータ提供システムの利点として、インターネットが利用できる環境ではブラウザのみで GIS を利用することが可能なこと、ユーザが普段使用しているブラウザを使うため使用方法を習熟していることから GIS を使用する

ことへの抵抗感が少ないこと等が挙げられる。また、サーバ管理者としてもデータ更新やサーバメンテナンスが簡略化される事が期待される。これは Web-GIS による GIS システムの構成をデータベース機能、GIS エンジン機能、クライアント側のブラウザ機能の三層に分担させる、いわゆる三層アーキテクチャ構成とすることでサーバ機能を単純化した結果その保守が容易となったためである。

さらに、2009 年 1 月の海洋情報部電子計算機の更新に合わせて、GIS サーバソフトを業界一位の市場占有率を持つ ESRI 社製の ArcGIS サーバへと移行した。沿岸海域環境保全情報の収集・作成から Web-GIS によるデータ提供まで同一製品となり、一貫したユーザーインターフェースでの GIS 処理が可能となった。

現在、海洋情報部では、海洋産業の発展、科学的知見の充実、海洋政策の立案等に資するため、それら保有する情報を視覚的に重ね合わせて表示して提供する海洋政策支援情報ツール（海洋台帳）の整備を始めている。この海洋台帳の構築に当たっては、今までの述べてきた沿岸海域環境保全情報を GIS システムによって構築した経験やその過程で蓄積された技術が大いに活用されている。

G 電子海図（ENC）をめぐる進展

1 電子海図について

「海上における人命の安全のための国際条約」（SOLAS 条約）では、全ての船舶に、予定された航海に関する海図及び水路書誌を備え付けることを規定している（ただし、船舶の旗国政府は、一定の条件を満たす船舶に対して、適用の程度を緩和することが認められている）。同条約では、従来の紙に印刷された海図及び水路書誌に加え、電子的手段で情報を表示させる電子海図表示システム（ECDIS）を、この規定の搭載要件を満たすものとして認めている。この ECDIS に表示させて使用する海図データを電子海図（ENC）という。ENC は、国際水路機関（IHO）が定めた水

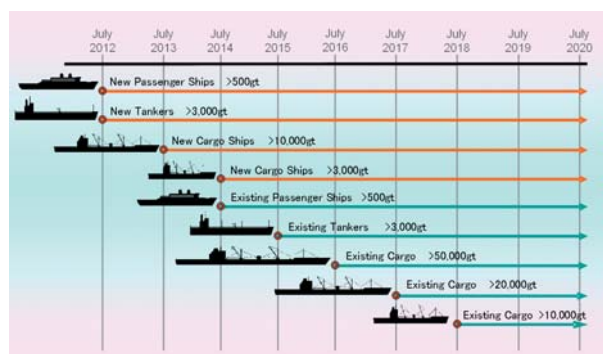


Fig.G 1 Schedule for mandatory carriage of ECDIS.

路データ転送基準 S-57 に準拠して、政府公認の機関により刊行されたデジタル海図データのことである。

海洋情報部は IHO S-57 に準拠して作製した ENC を、1995 年に世界で初めて刊行した。その後、各国水路機関によって ENC の刊行が進められ、現在では世界の重要港湾 800 港とそれらを結ぶ航路の 80% 以上において ENC が整備されている。ENC は、ECDIS に表示させることにより、海図上での自船位置の表示、危険水域に接近時の警報機能、レーダー画像との重畳表示、他の航海計器との連携等が可能となり、操船者の迅速・効率的な意志決定を支援することができる。

2009 年 6 月、ENC の整備が全世界的に進んできたこと、ECDIS が乗り上げ事故を減少させる効果があるとの定量的な報告などを背景にして、SOLAS 条約の改正が国際海事機関／海上安全委員会（IMO/MSC）で採択され、2012 年 7 月から、国際航海に従事する 500 トン以上の旅客船及び 3,000 トン以上の貨物船（現存する貨物船（タンカーを除く。）は 10,000 トン以上）に対して、ENC の搭載が順次義務化されることとなった。

IHO では、ECDIS の搭載義務化を推進するため、各国による ENC の整備を促進するとともに、各国が作製する ENC の一貫性確保や情報充実に向けた取組を推進している。

2 ENC の空白域解消に向けた取組

ECDIS は、1 台数百万円程度の航海計器だが、ECDIS に表示させる海図データがなければただ

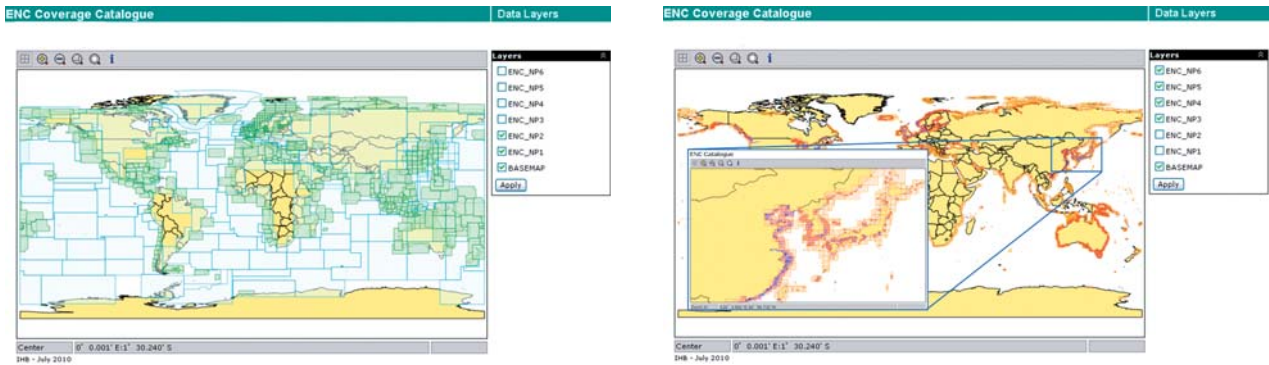


Fig.G 2 ENC coverage in the world, for “overview” and “general navigation” (left panel), and for “coastal navigation”, “approach”, “harbour” and “berthing” (right panel).

の箱となる。IMOにおけるECDISの搭載義務化の議論では、当初、高速船以外の船舶に対して2010年から義務化を開始するとの提案もなされたが、ENCの未整備地域の解消が大きな論点となり、結局2012年7月からの開始となった。

(1) 縮尺と航海目的

ENCの国際規格(IHO S-57)は、ENCの整備を「航海目的」ごとに実施することを規定している。この航海目的には、「概観」、「一般航海」、「沿岸航海」、「アプローチ」、「入港」及び「接岸」の6種類があり、それぞれの航海目的で、使用される表示縮尺、別の言い方をすると要求される情報密度が異なるため、航海目的ごとにそれぞれ別のデータセットを作製することになっている。小縮尺である「概観」のデータセットには、世界中の可航水域が含まれている必要があるが、大縮尺になるほど必要とされる海域は限定され、「入港」のデータセットには、通常、港湾及びその近傍の水域が整備されていれば十分である。

(2) 世界のENCの作製状況など

2010年7月時点における世界のENCの作製状況は、Fig.G 2のとおりである。IMOの第56回航行安全小委員会(NAV 56, 2010年5月)においてIHO事務局が報告したところによると、大縮尺ENCについては世界の主要港湾800港のうち91%が整備され、それらの港湾を結ぶ主要航路については、中縮尺が84%及び小縮尺が100%

のENCが整備されている。東アジア地域においても、10年以上前から刊行してきた日本や韓国に加え、中国、インドネシア、マレーシア、フィリピン、シンガポール及びタイなどがENCの刊行を始めており、2012年7月のECDISの搭載義務化開始までには、ENCの整備海域の充実が期待される。

世界的なENCの整備については、英国水路部(UKHO)が、発展途上国等の水路部に対して職員の研修を行うなどの技術協力をを行い、それらの国のENCの整備に大きく貢献していると言われている。またUKHOは、AVCS(Admiralty Vector Chart Service)という商品名で国際的なENC販売にも力を入れており、AVCSを購入すれば世界の水路部のENCが入手できる体制を構築している。もともとUKHOは紙海図の分野で国際的に大きな影響力を有していたが、AVCSの世界的シェアが増大すれば、ENCの分野でもUKHOの影響力が増大することが想定される。

3 ENCの一貫性確保に向けた取組

2012年7月からのECDISの搭載義務化開始を目前に控え、各国ともENCの刊行を急ピッチで進めており、未刊行区域は着実に減少している。一方で、隣接する国同士のENCの重複が拡大しており、大きな問題となっている。ENCの規格(IHO S-57)では、作製者(国)の異なるENCであっても同一航海目的の中でのデータの重複は認められておらず、重複したENCに対するECDIS



Fig.G 3 Coverage of South China Sea ENC.

の動作が保証されていないため、IHO は ENC を重複させないように加盟国に勧告している。

東アジア水路委員会は、南シナ海とそれに面する陸部を包含する「一般航海」目的の電子海図について、2005 年から関係国で共同刊行を行い、2008 年に改版をしている (Fig.G 3)。これは多国間協力の下で刊行された ENC としては世界初である。これにより、各国の領有権が交差する海域での重複のない ENC 刊行に成功するとともに、スーパertanker 等の大型船舶が輻輳する海域での ENC の早期刊行が実現した。

現在東アジア水路委員会では、東アジア全域における ENC の空白域及び重複の解消並びに各国 ENC のデータの一貫性の確保を、国際協力の下で実現するため、年数回タスクグループ会合を開催して活発な議論を行っている。

4 ENC の情報充実に向けた取組

ENC の普及を図るためには、ENC の整備海域の拡充を図ることが喫緊の課題であったため、当初日本を含めほとんどの国では、既に存在している紙海図をそのまま数値化して ENC を作製してきた。しかし現在では、多くの先進国で ENC の整備が完了したことから、次のステップとして、ENC の情報を充実させ、紙海図の単なるコピーではない高付加価値の ENC を作製しつつある。

(1) SCAMIN 属性の付与

前述のとおり ENC の国際規格は、最大 6 種類の航海目的 (縮尺) のデータを作製することが可能である。しかし、ECDIS によっては 20 段階以上の表示縮尺の切り替えが可能なものもあるため、表示縮尺によっては表示が混雑して、操船者がその内容を判別しづらいという状況が生じていた。そこで ENC には、表示縮尺を小さくしていったときに、水深や灯台などの個々のシンボルを、優先順位に応じて非表示とする機能がある。この機能を使うためには、個々のシンボルに、非表示にする縮尺値をデータとして入力しておく必要がある。この縮尺値を最小表示縮尺 (SCAMIN) 属性という。

これまでは SCAMIN 属性の付与はあまり行われてこなかったが、ENC の高付加価値化の流れの中で、そのニーズが高まり、2008 年に IHO から、SCAMIN 属性に係る編集指針が勧告された。海洋情報部でも 2010 年度から SCAMIN 属性の付与を開始し、2011 年度に整備を完了したところである。

(2) CATZOC 属性の付与

新たな水路測量が実施されるとその成果 (測量原図) は速やかに海図に反映される。しかし水路測量は全ての海域で一様に行われているわけではない。重要港湾などで定期的に掘り下げ工事等が行われる海域では、水路測量も頻繁に実施されるため海図には最近の測量成果が採用されている。一方でそれ以外の海域では、錘のついたロープを垂らして一点一点水深を測定した古い時代のデータが採用されていることがある。新しい測量が行われた海域では、未発見の浅所が存在する可能性が比較的小さいため、船舶の航路設定の自由度が高く、効率的な航行が可能となる。そのため IHO は、ENC に精度情報 (CATZOC) 属性を付与することを奨励している。これまで海洋情報部では、過去に実施された約 6,500 枚の測量原図について、区域ごとの測量精度の評価を行ってきた。この評価結果を基に、2011 年度から CATZOC 属

性の ENC への付与を開始している。

(3) 一時関係通報の電子海図への採用

上記以外の国際的な動向として、一時関係の通報を ENC に取り込む動きがある。紙海図の世界では、既に印刷された海図を更新する手段として、「水路通報」というシステムが国際的に確立している。水路通報には「小改正」と「一時関係等」があり、海図を恒久的に補正する情報は小改正として提供され、この情報を基に航海者が海図を修正していく。一方で、射撃訓練や港湾工事など一時的に有効な情報等は一時関係通報として、紙媒体又は PDF ファイルで提供されている。

これらのうち小改正については、当初から電子水路通報に採用され ENC に取り込まれてきたが、一時関係通報については、編集方法に関する国際的基準が確立していなかった等のため、多くの国で ENC に採用されてこなかった。そこで IHO は、2009 年 2 月 1 日に IHO S-65 を改正し、一時関係通報を電子水路通報に採用するための

コード化指針を追加したところである。海洋情報部では、2012 年 1 月から、一時関係通報を電子海図に順次採用している。

5 今後の展開の見通し

現在の ENC は、IHO が 1996 年に策定した規格 (IHO S-57 Ed. 3) に基づいて作製されている。しかし、IHO S-57 Ed. 3 の刊行後に、国際標準化機構 (ISO) において地理情報標準 ISO 19100 シリーズが整備され、GIS データの国際標準としての地位が確立されると、その後の GIS 技術は ISO 19100 標準の下で発展してきた。そのため、IHO では 2001 年から、ISO 19100 シリーズに準拠した新たな基準の開発を開始し、2010 年 1 月 1 日に「水路データ標準モデル」(仮訳、IHO S-100) を採択した。この基準に基づき、IHO では、ENC の製品仕様 (IHO S-101) の完成を 2012 年に予定している。さらに、航行警報、水路書誌、潮汐情報、水路測量成果等についても、新たにデジタル化製品仕様の策定が計画又は検討されている。

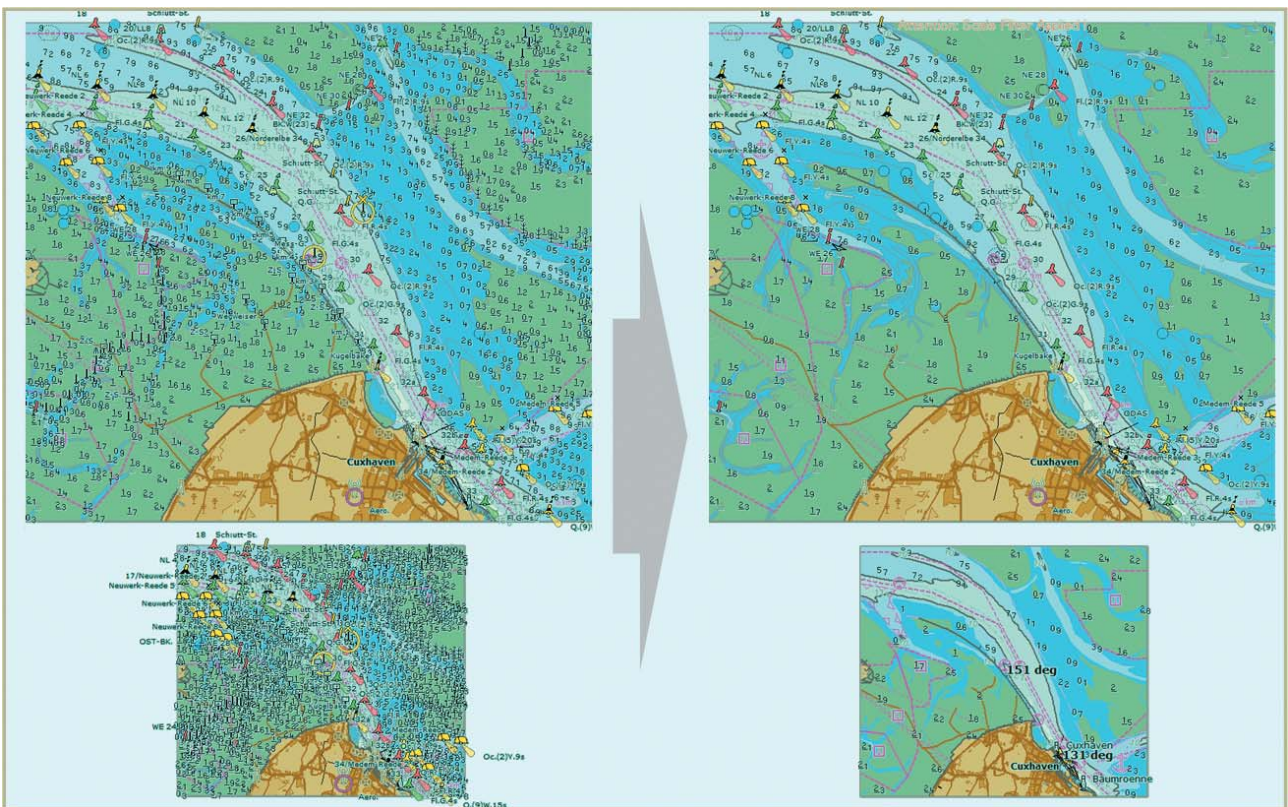


Fig.G 4 Improvement in display function of ENC with SCAMIN attributes.

一方、国際海事機関（IMO）でも、海上の安全及びセキュリティの確保並びに海洋環境の保護の観点から、最新の情報通信・電子技術を活用して、船橋における各種情報の収集、統合、交換、表示及び解析を実現する「e-Navigation」戦略を2008年に採択し、2012年の実行を目指して検討を進めている。e-Navigationを支えるデータの規格は、IHO S-100シリーズが大きな役割を担うことが想定されている。

現在海洋情報部で提供している情報のうち、操船者が船橋で処理できる形式でのデジタルデータは、ENC及びその更新のための電子水路通報だけである。しかし、上記のIHO S-100シリーズの整備や、IMOのe-Navigation戦略が実現すれば、航行警報、水路書誌、潮汐情報等の提供についてもデジタル化が実現し、船橋のペーパーレス化・ワンウィンドウ化が実現することが期待されている。

引用文献

- 浅田昭・加藤茂・春日茂（1989）、富山トラフの変動地形・地殻構造調査、*水路部研究報告*, 25, 93-122.
- 浅田昭・山本富士夫・徳山英一・矢島広樹（2003）、測深技術の現状、*海洋調査技術*, 15 (1), 37-77.
- Fujie, G., A. Ito, S. Kodaira, N. Takahashi, and Y. Kaneda (2006), Confirming sharp bending of the Pacific plate in the northern Japan trench subduction zone by applying a travelttime mapping method, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 157 (1-2), 72-85.
- 福田洋一（1995）、日本およびその周辺のジオイドの精密決定、*測地学会誌*, 41 (1), 1-16.
- 古河泰典・山城早苗（2003）、離岸流調査への着手と観測手法の一例（中間報告）、*海洋情報部技報*, 21, 73-79.
- 福島繁樹（2007）、日本海深海底付近の平均流、*海洋情報部技報*, 25, 122-126.
- 福島繁樹・須藤幹男・稲積忍・古田明・片桐学・島田政信・滝口太・鈴木明子・上村治睦（2008）、ALOS データを用いた海水観測手法の開発及び利用に係る研究、*海洋情報部技報*, 26, 44-52.
- 福島繁樹・小嶋哲哉（2011）、日本海の深海底付近で観測された深層流の特徴、*海洋情報部研究報告*, 47, 32-43.
- 林田政和・浜本文隆・田中喜年・松本正純（2005）、大東海嶺群における精密地殻構造調査、*海洋情報部技報*, 23, 33-45.
- Ganeko, Y. (1980), New Determination of a Marine Geoid around Japan, *Report of Hydrographic Researches*, 15, 71-170.
- 岩本暢之（2011）、航空レーザー測深機を使用する測深技術紹介、*海洋調査技術*, 23 (1), 33-36.
- 海上保安庁海洋情報部（2010）、放射能調査報告書、*海上保安庁海洋情報部*, 29 pp., 東京.
- 金田謙太郎・下村宏樹・志岐俊郎・小山あずさ・伊藤清寿・林田政和・池田耕作・瀬田英憲・佐伯充敏・谷口克伸（2005 a）、南鳥島周辺海域屈折法地震探査 ～2004年度第5-7, 10-11次大陸棚調査、*海洋情報部技報*, 23, 8-22.
- 金田謙太郎・瀬田英憲・谷口克伸・下村広樹・志岐俊郎・小山あずさ・伊藤清寿・池田耕作・佐伯充敏・林田政和・吉田剛・西澤あずさ（2005 b）、拓洋第5海山周辺の地震波速度構造探査、*2004年度地球化学連合大会*, S 053-P 005.
- 金田謙太郎・林田政和・小澤誠志・小山あずさ・阿部則幸・平井康仁（2006）、小笠原海台東方海域屈折法地震探査、*海洋情報部技報*, 24, 6-16.
- Kaneda, K., S. Kodaira, A. Nishizawa, N. Takahashi, and T. Morishita (2010), Structural evolution of preexisting oceanic crust through intraplate igneous activities in the Marcus-Wake seamount chain, *Geochem., Geophys., Geosys.*, 11, Q 10014.

- 木下秀樹・寄高博行・高芝利博・伊藤友孝 (2004), 海洋短波レーダーによる海流観測データの検証, *海洋情報部研究報告*, **40**, 93-101.
- Korenaga, J., W. S. Holbrook, G. M. Kent, P. B. Kelemen, R. S. Detrick, H.-C. Larsen, J. R. Hopper, and T. Dahl-Jensen (2000), Crustal structure of the southeast Greenland margin from joint refraction and reflection seismic tomography, *J. Geophys. Res.*, **105 (B 9)**, 21, 591-21, 614.
- Kubota, R., E. Nishiyama, K. Murase, and J. Kasahara (2009), Traveltime estimation of first arrivals and later phases using the modified graph method for a crustal structure analysis, *Explor. Geophys.*, **40 (1)**, 105-113.
- Kuroishi, Y. (1995), Precise Gravimetric Determination of Geoid in the Vicinity of Japan, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, **41**, 1-93.
- Larsen, S. C. and C. A. Schultz (1995), ELAS 3 D : 2 D/3 D elastic finite-difference wave propagation code, LLNL internal report, 18.
- Lerch, F. J., S. M. Klosko, R. E. Laubscher and C. A. Wanger (1977), Gravity model improvement using Geos-3 (GEM 9&10), *Rep. X 921-77-246*, Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland.
- 日本水路協会 (2004), 離岸流等の観測手法及び特性把握に関する研究, 日本水路協会, 67 pp., 東京.
- 日本水路協会 (2005) 離岸流等の観測手法及び特性把握に関する研究 その2, 日本水路協会, 83 pp., 東京.
- 日本水路協会 (2006) 離岸流等の観測手法及び特性把握に関する研究 その3, 日本水路協会, 79 pp., 東京.
- Nishizawa, A. and A. Asada (1999), Deep crustal structure off Akita, eastern margin of the Japan Sea, deduced from ocean bottom seismographic measurement, *Tectonophysics*, **306**, 199-216.
- Nishizawa, A., K. Kaneda, A. Nakanishi, N. Takahashi, and S. Kodaira (2006), Crustal structure of the ocean-island arc transition at the mid Izu-Ogasawara (Bonin) arc margin, *Earth Planet Space*, **58**, e 33-e 36.
- Nishizawa, A., K. Kaneda, Y. Katagiri, and J. Kasahara (2007), Variation in crustal structure along the Kyushu-Palau Ridge at 15-21°N on the Philippine Sea plate based on seismic refraction profiles, *Earth Planets Space*, **59**, e 17-e 20.
- Nishizawa, A., K. Kaneda, N. Watanabe, and M. Oikawa (2009 a), Seismic structure of the subducting seamounts on the trench axis : Erimo Seamount and Daiichi-Kashima Seamount, northern and southern ends of the Japan Trench, *Earth Planets Space*, **61**, e 5-e 8.
- Nishizawa, A., K. Kaneda, and M. Oikawa (2009 b), Seismic structure of the northern end of the Ryukyu Trench subduction zone, south-east of Kyushu, Japan, *Earth Planets Space*, **61**, e 37-e 40.
- Nishizawa, A., K. Kaneda and M. Oikawa (2011), Backarc basin oceanic crust and uppermost mantle seismic velocity structure of the Shikoku Basin, south of Japan, *Earth Planets Space*, **63**, 151-155.
- 野上健治・小坂丈予・松本敬三・野坂琢磨 (2004), 海底火山活動に伴う変色海水化学分析の迅速化, *海洋情報部技報*, **22**, 99-108.
- Ohara, Y., K. Okino, and J. Kasahara (2007), Seismic study on oceanic core complexes in the Parece Vela back-arc basin, *Island Arc*, **16**, 348-360.
- 大野重保(1987), プーゲ化成, *測地学の方法*, 223-226, 東洋書店, 東京.
- Oikawa, M., K. Kaneda, and A. Nishizawa (2010), Seismic structures of the 154-160 Ma oceanic

- crust and uppermost mantle in the Northwest Pacific Basin, *Earth Planets Space*, **62**, e 13-e 16.
- 岡野博文・並木正治 (2002), FIA による海水試料中の硝酸塩分析について, *水路部技報*, **20**, 29-39.
- 岡野博文 (2003), FIA による海水試料中のケイ酸塩分析について, *海洋情報部技報*, **21**, 97-102.
- 岡野博文 (2004), FIA による海水試料中の鉄分析について, *海洋情報部技報*, **22**, 85-90.
- 沖野郷子・西澤あずさ・浅田昭 (1994), 相模湾北西部の地殻構造探査, *水路部研究報告*, **30**, 383-393.
- 小野智三・柴田遥 (2012), 航空レーザー測深機による計測作業, *海洋情報部研究報告*, **48**, 91-100.
- Oshida, A., R. Kubota, E. Nishiyama, J. Ando, J. Kasahara, A. Nishizawa, and K. Kaneda (2008), A new method for determining OBS positions for crustal structure studies, using airgun shots and precise bathymetric data, *Explor. Geophys.*, **39** (1), 15-25.
- 齊藤茂幸 (2011), 最新の漂流予測プログラムの概要について, *海洋情報部研究報告*, **47**, 22-26.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004), 日本重力 CD-ROM 第 2 版.
- Sandwell, D. T. and W. H. F. Smith (2005), Retracking ERS-1 altimeter waveforms for optimal gravity field recovery, *Geophysical Journal International*, **163**, 79-89.
- 笹原昇・塩原健・矢吹哲一郎 (2006 a), 船上重力データの精度評価及び誤差補正について, *海洋情報部技報*, **24**, 89-93.
- 笹原昇・矢沼隆・矢吹哲一郎 (2006 b), 日本周辺における海域ジオイドモデルの決定, *海洋情報部研究報告*, **42**, 39-47.
- 笹原昇・工藤宏之・平岩恒廣・矢沼隆 (2007), 海域ジオイドモデルによる地衡流の算出, *海洋情報部技報*, **25**, 112-115.
- 笹原昇・工藤宏之・藤田雅之 (2008), 日本周辺における海域ジオイドモデルの精度検証, *海洋情報部研究報告*, **44**, 43-55.
- 佐藤まりこ・藤田雅之 (2012), GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展—この 10 年間のあゆみ, *海洋情報部研究報告*, **48**, 26-40.
- 清水潤子・野坂琢磨 (2005), 海底堆積物中における有機スズ化合物の分析及び定量法の開発, 及び主要湾域におけるトリブチルスズ化合物 (TBT) 汚染調査結果について, *海洋情報部技報*, **23**, 126-134.
- 清水潤子・山尾理・野坂琢磨・野口賢一・峯正之・松本敬三・大市一芳・堤一尚・宮本哲司・池田善郎 (2005), 東京湾海底堆積物中における POPs (残留性有機汚染物質) 濃度分布の特徴について (平成 14 年東京湾 POPs 調査結果より), *海洋情報部研究報告*, **41**, 35-49.
- 清水潤子・野口賢一・三浦幸広・友久武司 (2008), 主要湾域の海底堆積物中における有害汚染物質濃度の経年変化の傾向, *海洋情報部研究報告*, **44**, 57-66.
- 清水潤子・杉本綾・山尾理・高橋真 (2010), 東シナ海における残留性有機汚染物質 (POPs) 調査—2008 年 12 月, 測量船拓洋, *海洋情報部研究報告*, **46**, 1-12.
- 田中友規 (2007), 2 軸電磁ログを使用する海流観測におけるバイアス誤差の補正方法, *海洋情報部研究報告*, **43**, 45-57.
- Tapley, B., J. Ries, S. Bettadpur, D. Chambers, M. Cheng, F. Condi, B. Gunter, Z. Kang, P. Nagel, R. Pastor, T. Pekker, S. Poole, F. Wang (2005), GGM 02—An improved Earth gravity field model from GRACE, *Journal of Geodesy*, **79**, 467-478.
- 戸澤実・松本良浩・岩本暢之・小野智三・矢島広樹 (2004), 航空機レーザー測深機のテスト飛行について, *海洋情報部技報*, **22**, 1-6.

- 渡邊奈保子・山尾理 (2010), 2003年-2008年の東京湾奥部の底層溶存酸素濃度時間変化, *海洋情報部研究報告*, 46, 125-131.
- 渡邊奈保子・山尾理・清水潤子・高橋真 (2011), 東シナ海における残留性有機汚染物質 (POPs) の分布状況について, *海洋情報部研究報告*, 47, 72-82.
- Wessel, P. and A. B. Watts (1988), On the Accuracy of Marine Gravity Measurements, *Journal of Geophysical Research*, 93 (B1), 393-413.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998), New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.
- 山尾理 (2004), 強成層期の東京湾奥における水質の短期変動に対する海上風の影響, *海洋情報部技報*, 22, 78-84.
- 山尾理 (2006), 東京湾奥部における底層溶存酸素濃度の時間変化 (2003年-2005年), *海洋情報部技報*, 24, 116-126.
- 山尾理・清水潤子・郭新宇・田中周平・クナチワチナガン・藤井滋穂 (2010), 東シナ海におけるペルフルオロ化合物 (PFCs) の分布及び起源推定, *海洋情報部研究報告*, 46, 13-24.
- 寄高博行・工藤宏之・矢沼隆・大島ゆう子 (1999), TOPEX/POSEIDON 海面高度計を用いた海流推定について, *水路部技報*, 17, 31-36.

要 旨

1871年に我が国に海洋情報部が設立されてから140年が経過した。最近10年の海洋情報業務における技術の進展を報告する。