

## 水路技術に関する展望†

小田巻 実\*, 井本泰司\*, 打田明雄\*, 小川正泰\*

### An Overview on the Recent Research and Development for Hydrographic Works †

Minoru ODAMAKI\*, Taiji IMOTO\*, Akio UCHIDA\* and Masahiro OGAWA\*

#### 1. はじめに

水路部研究報告28号（創立120周年記念号）には、同じ題目の報文が掲載されている。当時と比べると、海洋をめぐる状況は大きく様変わりした。国連海洋法条約の発効、甚大な被害をもたらした阪神大震災、日本海沿岸を広く汚染した「ナホトカ号」事故など、水路業務に関わる事案が次々に発生、関連する調査研究及び技術開発が活発に行われた。一方、水路業務に関する技術そのものの発展もめざましく、おそらく10年前には構想しかなかったものが実現し、既に現場で使われるようになった。水路業務の最も基本である海上位置測定についても、かつては、六分儀を使った専門技能であったが、いまやGPS（Global Positioning System）で誰でも高精度な位置を得ることが出来るようになった。現在では、一般船舶はもちろんボートなどでもGPSを備え、さらにはGPSの付いた携帯電話も現れた。GPSでいきなり緯度経度が測定されるようになると、地文航法には必須の道具であった海図も、GPSの時代

に合った情報形態が求められ、国際標準に適合する電子海図の編集刊行が進められた。一方、位置決定の基本となる測地系についても、経緯度原点をもとに三角測量で展開する日本測地系を採用していたが、GPSの時代に合わせて地球中心を原点にした世界測地系に改正され、世界測地系海図の改版刊行が進められた。

このような新しい技術がもたらす膨大なデータを効率よく整理解析し、使いやすい形で提供して行くには、単に個々の課題を研究するだけでなく、データ処理解析や提供技術の研究開発も必要となる。また、関連する技術や分野も広がり、しかもそれぞれに先端的な研究開発が必要になる。そこで、水路部では、個別に研究するだけでなく総合的に研究を推進するため、関連研究課題をまとめた「プロジェクト研究」を発足させた。第1表は、現在までのプロジェクト研究の課題である。各プロジェクト研究課題については、本報告中にレビュー、もしくは論文として所収される。

水路部では、以上のような時代の情勢に合った研究開発に取り組むとともに、21世紀を迎えた

第1表 プロジェクト研究課題一覧.

課 題 名	研究期間	9年度	10年度	11年度	12年度	13年度	14年度	15年度	16年度
漂流予測手法の高度化に関する研究	(9~13)	←					→		
地殻変動把握に関する新手法の開発研究	(9~10)	←	→						
デジタル水深測量の業務化に関する研究	(9~10)	←	→						
浅海用マルチビーム音響測深機の精度評価手法の研究	(11)			↔					
海底地殻変動観測技術の高度化に関する研究	(12~14)				←		→		
沿岸域における海洋環境変動の監視と予測手法の開発研究	(14~16)						←		→

† Received 2002 March 12th.

\* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory.

平成12年2月、「ハイドロイノベーション21」(Hi21, Hydro-innovation for 21st century)としてユーザー・オリエンテッドを基礎とした今後の水路業務の方向についてまとめた。本稿では、最近の水路技術の発展を辿るとともに、Hi21の方向、そして将来展望について概観することとした。

## 2. 海底調査技術の進展

### 2.1 マルチビーム測深技術の改良と実用化

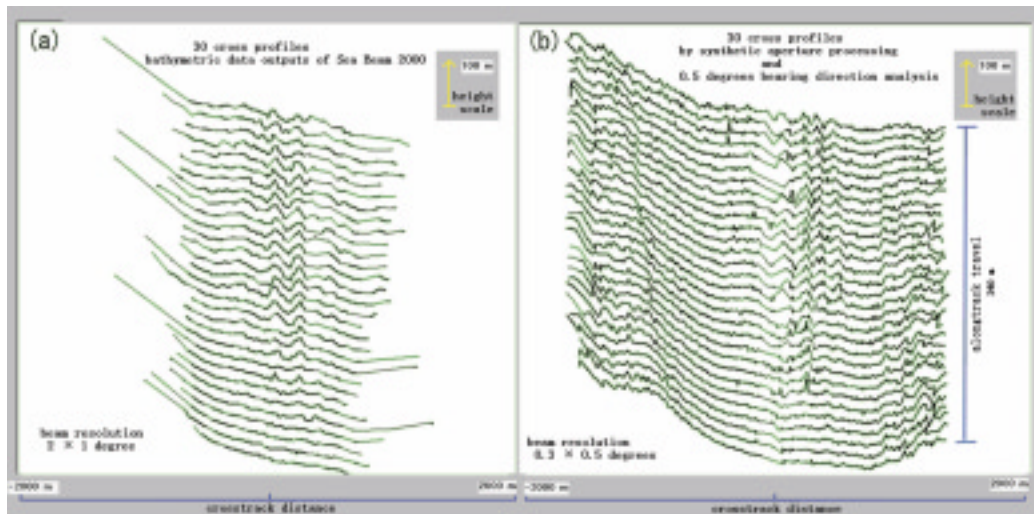
水路部では、大正13年から昭和5年に掛けて欧米から音響測深機を導入、昭和10年には音響測深データを海図に正式に取り入れた。戦後になってからは、各種の浅海用や深海用の音響測深機が開発され、水路測量に使用されるようになった。音響測深は、原理的には送波器から送信した音が海底で反射し受波器で受信するまでの時間を測定し、海中を伝わる音速度で水深に換算する。測量船の直下の海底を測深するのならば、原理的には最も早く海底で反射され返ってくる音を捉えればよい。しかしながら、斜めにいろいろな方向の水深を測定するのは簡単ではない。昭和58年に日本で初めて導入したSeaBeam（米国General Instrument社製）を始めとするマルチビーム測深では、直下方向を含め左右の斜め方向にも測深ビームを形成する測深方法が使用された。例えば、送波器列と受波器列を船底に直交して配置、送波ビームと受波ビームを直交させるクロスファンビームと呼ばれる方法を用い、各方向に鋭い測深ビームを形成することにより、どの方向の海底から反射して返ってきたのかを計測し、一回の送信で幅広い測深を可能とした。また、平成2年及び平成5年に導入したSeaBeam2000、平成10年に導入したSeaBeam2112では、送波器と受波器の個数を増やすことによりビームを絞って方向分解能をあげるとともに、コンピュータの発達に伴いビームフォーミングも改善され、SeaBeam2112では、水深に応じて90°から150°のスワ幅（測深幅）が得られるようになった。浅海域では、平成13年導入したSeaBat8125のようにビーム幅が

0.5°、ビーム本数240本の機種も現れた。このようにスワ幅が広がり且つビーム幅が鋭くなると、船の動揺をより正確に補正する必要がある。さらに、海水中の温度成層によって音速度も鉛直分布を持つことから、斜めに音波を発射した場合、音線が屈折するので、それに沿った伝搬時間の換算も必要になる。さらには、航走しながら測深するので、各種バイアスの測定及び音波の送受信時刻と位置測定や動揺計測との計測時間差(Latency)の検出が必要である。特に平成7年から導入を開始した浅海用のマルチビーム測深については、極めて重要である。このため、水路部では、平成13年に「浅海用マルチビーム測深実施指針(案)」を作成、使用機器の精度基準、各種補正精度、各種バイアス及び補正要素の測定、バイアス値の算出順序及びその検証、測深手順等の指針が示された。

また、近年のマルチビーム測深機は、測深機能とあわせてビームインテンシティー（反射強度）計測やサイドスキャン機能を備えているので、デジタル測深に加えて、海底面での音波の反射強度の変化から地形・地質の変化の把握が可能であり、深海域では、平成10年導入した深海用サイドスキャンソナーSystem09（通称、アンコウ）を含め海底地形解析の一助となっている。

さらに、マルチビーム測深の新たな技術として、航走しながら送波する機能を利用して、見かけ上、大きな送波器列を実現する開口合成手法の研究を行った。平成8年からはSeaBeam2000を使用し、5ピング（発信回数）のデータを使用して、送波アレイを開口合成し、7倍の開口長を実現し、送波ファンビームの指向幅を0.3度に向上できることを確認した（第1図）（Asada and Yabuki, 2001）。測量時の速力及び操船等の問題を抱えているが、地形を高分解能で計測できる可能性を示した。

水路測量用の測器は、取得データの検証・評価がきちんとできることが不可欠である。マルチビーム測深機では、機器導入から取得データの検証及び活用に関する問題点について、以上のよ



第1図 シービーム2000で得られたデータの合成開口処理結果。(a)は処理前、(b)は処理後の海底地形プロフィールである。調査海域は、相模湾真鶴岬から東約10km付近で、水深約900m。(b)には、より多くの詳細な谷筋、テラス地形など地形上の特徴が現われている (Asada and Yabuki, 2001)。

うな研究開発を行って克服し、ようやく総合的な測深システムとして実用化されてきた。マルチビーム測深は、測量船の姿勢や運動特性、操船等が測量精度に直接に関わることから、今後も解決すべき問題が残されているものの、面的に詳細な海底地形が捉えられることから、いまや海底地形調査には必須の技術となっている。

## 2.2 海底基準点の精密測量

水路部では、昭和39年の測地学審議会による「地震予知研究計画の実現について」の建議以来、地震予知計画に参画し、海底地形や海底地質構造などの調査を行い、海域での地震発生ポテンシャルを評価するための調査を推進するとともに、GPSを用いて離島基準点の位置を精密に測定することによって、我が国の本土及び離島の精確な位置を確定し、日本周辺の海洋プレートの動きを監視してきた。平成12年6月以来の三宅島周辺の地震活動とマグマ活動では、GPSによる南関東の地殻変動監視観測により、伊豆諸島周辺の群発地震に関連したマグマの活動による地殻変動を的確に捉えていた。しかしながら、このような島嶼の基準点だけでは、東海地震や南海地震のような海底での海底地殻変動を監視するには不足である。そこで、平成12年から、日本周辺の主な海域に海

底基準点を設け海洋プレートの動きを監視し、地震活動の原因となる地殻変動を監視するプロジェクトが始まった。

海底基準点の位置を精密に決めるには、海上にある測量船の位置を精密に決定する技術と測量船から基準点の位置を定める二つの技術が必要である。前者は、SLR (Satellite Laser Ranging) によって精密に測定されている下里の海洋測地本土基準点に対し、K-GPS (Kinematic GPS) を使用して船の位置 (緯度・経度・高さ) を精密に求め、後者は、ミラー式音響トランスポンダー (応答装置) による海底基準点に対し、船上から音響信号を送受して距離を求める。K-GPSでの船位測定と音響による船から海底基準点までの距離測定の多数のデータに対し、位置算出技術を駆使し、現段階では数cmの精度で海底基準点の位置 (経緯度) が決定できるまでに到達した。この技術は、海底地殻変動の監視だけでなく、海洋開発の基盤技術として多方面への応用が期待される。このプロジェクトに関する技術や研究開発に関しては、本研究報告において別項で報告される (矢吹, 2002)。

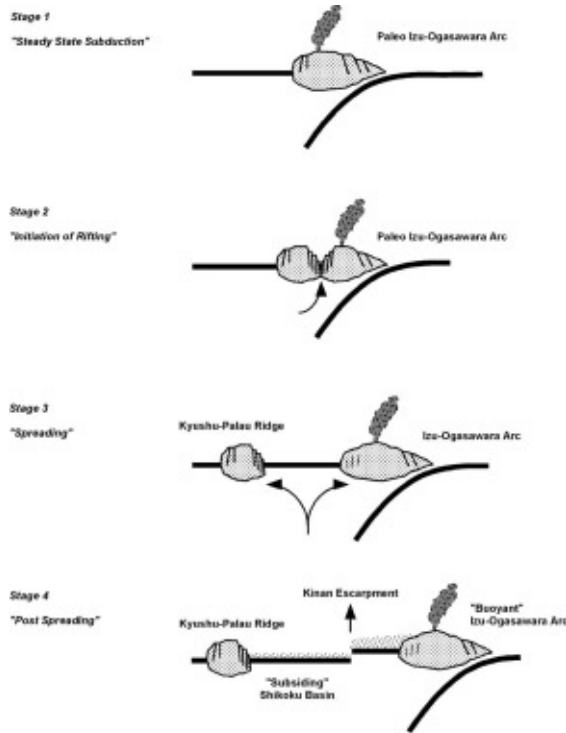
## 2.3 大陸棚調査の進展

国連海洋法条約は、発効に必要な批准国が60カ国に達し、平成6年11月に発効した。我が国で

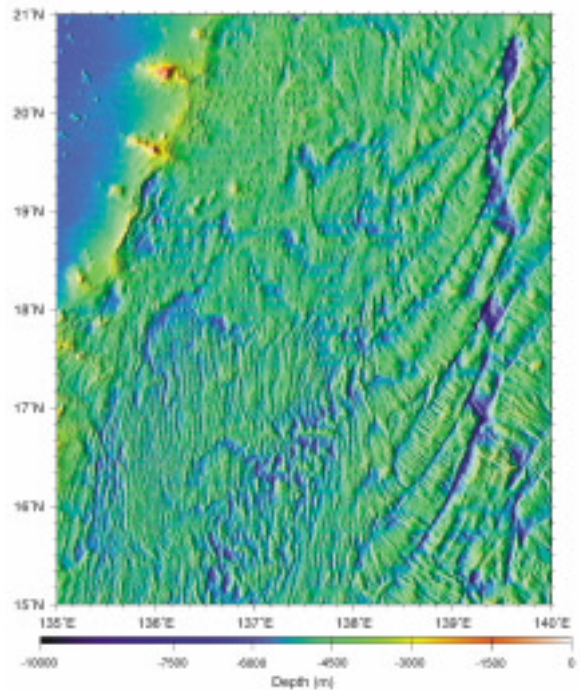
は、第136回国会で同条約の締結について承認され、平成8年6月に批准書を国連に寄託し、同年7月に我が国について効力を生じた。同時に「排他的経済水域及び大陸棚に関する法律」など関連する法令が整備された。同条約では、大陸棚の限界について、「大陸棚の外側の限界線は、堆積岩の厚さが大陸斜面の脚部までの距離の1%となる線又は大陸斜面の脚部から60海里の線まで200海里線を超えて延長できる。ただし、その限界線は、領海の幅を測定するための基線から350海里を、又は2500m等深線から100海里を超えてはならない」とされた。「沿岸国は、国連海洋法条約第76条の規定に従って自国の大陸棚の外側の限界を200海里を超えて設定する場合には、その科学的データを添えて、大陸棚の限界に関する委員会に資料を提出する」こととされている。よって、大陸棚を領海基線から200海里を超えて主張するためには、大陸棚縁辺部が陸部の自然延長であるこ

との証明に足りる科学的根拠（地形・地磁気・重力・底質データ）を示すことが必要である。このため、水路部では、昭和58年から測量船「拓洋」により、大陸棚が200海里を超えて延長できる可能性がある日本南方海域を含む広大な海域について、概略的な大陸棚調査（概査）を開始した。平成11年5月には、国連の大陸棚の限界に関する委員会で「大陸棚の限界に関する委員会の科学的及び技術的ガイドライン」が策定され、同ガイドライン策定以前に批准した国の資料の提出期限は、策定後10年以内となり、平成21年までに延長された。

水路部では、平成14年度まで我が国の大陸棚について概査を行い、海底地形、地質構造、地磁気、重力に関する膨大なデータを収集して、フィリピン海プレートの島弧-背弧系の構造発達史や北西太平洋プレートの地質構造などを考える上で重要な調査成果が得られている（第2図、第3図、春日・小原,1997a, Kasuga and Ohara,1997b, 小



第2図 四国海盆の4段階の構造発達史。紀南海底崖は、活動を停止した「冷たい」四国海盆と、活動中で「浮揚性」の伊豆・小笠原弧との重力不均衡によって生じたと考えられる（春日・小原, 1997a）。



第3図 大陸棚調査によって得られた沖ノ鳥島海盆の詳細な海底地形陰影図。光源は270度方向。東経138度を境にして地形のトレンドが大きく異なり、沖ノ鳥島海盆の海底拡大の拡大方向が東西から北北東-南南西に変化していることを明瞭に示している（Ohara et al., 2001）。

原ほか,2001)。平成15年度以降は、本格的な屈折法音波探査を導入して精密な海底地殻構造を解明するなど、大陸棚の延長の科学的な根拠をより確実にするための精密な大陸棚調査（精査）が計画されている。

### 3. 海上防災・環境保全への対応と研究開発

海上保安庁「業務遂行方針2001」に掲げられている海上防災、海洋環境保全に資するため、水路部では、従来の活断層調査や沿岸防災情報図に加え、沿岸海域環境保全情報や津波防災情報の整備を進めており、単に従来技術の応用だけではなく、新しい技術開発や知見を駆使した取り組みが期待されている。

#### 3.1 沿岸海域海底活断層調査の進展

平成7年1月17日には、淡路島北部を震源とするマグニチュード7.2の直下型地震（兵庫県南部地震）が発生、死者五千名を越える大災害となった。第五管区海上保安本部は自ら大きな被害を受けながらも、総力を挙げて救援と二次災害の防止にあたった。神戸港も激しく被災し、コンテナ流出などの災害も起きたため、五管区水路部は岸壁や航路の被害調査にあたりとともに救援にやって

くる船舶のために水路通報・航行警報などの情報を流し続けた。隣接管区水路部と本庁水路部では、測量船を緊急に派遣し、救援活動にあたりとともに、大阪湾の海底活断層の調査を実施した。この地震を通じて、人口と産業が密集した沿岸地域にある活断層の重要性があらためて認識され、水路部では平成7年度から沿岸海域海底活断層調査を開始した（第2表）。調査では、海底地形調査並びにスパーカーなどによる音波探査、ボーリングによる海底堆積物採取が行われ、その結果、延長37km以上にも及ぶ大阪湾断層や、伊勢湾では伊勢湾断層・鈴鹿沖断層・白子一野間断層の詳細が明らかにされた（岩渕ほか,2000a,2000b）。平成8年度以降は、各地の沿岸海域の活断層調査が続けられ、海域の地震ポテンシャル解明に期待が寄せられている（第4図）。

#### 3.2 沿岸防災情報図

地震などの自然災害発生時には、大きな混乱が予想される陸上からの救援だけでなく、海上からの救援活動が有効と考えられる。島嶼部や後背地の少ない沿岸域の集落などに対する救援活動には特に重要と考えられ、巡視船艇の活動に必要な海図情報に加え、避難場所や災害危険個所を盛り込

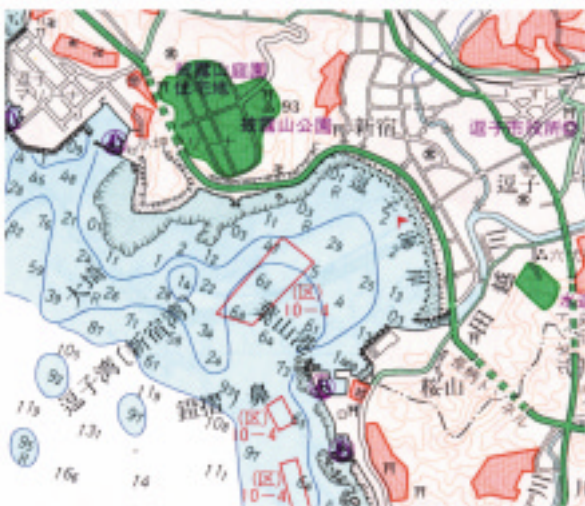
第2表 沿岸海域海底活断層調査海域一覧。

海 域	表層音波探査 (スパーカー)	深層音波探査 (マルチチャンネル)	堆積物採取
大阪湾	1994-1995	1995	1995/ボーリング
淡路島西部	1995	—	—
東京湾	1995	1995	1995/ボーリング
伊勢湾	1995	1995	1995/ボーリング
広島湾	1996	—	1999/ピストンコアリング
福岡湾	1996	—	2000/ボーリング
松山港周辺	1997	—	—
友ヶ島水道	1997	—	—
函館湾	1998	—	—
周防灘(宇部南部)	1998	—	2001/ピストンコアリング
周防灘(周防灘東部)	1999	—	—
秋田一本荘沖 その1	2000	—	—
秋田一本荘沖 その2	2001	—	—



第4図 沿岸海域海底活断層調査海域（調査年次及び調査項目は第2表参照）。

んだ沿岸防災情報図を整備している（第5図）。また、これらには災害時に必要な緊急連絡先などの社会情報も盛り込まれている。しかしながら、これらの防災情報は、防災対策の進展や社会状況の変化に応じて随時、見直しが行われ、最新維持される必要がある。さらに情報の交換、複製頒布も容易でなければならない。従って、従来のよう



第5図 沿岸防災情報図例。海域の情報以外に災害発生時に海からの救援活動に必要な避難場所や避難道路などが記載されている。

な紙の上での編集や印刷発行では、最新維持や見直しが難しく、また情報の相互利用も不便なことから、最近では計算機上でのデジタル編集、印刷・刊行とともに、デジタルデータベースとしても保守管理されるようになってきている。

一方、沿岸海域環境保全情報などでは、沿岸域の生物分布や流動特性の自然情報や防災設備などの社会情報まで情報が多岐にわたるとともに、位置データを持つ情報であることから、当初からGIS（Geographical Information System；地理情報システム）情報として整備され、さらにはインターネット経由でどこからでもアクセスできるWeb-GISデータベースとして構築されつつある。

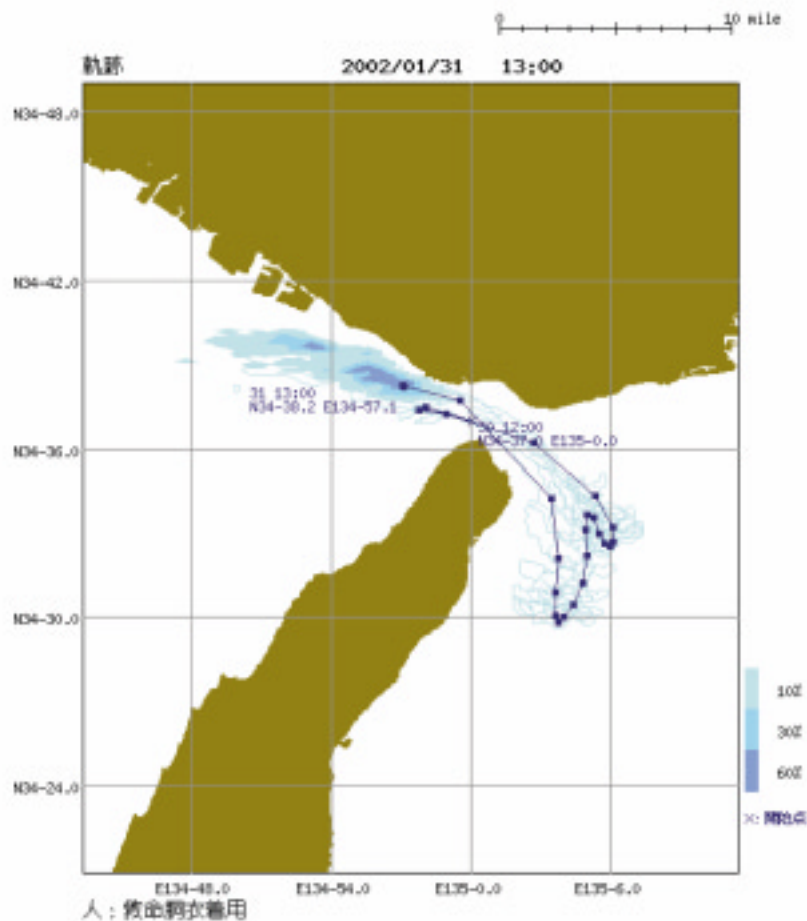
### 3.3 漂流予測の高度化

海上災害が発生すると、遭難者や積み荷などは海上に放出され、その場の流れや海上風によって漂流を始める。従って、捜索救難や防除活動を有効かつ的確に行うためには、現場の流況や海上風を推定し漂流経路・範囲を予測することが欠かせない。平成9年1月には、タンカー「ナホトカ号」が日本海で遭難、6240klのC重油が流出漂流、島根県から秋田県に至る日本海沿岸に漂着し、海岸部を広範囲に汚染した。同年4月には、対馬海峡で「オーソン号」からC重油1700klが流出する事故が発生、7月には、東京湾でタンカー「ダイヤモンドグレース号」が底触、貨物タンクの破口から原油約1550klが流出、湾内に広がった。このような大規模な油流出汚染事故では、影響が長期かつ広範囲にわたるため、流出油の動向を的確に把握・予測することが必要である。特に沿岸漁業などにも多大な影響が及ぶため、漂流予測は社会的にも注目され重要となる。水路部では、平成9年度から沿岸域の自然的・社会的情報等をデータベース化した沿岸海域環境保全情報の整備を開始するとともに、プロジェクト研究「漂流予測手法の高度化に関する研究」を開始した。研究の主要目標の一つは、少ない観測データによる流況の推定・予測の精度を向上させるためデータアシミレーション手法の導入である。このプロジェクト

研究の進捗状況と成果については別項で報告されている（寄高，2002）。

さらに平成10年9月には，海洋レジャー客が相模湾江ノ島の沖合いで遭難行方不明になり，巡視船航空機で捜索救難活動に当たったものの，約20時間後，熱海沖で漁船に救助される事件が発生した。この事件をきっかけに，より有効的確な捜索活動を行うために警備救難部と水路部は，「漂流予測に関する合同検討委員会」を設置し，精度向上方策を検討した（海上保安庁，1999）。その方策は，（1）警備救難部と水路部の連携体制の強化，（2）漂流予測計算システムの改良強化，（3）精度向上に必要なデータの蓄積，の課題毎にまとめられた。具体的には，精度向上の基礎となる海流データに関しては，巡視船からリアルタイムに気象・海象データを収集し伝送する「船舶観

測データ伝送装置」の増強配備，他の観測データも統合して収集整理するリアルタイム海況情報データベース並びにメッシュ化されたリアルタイム海況データベースの構築，前述のデータアシミュレーションの研究開発があげられた。さらに漂流予測計算や計算システムの改良が図られ，現在，庁内イントラネット経由で各地の部署でも漂流予測計算が可能となっている（第6図）。また，漂流予測の信頼性を確保するため，漂流ブイ等を用いた予測検証と逐次補正手法も検討され，GPSによる位置データを人工衛星経由で伝送するオープン・ブイが配備されるとともに，各地で漂流実験も行われた（中村・石村・宗田，2001）。一方，合成開口レーダーなどの新しい観測機器によって現場の気象海象を迅速的確に把握する可能性も検討された。さらに実施にあたっては，委員会を継続し



第6図 漂流予測計算例. 2002年1月30日12時に明石海峡中央で救命胴衣着用の人が海中転落し漂流したとの想定。一旦，上げ潮に乗って西に流されるが，転流した下げ潮で大阪湾に流され，再び転流し上げ潮で播磨灘に流される。海域の様子は推定存在確率分布を表している。

て具体的な方策と課題を検討することとなった。

以上の海難以降も、平成11年1月の漁船新生丸海難や平成12年7月の明石海峡でのプレジャーボート親子転落遭難などが発生、沖合の海流だけでなく沿岸内湾の潮流についてもさらなる推定・予測の精度向上が望まれ、海洋研究室だけでなく海洋調査課・沿岸調査課を中心に研究開発が進められている。

#### 4. 地球規模の海洋・気候変動監視への参加

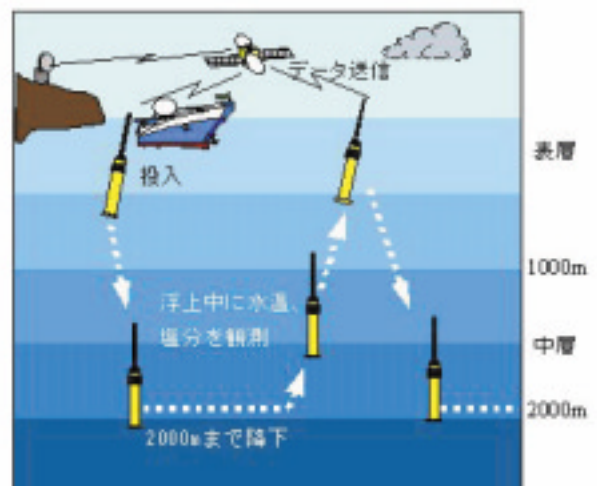
従来から、地球規模の気候変動をもたらすものとしてエルニーニョ現象が注目され、熱帯赤道域を中心とした大気海洋変動の観測調査・研究(TOGA; Tropical Ocean and Global Atmosphere, 熱帯海洋と地球大気変動に関する調査研究)が行われ、水路部でも政府間海洋学委員会(IOC)の西太平洋海域共同調査(WESTPAC)プログラムの一環として毎年、赤道域に至る海洋観測を行ってきた。近年では、より長期かつ大規模な気候変動が注目されるようになり、特に海洋の表層から深層までを巡るブロッカー循環など地球全体の海洋の状態をモニタリングすることの重要性が提起され、世界中の海洋を岸から岸まで海面から深海底までくまなく横断観測するWOCE(World Ocean Circulation Experiment; 世界海洋循環実験)計画が実施された。水路部では、これらの観測に参加するとともに、日本海洋データセンター(JODC; Japan Oceanographic Data Center)は、WESTPACのデータ管理センターやWOCEのADCPデータのDAC(Data Assembly Center)の業務を行っている。最近では、実際の気候海洋変動予測に結びついた観測計画が提唱され、世界的にはIOCの全地球海洋観測システム(GOOS; Global Ocean Observing System), WESTPAC海域では、NEAR-GOOS(North East Asian Region - GOOS)が組織化され、JODCは、NEAR-GOOSの遅延モードのデータセンター業務を行っている。

これらの観測研究プロジェクトにおいても、中層から深層に至る海洋の観測は測量船でCTDや

採水器などを上げ下げして観測するしかなく、観測海域や時期も限定されたものにならざるを得ない。そこで、IOCとWMO(世界気象機関)では、中層フロートを利用したアルゴ観測計画を提唱、推進することになった。

##### 4.1 アルゴ計画への参加

アルゴ計画では、海面と深さ2000mの間を定期的に上下する中層フロートで海洋観測を行う(第7図)。通常は、深さ2000mぐらいを浮遊、約2週間に一度、海面に浮上、その間の水温塩分の鉛直分布を人工衛星経由で伝送する。計画では、2002年までに世界各国協力して全海洋上に3000個の中層フロートを流し、経緯度約3度、300km毎の海洋観測データを得ようというものである。すなわち、2週間毎の世界中の海洋観測データのセットが得られ、それをもとに海洋・気候変動モデルを動かす、気候変動を解明予測しようというわけである。日本では、旧運輸省と旧科学技術庁が中心となり、気象庁や海洋科学技術センターなどの関係機関に呼びかけてこの計画に参加することになった。水路部では、中層フロートの投入及び検証海洋観測で参加するとともに、この計画に合わせて黒潮域まで観測できる海洋短波レーダーを整備することとした。



第7図 中層フロートによる海洋観測。約2週間毎に浮上・潜行を繰り返しながら、その時の水温・塩分の鉛直分布を観測し、データを伝送する。



#### 4.2 海洋短波レーダーによる海流観測

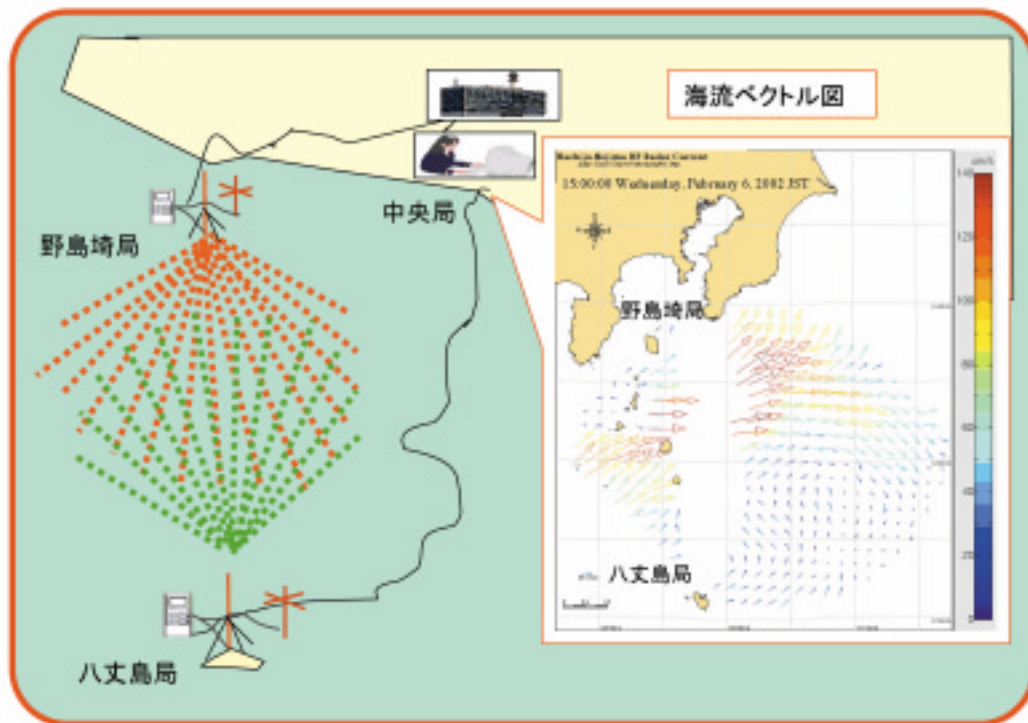
海洋短波レーダーによる海流観測の原理は、海面の波浪でレーダー電波が反射されることを利用したものである。まず、送信アンテナから特定周波数の電波を海面に向けて発射、海面ではいろいろな波長の波浪で反射・散乱が起きるが、波長が電波の波長のちょうど1/2になる波浪からの反射が、位相が重なることによって大きくなる(Bragg共鳴散乱)。つまり、波浪のある海面からのレーダー電波の反射スペクトルを取れば、ちょうど電波に対応する周波数のところにピークを持つが、この波浪は伝搬移動しているのでその速度に応じたドップラーシフトを起こす。さらに海面波浪の位相速度は波長から計算できるので、ドップラーシフトで観測された速度から位相速度を差し引けば海流の速度が求められる。

水路部では、千葉県野島埼と八丈島に海洋短波レーダーを設置し、平成13年9月から野島埼-八丈島間200kmの海流観測を開始した。このレーダーでは、5MHz帯を使用し、約10kmメッシュ内の3時間平均値として測定している。第8図は、

観測概念図及び観測結果の一例である。視線方向の速度を測定しているのので、二つのレーダー局を結ぶ線上では海流ベクトルは求められない。

アルゴ計画の中層フロートは、漂流しながら海流を測定するラグランジュ型観測であるが、海洋短波レーダーでは固定点でオイラー型の時系列データが得られ、ちょうどこの海域に入るフロート観測データの検証を行うとともに、より細かな時空間サイズでの変動を把握するのに役立つものと期待されている。

さらに、この海域は船舶の錯綜する海域の一つでもあり、リアルタイム海況情報データベースに登録され、データベース充実への寄与が期待される。また、沿岸調査課でも、海洋短波レーダーによる沿岸域の流れの観測が計画され、相模湾での設置が始まっている。今後、特定の重要な海域について、定常的にこのような海流データが得られるようになり、データ・アシミレーション手法の確立と相まって、漂流予測精度向上への貢献が期待される。



第8図 海洋短波レーダーの観測概念図及び観測結果例。

## 5. リモートセンシング技術の活用

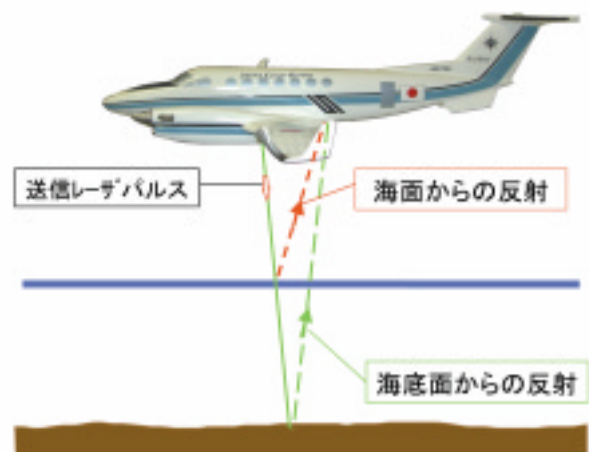
NOAA衛星の熱赤外画像を使つての海面水温分布観測は、かなり以前から実用化され、毎週の海洋速報等に活用されている。可視画像については、LANDSAT衛星などのものがリモートセンシング技術センター経由で比較的手軽に入手できる。最近では、地上分解能1mというようなイコノス衛星も利用可能となっている。さらにTOPEX-POSEIDON衛星の海面高度計(Altimeter)やRADARSAT衛星の合成開口レーダー(SAR; Synthetic Aperture Radar)など能動型センサーも実用化されている。従つて人工衛星リモートセンシングは、もはや一般的に画像を見る段階から、目的に合わせた衛星やセンサーを選択的に利用する段階に入ったと考えられる。

測量船による海洋観測や水路測量は、精度が高く詳細な観測データを得るためにはこれからも不可欠であるが、災害発生時に一刻も早く概況を知りたいときや海洋速報のように広域の海洋概況を定期的に把握したい場合などには、船舶だけではほぼ不可能に近い。例えば、「ナホトカ号」重油流出事故では、漂流油の分布把握には、船舶からの報告だけでなく、庁内外の航空機からの情報や人工衛星リモートセンシングデータが役に立った。すなわち、これからの海洋観測や水路測量に際しては、人工衛星や航空機によるリモートセンシングと測量船による現場観測・測量を有機的に組み合わせて行うこととなるであろう。水路部では、赤外画像を海洋速報に利用するだけでなく、可視画像を利用した火山変色水の監視、RADARSAT-SARによる流出油の把握(土出・井本・蔭山, 2000)や海水分布の把握などを行つてきた。中でも、人工衛星海面高度計については、海上重力分布や海底地形の推定(沖野, 1999)、海面高分布からの海流分布推定(寄高ほか, 2001)などの研究開発を行つてきた。平成13年末にはTOPEX-POSEIDONの後継機として海面高度計搭載のJASON-1衛星が打ち上げられ、さらに二つの人工衛星の距離を精密に測定して重力を測定

するGRACE計画も進められている。これらの衛星データを利用すれば一段と詳しい海流分布や海上重力・海底地形の推定が可能と考えられ、水路部としても積極的に研究を進めて行くこととしている。

### 5.1 航空機による水路測量技術

我が国の沿岸域における水路測量は、航路や港泊域など船舶航行に直接関わる海域について、従来から測量船により十分な精度を持った測量を行つてきたが、珊瑚礁海域などの極浅海域については、測量そのものが危険で難しくまた効率も上がらなかった。しかしながら、最近の海洋レジャーや沿岸開発の進展、さらにはGPS装置を過信した浅所への接近などにより座礁事故も起きようになり、航路筋以外の極浅海域でも十分な精度を持った測量が望まれるようになってきた。そこで水路部では、平成12年12月、航空レーザー測深システムSHOALS-1000(カナダOptech社製)を発注した。測量船では進入しにくい浅所や汀線近くの測量に活用することとなった。この測深原理は、航空機から緑色と近赤外のレーザー・パルスを発射し、緑色レーザーパルスは海中を透過して海底面で反射し、近赤外レーザーパルスは海面で反射して戻ってくるまでの時間を計測し、その時間差から水深が計算されるものである(第9図)。



第9図 航空レーザー測深概念図。近赤外と緑色のレーザーパルスを発射し、近赤外で海面を、緑色で海底面を検知。

航空機の位置や高度はK-GPSで測定されるので、その時の海底と海面が準拠楕円体上で求まり、別途、海図の水深基準面を準拠楕円体上で設定しておけば、ただちに水深値が求められることになる。このシステムは、現在、Optech社で製作されており、平成15年3月に納入され、平成15年度から国内において実際の運用に供されることになっている。この航空レーザー測深システムによって自然海岸域の浅所の測量が促進されるものと期待されるとともに、今後、データの検証のためのテスト海域の構築及び得られたデータを効率よく整理し、ユーザーに便利のように提供して行くのか、更なる研究開発が望まれる。

## 5.2 高解像度人工衛星画像の海図の最新維持・災害対策への利用

船舶がGPSに頼って浅所に近づいて行く状況を考えると、水深測量が航空機レーザー測深によって効率よく進められるのと同時に、海岸線や浅所の形状や位置についても今まで以上に精度よく最新維持されたものを提供して行く必要がある。従来のように航空写真測量を利用したとしても、全国の長い海岸線を把握・最新維持するのは難しく、近年、分解能が1mに達するようになったイコノスなどの人工衛星画像の利用が検討されている。中でも、宇宙開発事業団が平成16年に打ち上げる予定の陸域観測衛星（ALOS）では、地上分解能2.5mでステレオ画像が撮れるPRISMセンサーが搭載され、このデータを利用して全世界の陸域地形情報の精度向上・最新化が図られることになっており、海岸線情報の精度向上など水路業務への活用も期待される。

一方、最近の人工衛星では、センサーの向きを変えて特定の範囲を短い周期で撮影できるポイントング機能が付けられているものがある、例えば、RADARSAT-SARでは、衛星自体の回帰日数は24日であるが、ポイントング機能によって2~4日間隔で観測可能となる。他の衛星との組み合わせも考えれば、さらに短い周期での観測も可能で、油流出など災害時の緊急対応には数

時間で対応できると言われており、これからの海難事故や油流出などへの対応に際しては、必須の観測手段と考えられる。

## 6. 海域ダイナミックGISと電子海図の発展

海図を始めとして水路部が保有する情報のほとんどは、地理的位置と日時を属性として持っており、さらに新しい情報が入手され次第、情報の更新・最新維持が行われる。このような地理的な情報を扱うシステムをGIS (Geographical Information System) と呼び、近年の高度情報化社会の到来に伴い、国家的な事業として本格的な取り組みが進められている。水路部では、保有する海域地理情報とその最新維持機能に鑑み、海域ダイナミック地理情報システム (MD-GIS ; Marine Dynamic-GIS) と位置づけて、そのための整備を進めている。このMD-GISでは、海図情報に限らずJODCで保管されている水深データなど測量・観測データを含むとともに、水路誌や水路通報などもGIS情報としての属性を付与されて、ユーザーがさまざまな目的で相互に利用できる空間データ基盤の構築をめざしている。さらに、測量原図に代表される測深データについても従来の原図ベースのものから電子測量原図としてデジタル化され、原記録から成果に至るまでの電子情報化が進められている。しかしながら、まだGISソフトに依存するデータ形式などの問題があり、今後、各ユーザーの相互利用が容易になるような共通基盤データとすることなど、さらなる検討が進められているところである。

海図情報の電子化については、紙海図のデジタルデータベースの構築とともに、国際標準に合った電子海図そのものが要望されていた。水路部では、平成7年に世界に先駆けて、水路電子データ交換基準S57ver.2に基づく電子海図第1号を刊行し、その後日本全国を覆う電子海図が続々と刊行され、平成13年度末で現在14種のもものが提供されている。電子海図のデータ・ベース構築から刊行に至るまでの経緯は、別項で報告される(清水, 2002)。

## 7. 21世紀の水路業務 — Hi21 —

21世紀を迎えたのをきっかけに、海上警備、救難、環境・防災、航行安全などを柱とする海上保安業務遂行方針2001がまとめられ、水路部でも、ますます変化する社会的な情勢に対応した業務を展開するため、ユーザー・オリエンテッド (User Oriented) を基本指針とする「ハイドロ・イノベーション21」(Hi21) プランを策定した。新しい業務展開のためには、従来の業務遂行方法を見直すだけでなく、業務に合わせた技術革新、研究開発が必要となる。平成13年4月のHi21マスタープランⅡに唱われている次の8項目について、概要と具体的な取り組みについて紹介する。

### (1) 海洋環境保全業務の充実・強化

海洋汚染や地球温暖化はもとより、漂流・漂着ゴミあるいはダイオキシンや環境ホルモンなど身近な海洋環境問題に対し、従来からの調査及び報告にとどまらず、庁内各部と連携して海洋環境の実態把握・原因究明・除去に至る総合的な海洋環境保全施策を推進する。具体的には、未処理下水道水流入問題などが発生している沿岸内湾域の環境保全に取り組み、主要海域において環境ホルモンの一種である有機スズやダイオキシンの調査を進めるとともに、関係機関とも協力して東京湾蘇生計画などを推進する。この中で水路部に蓄積された汚染分析(清水,2000, 岡野,2001)や、潮流や吹送流のモニタリング・解析・予測能力が活用されると期待されている(植田ほか,2000, 寄高ほか,2001, 戸澤ほか,2001)。

### (2) 防災業務(自然災害)の充実・強化

水路部では、従来から海底活断層調査や海底地殻変動監視など地震予知や、沿岸防災情報図の作成など防災対策に資する業務を行ってきたが、最近では、東海地震や南海地震など海域の巨大地震及びそれに伴う津波の災害が懸念されており、Hi21をきっかけに津波防災に関する業務の充実・強化に取り組むこととなった。津波の伝搬速

度は水深で決まるので、概略の到達時刻を求めるのはさほど難しくはないが、海岸や港湾に近づくにつれ、様々に増幅したり反射・屈折し変化するため、具体的な被害の予測や対策の検討のためには、詳細な地形・水深に基づいた津波挙動シミュレーションが必要であり、水路部では、すでに研究に取り組んでいた(佐藤,1997,1999)。Hi21では、その経験を生かしてシミュレーションを行うとともに、関連情報も合わせて津波防災情報データベースにまとめ、防災対策検討や適切な初動体制の確立に資するとともに地方自治体等に提供してゆくこととなった。平成13年度は、塩釜港付近をモデルに津波防災情報データベースや津波防災情報図の検討が進められている。

### (3) 高度海洋電子ネットワーク(海洋電子ハイウェイ)構想の推進

国際海事機関による海洋電子ハイウェイ(Marine Electronic Highway)は、国際海峡等の船舶輻輳海域における航海安全性向上のための航海支援情報提供システムで、気象・海象、航行警報、海図補正等の航海支援情報、港湾や物流状況等の運航支援情報、さらにはAIS(Automatic Identification System; 船舶自動識別システム)などの船舶通航情報などを、電子海図情報表示装置を核に統合・重畳表示することによって、航海者に適時に適切な情報を提供し、海上交通の安全性向上と効率化を図るものである。このような多様な情報にリアルタイムにアクセスし、表示可能とするには、現在よりも進んだ次世代型電子海図表示システムが必要となる。特に、AISは、通航船舶が自船の位置・速度をはじめ目的地や積荷などの情報を決められた規則に従ってリアルタイムに通報し、相互に認識することによって、衝突などを回避するシステムで、平成14年7月には一定の大きさ以上の新造船に搭載が義務づけられる。Hi21では、AIS情報の電子海図重畳表示の検討や、リアルタイム気象海象情報収集提供システムの試みとして関門海峡潮流予測提供システムの検討を進めるとともに、基盤となる電子海図についても

マラッカ・シンガポール海峡をはじめとし、日米・日韓・日豪など主要航路について、関係国と連携調整して刊行整備をめざすこととしている。

#### (4) 小型船用電子海図（巡視船艇用を含む）の開発

電子海図は、小型船の安全航行にもたいへん役立つにも関わらず、電子海図情報表示装置（ECDIS）上での利用が最初に考えられていたため、小型船用には簡易な電子参考図を搭載したGPSプロッターが先行普及している。しかしながら最近では、パーソナル・コンピューターの小型化・高性能化が進み、小型船にも持ち込み可能なものが出現するようになった。そこで、小型船が乗り上げ事故などを起こすことの多い沿岸域の大縮尺航海用電子海図（ENC）の整備を進めるとともに、潮汐や水路誌等の航行支援情報、マリナー等の利便付加情報が表示可能な小型船用電子海図表示装置の評価・検討を進め、民間による利用開発、普及活動にも協力支援することとしている。また、潮汐を加えた実際の水深を表示するダイナミック水深機能についても検討する。

小型船は、大型船が近づかない沿岸浅海域で活動することが多く、従来の海図情報だけでは不足するため、沿岸防災情報図や新たに始められる航空レーザー測深による測量成果を取り込んで、小型船用電子海図データベースの整備・構築を進めることとしている。一方、そのような沿岸浅海域でダイナミック水深機能を実現するためには、従来のような港毎の潮汐情報では誤差が多いため、潮汐分布モデルの開発が欠かせず、また楕円体高を利用する3次元GPSによる水路測量の実施に向けて、基本水準標の楕円体高測定や基準面分布の検討を進めることとしている。

このように小型船用電子海図の開発にあたっては、電子海図をベースとした機能の拡張だけでなく、従来の港湾・航路以外の沿岸域の測量並びに潮汐空間分布の検討など水路測量や潮汐観測に至る技術革新・研究開発が展開されている。

#### (5) 情報提供方法の高度化（Web-GISの推進）

大規模油流出事故対策などに必要な情報を網羅した沿岸海域環境保全情報の充実を進めるとともに、発災時における作業性や対応能力の向上を図るため、海洋短波レーダーの海況情報や漂流油分布情報などのリアルタイム情報の取り込みについて検討する。また、各種情報の収集提供手段を確立するため、Web上で利用できるWeb-GISシステムの構築を図るとともに、可能な情報からインターネットによる情報提供を行う。

#### (6) リアルタイム海洋情報の収集・提供

油流出などの災害発生時に効果的な防除活動を行うためには、現場の状況に即したリアルタイム及び近未来の気象海象情報が不可欠である。そのため、海洋短波レーダーや航路標識ブイセンサーを導入し付近の海況を常時監視するとともに、データアシミレーション等の解析予測手法を開発することによって、近未来の予測情報の提供を可能とする。さらに、一般航海者やマリナー関係者に対する安全・利便性向上を図るため、このような気象海象情報に加え、航行警報など安全に関わる情報などをインターネットや携帯電話を活用して迅速に提供する。

#### (7) Web Coast Guide システムの充実

Web Coast Guide システムは、沿岸域の情報を収集・整理し共有化することにより「業務遂行に必要な沿岸海域等基礎情報を表示できるプラットフォームの構築」及び「庁外に対する利便情報の提供」を実現する簡易Web-GISシステムである。現在、ラスタ海図や陸図をベースとして地名や航路標識、漁具定置箇所などの社会情報や航空写真などが検索表示できるようになっており、現在、イントラネットでの庁内利用が先行しているが、将来的には、マリナー・ユーザーなどにも「海のガイドブック」として活用されることが期待される。

#### (8) Hi21を支える新技術の導入

小型船用電子海図を始め、リアルタイム・近未来気象海象情報の提供、GISによる情報基盤の充実など、新しいニーズに対応して行くためには、GPSの例を見るまでもなく、調査観測から情報提供に至るまで新しい技術の導入が必要であり、今まで述べてきたように航空レーザー測深、海洋短波レーダーによる海流監視などの導入が具体化している。今後、これらの測量・観測技術だけでなく、データアシミレーションやGISなどのデータ解析・予測並びに情報提供技術についても技術革新が進み、総合的な情報収集解析提供体制の充実が期待される。

以上、Hi21の概要について述べたが、水路部では、「Hi21推進委員会」のもとに「Hi21推進室」及び各WGを設置し、庁内の各部並びに関係機関と連携・調整を図りつつ、各課題を推進して行くことにしている。

#### 8. まとめ

この10年では、パーソナル・コンピュータは急速な発展を遂げ、いまや単なる電子計算機やワード・プロセッサから、インターネット経由で大きな情報データベースにもアクセスできる情報機器に変貌を遂げた。人工衛星利用による測位システムもGPSの出現で一挙に大衆化し、関連する航海・測量手法も紙海図から電子海図、さらには、測地系の改正など基本的なところまで技術革新が進んだ。

水路部では、このような状況変化に対応して技術開発や調査研究を進めるとともに、平成12年には「Hi21」として新しいユーザー・ニーズや技術状況に対応する業務革新の方向を取りまとめた。特に、MD-GISとして、時々刻々変化する海洋情報を如何に的確かつ有効にユーザーに提供して行くのか、そのためのデータベースの構築は如何にすべきかなど、検討が進められている。

一方、平成13年には、測地系改正を主眼に水路業務法の改正が行われ、また平成14年には、水路部の組織も海洋情報部として再編される。本

稿では、近年の発展を振り返るとともに、現在の研究開発の方向について概観した。今後、水路部が関連する技術、特にGISやインターネットなどの情報技術はますます発展するものと考えられ、安易な展望や予断を許さないが、現時点での水路部の技術開発・調査研究の動向を知る一助となれば幸いである。

なお、本稿は水路部としての公式見解ではなく、もし取り上げた項目に抜けや間違いがあれば、お詫びするとともに著者達の責任であることをお断りしておく。

#### 参 考 文 献

〈本文中に引用されているものの他、関係の深い文献を含む〉

Asada A.: New Bathymetric Surveying and Processing System Based on Sea Beam 2000, 水路部研究報告, 29, 1-32, (1993).

Asada A. and Yabuki T.: Synthetic aperture technique applied to a multi-beam echosounder: *Earth, Planets and Space*, 53, 1-6, (2001).

廣瀬洋介・長尾道広: Web Coast Guideシステムに使用したインターネットGISプログラムの開発について, 水路部技報, 20, 印刷中, (2002).

岩淵洋・西川公・野田直樹・雪松隆夫・田賀傑・宮野正実・酒井建治・深沢満: 反射法音響探査に基づく大阪湾の基盤と活構造, 水路部研究報告, 36, 1-23, (2000a).

岩淵洋・西川公・野田直樹・川尻智敏・中川正則・青砥澄夫・加藤勲・安間恵・長田智・角谷昌洋: 伊勢湾における活断層調査, 水路部研究報告, 36, 73-96, (2000b).

春日茂・林田政和・大陸棚調査室員: 日本近海地磁気・重力異常図の刊行と日本南方海域の地磁気異常分布, 水路部研究報告, 30, 329-343, (1994).

春日茂・霜鳥史郎・大陸棚調査室員: 小笠原海

- 台周辺海域の海底地形とテクトニクス,水路部研究報告, **31**, 23-44, (1995).
- 春日茂・井上渉 : フィリピン海沖ノ鳥島海盆の地球物理学的特徴と形成過程, 水路部研究報告, **32**, 101-118, (1996).
- 春日茂・小原泰彦 : 日本南方海域の背弧海盆に存在する急崖の形成過程 - 沈む背弧海盆と浮揚性島弧との力学的境界 -, 水路部研究報告, **33**, 39-51, (1997a).
- 桂忠彦・島村国雅・大陸棚調査室員一同: 大陸棚海底サンプルの地質学地球化学的研究 (その1) - 大陸棚調査で得られた海底サンプルの予察的研究 -, 水路部研究報告, **30**, 345-379, (1994).
- 川鍋元二・矢沼隆: 港湾域における津波の挙動の調査研究を終えて, 季刊「水路」, **28**, 2, 26-27, (1999).
- 中村啓美・石村孝三・宗田幸次: 漂流ブイを用いた漂流実験, 水路部技報, **19**, 69-76, (2001).
- 長屋好治: 音波を利用した海底での歪測定に関する基礎的考察, 水路部研究報告, **31**, 67-76, (1995).
- 長屋好治・矢吹哲一郎・小野房吉・浅田昭 : 海底音響測距計の開発, 水路部研究報告, **32**, 89-99, (1996).
- 長屋好治: 音響測距計の水温補正, 水路部技報, **15**, 60-63, (1997).
- 西澤あずさ: マルチビーム音響測深機 SeaBeam2000でみる海底地形 (1) 沈み込み帯の海底地形の統計パラメタを推定する試み, 水路部研究報告, **33**, 61-83, (1997).
- 西澤あずさ : マルチビーム音響測深器 SeaBeam2000でみる海底地形 (2) プレート境界域の精密海底地形と浅発地震の震央分布, 水路部研究報告, **35**, 109-124, (1999).
- 西澤あずさ・小野智三・大谷康夫・志岐俊郎 : 2000年7月の三宅島・神津島・新島近海における海底地震観測 (速報), 水路部研究報告, **37**, 57-71, (2001).
- 岡野博文・清水潤子・野坂琢磨・當重弘・青木繁・佐々木康仁・信國正勝・茂木由夫 : 駿河湾海底堆積物中のPCB調査, 水路部技報, **19**, 84-89, (2001).
- Okino, K., Shimakawa, Y., and Nagaoka, S. : Evolution of the Shikoku Basin, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **46**, 463-479, (1994)
- 沖野郷子・山本富士夫・加藤幸弘 : 海底地形解析の新技术 ~音響画像データと地形データから立体視画像をつくる~, 水路部研究報告, **34**, 71-83, (1998)
- Okino, K., Kasuga, S., and Ohara, Y. : A new scenario of the Parece Vela Basin Genesis, *Marine Geophysical Researches*, **20**, 21-40, (1998).
- Okino, K., Ohara, Y., Kasuga, S., and Kato, Y. : The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins, *Geophysical Research Letters*, **26**, 2287-2290, (1999).
- 沖野郷子: 衛星高度計から得られる重力・地形データと船舶データとの比較, 水路部技報, **17**, 65-69, (1999).
- 小原泰彦・春日茂・大陸棚調査室員: 100万分の1大陸棚海の基本図「南西諸島東方」に見る日本南方海域の島弧海溝系・背弧海盆の特徴, 地質学雑誌, **101**, XXVII-XXX, (1995).
- Ohara, Y., Kasuga, S., and Ishii, T. : Peridotites from the Parece Vela Rift in the Philippine Sea: upper mantle material exposed in an extinct back-arc basin, *Proceedings of Japan Academy, Series B72*, 118-123, (1996).
- Ohara, Y., Kasuga, S., Okino, K., and Kato, Y. : Survey maps Philippine Sea structure, *EOS Transactions, AGU*, **78**, 555, (1997).
- Ohara Yasuhiko : Report of multi-channel seismic reflection and submersible Shinkai 6500

- studies at Kyushu-Palau Ridge, 水路部研究報告, **33**, 85-93, (1997b).
- 小原泰彦・吉田剛・加藤幸弘・春日茂 : パレスベラ海盆の特異な地形, 水路部研究報告, **37**, 9-18, (2001).
- 大島章一 : 海底地形調査の歴史と現状, 地学雑誌, **103**, 3, 474-482, (2000).
- 佐藤敏 : 秋田港津波シミュレーションの動画, 水路部技報, **15**, 29-31, (1997).
- 佐藤 敏 : 酒田港津波シミュレーションの動画, 水路部技報, **17**, 41-43, (1999).
- Sengoku A., Fujita Masayuki, Matsumoto Kunio, Terai Koji and Sasaki Minoru : Determination of precise positions of the mainlands and isolated islands in the Japanese territory - A review of marine geodetic control network deployed by the Hydrographic Department -, 水路部研究報告, **35**, 79-95, (1999).
- 清水潤子 : GC/MSを用いた海水中における有機スズ化合物の定量法の検討, 水路部技報, **18**, 36-41, (2000).
- 仙石新・加藤剛・福良博子・小山薫・藤田雅之・矢吹哲一郎 : Lageos I 及び Lageos II の long-arc 解析による本土海洋測地基準点座標決定と日本測地系と世界測地系の変換パラメータの再決定, 水路部研究報告, **36**, 97-109, (2000).
- 高山守弘 : 船舶自動識別システム (AIS) と船舶通航業務 (VIS), 季刊「水路」, **26**, 4, 10-17, (1997).
- 寺井孝二・矢吹哲一郎・笹原昇・河合晃司・深野慶太・佐藤まりこ・仙石新 : 伊豆諸島の岩礁における地殻変動観測及び三宅島噴火による周辺海域の地殻変動, 水路部研究報告, **37**, 73-86, (2001).
- 戸澤実・木村琢磨・山崎哲也・小嶋哲哉 : 伊勢湾北部の漂流ブイによる表層流観測, 水路部技報, **19**, 51-54, (2001).
- 土出昌一・井本泰司・蔭山邦幸 : 人工衛星データによる油汚染の検出, 水路部技報, **18**, 47-65, (2000).
- 土出昌一・大谷康夫・蔭山邦幸 : 人工衛星 SAR による火山性変色水の検出可能性についての検討, 水路部技報, **18**, 66-73, (2000).
- 植田義夫・峯正之・中田尚宏・清水顕太郎 : 相模湾・城ヶ島沖定点観測ブイ付近の流況解析, 水路部研究報告, **36**, 57-72, (2000).
- 寄高博行・橋間武彦・工藤宏之 : 相模湾における漂流実験と吹送流について, 水路部技報, **19**, 55-60, (2001).
- 寄高博行 : 漂流予測の高度化に関する研究, 水路部研究報告, **38**, 印刷中, (2002).
- 吉宣好・寄高博行・橋間武彦 : 大阪湾漂流予測プログラムの改良について, 水路部技報, **19**, 69-76, (2001).