

ISSN 1348-1053

# 海洋情報部技報

TECHNICAL BULLETIN ON HYDROGRAPHY AND OCEANOGRAPHY

第 22 号 平成 16 年 3 月



海上保安庁海洋情報部

# 海洋情報部技報

第 22 号 平成 16 年 3 月

## 目 次

1	航空レーザ測深機のテスト飛行について	戸澤実, 松本良浩, 岩本暢之, 小野智三, 矢島広樹	1
2	ハイブリッド音響測深機 PDR701 について	戸澤実, 松本良浩, 中條拓也, 中川貴光	7
3	測量船による VRS 方式を用いた RTK 測位による 高さ方向の精度評価	戸澤実, 松本良浩, 矢吹哲一郎, 中條拓也, 雨宮由美, 植木俊明...	13
4	汎用解析型 GIS ソフトウェアによる電子測量原図 の作成	松本良浩, 戸澤実	20
5	海底地殻変動観測の現状と諸問題について	畝見潤一郎	33
6	海底地殻変動観測における海中音速誤差の局位置 への影響について	佐藤まりこ, 藤田雅之	42
7	海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェ アの開発	藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一郎	50
8	衛星画像による流出油と変色水の検出	中村啓美	57
9	海軍水路部における海象観測と当時の日本南岸域 の海況について	杉山栄彦, 手登根功, 豊嶋茂	63
10	河川からの噴流等が漂流に与える影響について	木村信介	69
11	「たぎり」と浅海用マルチビーム測深機	松尾美明, 田賀傑	73
12	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	山尾理	78
13	FIA による海水試料中の鉄分析について	岡野博文	85
14	GC-MS を用いた有機スズ化合物分析における基 本的な分析条件の検討	岡野博文	91
15	海底火山活動に伴う変色海水化学分析の迅速化	野上健治, 小坂丈予, 松本敬三, 野坂琢磨	99
16	災害対策システム運用装置による海底火山活動の 監視手法について	大谷康夫, 山根勝雄, 笹原昇, 西澤あずさ	103

## 航空レーザ測深機のテスト飛行について

戸澤 実・松本 良浩：海洋調査課

岩本 暢之・小野 智三・矢島 広樹：第六管区海上保安本部

### Test Flights of the Airborne Laser Hydrography system(JCG-SHOALS) in Japan

Minoru TOZAWA, Yoshihiro MATSUMOTO: Hydrographic Surveys Division

Nobuyuki IWAMOTO, Tomozou ONO, Hiroki YAJIMA: Hydro. Dept., 6th R.C.G. Hqs

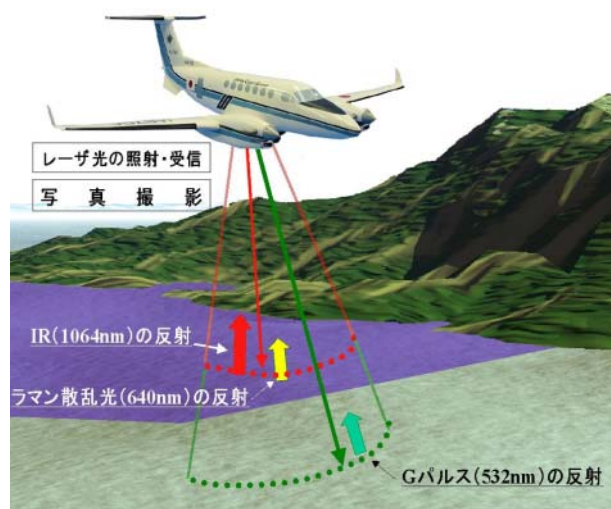
## 1 はじめに

レーザ技術を使用した航空レーザ測深は、1960年代から研究開発が開始され、1980年代からアメリカ、カナダやオーストラリアで実用化されてきた。測量船で測深をおこなうことの困難な岩礁やサンゴ礁等の多い海岸線付近の広大な海域で、航空機に搭載した航空レーザ測深機による測量がおこなわれている。

日本では、通行船舶の安全のための海図を刊行してきたが、近年電子海図の普及、地理情報システム（GIS）の活用や海洋レジャー等の小型船舶に対しての情報提供として極浅海域の水深データの充実が求められてきた。このため、海上保安庁では、平成12年度に航空レーザ測深機の導入がはかられ、平成15年3月に装置が納入された。平成15年8月に試験運用を開始したので、装置の概要及び試験運用で得られた結果を紹介する。

航空レーザ測深機については、平成12年の導入時に世界の動向を調査した「航空レーザ測深技術調査報告書」(朝日航洋株式会社、平成12年12月)を作成し、穀田(2001)が報告している。航空レーザ測深の原理等については浅田ほか(2003)が取りまとめているので、本稿では省略した。

なお、「レーザ」(英語のLASER)の表記については、「レーザ」と「レーザー」の2通りの使用が見られる。本報告では「レーザ」の表記を使用するが、航空レーザ測深機を使用した水路測量の作業名称の「航空レーザー測量」については長音をつけた表記をとるので寛容願いたい。



第1図 航空レーザ測深の概要

Fig.1 Principles of Airborne Laser Hydrography by JCG-SHOALS

## 2 航空レーザ測深機

海上保安庁が導入した航空レーザ測深機は、Optech社(カナダ国トロント市)製のSHOALS-1000システムである。

名称「SHOALS」は、Scanning Hydrographic Operational Airborne Laser Surveyの頭文字をとったものである。SHOALS-1000システムは、海上保安庁以外に米国に2式納入されている。海上保安庁の装置を特に区別する場合には「JCG-SHOALS」と呼ぶ。

JCG-SHOALSでは、レーザ光による水深データとデジタルカメラによる画像データを取得する(第1図)。

### (1) 装置の構成

航空機の機上に設置する装置は、

- ・ レーザヘッド
- ・ レーザラック
- ・ 冷却ラック
- ・ 操作ラック
- ・ GPS 受信機
- ・ DGPS 受信機
- ・ パイロット・ガイダンス

で構成されている。第 2 図に主な装置の外観を示す。主な構成品の大きさは次のとおり航空機に搭載する装置の重量は約 200kg である。

レーザヘッド	69 × 78 × 89cm	69kg
レーザラック	64 × 76 × 52cm	41kg
冷却ラック	64 × 70 × 58cm	39kg
操作ラック	64 × 84 × 74cm	50kg

機上装置で集録されたデータを解析するための室内の解析装置 (SHOALS-1000 Ground Control System; GCS) は、

- ・ ワークステーション (Intel Pentium )
- ・ ハードディスクドライブ (480GB)
- ・ DVD-RAM ドライブ
- ・ フロピードライブ
- ・ PCMCIA インターフェース
- ・ リムーバブルハードディスクドライブ
- ・ モニター (17 インチ LCD)
- ・ プロッター

で構成されている。

GCS で使用しているソフトは、航空レーザ測量計画処理用ソフト (Optech 社)、POS 後処理ソフト (Applanix 社)、3D 表示ソフト (IVS 社)、MS Office 及び MS Windows2000 で構成されている。

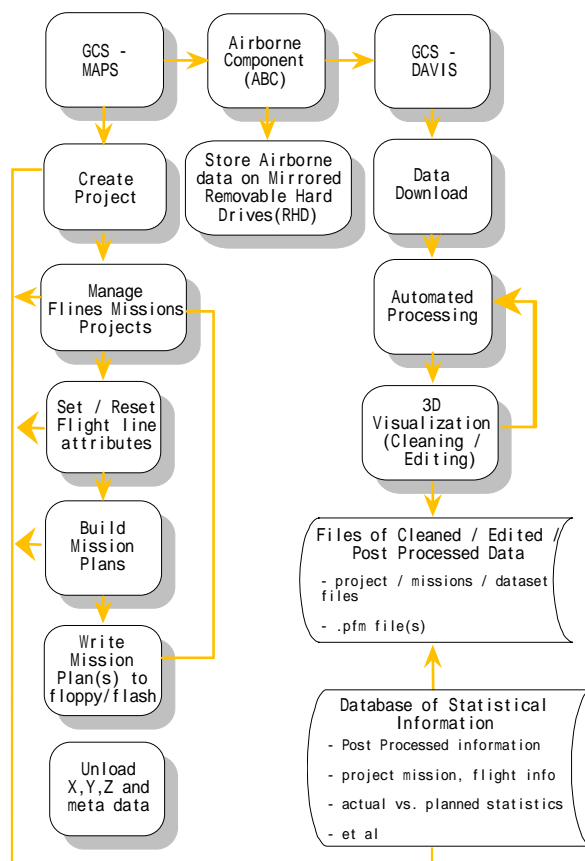
GCS は、航空レーザ測量の計画線の作成、SHOALS-1000 の取得データのダウンロード、取得データの処理、表示ソフトによるデータの編集及び XYZ データとメタデータの作成を行う。処理の流れを第 3 図に示す。

GCS の主な処理ソフトとしては、計画線を作成する「MAPS (Management And Planning



第 2 図 JCG-SHOALS の外観

Fig.2 The appearance of JCG-SHOALS



第 3 図 データ処理の流れ図

Fig.3 The flow of the data processing of JCG-SHOALS

Software)」とデータの処理を行う「DAViS (Downloading, Automated processing and 3D Visualization Software)」がある。

(2) レーザ光の送受信

JCG-SHOALS のレーザは、Nd:YAG を用いた Cutting Edge Optronics 社製 Model OSL- 007-QMIG-0030 を使用して近赤外パルス (1064nm) と緑パルス (532nm) を発射する。

発射されたレーザ光は、2 つのスキャンミラーにより円弧状に照射される。

海面と海底で反射したレーザ光は、スキャンミラーを介して分光器に導かれ、海面から反射してきた近赤外パルス (1064nm) とラマン散乱光 (640nm) 及び海底から反射してきた緑パルス (532nm) を 2 つに分けて水深 14m までの部分と深海部分の 4 つに分けて計測される。

レーザの広がり角は、測量高度 200 ~ 400m の間では海面上で直径 1.5m の照射域を形作っている。

(3) 位置決定方法

航空レーザ測深機の位置は、GPS と IMU により決定される。IMU は、Applanix 社製 POS-AV を使用している。IMU は、

- ・ Roll: 0.008 °
- ・ Pitch: 0.008 °
- ・ Heading: 0.015 °

の精度をもっている。

航空機の飛行中の位置は、海上保安庁のディファレンシャル GPS サービスを受信する DGPS 受信機 CSI Wireless 社製 MBX-3S にアンテナとし



第 4 図 搭載航空機 MA870

Fig.4 JCG-SHOALS in a king air 350 “MA870”

て NovAtel 社製 AT3065-9 を使用している。また、Fugro 社の世界的な人工衛星による OmniStar サービスを OmniSTAR 3100LM により測定することができる。どちらの DGPS 方式を採用するかはスイッチにより選択することができる。

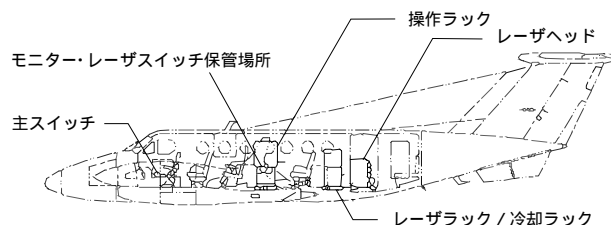
GPS アンテナ、IMU 等の構成を第 4 図に示す。

(4) 航空機への搭載

航空レーザ測深機は、従来航空写真作業のため航空カメラを搭載していたビーチエアクラフト式 B 300 型中型飛行機 MA870 「あきたか」(第六管区海上保安本部広島航空基地所属) に搭載する(第 4 図)。

機体上部に GPS 受信アンテナと DGPS 受信アンテナが設置されている。アンテナと電源接続口は右側壁に設置している。

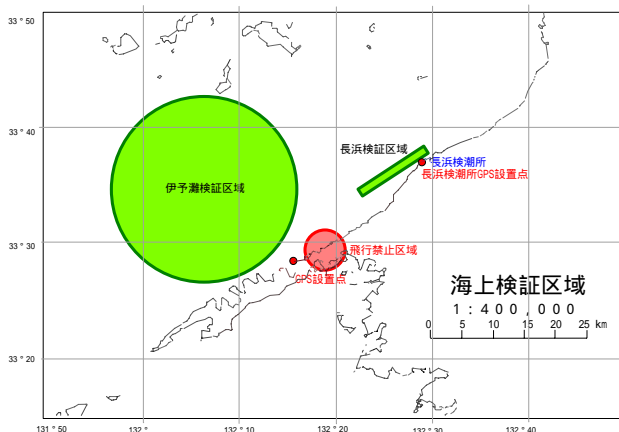
機体内部の右側中央部に前方から操作ラック、操作員席、レーザラックと冷却ラックを重ねて固定している。その後ろの投下口の上にソナーを設置する(第 5 図)。予定測線の表示されるパイロット・ガイダンスを前方に置き、各ラック等の間は 22 本のケーブルをそれぞれ接続し組み立てる。



第 5 図 機内配置図

Fig.5 The arrangement of JCG-SHOALS in MA870

3 テストの方法



第 6 図 海上検証区域

Fig.6 Sea test area

航空レーザ測深機の性能検証として次の項目を今年度実施している。

(1) 陸上垂直位置精度検証

事前に GPS で測量した滑走路等の長く平らな場所を航空レーザ測深機で測量する。

(2) 陸上水平位置精度検証

事前に GPS で測量した地上に設置したターゲット (2×2×2m) を航空レーザ測深機で測量する。

(3) 水中水平位置精度検証

事前にマルチビーム測深で測量した水深約 5 m 付近の海底に設置したターゲット (2×2×2m) を航空レーザ測深機で測深する。

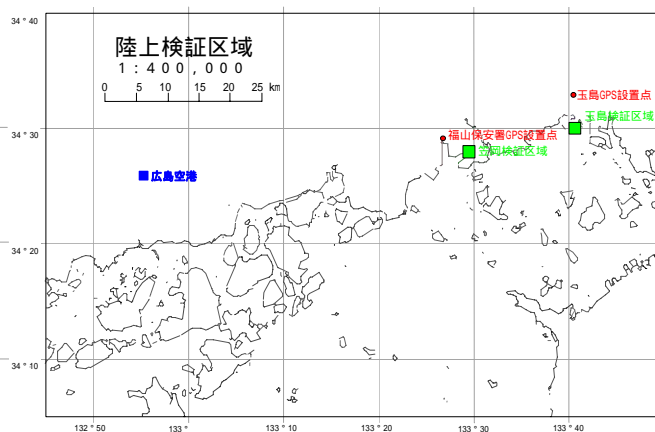
(4) 水深測得精度検証

事前にマルチビーム測深で測量した 5m, 10m, 20m 及び 30m の水深海域を航空レーザ測深機で測深する。

(5) 最大測深能力検証

水深 5m ~ 50m の海域で透明度の 2 倍の水深まで測深できることを検証する。

航空レーザ測深機のテスト地は、海上検証区域として海面データを取得するための伊予灘検証区域、水中水平位置精度検証と水深測得精度検証のために長浜検証区域を設定した。長浜検証区域は、測量船「くるしま」により事前にマルチビーム測深による精密海底地形測量を行った(第 6 図)。



第 7 図 陸上検証区域

Fig.7 Land test area

陸上検証区域としては、陸上垂直位置精度を検証するためのある程度の長さのある滑走路がある笠岡検証区域と陸上水平位置精度検証のためターゲットを置ける玉島検証区域を設定した(第 7 図)。

4 航空レーザ測深機により得られた成果

第 1 回目の検証は、平成 15 年 8 月 25 日から 9 月 1 日にわたり Optech 社の技術者及び海上保安庁の職員によりおこなった。

JCG-SHOALS の故障発生のため十分な検証は次回に繰り延べになったが、初飛行で得られた成



第 8 図 デジタル画像例

Fig.8 A digital image by JCG-SHOALS

果について記載する。

(1) デジタル画像

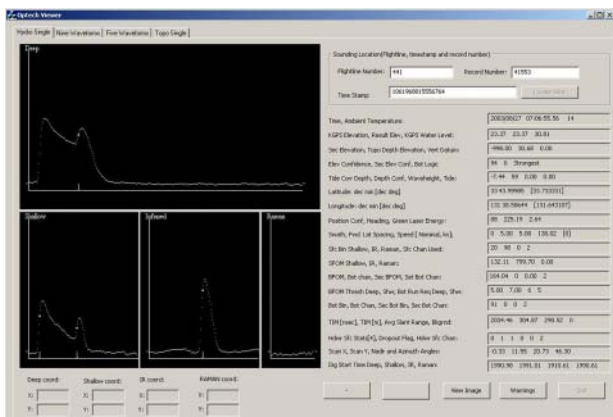
デジタルカメラで得られた画像の例として 8 図に示す。

毎秒 1 枚の画像を取得できるが、異常水深データの参照に活用するため、現在の処理作業では一括出力とモザイク図の作成には対応していない。

(2) 水深データ

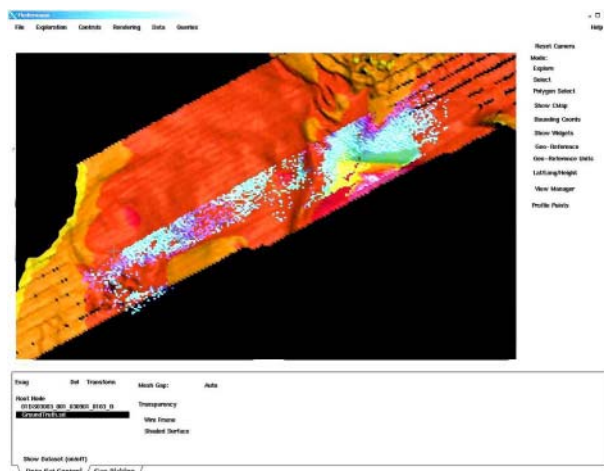
レーザ光の受信波形の例を第 9 図に示す。上部窓には、緑パルスの全域が表示され、下部窓の左側から緑パルスの極浅海域（水深 14m まで）、近赤外パルス及びラマン散乱光（例では反射がとれていない）が表示されている。右欄に受信データが示されている。

マルチビーム測深と航空レーザ測深の合成した



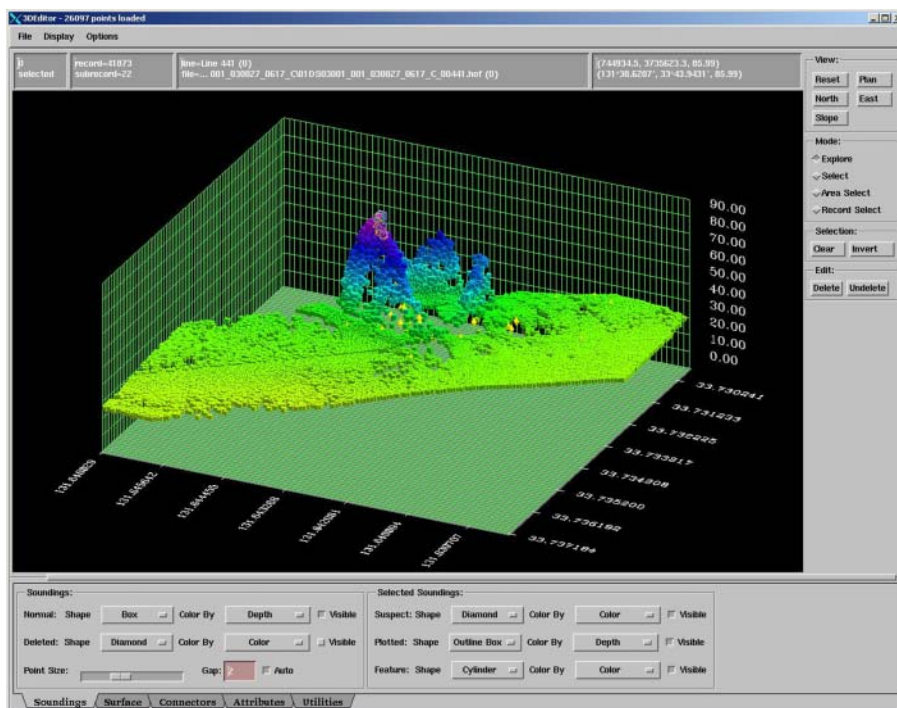
第 9 図 レーザ光受信波形

Fig.9 Display of Laser Waveforms on JCG-SHOALS Ground Control Subsystem.



第 10 図 マルチビーム測深（暖色）と航空レーザ測深

Fig.10 Displayed Multi beam data (orange) and JCG-SHOALS data (light blue)



第 11 図 3D 表示

Fig.11 Displayed JCG-SHOALS data

図を第 10 図に示す．航空レーザ測深でデータが途切れている区域は河川からの濁り水があるためデータが取得できなかった区域である．航空レーザ測深では，海水の濁りが非常に大きな影響を与えることがわかった．

3D 表示した海域と陸域のデータを第 11 図に示す．

(3) 陸上データ

陸域のデータを第 12 図に示す．左側から 3D 表示図，平面図及びデジタル画像を並べている．平面図では養殖池にある水車が 3 箇所確認できる．

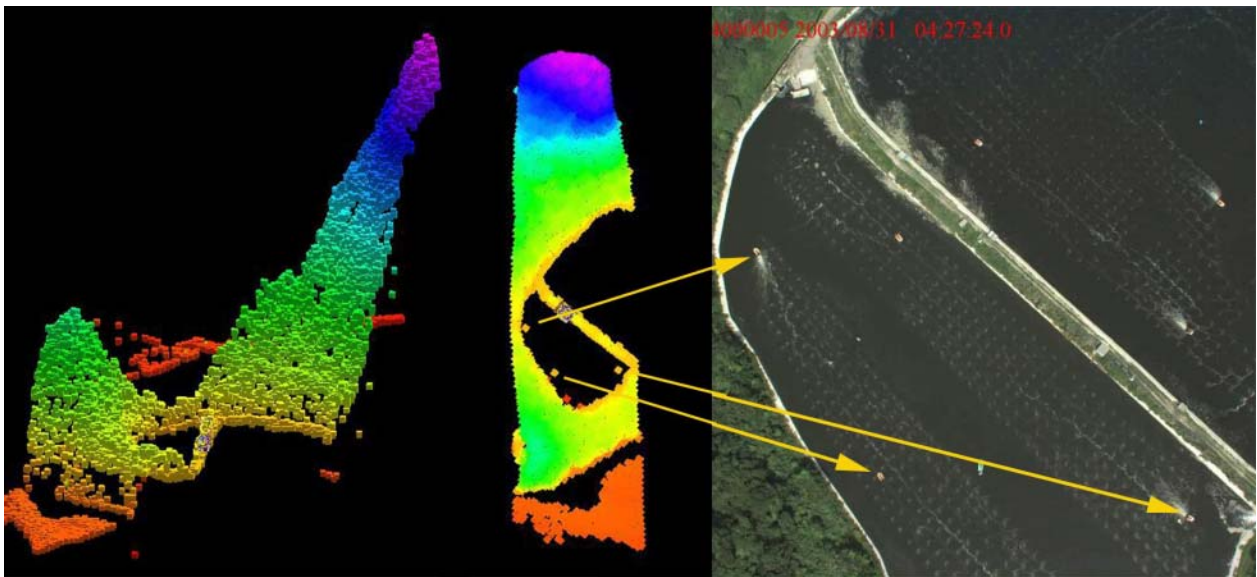
5 おわりに

航空レーザ測深機は，平成 12 年 12 月の契約から平成 15 年 6 月の MA870 に搭載するための改造作業まで各関係者の尽力によりテスト飛行が行え

る段階に到達した．国内において，最初の装置の運用にあたり広島航空基地の皆様には，特に感謝します．

参 考 文 献

Optech : SHOALS-1000 ユーザーマニュアル，2003  
 穀田昇一：沿岸調査に新手法の導入 - 航空レーザ測深 - (1)，水路，117，2-12，(2001)  
 穀田昇一：沿岸調査に新手法の導入 - 航空レーザ測深 - (2)，水路，118，6-12，(2001)  
 穀田昇一：沿岸調査に新手法の導入 - 航空レーザ測深 - (3)，水路，119，8-18，(2001)  
 浅田昭，山本富士夫，徳山英一，矢島広樹：測深技術の現状，海洋調査技術，29，59-77，(2003)



第 12 図 陸域データの表示

Fig.12 Displayed Land area. 3D image (left), surface (middle) and photo (right).  
 Yellow arrows show water wheels.

## ハイブリッド音響測深機 PDR701 について

戸澤 実, 松本 良浩: 海洋調査課  
 中條 拓也: 株式会社海洋先端技術研究所  
 中川 貴光: 千本電機株式会社

### Hybrid Echo Sounder "PDR701"

Minoru TOZAWA, Yoshihiro MATSUMOTO: Hydrographic Surveys Division

Takuya CHUJO: Ocean High Technology Institute Inc.

Takamitsu NAKAGAWA: Senbon Denki Co. Ltd.

### 1 はじめに

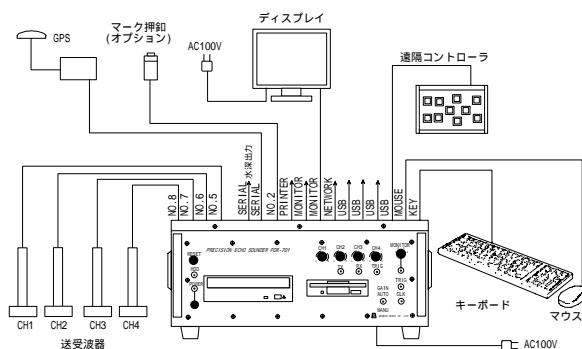
水路測量では、乾式記録方式の多素子音響測深機を用いて音響測深記録の出力とデジタル水深データの収録を行っている。海上保安庁におけるデジタル水深データの集録は、1984年8月に開発されたデジタル深度集積装置 DDR101(千本電機製)を音響測深機 PDR501 と接続することにより可能となった。

その後 1988年7月には音響測深機とデジタル変換器を一体化した PDR120D が、ついで 1990年3月には PDR601 が開発され、紙媒体の音響測深記録とともにデジタル水深データの電子媒体による集録がおこなわれている。

2003年3月には、ついに音響測深記録のイメージとデジタル水深データ及びGPSの位置データをすべてハードディスクに集録できる(すなわち、記録紙が不要になる)千本電機製音響測深機 PDR701 が登場した。本稿では、測量船「くるしま」と測量船「はましお」で集録をおこなった結果をふまえつつ、PDR701 の概要について紹介する。

なお、本稿では、音響測深機の記録紙に記録された音響測深記録を「アナログ音響測深記録」と呼び、PDR701 で集録された音響測深記録を「デジタル音響測深記録」と呼ぶ。音響測深機からデジタル出力された水深データは「デジタル水深データ」と呼ぶ。

### 2 PDR701 の概要



第1図 PDR701 構成図

Fig.1 The composition of PDR701.

#### (1) 概観

PDR701 は、本体、ディスプレイ、遠隔コントローラ及び送受波器により構成されている。GPS 受信機とマーク押鈕は、オプションで取り付けることができる(第1図)。

大きさは、

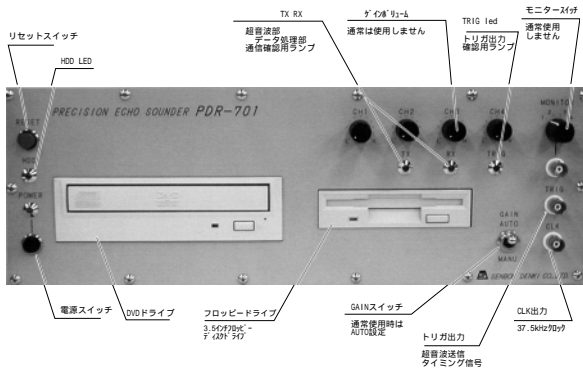
本体	46 × 43 × 20cm	14kg
ディスプレイ	20 × 20 × 20cm	5kg
遠隔コントローラ	11 × 16 × 48cm	

で、送受波器は PDR601 と同様の送受波器を使用している。本体のパネルの正面部分を第2図に、裏面部分を第3図に表示する。

#### (2) 仕様

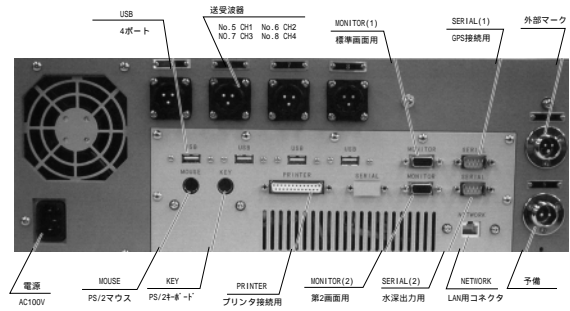
主な仕様は、

電源	AC100V, 3A
測深範囲	1 ~ 120m
送受波器周波数	230, 210, 190, 170kHz
送受波器指向角	半減全角 16° / 6°
測深回数	5回 / 秒
感度調整	自動 / 手動
STC	10段階設定(ソフトウェアによる)



第 2 図 パネル正面

Fig.2 The front panel of PDR701.



第 3 図 パネル裏面

Fig.3 The back panel of PDR701.

データ処理部

OS	Windows 2000
処理ソフト	PDR-701 システムソフトウェア
CPU	Pentium4
メモリー	512 MB
ハードディスク	80 GB
外部データ出力	3.5 インチフロッピーディスク, DVD-R/RW

である .

(3) 特 徴

PDR701 の特徴としては ,

水深記録のデジタル音響測深記録とデジタル水深データをハードディスクに集録する . 位置データとして GPS データをハードディスクに集録する .

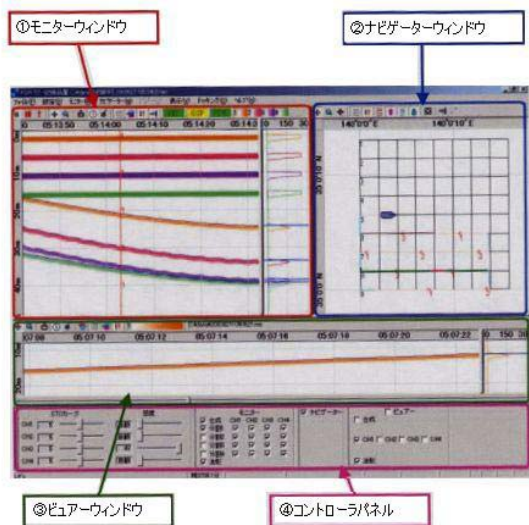
直下水深と斜水深の比較をおこない , 斜水深が浅い測線部分について表示する .

機能をもっている .

3 使用ソフトウェアの構成

PDR701 では , 現場でのデータ集録時に使用する「データロガー」と集録したデータを表示させる「データビューア」が使用されている .

「データロガー」は , デジタル音響測深記録とデジタル水深データを集録処理するための「データ集録」とパーチェックデータを集録したファイル処理する「パーチェック」及び集録したデータを印刷する「データ印刷」で構成されている .



第 4 図 データ収録画面

Fig.4 Display of a data recording view.

「データビューア」は , PDR701 で集録したデータを表示する「データ表示」, 「パーチェック」及び「データ印刷」で構成されている .

なお , PDR701 で集録したデータの処理には , 海洋先端技術研究所製「PDR701 後処理」ソフトウェアを使用する .

3.1 「データロガー」

(1) 「データ集録」

集録画面は , 送受波器から受信したデータをリアルタイムに表示するモニターウィンドウ , ナビゲーターウィンドウ , ビューアウィンドウ及びコントローラパネルを表示する ( 第 4 図 ) .

各ウィンドウは , 次の機能を持つ .

モニターウィンドウ

モニターウィンドウは、測深記録が右から左にスクロール表示され、右側部分にデータの強度を波形として表示する。

ナビゲーターウィンドウ

GPS からの位置データにより測量船マークで現在位置を示し、航跡、予定測線及び斜測水深が直下水深より浅い場合の判定結果を表示する。

ビューアウィンドウ

集録の終わったファイルを選択して画面に表示する。側近の側線の水深と比べる際のために、記録方向を反転させることができる。

コントローラパネル

モニターウィンドウに表示している測深記録の STC、感度設定、モニターウィンドウの画面設定、ナビゲーターウィンドウ表示の有無及びビューアウィンドウの画面設定を指定する。

集録等のファイルは、次の 5 つのファイルを作成する。

- 集録ファイル (rec ファイル)
- 集録データの情報ファイル (idx ファイル)
- 座標原点ファイル (art ファイル)
- 予定測線ファイル (pln ファイル)
- 画面セットファイル (set ファイル)

rec ファイルと idx ファイルは、同名で常に対で作成される。

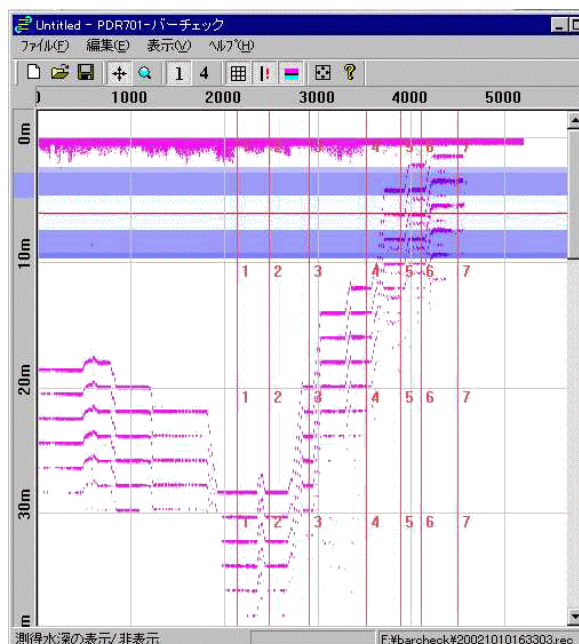
GPS の受信状況は、インジケータの GPS ボタンが受信していないときは赤色、単独測位ときは黄色及び DGPS 測位ときは緑色で表示される。

PDR の通信状況は、インジケータの PDR ボタンで通信ができていないときは赤色、通信ができていたときは緑色で表示される。

水深データの集録は、集録フォルダを選択し、タイトルバーに選択フォルダ名が表示された後、アイコンまたはボタンにより開始する。集録が開始されるとインジケータの集録ボタンが赤色から緑色にかわり、横軸の黄色の点滅が解除される。

(2) 「バーチェック」

PDR701 で集録したバーチェックデータの読み込



第 5 図 バーチェック画面

Fig.5 Display of a bar check view.

後、測深記録の表示、バーチェック水深の読み取り、読み取り水深のグラフ展開、水中音速度の解析を行い、音速ファイル (sv ファイル) として保存する。

水中音速度の解析は、最小二乗法による一次式あるいは二次式を選択し、係数を決定する。

バーチェックデータの表示画面例を第 5 図に示す。

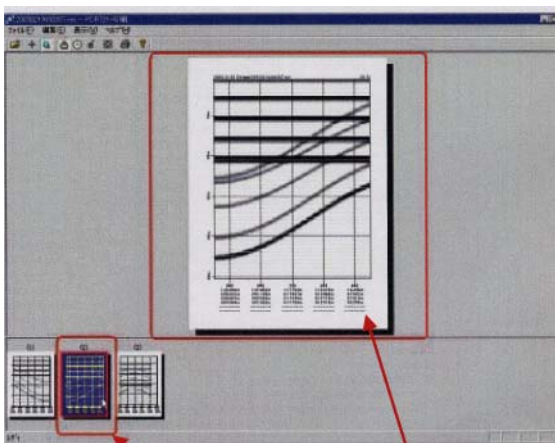
(3) 「データ印刷」

測深データの印刷は、印刷したい集録ファイルを選択し、画面の下部に表示されたページリストから印刷したいページを指定して印刷する。印刷画面の例は第 6 図に表示する。

3.2 「データビューア」

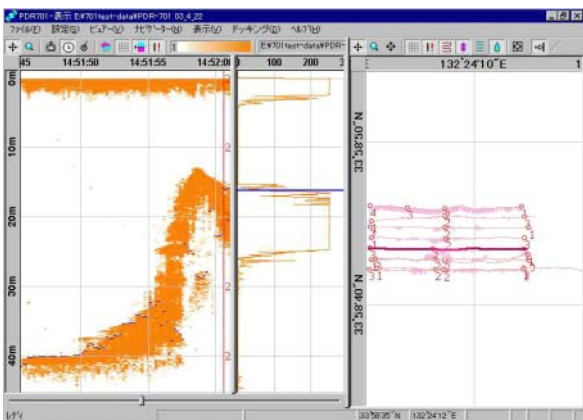
(1) 「データ表示」

表示機能として、測深記録を表示するビューアウィンドウと航跡を表示するナビゲーターウィンドウがある。ビューアウィンドウとナビゲーターウィンドウは、それぞれ独立して表示、非表示の選択が可能である。両方の表示を一画面に表すと、左側からビューアウィンドウ (記録画面と記録波形画面)、ナビゲーターウィンドウが配列されてい



第 6 図 印刷画面

Fig.6 Display of a print out view.



第 7 図 データビュー画面

Fig.7 Display of a data view and a navigated view.

る (第 7 図)。

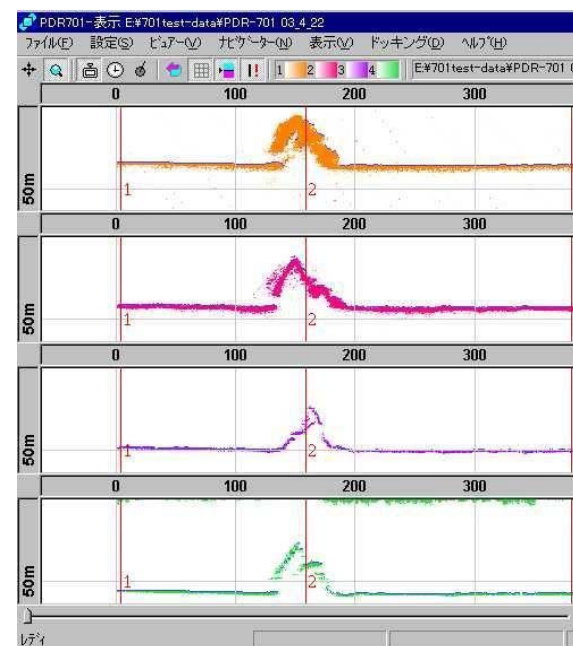
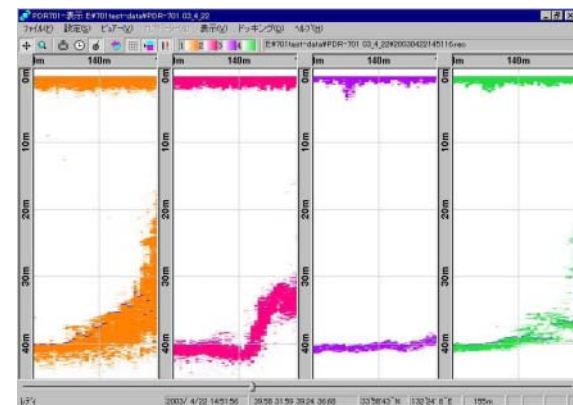
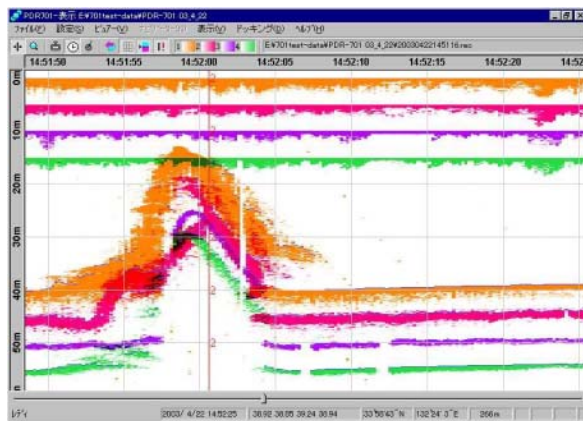
ア. ビューウィンドウ

ビューウィンドウには、記録画面と記録波形画面を表示することができる。

記録画面では、右端から集録されたデジタル音響測深記録とデジタル水深データが表示される。横軸としてピング、時間あるいは距離表示を選択することができ、縦軸に水深をとっている。

また、「画面設定」機能により任意にチャンネルを表示させることができ、1 画面に合成する表示法、横に並べる表示法あるいは縦に並べて表示する方法を選択することができる (第 8 図)。

記録波形画面は、受信した音響信号の強度と採用したデジタル水深データの位置を実線で表示する。



第 8 図 画面設定例

Fig.8 Displays of the data view.

この他ビューウィンドウには、グリッド、カット線、斜水深の浅い場合の表示も可能である。また、記録の表示の左右反転をおこなうことができる。

イ. ナビゲーターウィンドウ

ナビゲーターウィンドウは、予定測線、航跡及び斜判別を経緯度平面に表示する。設定した画面の大きさに合わせて自動的に表示範囲を設定する操作機能をもっている。

(2) 「パーチェック」

パーチェックは、データロガーと同一のソフトウェアを使用している。

(3) 「データ印刷」

データ印刷は、データロガーと同一のソフトウェアを使用している。

4 PDR601記録との比較

測量船「くるしま」により同時に取得したPDR601のアナログ音響測深記録とPDR701のデジタル音響測深記録の対比を第9図に表示する。

PDR701による作業では、PDR601に比べて次の(1)から(3)のような効果が認められる。

(1) データ処理の効率化

- PDR701の音響測深記録のデータ整理では、
- パーチェック・スケールの決定
- 採用水深の検討
- 補充、訂正水深の読取、訂正
- データの集録

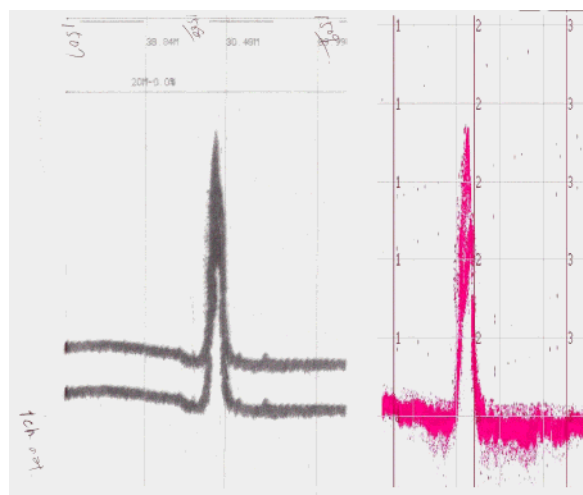
を行い、画面上で簡単に水深を読取ることができる。

これに対し、現在のPDR601で得られた音響測深記録のデータ整理では、デジタル水深データの整理として、

- パーチェック・スケールの決定
- デジタル水深検討紙の作成
- 採用水深の検討
- 補充水深読取位置の記入
- 水深の読取、訂正
- 割込位置の決定

を行うが、集録されたデジタル水深が適切に海底を示していない場合や最浅所のデータを採用していない場合にはアナログ音響測深記録を読み取ることが必要になる。具体的には、

- パーチェック・スケールの決定



第9図 アナログ音響測深記録とデジタル音響測深記録

Fig.9 An analog-echo-record (left) and a digital-echo-record (right)

10分毎の潮位データの記入

潮位線の記入

採用水深の検討

水深読取位置の記入

パーセントスケールによる水深の読取

割込位置の決定

の各過程を経て必要な水深値を読み取り、デジタル水深データとして集録装置から入力する。

PDR701では、一画面上に表示するのでデジタル水深データが海底面あるいは障害物の最浅所の位置として適切であるかの判断を速やかにできることとなり、データ処理が大幅に効率化された。

(2) 位置データ読取精度の向上

PDR701ではGPSによる測位データを同時に集録しているため、デジタル音響測深記録の位置測定精度がアナログ音響測深記録からの読取に比べて向上した。

(3) 斜水深の検討時間の短縮

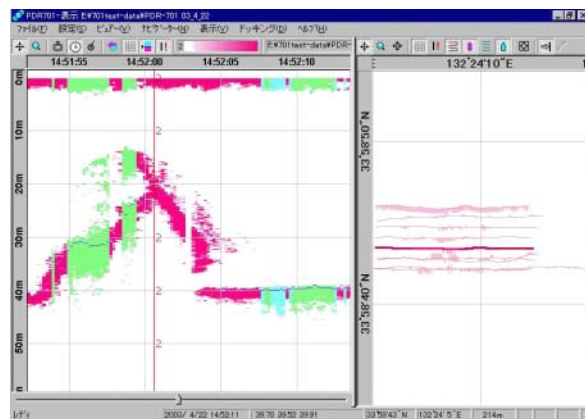
斜水深と直下水深の比較により未測深区域にある浅所の発見も、PDR701ではモニターウィンドウの記録で色を変え、ナビゲーターウィンドウでは浅い側を幅広く表示することにより一目で確認ができるようになっている。(第10図)。

7 まとめ

水路測量に使用される多素子音響測深機は、水路測量業務準則施行細則により「乾式直線記録方式」をもつものと規定されている。アナログ音響測深記録によらずデジタル音響測深記録とデジタル水深データをハードディスクに総て集録する方法は、制定当時に想定されていないため、PDR701の開発に伴い規則上の対応をはかっている。

参考文献

- 千本電機：PDR-701 ユーザーマニュアル(2003)
- 海洋先端技術研究所：PDR-701 データロガー取扱説明書(2003)
- 海洋先端技術研究所：PDR-701 データビューア取扱説明書(2003)
- 海洋先端技術研究所：PDR-701 後処理ソフトウェア取扱説明書(2003)



第10図 斜測深の浅い箇所の表示例

Fig.10 Display of areas where the oblique depth of water is shallower than the depth of bottom.

## 測量船における VRS 方式を用いた RTK 測位による高さ方向の精度評価

戸澤実, 松本良浩: 海洋調査課

矢吹哲一郎: 海洋研究室

中條拓也・雨宮由美・植木俊明: 株式会社海洋先端技術研究所

### Evaluation of Vertical Positioning Accuracy by VRS-RTK system on S/V

Minoru TOZAWA, Yoshihiro MATSUMOTO: Hydrographic Surveys Division

Tetsuichirou YABUKI: Ocean Research Laboratory

Takuya CHUJO, Yumi AMEMIYA, Toshiaki UEKI: Ocean High Technology Institute Inc.

## 1 はじめに

沿岸域では、中波無線標識（ラジオビーコン）を利用した補正情報を利用する D-GPS 測位手法が多くの船舶で採用されている。その測位誤差は、1m 程度、もしくはそれより小さいと見られる。これに対し、Kinematic-GPS(K-GPS) 測位は、既知点と測位地点で同時に同じ衛星から受信した搬送波情報を解析し、数 cm の精度での測位が可能である。

平成 14 年度、仮想基準点（Virtual Reference Station: VRS）によるリアルタイムの K-GPS 測位(以下、VRS-RTK)が可能となった。この方式では、後処理方式の K-GPS 測位（以下 K-GPS）よりも簡便に且つ同等の精度の測位結果が得られる可能性がある。

そこで、VRS-RTK 測位の可能性を明らかにするため、K-GPS 測位結果と VRS-RTK 測位結果について、実際の測定結果を比較し、VRS-RTK 測位手法の精度や性能に関する検証を実施した。このため、K-GPS 測位結果と VRS-RTK 測位結果の較差の平均値と標準偏差を算出し精度を検討した。さらに、VRS-RTK 方式による測量船の高さ測位データより算出した潮高値と、潮高実測値の比較を試みた。

## 2 GPS 測位実験

GPS 測位は、電離層や対流圏の影響による電波の遅延量を除去する必要がある。従来の K-GPS 測位は、移動点と、その近傍の位置が精密に決定

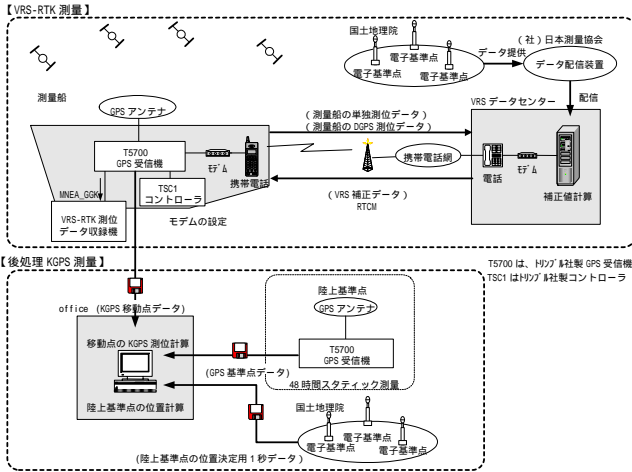
されている固定の陸上基準点とで同時に GPS の搬送波位相観測を行い、それを利用して誤差量を補正する。

この仕組みは、基本的には VRS 方式でも同じである。VRS 方式では、測位地点の近傍に仮想の基準点を考え、その仮想点での測定データを周りの固定点の実データから創りだし、移動点の補正量を導く。実際には、国土地理院の電子基準点など 50km 程度以内の間隔で配置された 3 個以上の基準局からの実際の GPS 観測データを VRS データセンターで収集し、移動局近傍 VRS での補正值を移動局に携帯電話で伝送する。これにより、移動点側で、陸上に特別な基準点を設置することなく確実かつ効率的に RTK 測位を実現する。

### 2.1 データ取得方法

GPS 観測データは、VRS-RTK 測位と後処理 K-GPS 測位との測位結果を比較するため、同じ GPS アンテナ及び受信機の 0.5 秒（燧灘）もしくは 1.0 秒（仙台湾）のデータを使用し、船体の動揺等の外的要因による誤差の発生を極力無くすように配慮した。データの取得方法を第 1 図に示す。

比較に用いる後処理 K-GPS 測位は、そのための臨時的陸上基準点を、電子基準点とは別に、各実験に際して 1 カ所設け、その位置は、国土地理院の電子基準点データを使用しスタティック基線解析を行って決めた。後処理のキネマティック解析は、Trimble GPSurvey 2.35 ソフトウェアのキネマティック解析モードで実施した。この解析では、VRS と異なり、陸上基準点 1 カ所のデータと



第 1 図 データ取得方法

Fig.1 Overview of the VRS-RTK System.

の直接解析で測位を行う。したがって、VRS と K-GPS では、用いる基準点の異なることになり、結果には、基準点のデータの質も影響するので必ずしも、測位方法の違いだけが差を生むのではないので注意が必要である。

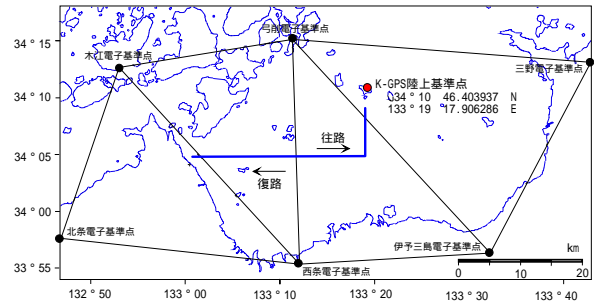
なお、仙台湾実験では、K-GPS 解析結果は、クロスポイントでの較差の標準偏差は、2~3cm 程度となり、測定精度もその程度あるものと見られる(寺井, 2003)。

2.2 測量船におけるデータ取得と解析

VRS-RTK 測位の精度を評価するために、測量船による以下の 2 海域で VRS-RTK データ及び K-GPS データを取得した。

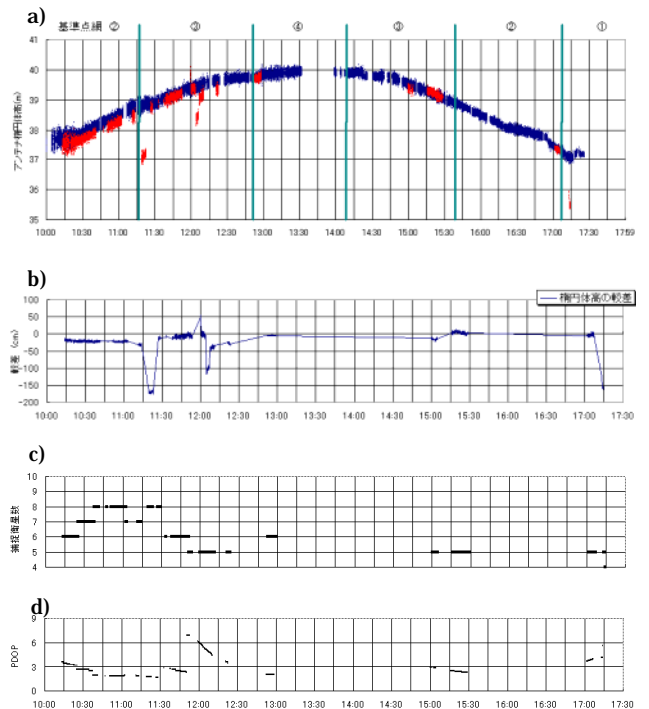
データの取得海域、取得時期及び実施した測量船は以下のとおりである。

- (1) 燧灘(今治東方 東経 133 度 10 分, 北緯 34 度 5 分を中心とした海域)  
測線は、西から東へ  
1 測線 約 8 km  
平成 14 年 10 月 10 日  
測量船「くるしま」
- (2) 仙台湾(仙台空港沖 東経 140 度 59 分, 北緯 38 度 12 分を中心とした海域)



第 2 図 VRS 基準点網と測線及び K-GPS 陸上基準局の関係(燧灘)

Fig.2 VRS control nets, K-GPS control points and survey line on Hiuchi-nada.



第 3 図 燧灘 VRS-RTK と後処理 KGPS 測位結果の比較と衛星状況

Fig.3 a) GPS antenna height by VRS-RTK (red) and K-GPS (blue), b) height difference of VRS-RTK and K-GPS results, c) Number of GPS satellites, d) PDOP on Hiuchi-nada.

測線は、約 2 km 四方の井桁状  
測線間隔約 20m  
平成 14 年 8 月 26 日  
測量船「天洋」搭載艇

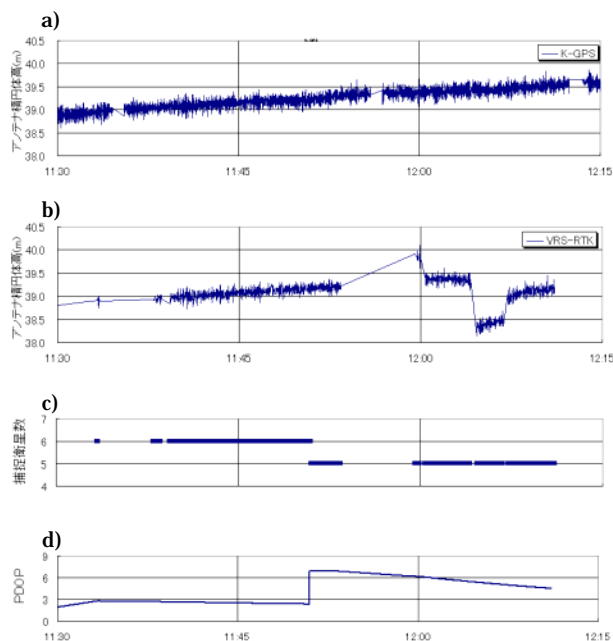
2.3 燧灘実験

燧灘における実験海域と VRS 基準点網及び K-GPS 陸上基準点の関係を第 2 図に示す。また、VRS-RTK と K-GPS 測位結果の比較及び衛星状況を第 3 図に示す。測量船の GPS アンテナ高は、潮汐の変化による変動も表している。

燧灘実験では、VRS-RTK Fix 解の継続した出力が得られなかった。原因として、測位海域が広範囲であるため、VRS 基準点網を超えたことによる捕捉衛星の変更及び電波が届きにくいエリアであった可能性等が考えられる。

そこで燧灘実験における VRS-RTK 測位データの精度の検証は、11 時 30 分から 12 時 15 分のデータにより実施した。この時間帯の測位結果と捕捉衛星数及び PDOP (Position Dilution of Precision) を第 4 図に示す。

次に、K-GPS 測位結果を基準とした VRS-RTK 測位結果の較差を算出した。東西、南北、鉛直方向の較差の最大値、最小値、平均値、標準偏差を第 1 表に示す。符号はそれぞれ東、北、上方向



第 4 図 11 時 30 分から 12 時 15 分の VRS-RTK と K-GPS 測位結果と衛星状況 (燧灘)

Fig.4 a) GPS antenna height by K-GPS, b) GPS antenna height by VRS-RTK, c) Number of GPS satellites, d) PDOP from 11:30 to 12:15.

を正とした。

第 4 図を見ると、PDOP3 以上になる時間帯の VRS-RTK のアンテナ楕円体高測位結果は、K-GPS の結果と比較して乱れが大きい。

そこで、衛星状況が良好な時間帯の精度を確認するため、PDOP3 以下の測位結果のみを対象とした較差を第 2 表に示す。

2.4 仙台湾実験

2.4.1 測位結果

仙台湾における実験海域及び K-GPS 陸上基準点と仮想基準点の関係を第 5 図に示す。

VRS-RTK による水平方向の測位結果より、測量

第 1 表 11 時 30 分から 12 時 15 分の較差 (燧灘)

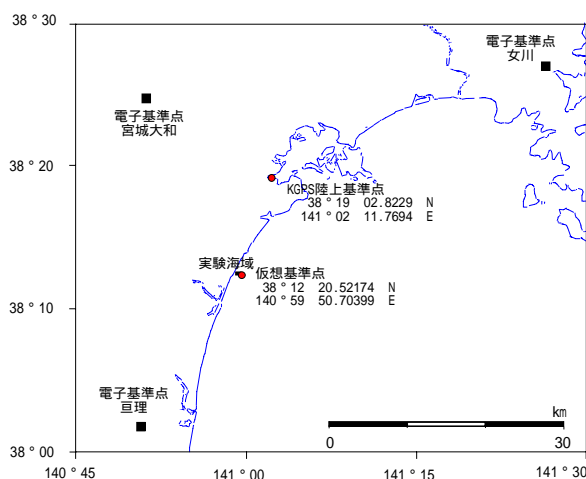
Table 1 The coordinate difference from 11:30 to 12:15 on Hiuchi-nada.

	東西方向(cm)	南北方向(cm)	鉛直方向(cm)
最大値	62.3	53.5	55.1
最小値	-84.6	-62.3	-118.1
平均値	6.1	-8.3	-20.2
標準偏差(2 )	67.8	60.5	55.9

第 2 表 衛星配置が良好な時間帯の較差 (燧灘)

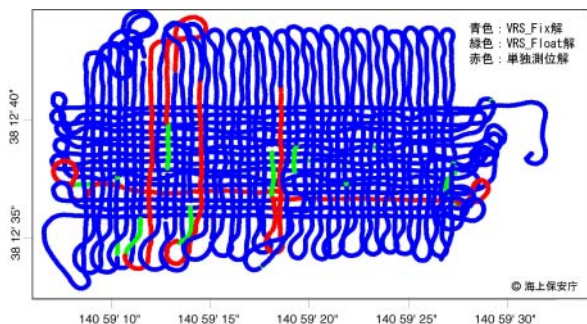
Table 2 The coordinate difference when PDOP is less than 3 on Hiuchi-nada.

	東西方向(cm)	南北方向(cm)	鉛直方向(cm)
最大値	6.5	1.8	6.2
最小値	1.8	-4.0	-16.7
平均値	3.8	-1.1	-7.6
標準偏差(2 )	1.7	2.0	7.2



第 5 図 実験海域及び K-GPS 陸上基準局と仮想基準点の関係

Fig.5 Test area, a K-GPS control point and a virtual reference point.



第 6 図 水平方向の軌跡と解の種類

Fig.6 Horizontal track for Fix solutions (blue lines), Float solutions (green lines) and Point positioning solutions (red lines).

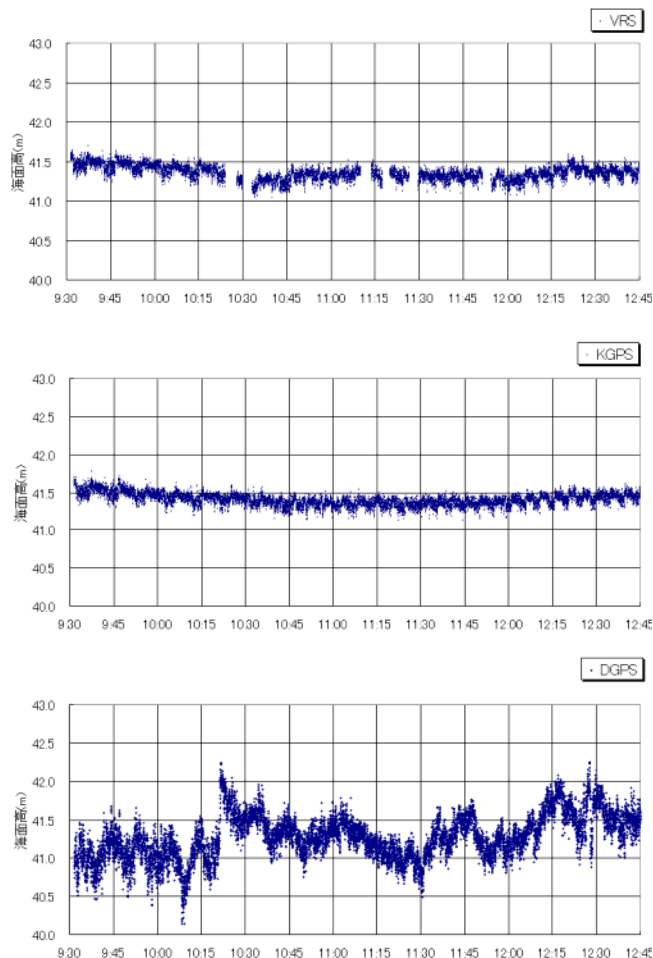
船の航跡と測位解の種類を第 6 図に示す。

第 6 図の線色は、測位解の種類を表し、青色が VRS-RTK 測位の Fix 解、緑色は同じく VRS-RTK の FLOAT 解、赤色は単独測位解を示す。FLOAT 解は、測定ノイズ等の理由で、精密な K-GPS 測位ができず、誤差が Fix 解に比べ大きいと見られる。単独測位解は、VRS-RTK 補正データが何らかの理由により受信できなかった場合に、T5700 受信機が出力する解である。解の種類は、NMEA\_GGK データに記録される GPS Quality indicator の値を参照した。

鉛直方向の測位は、アンテナ高への測量船の動揺の影響を取り除くため Heave, Roll, Pitch 補正を行い、海面の高さを算出した。VRS-RTK 測位結果ならびに同時に測位した DGPS 及び後処理 K-GPS による結果を第 7 図に示す。グラフは上から VRS-RTK, K-GPS, DGPS による測位結果である。なお VRS-RTK 測位データは、Fix 解のみを示した。

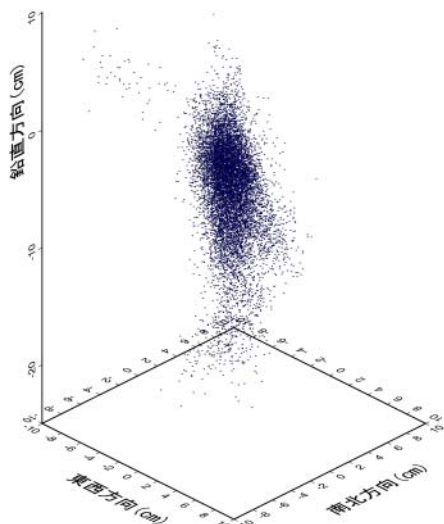
2.4.2 較差の平均と標準偏差

K-GPS 測位結果を基準とした VRS-RTK 測位結果の較差の分布図と最大値、最小値、平均値、標準偏差を第 8 図に示す。符号はそれぞれ東、北、上方向を正とした。



第 7 図 VRS-RTK, 後処理 K-GPS, DGPS による海面高測定結果

Fig.7 Heights of the surface of the sea by VRS-RTK (top), K-GPS (middle) and DGPS processing (bottom).



	東西方向(cm)	南北方向(cm)	鉛直方向(cm)
最大値	3.5	6.1	9.8
最小値	-6.4	-10.5	-23.7
平均値	-0.5	0.0	-5.1
標準偏差(2 )	2.2	3.2	7.3

第 8 図 VRS-RTKと後処理 K-GPS 測位結果の較差  
 Fig.8 The difference between VRS-RTK and K-GPS solutions.

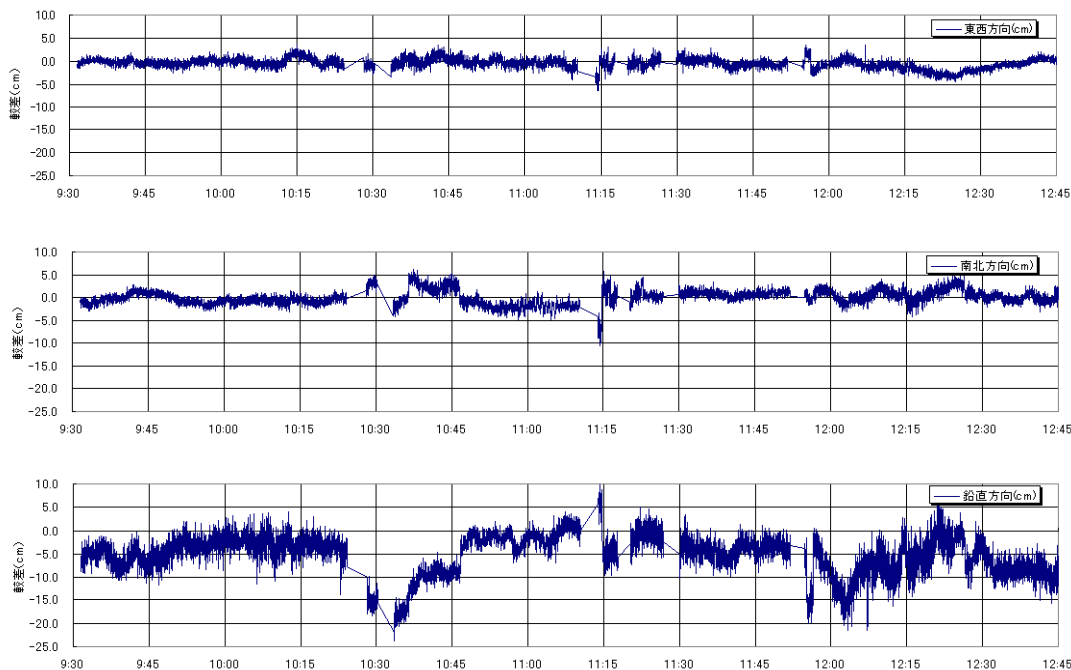
2.4.3 較差と衛星状況

東西，南北，鉛直方向の較差の時系列変化を第 9 図に示す．また，捕捉衛星数と PDOP の時系列

変化を第 10 図に示す．

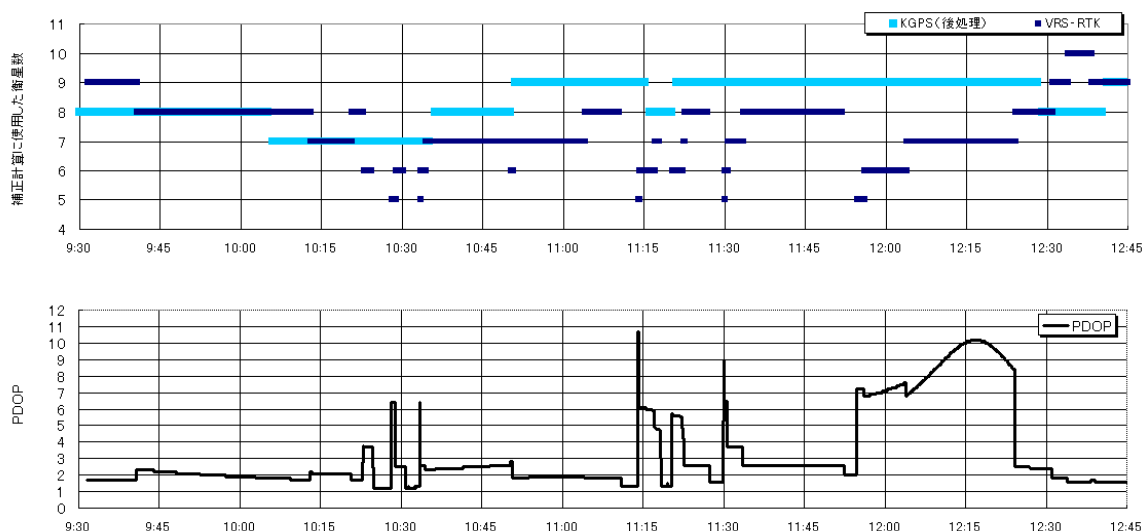
第 10 図には，VRS-RTK と K-GPS 測位計算に使用した衛星数を重ねて表示した．VRS-RTK の衛星数は，Fix 解出力計算に使用した衛星数で，NMEA\_GGK データを参照した．KGPS の衛星数は，GPSurvey によるキネマティック処理計算結果より出力された記録を参照した．PDOP は，VRS-RTK の Fix 解の NMEA\_GGK 出力結果を参照した．

仙台湾実験では，K-GPS の場合は測量船と塩釜陸上基準点で共通に捕捉した衛星を全て計算に使用した．第 10 図より VRS-RTK では，測位計算に使用した衛星数が K-GPS の利用衛星数よりも減少する傾向があることがわかる．特に Fix 解の出力が途切れた直後数分間の衛星数の減少が大きく，段階的に変化する傾向がある．その時の鉛直方向の較差の乱れが大きいことから，使用衛星数が減少すると鉛直方向の Fix 解の精度が劣化することがわかる．



第 9 図 較差の時系列変化

Fig.9 The difference in the east and west direction (top), in the north and south direction (middle) and in the height direction (bottom).



第 10 図 捕捉衛星数と PDOP

Fig.10 The number of the GPS satellites (top) and PDOP (bottom).

そこで、衛星状況が良好な時間帯の精度を確認するため、VRS-RTK の捕捉衛星数 7 個以上且つ PDOP3 以下の測位結果だけを対象とした K-GPS 測位との較差の最大値，最小値，平均値及び標準偏差を調べた。その結果を第 3 表に示す。

第 2 表及び第 3 表を見ると、衛星状況が良好な時間帯の較差は、燧灘実験，仙台湾実験ともにほぼ同じ値を示している。

第 3 表 衛星状況が良好な時間帯の較差（仙台湾）

Table 3 The coordinate difference when PDOP is less than 3 on Sendai Bay.

	東西方向(cm)	南北方向(cm)	鉛直方向(cm)
最大値	3.5	6.1	4.7
最小値	-4.5	-4.8	-19.8
平均値	-0.3	-0.1	-4.5
標準偏差(σ)	2.0	3.0	7.3

#### 2.4.4 潮高値の算出と実測値との比較

VRS-RTK 測位結果をもとに、仙台湾実験海域における潮高値を算出した。潮高値は、下記の式により算出した。

$$\begin{aligned} \text{潮高} &= \text{海面高} - \text{平均水面の楕円体高} \\ \text{海面高} &= (\text{測量船上の GPS アンテナ楕円体高}) \end{aligned}$$

- (海面からのアンテナ高)

但し、測量船上の GPS アンテナ楕円体高は VRS-RTK による測位結果、海面からのアンテナ高はアンテナ位相中心から海面までの高さを使用した。アンテナ高は、喫水および Roll, Pitch, Heave 補正をし、船体の動揺及び波浪による影響を極力取り除いた。

潮高実測値は、塩釜検潮所の 10 分ごとのデータを参照した。

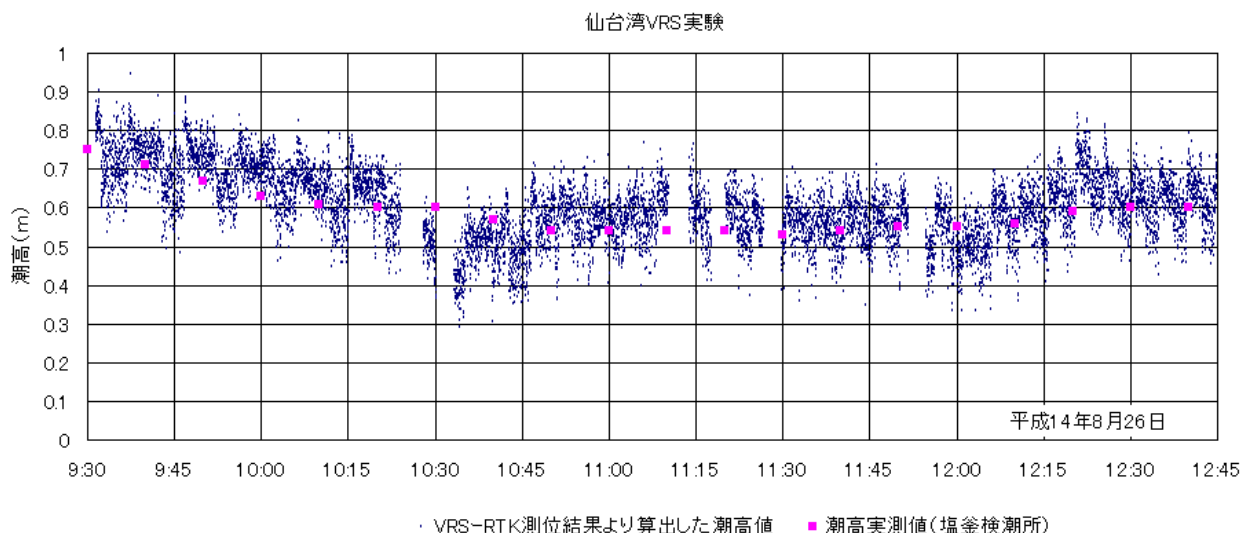
平均水面の楕円体高は、国土地理院ホームページよりダウンロードしたジオイド 2000 の値を使用した。

Z<sub>0</sub> 値は、海洋情報部ホームページに掲載の、平均水面等一覧に記載されている仙台の Z<sub>0</sub> 値 (0.93) を参照した。

VRS-RTK 測位結果より算出した潮高データと潮高実測値の比較を第 11 図に示す。

### 3 まとめ

- (1) VRS-RTK による測位精度は、衛星の減少または配置が良好ではない時間帯においては劣化する。



第 11 図 VRS-RTK 測位結果から算出した潮高データと潮高実測値の比較  
 Fig.11 The comparison of VRS-RTK solution and actual measurement of tide

- ( 2 ) 衛星状況が良好な時間帯では、VRS-RTK による水平方向の測位精度は K-GPS と同等である。
- ( 3 ) 衛星状況が良好な時間帯では、VRS-RTK による鉛直方向の測位結果は、K-GPS との較差の平均値 - 4.5 ~ - 7.6cm、標準偏差(2)約 7.3cm であった。楕円体高値は一般に VRS-RTK の方が、K-GPS に比べ低くなった。

- 宏実，黒石裕樹，福田洋一：「日本のジオイド 2000」の構築，国土地理院時報，**97**，(2002)。
- 都筑三千夫，西修二郎，松村正一：仮想基準点方式によるリアルタイム測位，国土地理院時報，**96**，39-44，(2001)。
- 寺井孝二：船舶におけるキネマティック GPS 測位観測による高さ方向の精度評価と船体動揺観測の試み，海洋情報部技報，**21**，51-61，(2003)。

4 今後の課題

- ( 1 ) 海面高の測位では、陸上に比べ急激な高度の凹凸は考えにくいことから、鉛直方向の欠損データ補間値の推定は可能と考える。今後の検討課題とする。
- ( 2 ) RTK 測位では、なんらかの障害によるデータの遮断などが起こる可能性がある。衛星の数や配置状況の予測はもちろんのこと、電子基準点データの欠損、通信障害等に起因するデータ欠損の補間手段を講じた上で、の測位計画をたてる必要があると考える。

参 考 文 献

安藤久，佐々木正博，畑中雄樹，田中和之，重松

# 汎用解析型 GIS ソフトウェアによる電子測量原図の作成

松本良浩, 戸澤実: 海洋情報部

## Compilation of Digital Smooth Sheet on General-Purpose Analytic GIS Software

Yoshihiro MATSUMOTO, Minoru TOZAWA: Hydrographic Surveys Div.

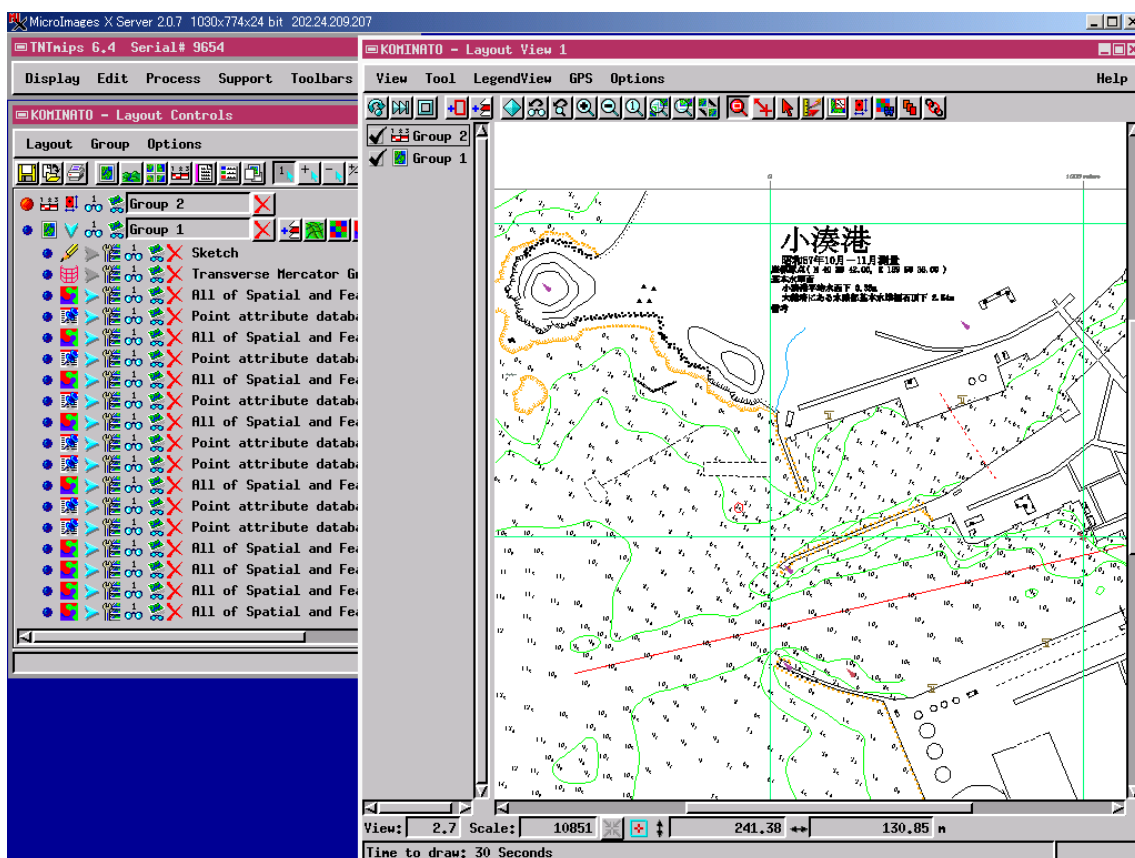
### 1 はじめに

平成 10 年度より海上保安庁海洋情報部においては、浅海域の測量において水路測量データをデジタル処理し地理情報システム(GIS)を使用して作成した電子測量原図および電子側傍水深図(以下「電子測量原図等」と呼ぶ)を測量成果として提出することが必須とされている。アナログデータをもとに紙(或いはプラスチックシート)をベースとして主に手作業で調製されてきた従来の測量原図を電子測量原図に移行するために、各種測量機

器のデジタル化の流れに並行した測量作業全体のシステム化の取り組みが行われてきた。

本稿では、導入後既に約 5 年を経て測量作業において定着した感のある電子測量原図作成システムの実現の経緯についてまとめた。

なお、電子測量原図は構想段階では「デジタル測量原図」と呼称されていたことから、本稿においても引用した一部の図や文献名の中で「デジタル測量原図」の表記が見られるが、これらは電子測量原図と同じものであると了解いただきたい。



第 1 図 電子測量原図の編集画面

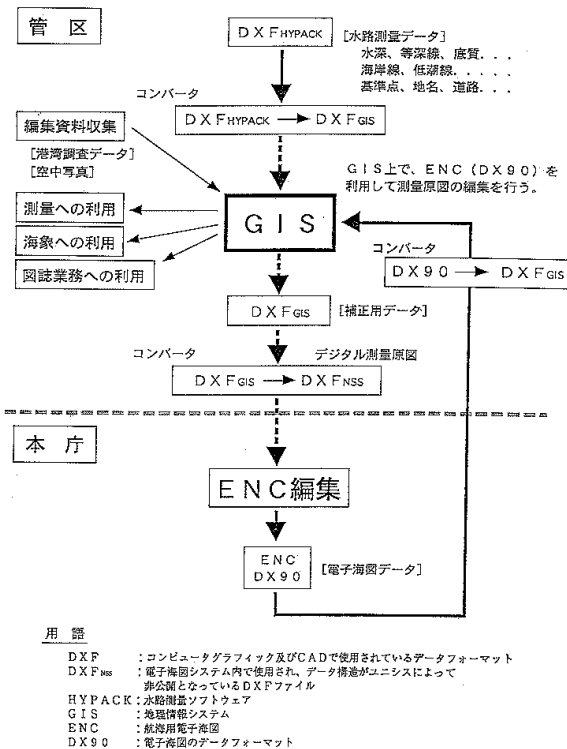
Fig.1 Compilation screen of digital smooth sheet.

2 電子測量原図等実現の背景

従来水路測量においては、六分儀による海上位置決定とシングルビーム(又は多素子)音響測深機による測深を行うのが長年の原則であった。これらの手法により得られた測量データは記録紙と図板によるアナログベースのデータ処理により測量原図が調製され、測量成果とされてきた。近年のデジタル計測技術の進展に伴い、水路測量の分野でも各種の計測データは、電磁的媒体によりデジタル集録されることが通常となってきた。例としては、海上位置決定では電波測位機、測深では測得水深の数値データ出力が可能な音響測深機の出現が挙げられる。さらに最近では GPS 受信機や浅海用マルチビーム音響測深機の普及に伴い、取得されるデジタルデータそのものが大容量化してきた。

このような情勢を鑑み、海上保安庁水路部(当

GISを用いた本庁・管区間における測量・海図データ相互利用について



第2図 GISを用いた本庁・管区間における測量・海図データ相互利用について

Fig.2 Mutual use of survey data/chart data on GIS among HOD and R.C.G. Hqs.

時)では平成9年度に測量業務デジタル化・システム化推進タスクチームが編成され、測量業務をデジタル化・システム化するための現状評価と方策の検討が行われた。沿岸調査課長(当時)をリーダーとしたこのタスクチームでは、沿岸調査課(当時)が推進しているシステム化構想をメンバーに紹介・検討し、管区へ習知するための要領、問題点および海洋情報課との関連について、意見交換が行われた(第2図)。

この結果、GISソフトウェア(米国MicroImages社製TNTmips)を利用し、電子海図データベースとデータ構造の点で互換性を持った電子測量原図作成システムを構築することが目標とされた。

この目標を達成するため、本庁および各管区海上保安本部水路部(当時)には以下の機器やソフトウェアが配備された(第1表)。これにより測量データの取得から電子海図システムへの提供まで、いわば測量データの「入口から出口まで」一貫したデジタル処理の基盤が整ったといえる。

種類	配置
デジタル多素子音響測深機	
千本電機 PDR-601 型	本庁・全管区
千本電機 PDR-701 型	本庁・六管区
浅海用マルチビーム音響測深機	
米国 RESON 社 SeaBat9001 型	本庁
米国 RESON 社 SeaBat8101 型	三・四・五・六・七・十・十一管区(20m型測量船)
米国 RESON 社 SeaBat8125 型	本庁
米国 SeaBeam 社 SeaBeam1180 型	本庁(測量船「天洋」)
GPS 受信機	
中波ビーコン受信機内蔵 DGPS 受信機	本庁・全管区
RTK-OTF 可能な GPS 受信機	本庁・全管区
イメージスキャナ	
A0 判カラーイメージスキャナ	本庁・全管区
水深自動集録処理ソフトウェア	
米国 Coastal Oceanographics 社 HYPACK MAX	本庁・全管区

第1表 デジタル水路測量に使用される機器・ソフトウェア(平成15年10月現況)

Table 1 Equipments and softwares for digital hydrographic surveys.(as of Oct. 2003)

### 3 電子測量原図作成作業の要件

主にハードウェア面でのデジタル化の環境整備が進められる一方で、前述のタスクチームにおいては電子測量原図の実現の構想が準備された。

従来測量原図を手描きではなく計算機を用いて自動印刷出力を行う環境は存在したが、これは紙ベースの図を出力することのみを目的としており、電子海図システムで利用できるデジタルデータが得られるものではない。電子測量原図作成システムでは、第3図のように測量データを電子海図システムへデジタルで受け渡しできることが主眼とされた。

これを実現するための要件を以下の節で述べる。

#### 3.1 実測デジタルデータの取得と編集

前述の HYPACK MAX をはじめとする水深自動集録ソフトウェアを用いると、計算機上でデー

タの集録が行われた後、対話形式による操作で水深編集・水深選択を行うことができる。水深選択まで処理を終えた電子測量原図に採用される水深データセットは ASCII(XYZ)形式の電子ファイルを介して GIS ソフトウェアにインポートされ、点のベクタ型データとして取り扱われる。基準点、底質、航路標識、航海目標等の点データも同様である。

実測のデジタル岸線データについても同様にインポートされ、線のベクタ型データとして取り扱われる。岸線・低潮線・その他の陸部データを航空写真から抽出する場合には、イメージスキャナーを用いてラスタ型データとして GIS に取り込み、ヘッドアップデジタイズを行うことにより線もしくは面のベクタ型データを得る。

これらのベクタ型データには「デジタル水路データのための IHO(国際水路機関)転送基準 S-57 第3版」(以下 S-57 Edition3 という)に準拠した属性を付与する。電子海図データは S-57 Edition3 に基づいて作成されているため、これと同じデータ構造を採用することにより、円滑にデータの受け渡しができるからである。

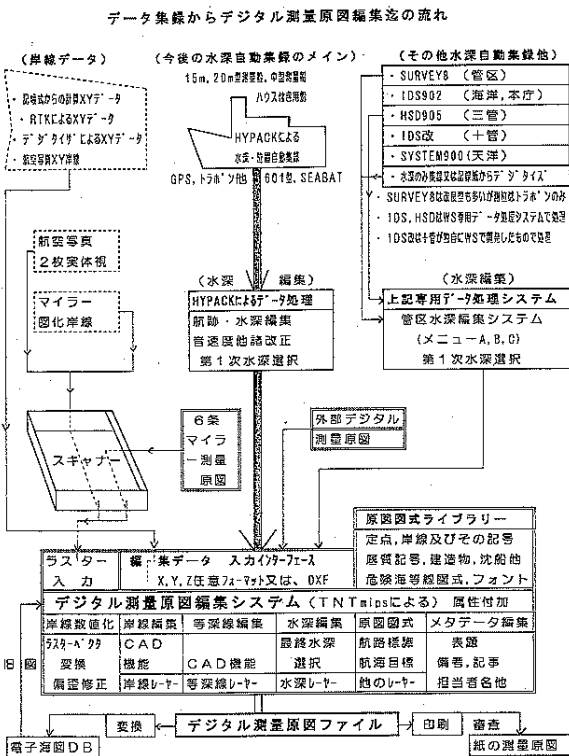
#### 3.2 旧資料の利用

大縮尺電子海図データベースから必要な種類・範囲のデータをベクタ型データとして GIS にインポートし、旧資料として利用する。

また、紙ベースの旧資料については、イメージスキャナーを用いて読み取りラスタ型データとして GIS ソフトウェアに取り込んで使用する。

#### 3.3 測量原図の視覚的表現

データの種類ごとに GIS 上で1レイヤをなし、従来の測量原図図式や海図図式に準拠した図式・表記法を用いて表示する。これらのベクタ型データのほか、地理座標を持つデータではないが図上において視覚的に必要とされる経緯度格子・メートルの尺度・共通点・タイトル・備考等の各要素を別レイヤとして付加し、測量データ・旧資料とともに重畳表示して測量原図の体裁で画面上・印



◎ その他の水深自動集録装置は、今後HYPACKが使用できない状況でのみ、利用するものとし、沿岸調査課ではサポートしない。  
・陸島の海の基本図等の本庁によるデジタル測量原図作成も上述の流れと同様。

第3図 データ集録からデジタル測量原図迄の流れ  
Fig.3 Data flow from data acquisition to digital smooth sheet.

刷出力上に表現する。図法については従来の測量原図と同様の TM(Transverse Mercator) 図法によるものとする。

**3.4 従来の測量原図のデジタル化**

水路業務法第 6 条・第 26 条等に基づき外部から提出されるプラスチックシートに記入された測量原図については、電子測量原図を調製することとなる。このため、イメージスキャナーを用いて元となる原図を読み取り、ラスター型データとして GIS ソフトウェアに取り込んだのち、ヘッドアップデジタル化によるラスター・ベクター変換を行って、3.1～3.3 節に述べたのと同様の編集作業を行う。

**3.5 電子海図システムへのデジタルデータ出力**

実測されたベクタ型データは付与された属性をもとに S-57 Edition3 DAI 形式の電子ファイルに変換出力する。

**3.6 その他**

ベースとなる GIS ソフトウェアは、作成された電子測量原図データを基にして地形解析処理など他の成果物へのデータ利用の拡張性を備えていることが望ましい。

**4 汎用解析型 GIS 上への電子測量原図作成システムの実装**

**4.1 TNTmips の採用とシステムの構築**

3 章で述べた要件に従って、点・線・面のベクタ型データを作成・編集することがすなわち電子測量原図の調製にほかならない。これらの地理座標を持ったデジタルデータ群を地図投影を経て視覚的に表現する作業を行うためには、汎用の解析型 GIS ソフトウェアをプラットフォームとして業務に合うようにカスタマイズし電子測量原図作成システムを構築することがコストや開発期間の面で有利である。3.1～3.6 節で述べた内容に沿っ

実測データの取得と編集
a. ベクタ型データのインポート (ASCII 形式による)
旧資料の利用
b. ベクタ型データのインポート (電子海図データによる)
c. ラスター型データのインポート (各種の画像フォーマットによる)
測量原図の視覚的表現
d. 測量原図図式に準拠したベクタ型データの表示
e. ベクタレイヤの重畳表示
f. 修飾情報の作成・編集・表示
g. 測地系変換・図法変換
h. 印刷
従来の測量原図のデジタル化
i. ラスター型データのインポート (各種の画像フォーマットによる)
j. ラスター・ベクター変換
電子海図システムへのデジタルデータ出力
k. ベクタ型データのエクスポート (S-57Edition3 DAI 形式)
その他
l. 各種のベクターおよびラスター解析機能

第 2 表 電子測量原図作成システムの要件

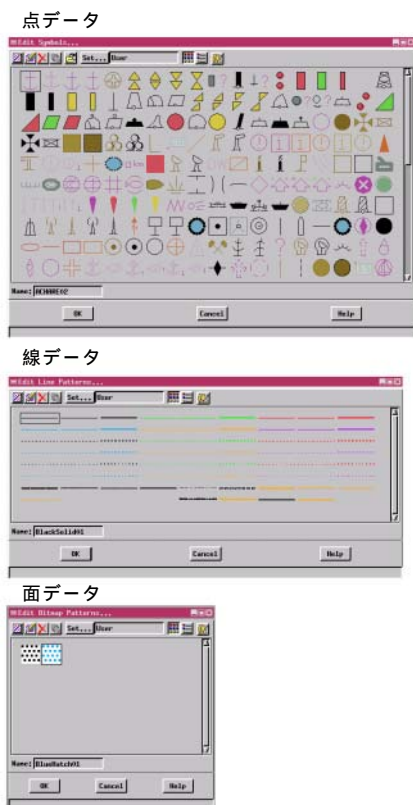
Table 2 Requirements of digital smooth sheet compilation system.

て要求される機能を具体的に列挙すると、第 2 表のようになる。ここに挙げる機能を実現できる GIS ソフトウェアを選定することとなる。

電子測量原図作成システムのベースとして、平成 8 年度に水路部沿岸調査課(当時)は米国 MicroImages 社製の TNTmips を選定した。TNTmips はベクタ・ラスター型データを共にサポートする解析型 GIS のパッケージであり、豊富なデータ編集機能と解析機能を安価に提供する製品のひとつである。TNTmips が標準装備する機能によって、第 2 表のうち a,c,e,f,g,h,i,j,l は既来实现されていることになる。

b については、平成 8 年度に財団法人日本水路協会が行った委託研究「ENC のパソコンによる表示の調査研究」において電子海図データ(S-57 Edition3)を TNTmips ベクタオブジェクトに変換するソフトウェアが開発されており、これを利用することで電子海図データのインポートが既に可能となっている。

d については、従来の測量原図図式および「IHO(国際水路機関)による ECDIS の海図内容と表示に関する仕様書」(S-52) に準拠したシンボル群を別途作成して提供し、表示に使用することとした(第 4 図)。



第 4 図 電子測量原図図式の例

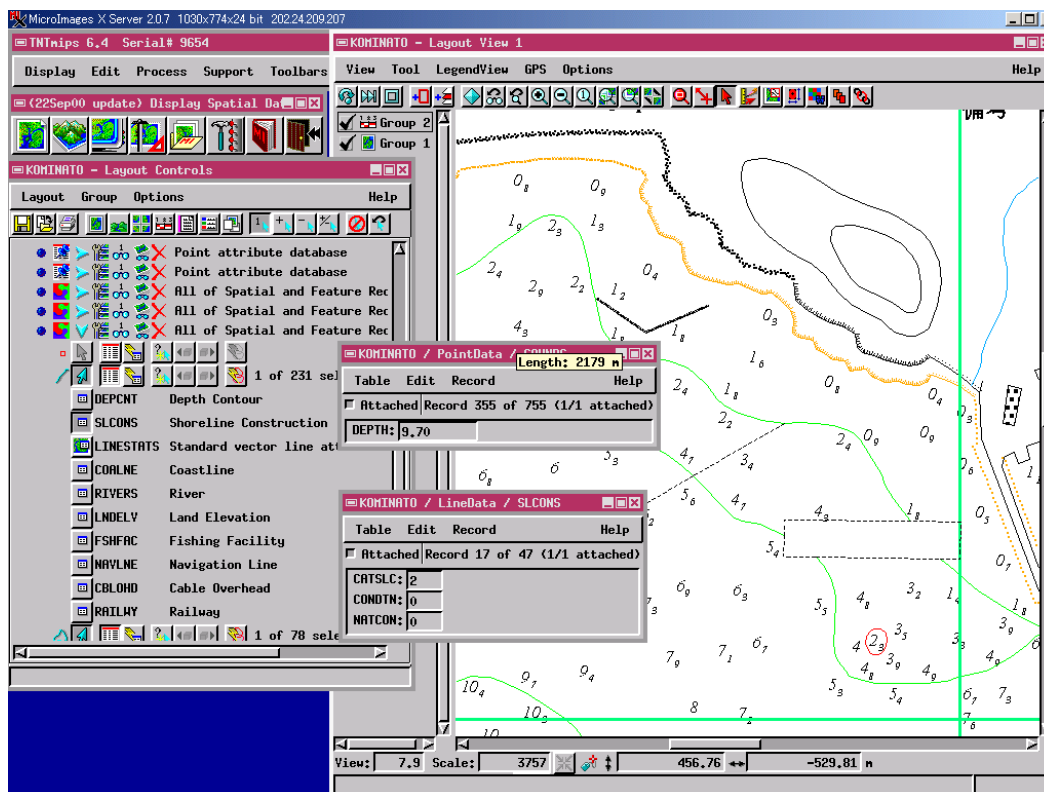
Fig.4 Examples of digital smooth sheet symbols.

k については, c の逆変換ともいえるが, S-57 Edition3 DAI 形式を変換出力する変換プログラムを TNTsdk(TNT Software Development Kit) を用いて開発した .

電子測量原図の調製に関する一連の操作については「デジタル測量原図作成システムマニュアル」が整備・配布された . 原則的にこのマニュアルに沿って作業を進めれば電子測量原図を完成させることができる .

#### 4.2 S-57 に準拠したデータ構造の実現

S-57 では, 電子海図に記載される一つ一つの要素をオブジェクトと呼び, オブジェクトが持つ各種の属性をオブジェクトアトリビュートと呼ぶ . TNTmips 上ではベクタ型のデータの各要素に対してテーブルを作成して属性を付与することができるため, テーブルを S-57 オブジェクトに, テ



第 5 図 テーブルの例

Fig.5 Examples of tables.

ープル内の各フィールドを S-57 オブジェクトアトリビュートに対応させることにより、同じデータ構造を実現している(第 5 図)。

TNTmips は強力なマクロ機能を持ち、ユーザーがスクリプトを記述して自由に画面表示やデータの解析を制御できる。この機能を利用して、画面・印刷出力上でベクタ型データが持つ属性に連動して適切な図式が自動的に選択表示されるスクリプト群を各 S-57 オブジェクトに対応して提供した(第 3 表)。

S-57 オブジェクト	名称	型	QRY(スタイル用)	QRY(ラベル用)	備考
BONSPF	立標、特殊標識(Beacon, special purpose/general)	点	P_BONSPF_style	P_BONSPF_label	ラベルの位置は Lower Center
BOYINB	係船浮標(Buoy, installation)	点	P_BOYINB_style	P_BOYINB_label	ラベルの位置は Lower Center
BOYSPP	浮標、特殊標識(Buoy, special purpose/general)	点	P_BOYSPP_style	P_BOYSPP_label	ラベルの位置は Lower Center
BRIDGE	橋(Bridge)	面	A_BRIDGE		
BUISSL	建物(Building, single)	面	A_BUISSL		
CBLDHD	架空線(Cable, overhead)	線	L_CBLDHD		
COALNE	海岸線(Coastline)	線	L_COALNE		
CONVYR	ベルトコンベア(Conveyor)	面	A_CONVYR		
CRANES	クレーン(Crane)	点	P_CRANES		
CTNARE	注意区域(Caution area)	面	A_CTNARE		
CTRPNT	定点(Control point)	点	P_CTRPNT_style	P_CTRPNT_label	ラベルの位置は Right Center
DEPCNT	等深線(Depth contour)	線	L_DEPCNT		電子測量原因では低潮線を含む
FSHFAC	漁具(Fishing facility)	面	A_FSHFAC		
LNDELV	標高(Land elevation)	点	P_LNDELV_style	P_LNDELV_label	ラベルの位置は Right Center
LNDRMK	立標(Landmark)	点	P_LNDRMK_style	P_LNDRMK_label	ラベルの位置は Lower Center
NAVLINE	見通し線(Navigation line)	線	L_NAVLINE		
OBSTRN	障害物(Obstruction)	点	P_OBSTRN_style	P_OBSTRN_label	Label Style of the Special Format: Nautical Depth とし、ラベルの位置は Centered 領域内の水深点には点型の OBSTRN を付与する。
OILBAR	オイルフェンス(Oil barrier)	線	L_OILBAR		
RAILWY	鉄道・軌道(Railway)	線	L_RAILWY		
RIVERS	河川(River)	線	L_RIVERS		
ROADIY	道路(Road)	面	A_ROADIY		
SBDARE	海底(Seabed area)	点	P_SBDARE1	P_SBDARE2	水深の伴わない底質、ラベルの位置は Centered 水深付きの底質、ラベルの位置は Lower Center
SILTNK	サイロ/タンク(Silo/tank)	面	A_SILTNK		
SLOCNS	人工岸(Shoreline Construction)	線	L_SLOCNS		
SNDWAV	サンドウエーブ(Sand waves)	点	P_SNDWAV		
SOUND	測深・水深(Sounding)	点	P_SOUND		Label Style of the Special Format: Nautical Depth とし、ラベルの位置は Centered
TOPMAR	トップマーク(Topmark)	点	P_TOPMAR		
UNSARE	未測量区域(Unsurveyed area)	面	A_UNSARE		
VEGATN	植生(Vegetation)	点	P_VEGATN		
WEDKLP	海藻(Kelp)	点	P_WEDKLP		
WRECK	沈船(Wreck)	点	P_WRECK_style	P_WRECK_label	Label Style of the Special Format: Nautical Depth とし、ラベルの位置は Centered 領域内の水深点には点型の WRECK を付与する。

- 全てのデータは Vector Layer として扱う。このとき、図式表示を Style、文字の表示を Label として扱う必要があるため、名前の末尾に \_style、\_label が付いた QRY ファイルを組にしている。
- 末尾に RED のついたファイル名の場合は、図式に S-52 準拠のものではなく「赤丸赤点」を用いる。

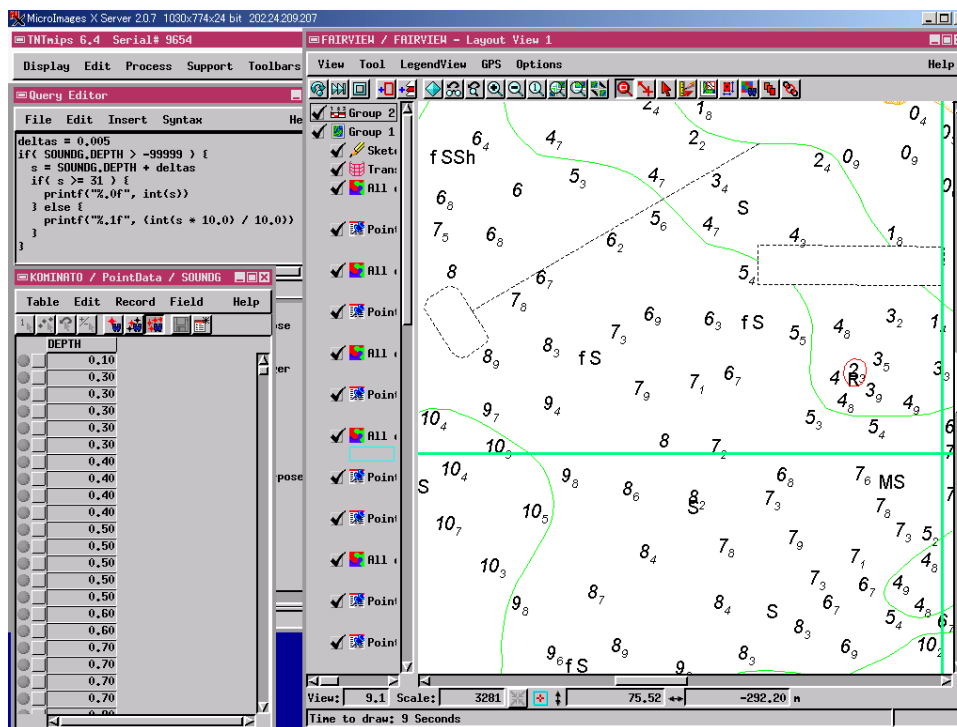
第 3 表 S-57 オブジェクト別のスクリプト群 (QRY ファイル)一覧

Table 3 Summary of script (QRY) files corresponding to S-57 objects.

図式名	種類	オブジェクト名	属性	対応無し	備考
注記	注記				
特殊点	特殊点				
水深点	水深点				
底質点	底質点				
航路標識	航路標識				
障害物	障害物				
浮標	浮標				
海岸線	海岸線				
橋	橋				
建物	建物				
架空線	架空線				
海岸線	海岸線				
ベルトコンベア	ベルトコンベア				
クレーン	クレーン				
注意区域	注意区域				
定点	定点				
等深線	等深線				
漁具	漁具				
標高	標高				
立標	立標				
見通し線	見通し線				
障害物	障害物				
オイルフェンス	オイルフェンス				
鉄道・軌道	鉄道・軌道				
河川	河川				
道路	道路				
海底	海底				
サイロ/タンク	サイロ/タンク				
人工岸	人工岸				
サンドウエーブ	サンドウエーブ				
測深・水深	測深・水深				
トップマーク	トップマーク				
未測量区域	未測量区域				
植生	植生				
海藻	海藻				
沈船	沈船				

第 4 表 電子測量原図 - S-57 対応表

Table 4 Object and attribute table between digital smooth sheet and S-57.



第 6 図 水深の例

Fig.6 Example of soundings.

### 4.3 属性付与の実際

従来の紙ベースの測量原図とは異なり，電子測量原図を調製する際には測量されたデータに対し S-57 に準拠した属性を付与しなければならない。このため，測量原図を調製する者は電子海図のデータ形式についても一定の知識が求められることとなった。

電子測量原図のベクタ型データに属性を付与する際の早見表として第 4 表に示すような表が提供された。ここには各要素に対応するオブジェクト名・アトリビュート名のほか，点・線・面のうちとり得る型，属性付与上の注意などが記されている。

電子測量原図の調製者は，ベクタ型データの作成と同時にこの表を参照しながら各データ要素に適切な属性を付与していく。

以下では主要なオブジェクトについて，属性付与の具体例を述べる。

#### NATSUR(表面の性質)

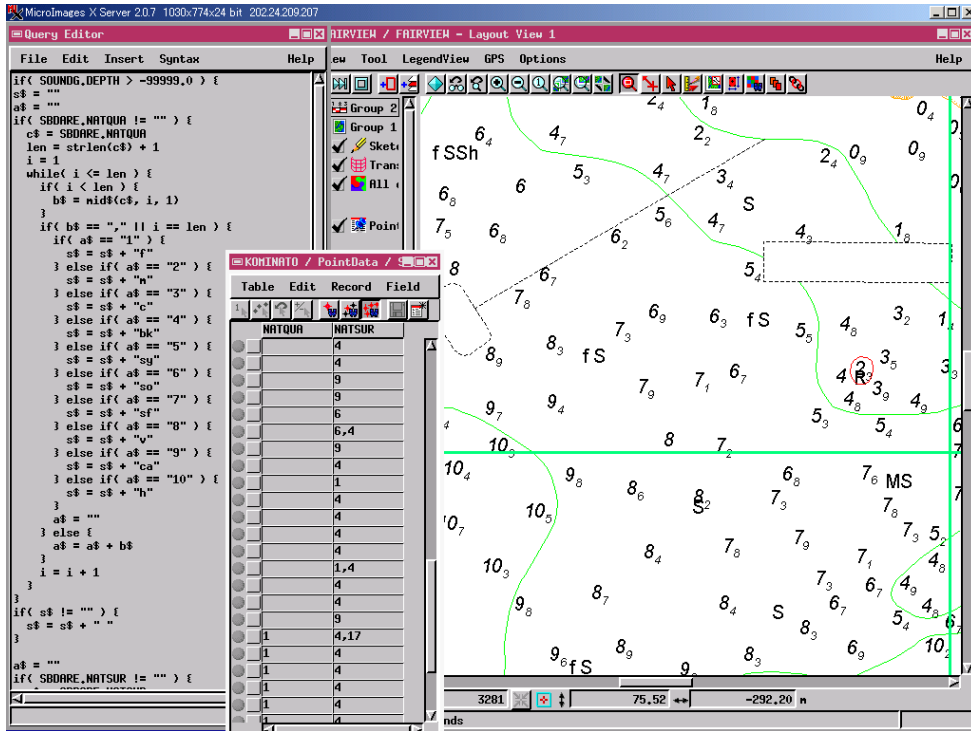
ID	種類	S-57 における定義	測量原図における底質記号
1	泥	ゆるい、ぬれている土。	M
2	粘土	(0.002mm 以下の粒子)；焼いたときに堅くなる堅い粘着質の土。	Cy
3	シルト	(0.002-0.0625mm の粒子)；手の上で乾いたときに容易にこすり落とせる。	Si
4	砂	(0.0625-2.0mm の粒子)；押しつぶされたか擦り切れた岩の小さな粒。	S
5	石	中れきやれきから群石や大きな岩のかたまりまでの範囲の大きさの破片の一般的な名前。	St
6	れき	(2.0-4.0mm の粒子)；粗い砂を伴う小さな石。	G
7	中れき	(4.0-64.0mm の粒子)；水の中をころがることによってなめらかに円くなった小さな石。	P
8	大れき	(64.0-256.0mm の粒子)；水によって円くならぬに擦り切れた石で舗装道路に使われる。	Cb
9	岩	岩石圏の不可欠部分を構成する自然が源のあらゆる形成物。堅いかたまりを形成する自然にできた物質。	R
11	溶岩	火山から流れてくる流体や半流動体。溶融した岩の冷えたものが結果できた物質。海底の一部は溶岩からなっている。	Lv
14	さんご	海洋ボリアの多くの属の堅い炭酸カルシウムの骸骨。	Co
17	貝殻	さまざまな水に住む動物の外骨格。	Sh
18	群石	256mm よりも大きい直径を伴う円くなった岩。	

#### NATQUA(表面の性質 - 限定した用語)

ID	種類	S-57 における定義	測量原図における底質記号
1	細かい	(特定の NATSUR に対し)大きさの最も小さい分類。	f
2	中位の	(特定の NATSUR に対し)大きさの中位の分類。	m
3	粗い	(特定の NATSUR に対し)大きさの最も大きい分類。	c
4	砕けた	砕けたか粉々になっている。	
5	粘着質	粘着性が膠のような固性を持っている。	
6	軟らかい	堅くない。	
7	堅い	柔軟でない；厚く流れに抵抗力がある。	
8	火山質	火山から噴出した物質からなっているか含んでいる。	
9	石灰質	カルシウムがカルシウム炭酸からなっているか含んでいる。	
10	堅い	堅い；通常固められていない堆積物によって覆われていない海底の部分に対していう。	

第 5 表 底質の属性

Table 5 Attributes for quality of the bottom.



第 7 図 底質の例

Fig.7 Example of quality of the bottom.

4.3.1 水深・干出

水深は点データであり、電子測量原図では 2 次元の点座標に S-57 で定義されていない SOUNDG.DEPTH という特別の属性を付与する形で表現する(第 6 図)。このほか測量年月日(SORDAT)や測量精度(SORACC)を付与することもできる。

干出については負の水深値を与えることで水深と同様に扱う。

4.3.2 底質

底質(SBDARE)は点データであり、電子測量原図では点座標に底質の属性を付与する形で表現する。底質の属性としては NATSUR(表面の性質)と NATQUA(表面の性質の修飾語)を付与する(第 5 表・第 7 図)。なお、水深と同じ場所に付与された底質については、水深と同じ点座標に対して重ねて底質の属性を付与する事によって実現する。

4.3.3 岸線

岸線は線データである。S-57 Edition3 におい

CATCOA(海岸線のカテゴリ)

ID	種類	S-57 における定義	測量原図における分類
1	急斜海岸	岩または土の崖を持つ海岸はレーダーをよく反射し、また海岸に沿って崖と低い海岸が交互に現れる場合には、かなりの沖合からも目視による識別に有効である。	
2	平坦な海岸	明らかな地形学的なフィーチャーのない平らな海岸。	泥
3	砂浜	砂すなわち小さいが 0.0625 と 2.000 ミリメートルの間の簡単に区別できる個々の粒から成っているぼろぼろの物質から成り立っている海岸線区域。	砂
4	石浜	石と中れきとれきから群石や大きな石の塊までの範囲における石の破片からなる海岸線の区域。	群石・岩又ははげ岩
5	れき浜	だいたい 16 ミリメートルよりも大きい丸められてしばしば水の作用で摩滅した石の破片から成り立っている海岸線の区域。	れき
7	マングローブ	多くの支持根を生ずる熱帯の木や低木のある属の一つで低い海岸から浅い水へと茂っている。	樹木岸
8	沼地の海岸	水をたっぷり含んだ海綿状の土地から成り立っている海岸線の区域。表面上に現れるかなりの数の植生を普通ともない浅く水で覆われている。	湿地岸
9	珊瑚礁	本質的に珊瑚とその派生物で構成されているしばしば大きな広がり。礁。	

(通常使用されるものみ抜粋)

第 6 表 自然岸線の属性

Table 6 Attributes for natural coastline.

て岸線は自然岸線 (COALNE) と人工岸線 (SLCONS)を区別する。



自然岸線の属性としては CATCOA(海岸線のカテゴリー)を付与する(第 6 表) . 従来の測量原図図式と S-57 Edition3 との間で属性が対応しておらず、礫と岩、群石とガケ岩がそれぞれ区別されないなどの整合性の悪さが見られる .

人工岸線は元来測量原図では工事中などを除いて種類を区別する決まりはなかったが、S-57 Edition3 においては CATSLC(人工岩のカテゴリー)を付与し、よく使用されるものだけでも CATSLC=1(防波堤)、2(防波堤・護岸)、4(棧橋(突堤))、5(遊歩棧橋)、6(ふ頭(岸壁))、9(捨石)、13(斜路)、15(固い壁のふ頭)、16(開いている表面のふ頭)のように細かく区別する。但し表示上は全て黒実線であり、個別の図式はない(第 8 図) .

4.3.4 等深線・低潮線



等深線(DEPCNT)は線データであり、属性としては VALDCO(水深値)を付与する(第 9 図) . 元来測量原図では等深線と低潮線を区別するが、S-57 Edition3 では低潮線を VALDCO=0 の等深線として区別せずに取り扱う .

測量原図において低潮線は海岸の種別に応じた図式を茶色で表示することとなっている . このため、本来 DEPCNT に付与されない CATCOA を岸線同様に付与し、特に区別を行っている . この属性は電子海図システムでは無視されることとなる .

4.3.5 その他

前述の対応表でカバーしていない要素については、S-57 Edition3 Appendix A のオブジェクトカタログを参照し個別に適切な属性を判断して属性付与を行う .

前述の対応表およびオブジェクトカタログを参照すれば、データの種別別に概ね規則的に属性を付与することができるが、中には調製者が付与の仕方に困るようなものも多々ある . このような事例で他の調製者にも参考になると考えられるものはまとめて以下のような事例集(第 7 表)を作成した .

種類	オブジェクト	点線面	属性	備考
係船浮標(小)	MORFAC		CATMOR=7	 12, R (No 2) 沖合・大型タンカー用のものは次を参照。
係船浮標(大)	BOYINB		BOYSHP, CATINB など	
船架	GRIDRN		WATLEV, VERLEN など	つける属性がない場合、INFORM(英語)もしくは NINFORM(日本語)に何か注記を書く。(何か属性が無いと DAI 変換されないで)
潜堤	SLOONS		CATSLC, NATCON, WATLEV=3	WATLEV=3: 常に水没 他は人工岸と同じ
杭(パイル)	PILPNT		CATPLE, CONDTN	CATPLE=1: 湾標, 3:杭, 4: 三脚
験潮所	S1STAW		CATS1W=12	
生質	MARCUL		CATMFA, VALSOU, WATLEV	CATMFA=1: 甲殻類動物, 2: 牡蠣・胎貝 3:魚 4:海藻
海底導水管の両端にあるビーコン	BCNSPP		CATSPM=39	CATSPM=39: 海底輸送管の位置や輸送管が陸へ上がる点を示すのに使われる標識
海底電力ケーブルの両端にあるビーコン	BCNSPP		CATSPM=6	CATSPM=6: 海底ケーブルの位置やケーブルが陸へ上がる点を示すのに使われる標識
送電線の両端の電柱	PYLONS		CATPYL=1	CATPYL=1: エネルギー伝送ケーブルや線を支えるための、鉄鋼の枠組みや補強鋼線入りのコンクリートなどからなる垂直の構造物
石碑	LNDMRK		CATLMK=9	CATLMK=9: 記念碑
フェリーターミナル	BUISGL		INFORM, (FUNCTN)	FUNCTN は空欄(該当なし)とし、INFORM(英語)もしくは NINFORM(日本語)に何か注記を書く。(何か属性が無いと DAI 変換されないで)

第 7 表 属性の付与に困る事例集

Table 7 Case examples confusing to attach adequate attributes.

5 問題点

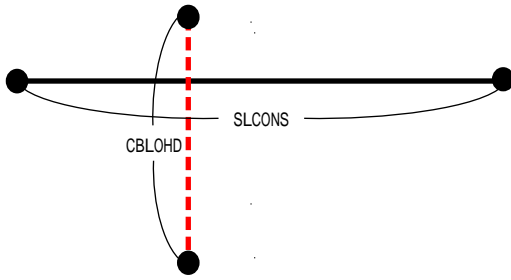
5.1 S-57 と TNTmips のトポロジーレベル

電子海図システムとできる限り整合するデジタルデータを編集できるように電子測量原図作成システムは構想されたのであるが、そのプラットフォームである TNTmips と S-57 の間でトポロジーレベルに違いがある .

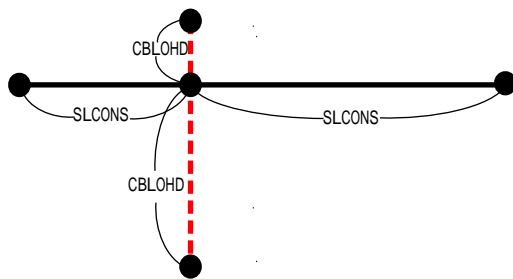
GIS においてトポロジーとは、ベクタ型データにおける図形要素間の位相関係を意味する . S-57 にはトポロジーレベルとして Cartographic Spaghetti, Chain Node, Planar Graph, Full Topology の 4 種類が規定されているが、電子海図ではこのうち Chain Node を使用する一方、TNTmips は Full Topology を使用する . この違いから、空間データの構成に違いが生じることがある .

TNTmips の Full Topology においては、線と線が交差すると必ず交差した位置にノードが発生し、線データはノードを境に分断される . また、線に

電子海図(Chain Node)の場合



TNTmips(Full Topology)の場合



SLCONS:人工岸, CBLOHD:空中線  
●はノードを表す。

第 10 図 岸壁を横切る空中線

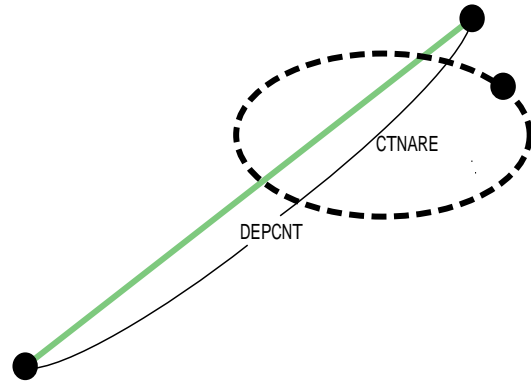
Fig.10 Example of an overhead cable across a wharf.

よって閉じた領域は必ず面として認識される。一方電子海図の Chain Node においては、位置関係のほかデータの概念的つながりを考慮するため、無関係な線データ同士の交差にはノードは発生せず、また無関係な線データの組み合わせで囲まれた領域は面と認識しない。

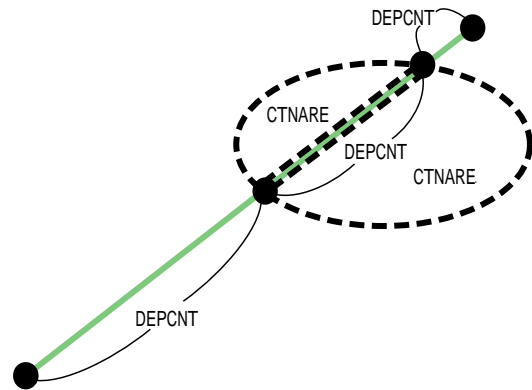
例えば、第 10 図において TNTmips では人工岸 (SLCONS) と空中線 (CBLOHD) の交差した点にノードが発生し、人工岸と空中線各々が 2 つの線データに分断されるが、電子海図では人工岸と空中線の間概念的つながりはないのでノード無しで交差を許容する。

また、第 11 図のような危険界 (CTNARE) は TNTmips では等深線 (DEPCNT) を境に 2 つの面データとして認識されることとなるが、電子海図では危険界と等深線の間概念的つながりはない

電子海図(Chain Node)の場合



TNTmips(Full Topology)の場合



DEPCNT:等深線, CTNARE:危険界  
●はノードを表す。

第 11 図 危険界を横切る等深線

Fig.11 Example of a depth contour across caution area.

ので危険界は分断されずひとつの領域と認識される。

TNTmips で作成されたこれらの例のようなデータを変換出力して電子海図システムで取り扱うことは可能であるが、Chain Node の考え方においては不自然に分断された状態でデータが渡されるため、電子海図の編集者において自然な形態に修復する必要があるが起きている。

### 5.2 底質記号表示の問題

電子測量原図の底質点は、点型データに対し S-57 オブジェクト SBDARE のアトリビュート

NATSUR および NATQUA に相当する属性を付与することで実現される。NATSUR には表面の性質に対応して泥は 1, 砂は 4, 貝殻は 17 などという値が(複数ある場合はカンマ区切りで)付与され, NATQUA には「細かい」は 1 などの修飾語が付与される。よって「泥と細かい砂と貝殻」が認められる底質点の例では, 「NATSUR=1,4,17」と「NATQUA=,1,」という属性が付与されることとなる。これは「MfSSh」と表記されるものであるが, TNTmips のマクロ機能を用いてこの表示を実現することが遂にできなかった(第 12 図)。これは TNTmips のマクロ機能の不備によると考えられ, MicroImages 社に修正を要望したが改善は見られなかった。この問題は未解決である。

### 5.3 TNTmips のサポート上の不満

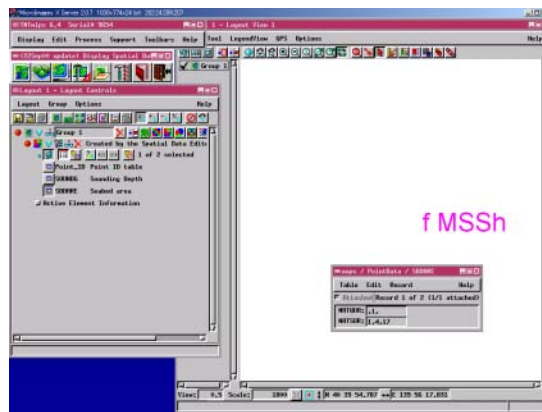
TNTmips はバグが多く, バグレポートを送っても修正の対応が速やかではない。また, 定期的にバージョン番号が上がっていくシステムをとっているため, アップデート契約をしていないと修正が行われても契約上の問題で使用できないというケースが多い。さらに, 修正に伴い他のバグが混入する場合も非常に多い。

この結果安定したバージョンといえるものが無く, 不具合を回避するためにはアップデートし続けることとなり, 業務の定常化の面からも費用の面からも問題がある。

### 5.4 RVC ファイルによるデータ保管の問題

TNTmips においてあらゆるデータは RVC という固有のファイル形式で入出力される。このファイルフォーマットは非公開であるため, 電子測量原図という資産を長く保管する際には, 将来にわたってアクセス可能かどうかという点で疑問がある。

また, 前節で述べたようなバグに類する問題であるが, RVC ファイルを作成したのと異なるバージョンの TNTmips でデータを表示・印刷出力すると元のレイアウトとは違うものが出力されるという場合が多い。この点について MicroImages



第 12 図 底質記号「MfSSh」表示の不具合  
Fig.12 Display failure of quality of the bottom 'MfSSh'.

社から公表はされていないが, 内部で RVC ファイルフォーマットの仕様が変更されている, もしくは何らかのバグが潜在している可能性が高い。このことから, 調製済み電子測量原図を長期保管する目的には, 他の公開されたファイルフォーマットを採用することが望ましいと考える。

## 6 おわりに

平成 8 年度に各管区に 1 ライセンス目の GIS ソフトウェア(TNTmips)配布されてから 2 年足らずで水路測量の成果提出は 100%電子測量原図へと移行した。こうして短期間のうちに測量原図のデジタル化が達成されたことは, ひとえに本庁・管区の全ての水路測量担当官が操作習得に費やした並々ならぬ努力の賜物である。

測量データの一貫したデジタル処理という目標において, 水路業務法第 6 条・第 26 条等に基づき提出される外部成果には, プラスチックシートによるものが未だ残されている。これについても, 最近では原図のほかに水深データの電子ファイルの提出を受けることにより, 管区において水深の位置精度を落とさずに電子測量原図を調製することが多くなっている。

また, GIS 利用の普及に伴い, 測線計画・他の業務用参考図の作成等電子測量原図調製以外の新たな利用方法も広まった。これらの取り組みが水

路測量担当官全体の電子海図や GIS・コンピュータマッピングに対する知識や技術レベルの底上げにつながった効用は大きいと考える。

電子測量原図作成システムは使用者の意見や不具合報告を随時反映して改善を行ってきたが、イントラネットを用いた情報交換・情報共有が大変有益であった。本稿でまとめた内容の多くはイントラネット上の海洋調査課技術担当サイトの Web ページや掲示板で見いだすことができる。とりわけ掲示板による情報交換は本システムの改善のみならずあらゆる利用者にとって参考となったと考えられる。このように、本庁・管区の水路測量に携わる職員全体の取り組みによって本システムは作り上げられたとって過言ではない。

#### 参 考 文 献

- 海上保安庁水路部沿岸調査課海図編集室電子海図担当,デジタル水路データのための IHO 転送基準 S-57 第 3 版(日本語訳),(1998)
- 沓名景義・坂戸直輝,新訂海図の知識,成山堂,407 ページ,(1996)
- 町田 聡,地理情報システム 入門&マスター,山海堂,178 ページ,(1994)
- 日本ユニシス株式会社・テラ株式会社,ENC のパソコンによる表示の調査研究報告書,29 ページ,(1996)
- 社団法人海洋調査協会,水路測量関係規則集,151 ページ,(2002)
- テラ株式会社,デジタル測量原図作成システム 運用マニュアル,23 ページ,(1999)
- テラ株式会社,デジタル測量原図作成システム 操作マニュアル,76 ページ,(1999)

# 海底地殻変動観測の現状と諸問題について

畝見潤一郎：航法測地室

## Overview of the seafloor geodetic observation from the aspect of practical operations

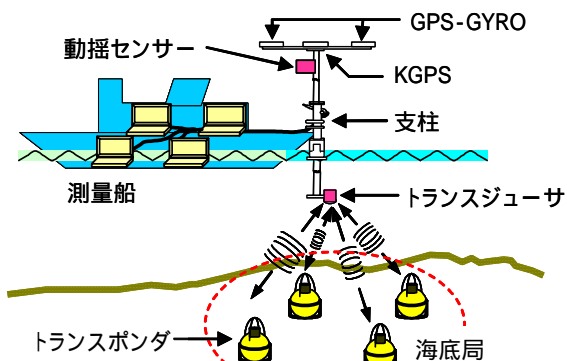
Junichiro UNEMI: Geodesy and Geodetic Office

### 1 はじめに

海底地殻変動観測は、平成 12 年度からはじまったプロジェクトで、キネマティック GPS により船の位置を精密に求める観測（以下「KGPS 測位」という）と、海底に設置したトランスポンダ 4 基から成る海底音響基準局（以下「海底局」という）と船との間の距離を音波によって測定する音響測距観測を行い、両者を組み合わせることによって誤差数 cm の精度内で海底局の位置を求めようとするものである（第 1 図）。そして、得られた海底局位置の変動から実際の海底面の動き（地殻歪）を検出することを目指している。

海底局は、日本海溝や南海トラフ沿いの水深 1000～2500m の海域及び特別観測点である三宅島西方海域に展開し、中型測量船「明洋」と「海洋」を用い年間を通して観測を行っている。

この観測では、誤差数 cm という高精度の成果を得ることが目標であるが、定常的にこの精度が得られているとはいえないのが現状である。その



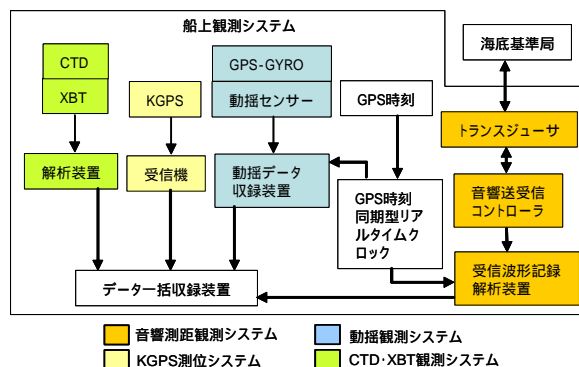
第 1 図 海底地殻変動観測システム。  
Fig.1 The seafloor geodetic system.

大きな原因は、GPS 測位や音速度に関連する問題に集約され、これらを解決するためにさまざまな実験を試みたり、ソフトの改良を重ねたりしている。また、これとは別に観測に使用する装置や機材などのハード面でも精度の向上を目指して試行錯誤を繰り返し、改良を重ねている。そのほか精度の向上には直結しないまでも作業効率や安全対策等さまざまな問題も抱えており、その解決に向け努力しているのが実情である。ソフト面については、これまでに浅田・矢吹(2001), 矢吹(2002), 藤田・矢吹(2003), 富山(2003)が紹介しているので、ここではソフト面を除いた諸問題について、海底地殻変動観測の全体像とともに紹介する。

### 2 船上観測システムについて

海底地殻変動観測を推進するため、測量船の船尾部とそれに続く観測準備室に観測機材や PC 等の観測装置を置き、第 2 図に示す船上での観測システムを構築している。

この観測システムは次のように細分化され、ネ



第 2 図 船上観測システム。  
Fig.2 Components of the on-board systems.

ネットワークを組むことによって1つのシステムを構成している。

音波を使ってトランスジューサ（音響送受波器）と海底局の距離を求める音響測距観測システム

KGPS用アンテナの位置を求めるKGPS測位システム

KGPS用アンテナとトランスジューサの位置関係を明確にする動揺観測システム

海中の音速度構造を求めるCTD及びXBT観測システム

次に、これらシステムを構成する装置と機材を船尾部と観測準備室に分けて紹介する。船尾部には、船尾ブルワークに取り付けた支柱の頂部中央に、KGPS 測位用の『GPS アンテナ』、その前後（船首尾方向）に方位測定用の『GPS アンテナ（GPS-GYRO）』、さらにアンテナの動揺を検出する『動揺センサー』、最下部には海底局と通信するための『トランスジューサ』を装備する。これらは ~ の各システムにおいてセンサーの役割を担っている（写真1）。

支柱は中折れ式で、音響測距観測時には一直線にしてトランスジューサを海中に突出させ、船が航走する際には下部を折りたたみ船尾に抱かせる構造にしている。この支柱は上部・中間・下部の3本の柱から成り、測量船への搭載時には分割されているが、船上ですべてを接続することにより全長8mの支柱に組み立てている。中間柱は最下端にヒンジ（屈曲部）を持ち、この部分の回転によって支柱が中折れする仕組みにしている。また、中間柱はハンドルを備えており、これを上下に操作することにより中間柱内をレバーが上下し、その先端部のピンが、ヒンジを固定し、また解除する仕掛けになっている。これによって支柱を自在に曲げ伸ばしすることが可能となる。

一方、観測準備室には、次に列挙する各種の装置を配置している。

に関しては、トランスジューサの送受信をコントロールする『音響送受信コントローラ』と受信信号をアナログからデジタルの波形データに変換

して記録する『受信波形記録解析装置』（以下、『波形装置』という）

に関しては、KGPSの受信機

に関しては、『GPS-GYRO』と『動揺センサー』からのデータを受ける受信機とそれを記録する『動揺データ収録装置』（以下、『動揺装置』という）

そのほか、GPS時刻よりシステムの時刻を管理する『GPS時刻同期型リアルタイムクロック』やすべてのデータを一括収録する『データ一括収録装置』等を備えている（写真2）。

### 3 観測の実際

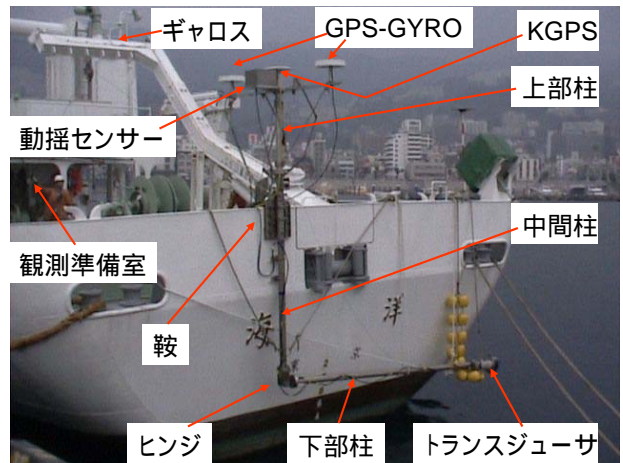


写真1 船尾ブルワークに設置した支柱。

Photo.1 The pole installed on the bulwark at the stern.



写真2 観測準備室内の観測装置。

Photo.2 On-board systems in the observation room.

### 3.1 海底局の新設

#### 3.1.1 設置点の決定

海底地殻変動観測を実施するには、あらかじめ海底に海底局を設置しなければならないが、設置点の決定にあたっては基本的に次の事項を条件としている。

海溝，トラフの内側であり，地殻歪を検出するに有意義な地点であること

トランスポンダが長期間安定した設置状態を保持するため，海底面が平坦であること

漁業（特に底引き網漁）の影響がないこと

海底電線が敷設されていないこと

船舶輻輳海域を避けること

しかしながら，海域によってはこれらの条件が十分に満足されない場合がある。平成 14 年度に設置した東海沖及び相模湾海底局の場合は，既設や計画中の海底電線が輻輳する海域にあたり，それらを避け上記及びを満足させるには非常に限られた場所しかなく，しかも電線に囲まれた狭隘なスペースに設置点を決めざるを得なかった。

また，本年度の潮岬沖海底局の場合，紀伊半島に接近して流れる黒潮と商船のコースを完全に回避することは不可能であったため，できる限りこれらを避けるという方針で設置点を決定した。通常の海域であれば設置点と投入点はほぼ一致すると考えているが，この海域では黒潮の流れに乗ったトランスポンダが投入点から離れた場所に着地することが懸念されたことから，流速に対するトランスポンダの流れ量を求める計算式（寄高，私信）から流速ごとの投入地点を決めた。投入したトランスポンダの作動確認時に，音響測距（波形）データとそのときの船位を取得し，後処理で概位を求めたところ，ほぼ設置予定地点に着地していることが確認できた。なお，この際設置地点が商船コースの最南端にかかったため水路通報室と協議し，NAVTEX 放送を実施した。

#### 3.1.2 設置作業

海底局の設置作業とは，海底局を構築するために 1 局につき 4 基のトランスポンダを測量船から

予定地点に投入する作業である。

このトランスポンダはミラー式と呼ばれるトランスポンダで，船上のトランスジューサから送信した信号を受信し，1.062s のディレイタイムの後に同じ波形の信号を返送するよう設計されている。実際にはトランスポンダごとにディレイタイムに若干の個体差があるため設置航海に先立ちディレイタイムを計測する必要がある。

洋上での設置作業は，まずマルチビーム音響測深機で予定海域の海底地形調査を実施し，設置点を最終的に決定する。この後トランスポンダを鉄枠の重錘にセットして作動確認を行ったのち，写真 3 のように巻揚げ機のワイヤで海中に吊り下げ，投入地点に到達した時点で切り離し，投下させる。なお，投入地点への移動は DGPS からの位置情報を利用している。



写真 3 トランスポンダの投入作業。

Photo.3 Installation of a transponder.

### 3.2 観測の準備

観測航海の前に毎回観測装置や機材を測量船に持ち込み，観測準備室に臨時に用意したテーブル上にセットする必要がある。また念のためにトランスジューサとアンテナを装置に仮接続し，システムが正常に作動するかどうかの確認テストを行っている。なお，装置や機材は，故障や事故等の不測の事態に備えて，すべて予備機を用意している。

船尾に設置する支柱については，まず準備作業

として出港後に支柱の中間柱と下部柱を接続し，上部柱にアンテナを，下部柱にトランスジューサをそれぞれ取り付け，配線を施したのち最終的な作動確認を行っておく．観測海域付近に到着後，トランスジューサを配した下側の柱を巻揚げ機とギャロス（油圧式クレーン）を使って船尾ブルワークの鞍に載せて固定し，次にアンテナのある上部柱を同様の方法で吊り上げ，下側の柱と接続することで1本の支柱に組み立てている．この作業は支柱の総重量が150kg以上もことから大変な危険がともなうものである．したがって写真4のように上乗り班はもちろんのこと手空きの乗組員総出の作業となる．



写真4 支柱の設置作業．

Photo.4 Installation of the pole.

### 3.3 観測

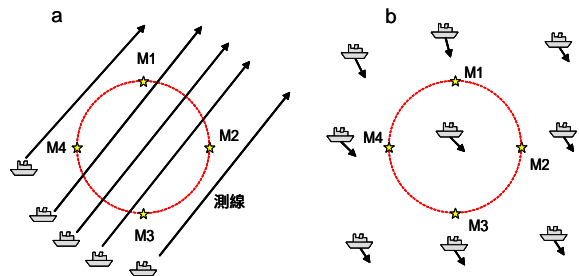
観測作業の流れは以下ようになる．まず海底局の中心付近でCTD観測を行ったのち，船を漂流移動させながらKGPS測位，音響測距観測，動揺観測を実施し，1日の最後にもう一度CTD観測を行う．なお，観測中は1時間毎にXBT観測を実施している．

トランスポンダは電池（リチウム電池）の消耗を防ぐため，トランスジューサから信号を送らなければ1~2時間でSleep状態になるように設計されている．そのため音響測距観測の前に海底局の中心付近に船を移動して，トランスジューサからWake Up信号を送って作動状態にする．

#### 3.3.1 音響測距観測

音響測距観測は，10kHzの音波信号（M系列のパルス信号）（富山，2003）を用いて行っている．海底に設置した4個のトランスポンダはM1~M4（M5の場合もある）のM系列信号に対応しており，『音響送受信コントローラ』が作るトリガー信号をスタート合図にトランスジューサから音波信号を送ると，それに対応したトランスポンダから受信信号と同じ波形の信号が送り返されてくる．これをトランスジューサで受け取り，『波形装置』内のA/D変換ボードによって，アナログデータからデジタルデータに変換後，音響波形データとして『波形装置』に収録している．収録したデータからは，トランスジューサと各局間の伝播時間が読み取れるが，これを後処理で距離に換算している（富山，2003）．

この観測は，基本的に海底局上の海面で船を漂流移動させながら行っており，1回の漂流移動を測線と称して，第3図aのように繰り返し何本もの測線観測を行うことでさまざまな方向からの音響測距データを取得している．ただし，潮や風任せの観測なので，狙いどおりには流れてくれず，測線ごとに流れが極端に変わる海域もあって漂流開始点を決定するのに苦心する場面も多々ある．データは測線ごとに収録するので，1測線が終了した時点で，柱を折り曲げ航走し，次の測線に移動し，再び柱を伸ばし観測を行うことを繰り返している．



第3図 測線観測と定点観測．

Fig.3 Drifting observations (a) and Observations migrating around the seafloor stations (b).

海底局を構成するトランスポンダは、当該海域の水深を直径とする円周上に東西南北の配置で海底に設置しており、1 測線の距離は、その直径のおおむね 2 倍を目安としている。これは、測線の距離があまり長くなると、測線の端では海底局から遠くなり、音速度の誤差の影響が増大してしまうことによる。

流れが小さく船の漂流速度が小さい場合には、海底局をとりまく 8 点及び中心点に各 20 分間前後停船し、第 3 図 b で示す定点観測を行っているが、この方法のメリットは 1 日の観測時間があらかじめ推定できることである。

漂流観測中はプロペラシャフトからプロペラを離脱させてプロペラ回転を止めることにより、音波の受信を妨げる騒音や気泡の発生を防止している。

### 3.3.2 KGPS 測位

KGPS 測位は、陸上の GPS 局を基準とした船上の GPS アンテナの時々刻々における位置を求めるものである。船上の GPS 局では 0.5 秒サンプリングを、陸上 GPS 局の場合は当部が運用する釜石、塩釜、塩屋崎、銚子、横須賀、真鶴、南伊豆、伊豆大島、神津島、三宅島、八丈島、下里の各 GPS 局の中から観測海域に対応する局を選択し、1 秒サンプリングを行っている。このほか交通部の DGPS データ（サンプリング間隔 10 秒）や国土地理院の電子基準点データ（サンプリング間隔 1 秒）も収集し補助データとしている。なお、当部が運用する局は西日本では下里局のみのため、この方面の海域で観測を行う場合は、これ以外にも臨時に陸上局を設けている。

当部が運用する GPS 局のデータ収録には、日立造船情報システム(株)製の GARD (GPS Automatic Remote Data processing)と呼ばれるソフトウェアを搭載した GPS データ収録・解析装置を使っている。通常、この GPS 局では 30 秒間隔でデータを収録・解析し、下里を基点とした地殻変動を監視しているが、海底地殻変動観測の陸上局とする場合は、サンプリング間隔を 1 秒に

切り替えている。KGPS 測位は、データが途切れると測位精度が悪くなるため確実にデータ取得しなければならないが、データ収録・解析装置や陸上 GPS 局にトラブルが発生することがあるため海上観測が予定されている場合は、休日当番を決めて職員を配置し、確実な収録に努めている。

### 3.3.3 動揺観測

海底地殻変動観測システムでは、支柱上部の KGPS 用アンテナによる位置測定と支柱下部のトランスジューサによる海底局との距離計測を組み合わせることで海底局の位置を求めているが、アンテナとトランスジューサは 8m 離れており、かつ船体動揺により、船体に固定された支柱も刻々と変化していることから、この位置関係を明確にし、アンテナの位置からトランスジューサの位置を算出する必要がある。そこで、『動揺センサー』と『GPS-GYRO』から送られてくるアンテナの刻々の動揺(傾斜)データと方位データを『動揺装置』に収録している。この動揺観測は音響測距観測と並行して測線ごとに行っている。

### 3.3.4 CTD 観測と XBT 観測

CTD 観測と XBT 観測は、ともに海中の音速度構造を把握するために行っており、前者は水温・塩分を後者は水温を観測している。

CTD 観測は、ギャロスを使い測定器を海中に投入しているが、ギャロスを船尾に振り出すとき KGPS 用アンテナがその陰になるので、KGPS の連続測位中には CTD 観測を行うことは好ましくない。そこで、CTD 観測は音響測距観測の前後に実施することとし、その間を複数回の XBT 観測によって補填し、刻々と変化する海水中の水温を把握している。

## 4 問題点とその対応

### 4.1 支柱の改良

支柱は 3 つの柱から構成されていることは前述したが、初代の支柱(写真 5a)は、中間柱を鉄製

のコの字型とし、下部柱はアルミ合金のパイプとしていた。この支柱は、現在のものよりも軽量で扱いが容易であったが、波浪によってしなりが生じるという欠点があった。KGPS 用アンテナとトランスジューサは 1 本の堅牢な支柱で固定されることが理想であるにもかかわらず、しなることによって両者の位置関係が不明瞭となり、これが誤差となって高い解析精度が得られなくなるわけである。

そこで、平成 13 年 11 月にアンテナとトランスジューサ間にワイヤを張り、途中に傾斜計を配置して支柱の中心軸に対するズレ量を検出する方法を試みることにした。

さらに、平成 14 年 8 月には支柱を堅牢なものにするため、中間柱をステンレス製のパイプにすることで強化し、下部柱（材質は初代と同じ）はその肉厚を増し、パイプ径を太くする改良を行った(写真 5b)。これによりしなりは改善されたが、その分ヒンジの回転と固定をつかさどるピンに波浪による圧力が集中し、その結果ピンが変形して抜き差しができなくなってしまった。原因はピンが細かった(20mm)ため、10 月になってヒンジを改良し、ピンの径を 2 倍にしたところこの問題は解消した。ただ、ピンを太くしたことにより必然的にヒンジが大きくなり、その分重量も増大した(写真 6)。

この時の改良ではヒンジの回転角度も当初の 90 度から 120 度まで回転できるように変更した。航走時には支柱を折りたたむ必要があるが、90 度程度では船尾に波浪を受けたとき、下部柱先端のトランスジューサがダメージを受けるおそれがあり、これまでは 100 km 近く航走する次の局への移動や荒天航海時には支柱を完全に撤去して船内に取り込まなければならなかった。この設置や撤去の作業を洋上で繰り返すことは大変な苦勞であったが、この改良により支柱の撤去作業をせず長距離の航走が可能になったことで負担の軽減が図られた。

これらの改良の結果、支柱全体の重量が増し、取り扱いが困難になるというデメリットが発生したが、精度が向上したことは何ものにも代えられ

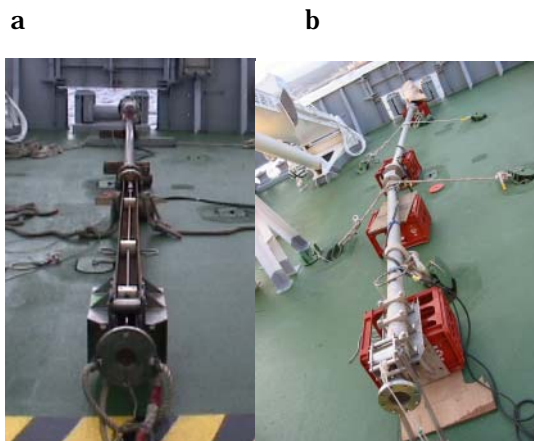


写真 5 旧型支柱と改良型支柱。

Photo.5 The old-type pole (a) and The improved pole (b).



写真 6 改良型のヒンジ。

Photo.6 The improved hinge.

ない。なお、重くなった支柱を支える鞍もこの時点で強固なものに新換えている。

後で詳細に述べるがこの改良時には船尾に鞍を載せる台座を常設し、さらに U ボルトで支柱の一部を船体に固定する方法を取り入れた。また、以上の改良によって、しなりは格段に改善されたことから、傾斜計を撤去した。

なお、支柱の設置・撤去には人手を要し、観測時には測線ごとに人力で支柱の曲げ伸ばしを行わなければならないことから、これを機械化する方法も検討していた。例えば、甲板上に支柱を載せたベッドを置きベッドごと油圧で起こしていく方法、ブルワークに支点を設けこれを中心に支柱を左右に回転させる方法、さらに油圧で垂直方向にスライドさせる方法などさまざまなアイデアが出たが、油圧を使うと装置が大掛かりになったり、支柱を横にしたときのアンテナを備える上部支柱

の始末に窮したりで、すべて廃案になってしまった。

結局ブルワーク固定型の支柱方式を踏襲している訳だが、さらに重量を増やせば設置や撤去作業が今以上に困難になるほかブルワークやギャロスが耐え切れなくなるおそれがあり、この方式も細部の修正を除いて、このあたりが改良の限界ではないかと思われる。

#### 4.2 データ収録装置の変遷

前述の支柱のほか装置についても改良を重ねており、その改良点はデータ収録装置である『動揺装置』と『波形装置』の時刻をできるだけ正確に合わせる（時刻同期）ことのほかシステムのスリム化を図ることであった。

音響測距観測では膨大な量の音響波形データを取得するが、その1個1個の波形データにつき、KGPS測位データと動揺データを対応付ける必要がある。『動揺装置』には動揺データの他にトリガーを発信したGPS時刻が記録されるので、KGPS測位データと動揺データの対応付けは容易である。しかし、波形データには1PPS信号しか記録されないため対応付けが困難であった。そこで、当初は『動揺装置』のトリガー発信時刻を『波形装置』に伝えログデータとして記録させることにより、時刻の共有を図っていた。これには両装置の時計が同期している必要があり、その時刻同期の精度向上を求めて改良を重ねてきた。

初代のシステムでは、単体で備えていた『GPS時刻受信機』が常時GPS時刻を受信しており、トリガーが発生した時にその時刻を『動揺装置』に配信し、さらにLANで『波形装置』に送り、『波形装置』はこれをログデータとして記録していた。

この時の『動揺装置』と『波形装置』との時刻同期は両者が持つそれぞれのパソコン時計で行っていたが、両者の精密な時計合わせが困難なことやパソコンの個性でズレが生じてくることから、平成14年8月に『GPS時刻受信機』を廃止し、これに替わるボードを『動揺装置』内に組み込んで直接GPS時刻を受けるようにした。トリガー

発信時刻を『波形装置』へ伝達する方法は、初代と同様であったが、観測前に両装置のパソコン時計を一致させるための時刻合せソフトや1分ごとに両装置のパソコン時計を照合するソフトを導入し、時刻同期の精度向上を図った。この時の改良で、『音響送受信コントローラ』の作動を制御するパソコンを廃止し、ボードとして『動揺装置』の中に格納することでシステム全体をスリム化した。また、『波形装置』が経年疲労で観測中頻繁にフリーズするようになっていたことから、あわせてこれの更新も行った。

平成15年に入り、さらなる同期精度の向上を図るため、基準信号をルビジウム発信器とし、GPS時刻に同期することができる『GPS時刻同期型リアルタイムクロック』を導入し、両装置に直接時刻信号を送ることで時刻合せを行うとともにトリガー発信時刻も同時に発信することにした。ルビジウム発振器はGPS時計に同期させるのに十分な精度を持っているため、GPSとの時刻合わせは、当日の観測開始前に1度行うことで高い精度を保持できるようになった。

また、波形データをアナログからデジタルに変換する際、これまではそのサンプリングタイムを単体の『A/D変換器』が内蔵する水晶発信器で管理し、変換したデジタルデータを波形装置に送っていたが、水晶発信器は温度変化に弱く、発振も不安定であるため、『波形装置』内にA/D変換ボードを組み込み、直接ルビジウムが発する安定した周波数を受けることで変換精度を格段に向上させることができた。この装置は平成15年10月から本格使用となったが、この改良にともなって、単体で装備していた『A/D変換器』を廃止し、新たに『波形装置』内にA/D変換ボードとして組み込むとともに、『動揺装置』から『音響送受信コントローラ』の作動制御ソフトを移設した。また、上記の変更によって『動揺装置』は動揺データ収録専用装置となった。

その他、KGPS測位には、当初Trimble4000受信機を使用していたが、新機種の登場にともない精度比較等の試験期間を経て平成15年から5700

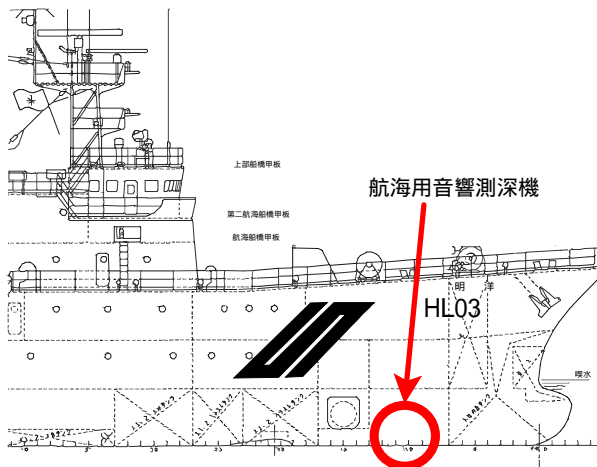
受信機に切り替えている。

これらの装置はすべて精密機器であるが観測準備室を作業場に行っているため、塩害、高温（夏季及び機関室の熱）、湿度、ほこりに曝され、劣悪な環境下に置かれている。また、観測行動ごとの搬入・搬出も装置に与えるダメージが大きく、いずれは観測室に常設したいと考えている。

### 4.3 船底装備等の検討

船底装備の検討は、支柱のしなりに苦渋していた初代支柱時代の平成 13 年後半から 14 年前半にかけて行ったものである。これは測量船「明洋」の提案を発端として「明洋」を対象にはじめたもので、しなりの除去が最大の目的ではあったが、その他にも支柱の設置・撤去作業、煩雑な測線ごとの支柱の曲げ伸ばし作業からの開放や任意の時間に CTD 観測を行うことなどを目的としてトランスジューサを船底から出し入れし、その直上のオープンスペースに GPS アンテナを置き、観測機器は観測室に備え付ける方法を模索した。

測量船の船底部は、燃料タンクや清水タンク等の各種タンクで覆われているが、船首部船底にただ 1 箇所の空所区画がある。そして、この区画に設備されている航海用音響測深機（第 4 図）のセンサー部を出し入れする貫通孔を利用してトランスジューサを上下させることを考えた。その場合、遠隔操作が可能な油圧式の装置であること、マルチパスの影響を避さけるため、トランスジューサ



第 4 図 測量船「明洋」の船首部。

Fig. 4 Sketch of the bow of the vessel "MEIYO".

を船底から 1.5m 程度を目安に突出（各海底局から帰ってきた音波が直接波か船底で反射した波かを識別できるだけの距離が必要）できること、トランスジューサの交換が船内で可能なことなどを条件として検討したが、以上の条件を満たす装置は大規模なものになり、空所区画のみでは納まらず、上方の甲板までも貫通させなければならないことがわかった。

一方、GPS アンテナの設置箇所は、アンテナとトランスジューサを鉛直線上に配置する必要から必然的に船橋前面の前部甲板上となるが、船橋構造物が近接して存在することから、GPS の受信状態を安定させるためにはかなりの高さを有し、かつしなりの生じないポールまたは櫓を設置してその頂点にアンテナを置かなければならず、そうすると操舵室からの視界の妨げ、及び出入港作業の障害になるので常設ではなく、取り外し可能な設備にする必要が生じた。

さらに深刻な問題として、GPS アンテナ、船体、船底から突出させたトランスジューサがそれぞれ独自の動きをすることが懸念され、その場合最上部と最下部の位置関係をどのように検出するかが難題であった。

以上の検討を造船所などの意見も交えて行ったが、既存の船にわれわれが要求する条件を満たすことは困難であるとの結論を得た。

船底装備と同時進行で「海洋」から提案のあった方法の検討も進めた。これは船尾ブルワークにボルトを通す穴をあけ、U ボルトで支柱を固定し、中間柱だけでもしなりを減少させようというものだが、この案をさらに発展させて、鞍を載せる台座をブルワークに溶接留めで常設し、台座面に窪みを付け、その窪みを利用して台座に鞍をボルト締めで固定することにした(写真 7)。その理由は、支柱にかかる波浪の圧力で動かないはずの鞍が動くことがわかったからで、平成 14 月 7 月のドックでこの工事を行った。この時期は堅牢な 2 代目支柱を作成していた時期でもあり、両者を使用することによって観測データの品質は格段に向上した。この結果をもって、「明洋」にも同年 11 月に

同様の処置を施し、今日に至っている。

#### 4.4 作業効率の検討

平成13年から15年までの行動実績をもとに入港日、回航日、基地外停泊日を除いた年間行動日数と観測実施日数から割り出した観測達成率は約60%である。つまり、40%が荒天による観測不能日であり、決して作業効率がよいとはいえない状況下にある。

ここでいう荒天とは、船体動揺が激しくなることによってデータの品質が悪化する状態、波浪で支柱が耐えられなくなる状態、甲板作業が危険になる状態であり、これを打開するには中型測量船より時化に強い大型測量船を用いることも考えられる。しかし、船が大きくなれば喫水も深くなり、船体構造物も大きくなるので今以上に支柱を長くしなければならない。すると、その分しなりも大きくなり、より堅牢にする必要が生じて一層大掛かりな装置となってしまう。そのような装置を船尾ブルワークに設置する作業は困難を極めるばかりか、ブルワークにかかる負担も大きくなり、補強工事も必要となるだろう。よって、現支柱方式を大型船に採用するのは困難と言わざるを得ない。

また、船上での観測を現在の昼間のみから24時間体制にすることにより観測の機会を増やすことも選択肢としては考えられるが、そのためには

a

b



写真7 常設した台座と台座上の鞍。

Photo.7 The permanent base of the saddle (a) and The saddle installed on the bulwark (b).

上乗りを増員し、当直交替制勤務にする必要が生じるものの人的に余裕がないのが現状である。

#### 5 おわりに

ここまで触れてきたようにこのプロジェクトはさまざまな問題を抱えているが、この現実を直視し、与えられた環境の中で今後とも知恵を出し、試行錯誤を繰り返しながら、より安全で合理的で精度の高いシステムへと改良を重ね、良質なデータの取得に努めていきたい。

#### 参考文献

- 浅田昭，矢吹哲一郎：熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化，地学雑誌，**110**，529-543，(2001)
- 矢吹哲一郎：海底地殻変動観測を目指した音響技術開発，水路部研究報告，**38**，47-58，(2002)
- 藤田雅之，矢吹哲一郎：海底地殻変動観測におけるK-GPS解析結果の評価手法について，海洋情報部技報，**21**，62-66，(2003)
- 富山新一：海底地殻変動観測における音響解析，海洋情報部技報，**21**，67-72，(2003)

## 海底地殻変動観測における海中音速誤差の局位置への影響について

佐藤まりこ，藤田雅之：航法測地室

### Effects of sound velocity profiles in the seafloor geodetic observation

Mariko SATO and Masayuki FUJITA: Geodesy and Geophysics Office

#### 1 はじめに

海上保安庁海洋情報部は，東京大学生産技術研究所と共同で海底の地殻の動きを検出する海底地殻変動システムを開発し，平成 12 年度から観測を行っている（浅田・矢吹，2001）．このシステムは，長基線キネマティック GPS（KGPS）測位と音響測距を組み合わせ，海底に設置した基準局（海底局）の位置を船を介して精密に測定しようとするものであり（第 1 図），これまでに日本海溝陸棚斜面や三宅島周辺海域，東海沖など十数箇所に海底局を設置し，年に数回の観測を実施している．

観測を進める中で，様々な観測技術や解析上の問題点が顕わになり，その都度改良を加え，センチメートルオーダーの精度の観測を目指して日々努力しているところである（例えば，畝見，2004）．

海底地殻変動観測において，海底局の位置決定に大きな誤差を与えられ考えられる主な要因として，海中の音速構造と長基線 KGPS 測位の不安定

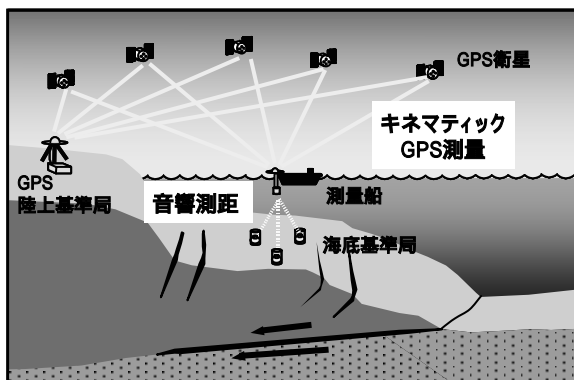
性が挙げられる．このうち，後者の KGPS 測位の不安定性については，藤田・矢吹（2003）等により不安定になる原因や対処方法についての研究が鋭意進められているので，ここではもう一つの誤差要因である海中の音速構造に着目することとする．

海中の音速構造は，音響測距による音波の伝播時間から船上局と海底局との間の距離を求めるのに必要不可欠であり，精密に海底局の位置を決定するためには，高精度に海中の音速構造を把握する必要がある．そのため，観測時には，CTD 観測や XBT 観測を行い，海中の音速構造の把握に努めている．しかしながら，海況は空間的にも時間的にも絶えず変化しており，観測回数や精度の面から見ても海中の音速構造を十分満足する精度で把握することは非常に難しい．

そこで，本稿では，このような正確に把握することができない海中の音速構造について，実際の観測で含まれ得る誤差の量を推定する．そして，それらの音速誤差が海底局の位置決定へ与える影響を取得データを用いた数値的なシミュレーションにより求め，音速構造の誤差に対する対処方法を提示する．

#### 2 海中の音速構造の観測誤差について

海中の音速度を測定する方法には，音速度計により直接音速度を測定する方法や CTD 観測，XCTD 観測，XBT 観測による水温，塩分，深度の値を Wilson（1960）や Del Grosso and Mader（1974）などの音速度計算式を用いて変換する方法がある．我々のデータ解析では，後者の音速度



第 1 図 海底地殻変動観測の概念図．

Fig.1 Schematic image of the seafloor geodetic observation system.

第 1 表 CTD, XCTD, XBT の測定精度 (カタログ値).

Table.1 Measurement accuracy of CTD, XCTD and XBT.

	CTD	XCTD	XBT
Temperature	0.01	0.02	0.2
Conductivity	0.001S/m	0.003S/m	-
Depth (Pressure)	0.15%fs	2%fs	2%fs

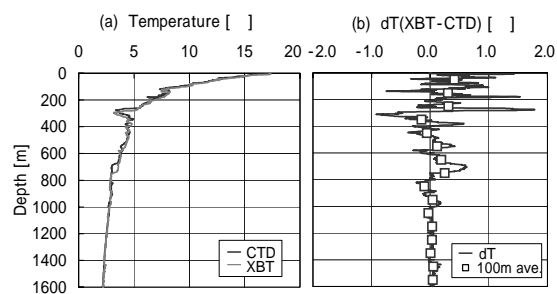
計算式による方法を採用している.

CTD, XCTD, XBT の測定精度 (カタログ値) を第 1 表に示す. 表に示した CTD は, 海底地殻変動観測で通常使用している Sea-Bird 社製の SBE-19 で, XCTD 及び XBT は鶴見精機製のものである. 第 1 表より, 最も精度良く測定できるのは CTD であるので, 精密に海底局の位置決定を行うためにはできるだけ多くの CTD 観測を行うことが望ましい.ところが, 実際の観測では, CTD 観測を行う際に船のギャロスがキネマティック GPS 用のアンテナを横切り, GPS データを途切れさせてしまうため, CTD 観測と KGPS 観測を並行して行うことは好ましくない.そのため, 観測では基本的に一日の観測の前後に CTD 観測を行い, その間の水温の日変化を捉えるため約 1 時間ごとに XBT 観測を行っている.そして, 解析では XBT 観測の水温に CTD 観測の塩分を補って音速度を求めている.しかし, XBT の測定精度は第 1 表を見て明らかのように CTD に比べて一桁劣っている.一方, XCTD は水温の測定精度が XBT に比べてかなり良いのに加えて塩分の値も得ることができ, また, ギャロスを使用する必要もないので, XCTD 観測を行うことができれば良いが, XCTD は XBT に比べてかなり高価であるため, 通常の実地観測では使用していない.そこで, 実際の観測データによる XBT の精度検証のため, 各海域で一行動に一度 CTD・XBT 比較観測を行っている.その結果の一例を以下に示す.

第 2 図は 2002 年 7 月 4 日に釜石沖海底基準点

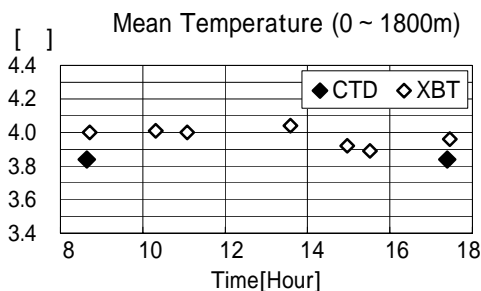
付近で実施した CTD・XBT 比較観測による温度プロファイルと CTD 観測値と XBT 観測値の差である.観測では, ほぼ同時刻に両装置を投入した. CTD 観測においてはダウンキャストデータを用いた.第 2 図(a)より, XBT 観測による温度プロファイルはだいたいの形状は捉えられているものの CTD 観測による温度プロファイルとのずれが確認できる.このずれは, プロファイルの形状に CTD と XBT とで同様の凹凸が見られることから, XBT 観測の水温の測定誤差というよりは深度の測定誤差が大きいと思われる.そして, その原因としては, XBT の着水時刻の読み取り誤差や時刻を深度に変換する際の係数の誤差が考えられる.また, XBT 観測による深度の測定値は CTD 観測による深度に比べて深く観測される傾向があり, これは他の比較観測結果でも同様である.このため, 第 2 図(b)の各水深における水温の差を見ると, CTD 観測値に対して XBT 観測値は全体的に温度が高く(すなわち音速が大きくなる)なっていて, その量は 0~200m の浅いところで約 0.5 (音速度で約 1.0m/s), 1000m 以深では両者の差はほとんど見られない.

次に, 同日に行った全ての CTD 観測, XBT 観測による一日の平均水温(海面から海底付近までの水温の平均値)の変化を第 3 図に示す.2 度の CTD・XBT 比較観測で, XBT 観測値は CTD 観測



第 2 図 CTD・XBT 比較観測結果 (2002 年 7 月 4 日, 釜石沖): CTD 観測, XBT 観測による温度プロファイル(a)とその差(b).

Fig.2 Temperature profiles obtained by CTD and XBT measurement (a) and their difference (b).



第 3 図 1 日の平均水温の変化 (2002 年 7 月 4 日, 釜石沖).

Fig.3 Time variation in the mean temperature at Off-Kamaishi during Jul. 4, 2002.

値より平均水温で 0.1 ~ 0.2 高く測定されている。これは、約 0.2 ~ 0.5m/s の音速度に相当する。また、7 回実施した XBT 観測の結果を見ると、一日を通して平均水温はほとんど変化がないことから、この日の海況は一日を通して非常に安定していたと推測できる。

これらより、XBT 観測による水温を用いて音速度を求めた場合、海面から海底付近までの平均水温で 0.1 ~ 0.2，平均音速で 0.2 ~ 0.5m/s 程度の誤差が含まれている可能性があると考えられる。そして、その傾向は、XBT 観測値が CTD 観測値に対して温度が高い(音速が大きい)。しかし、その一方で、XBT 観測は CTD 観測に比べて測定精度は劣るものの朝夕の CTD 観測だけでは知り得ない一日の大まかな海況の変化を捉えており、海況について知るための貴重な客観的資料となり得るということを強調しておく。

以下では、このような音速構造の誤差が海底局の位置決定に与える影響を実際の観測データを使用して数値的に求め、議論する。

### 3 海中音速誤差の局位置への影響評価

#### (1) 使用した観測データと解析方法

使用した観測データは、設置地点が比較的浅い三宅島 A 基準点 (Near-Miyakejima-A, 水深約 350m) と深い釜石沖基準点 (Off-Kamaishi, 水深約 2300m) で取得したデータである(第 2 表)。

第 2 表 本稿で使用した観測データ。

Table.2 Data summary used in this study.

海底基準点名	三宅島西方A	釜石沖
水深	約350m	約2300m
観測時期	2001年4月	2002年7月
観測日数	1日	5日
データ数	1122	4300

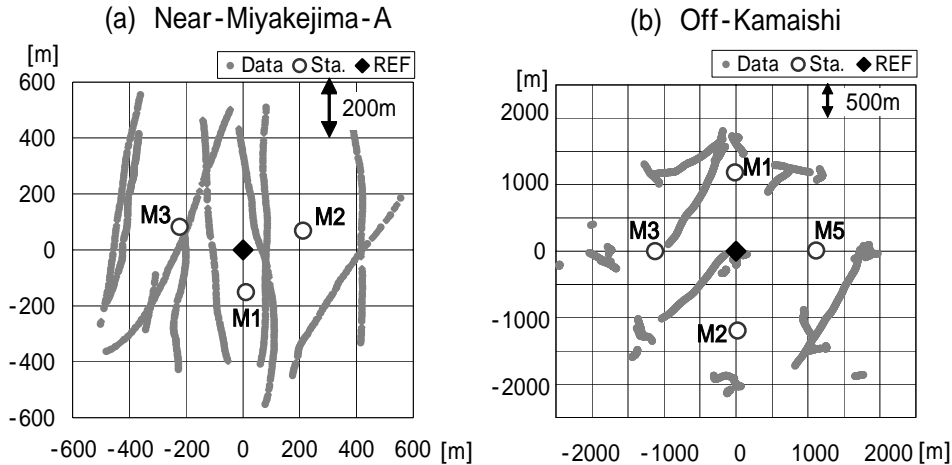


第 4 図 本稿で使用した海底基準点の配置図。

Fig.4 The locations of the seafloor geodetic points used in this study.

それぞれの基準点の位置を第 4 図、海底局とデータ取得位置を第 5 図に示す。両データとも比較的空間的にバランスの取れたデータである。

海底局の局位置推定は海洋情報部開発ソフトウェア SGOBS Ver.2.2 により行った。このソフトウェアは、本号別稿の藤田他 (2004) で紹介されている SGOBS の旧バージョンであり、これについては後で言及する。局位置解析で使用した音響測距解析結果は、東京大学生産技術研究所の浅田教授が作成したソフトウェアによる結果、KGPS 解析結果は、NASA/GSFC で開発されたソフトウェア IT (Colombo, 1998) による結果である。また、初期値として与えた音速度プロファイルは、観測時間に最も近い時刻に測定した XBT 観測の水温の値に、朝夕の CTD 観測で得られた塩分の値を観測時刻に合わせて線形補間した値を補って、Del Grosso の音速度計算式により音速度に変換



第 5 図 海底局と取得データの配置：(a)三宅島西方 A，(b)釜石沖。

Fig.5 Locations of the seafloor geodetic stations and the obtained data at Near-Miyakejima-A (a) and Off Kamaishi (b).

したもので、水深 1m ごとの音速度プロファイルである。局位置解析では、このようにして得られた音速度プロファイルを固定して解析を行った。

(2) 影響の評価方法と誤差モデル

海中の音速構造が海底局の位置決定に与える影響の評価は、CTD 観測と XBT 観測から得られた音速度プロファイルに次の 3 種類の誤差 (第 6 図) を与えて海底局の位置を求め、誤差を与えていないときの海底局の位置と比較することにより行った。

バイアス誤差

音速度プロファイルに深さ方向に一定のバイアス誤差 (+0.5m/s, +1.0m/s) を与える。

深さに対して線形の誤差

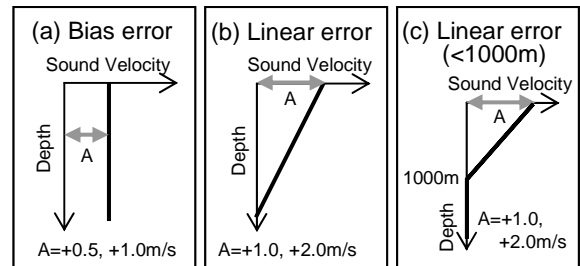
音速度プロファイルに深さ方向の線形誤差 (海面で +1.0m/s, +2.0m/s, 海底で 0m/s となるような誤差) を与える。

1000m 以浅の深さに対して線形の誤差

音速度プロファイルの 1000m/s 以浅に対して深さ方向の線形誤差 (海面で +1.0m/s, +2.0m/s, 水深 1000m で 0m/s となるような誤差) を与える。

(3) 局位置推定結果

局位置推定結果を第 7 図に示す。図は、誤差を



第 6 図 音速構造に与えた誤差モデル：(a)バイアス誤差，(b)線形誤差，(c)線形誤差(<1000m)。

Fig.6 Error models given to the sound velocity structures: (a) Bias error, (b) Linear error, (c) Linear error (<1000m).

与えていない時の位置を基準として、それぞれの誤差を与えた時に求められた位置をプロットしており、白抜き ( ) は各海底局の推定位置、黒丸 ( ) は 3 局又は 4 局の海底局の中心位置 (座標平均値) を示す。音速の誤差が海底局の推定位置へ及ぼす影響について図から分かったことを以下に記す。

全ての誤差モデルにおいて、音速の誤差は鉛直方向の位置決定に顕著な影響を与える。

音速構造に 0.5m/s のバイアス誤差があるとすると、浅い三宅島西方 A で -0.2m, 深い釜石沖では -1.0m の高さの誤差が生じる。

音速の誤差は、鉛直方向だけでなく各海底局の水平位置にも有意な推定誤差を与える。

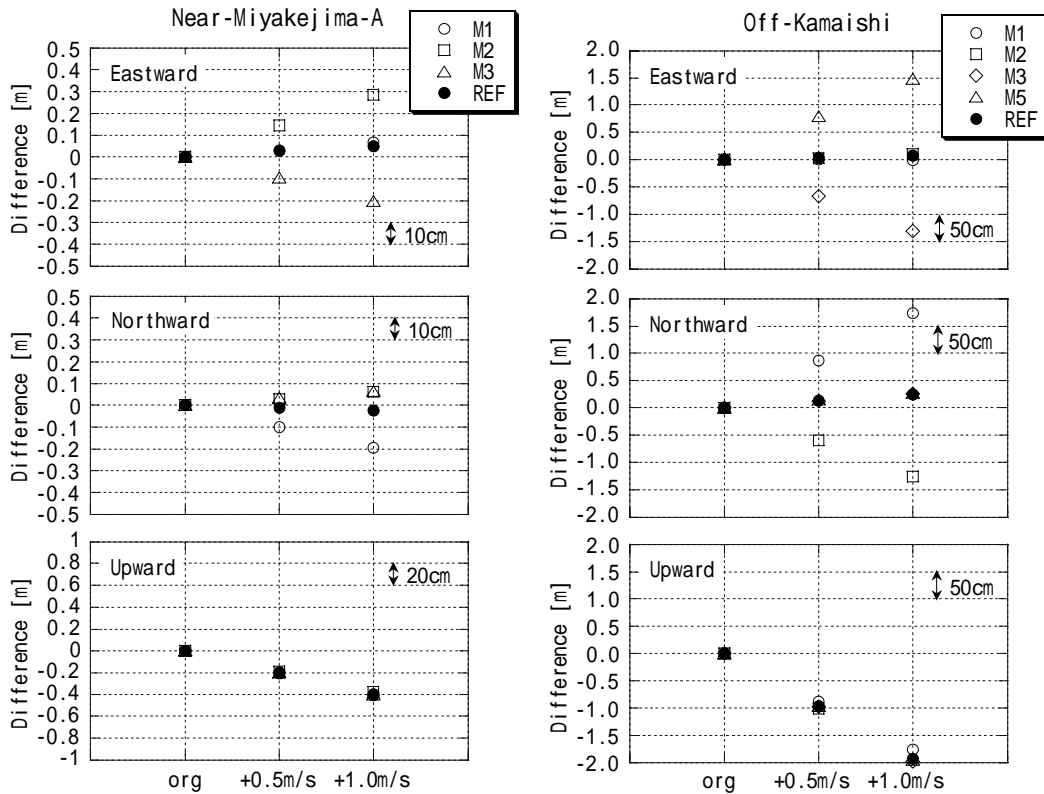
海底局の水平位置に与える誤差の量は、鉛直方向の誤差に比べて小さいものの三宅島西方 A で 0.2m、釜石沖で 0.5 ~ 1.0m である (0.5m/s のバイアス誤差の場合)。ただし、その量は後に示すようにデータ取得配置の状況により異なる。

各海底局の推定位置は、東西方向又は南北方向のどちらかに音速誤差の影響を受けやすく、それと直交する方向へはほとんど影響を受けない。

これは、各海底局からデータの配置を見た場合、必ず東西又は南北のどちらかに偏っているため、音速誤差がその偏った方向の位置決定に影響を及ぼしているということを示す。例えば、三宅島西方 A の M1 局は、第 5 図(a)より海底局の中心

位置に対して南側に位置しており、この海底局から見たデータ配置は、東西にはバランスが良いが、南北は北側にデータが多く、南側にデータが少ない。この時、音速構造にバイアス誤差が 0.5m/s あるとすると M1 局の推定位置は、データのバランスが良い東西方向は誤差がない時と比べてほとんど変化していないが、データが偏っている南北方向は約 10cm 南にずれている。このように、各海底局から見たデータ配置は必ず東西又は南北に偏っているため、その方向に音速構造の誤差の影響を受けてしまうことは避けられない。そして、水平位置に与える誤差の量は、データ配置が偏っているほど大きくなる。

(a) Bias Error



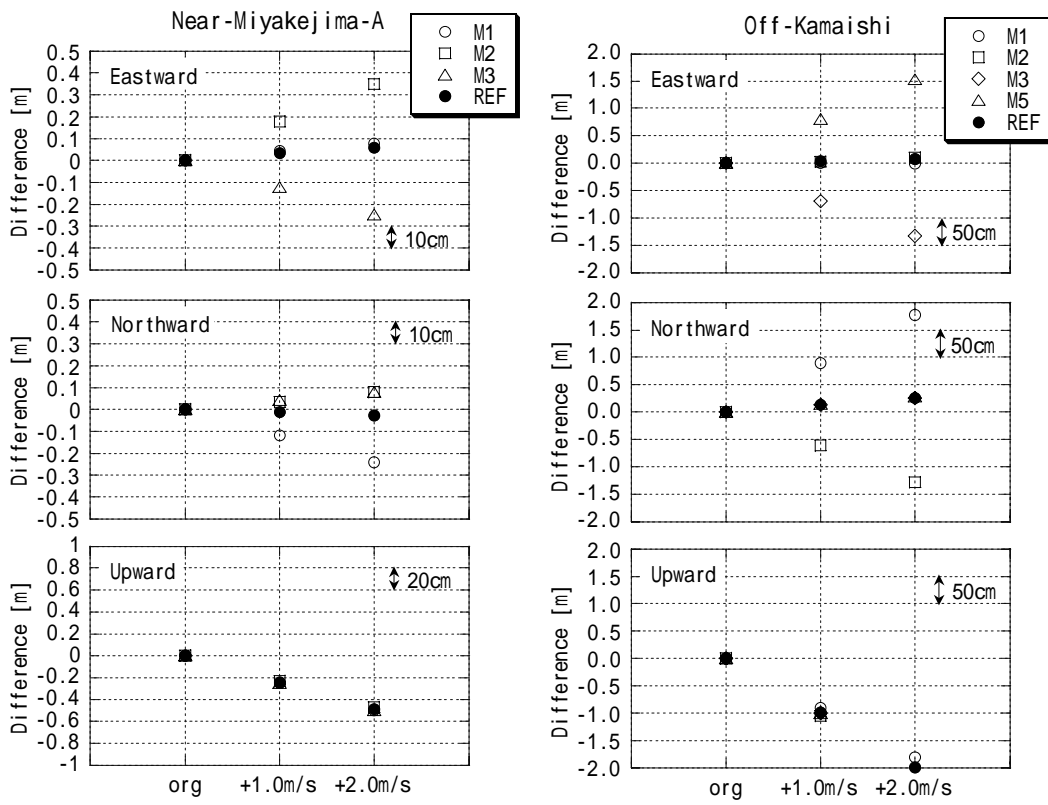
第 7 図 局位置推定結果。誤差を与えていない時の推定位置を基準として誤差を与えた時の推定位置をプロットしている (左: 三宅島西方 A, 右: 釜石沖): (a)バイアス誤差, (b)線形誤差, (c)線形誤差 (<1000m)。

○, □, △, ◇, ● : 各海底局の位置推定結果      ● : 3局又は4局の海底局の平均位置(REF)

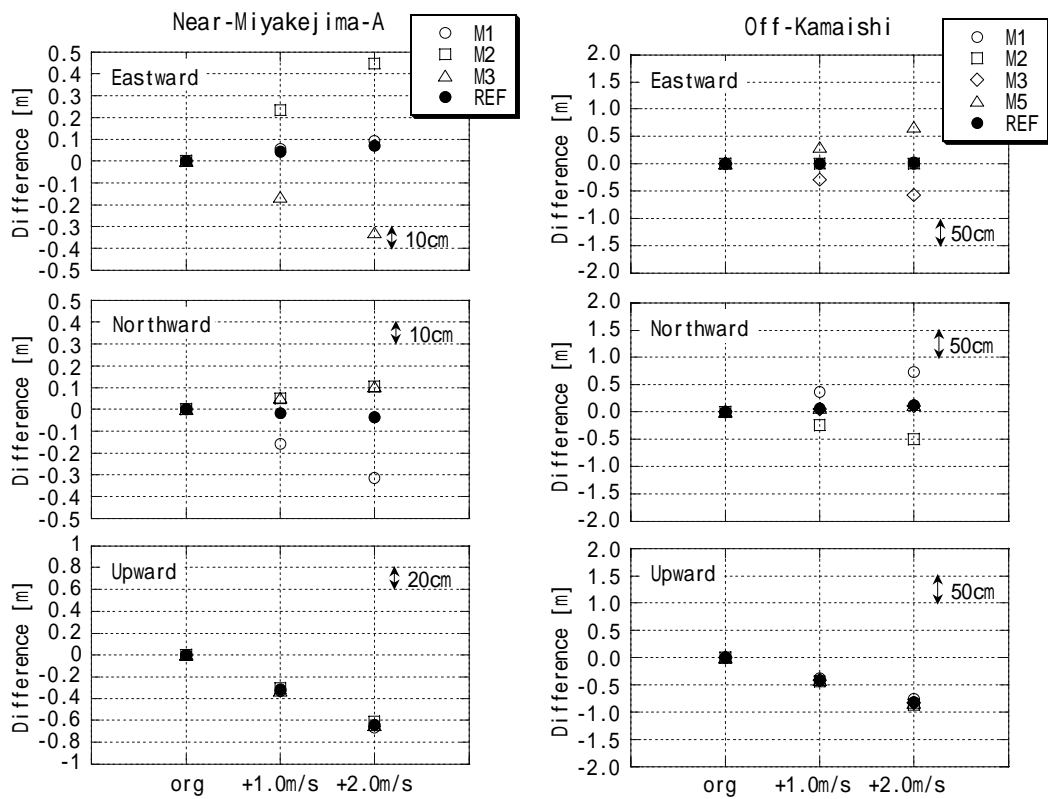
Fig.7 The differences between the original positions and the positions estimated using sound velocity structures including the given errors at Near-Miyakejima-A (Left) and Off-Kamaishi (Right): (a) bias error; (b) Linear error; (c) Linear error (<1000m).

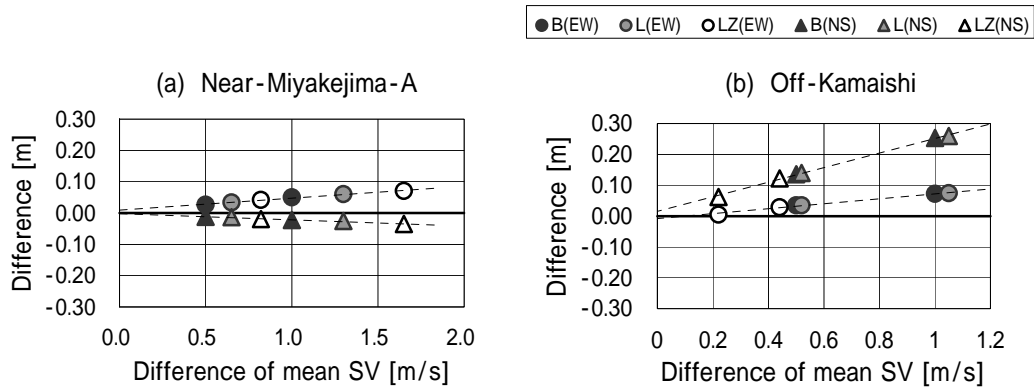
○, □, △, ◇, ● : the difference of each seafloor station      ● : the difference of the mean position (REF)

(b) Linear Error



(c) Linear Error (<1000m)





第 8 図 平均音速の変化量と推定された平均位置との関係：(a)三宅島西方 A，(b)釜石沖．

B：バイアス誤差，L：線形誤差，LZ：線形誤差 (<1000m)．

Fig.8 The dependency of the deviation of the estimated position of REF on the mean sound velocity at Near-Miyakejima-A (a) and Off-Kamaishi (b).

B: Bias error, L: Linear error, LZ: Linear error (<1000m).

取得データの空間的バランスが良い 3 局又は 4 局の海底局の中心位置では，東西，南北ともに音速構造の誤差による推定位置の変化が非常に小さい．

海底局の中心位置への音速構造の誤差の影響は，三宅島西方 A で数 cm，水深約 2300m の釜石沖でも数 cm から 10cm 程度である．これは，中心位置に対する取得データの空間的バランスが良いため，各海底局の音速構造の誤差による影響が相殺され，中心位置にほとんど影響していないということを示している．

以上から，海中の音速構造の誤差は各海底局の鉛直位置だけでなく，水平位置にも数 10cm の誤差を与えるが，観測データを 3 局又は 4 局の海底局の中心点に対して空間的にバランス良く取得することにより，海底局の平均位置への影響をかなり小さくすることができることが分かった．

また，一方で，与えた 3 種類の誤差モデルによる影響は全て同様の傾向を示しており，誤差の形状による違いは見られない．そこで，3 種類の誤差を与えたことによる平均音速の変化量と推定された海底局の中心位置との関係を第 8 図に示す．

は東西成分， は南北成分を示し，凡例中の B，

L，LZ はそれぞれバイアス誤差，線形誤差，1000m 以浅の線形誤差を示している．図より推定された海底局の中心位置の変化は，平均音速の変化と比例の関係にあることが分かる．これは，海底局の推定位置は音速誤差プロファイルの形状にはほとんど関係なく，平均音速に依存しているということを示唆している．

したがって，局位置解析においては，本稿で用いたような水深 1m ごとの音速度プロファイルに代えて，層の数を減らして平均音速を用いた音速度プロファイルを用いることが可能だと思われ，藤田他(2004)ではこの結果に基づき，ソフトウェア SGOBS を改良し，計算時間を大幅に短縮した．

#### 4 まとめ

本稿では，海底地殻変動観測において海中の音速構造に含まれていると考えられる観測誤差の量を推定し，それらの誤差が海底局の位置決定に及ぼす影響を数値的に求めた．

その結果，XBT による観測による水温と朝夕の CTD 観測による塩分から求めた音速には，平均音

速にして 0.2~0.5m/s の誤差が含まれていることが示唆され、その音速誤差は海底局の水平位置にも有意な誤差を与えることが分かった。しかし、観測データを 3 局又は 4 局の海底局の中心点に対してバランス良く取得することにより、その中心点における海中の音速誤差の水平位置への影響を数 cm 程度に小さくすることができる。そのため、海底地殻変動観測の成果としては、3 局又は 4 局の中心位置を採用することが望ましい。十分なデータ量がある場合には、空間的に均一になるようにデータを選別して解析することも有効な方法であろう。

また、海底局の推定位置は音速度プロファイルの形状よりも音速度の平均値に依存することが分かった。これにより、層の数を減らした局位置解析が可能となり、計算時間が大幅に短縮された。

ただし、より高精度の観測を目指すためには、やはりできるだけ精度の良い観測を行うことが必至であることは言うまでもない。最近では、水深 2000m まで対応可能な XCTD が登場しているので、高価であるという問題が解決すれば、XBT に代えて XCTD を用いることは海況の把握に大いに役立つと思われる。また、音速構造の空間的な変化を捉えるため、同時刻に複数の場所で CTD 観測又は XBT 観測を行うことも音速構造の実態を把握する上で非常に有効だと考える。

今後、本成果を実際の観測で活かして、より高精度な観測を目指していきたい。

最後に、本稿作成にあたり、データを取得して下さった測量船「明洋」、「海洋」の乗組員の方々、航法測地室の方々、東京大学生産技術研究所浅田昭氏、望月将志氏、吉田善吾氏に深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

浅田昭, 矢吹哲一朗: 熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化, 地学雑誌, **110**(4), 529-543, (2001).

Colombo, O. L. : Long-Distance Kinematic GPS,

in "GPS for Geodesy 2nd Edition", edited by P. J. E. Teunissen and A. Kleusberg, Springer, 537-568, (1998).

Del Grosso, V. A. and Mader, C. W. : Speed of Sound in Pure Water, The Journal of the Acoustic Society of America, **2**, No.4, 1442-1446, (1972).

藤田雅之, 矢吹哲一朗: 海底地殻変動観測における K-GPS 解析結果の評価手法について, 海洋情報部技報, **21**, 62-66, (2003).

藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一朗: 海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発, 海洋情報部技報, **22**, 50-56, (2004).

畝見潤一郎: 海底地殻変動観測の現状と諸問題について, 海洋情報部技報, **22**, 33-41, (2004).

Wilson, Wayne D. : Equation for the Speed of Sound in Sea Water, The Journal of the Acoustic Society of America, **32**, No.10, 1357 (1960).

### 海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発

藤田雅之、佐藤まりこ：航法測地室

矢吹哲一郎：海洋研究室

### Development of seafloor positioning software using inverse method

Masayuki FUJITA, Mariko SATO: Geodesy and Geophysics Office

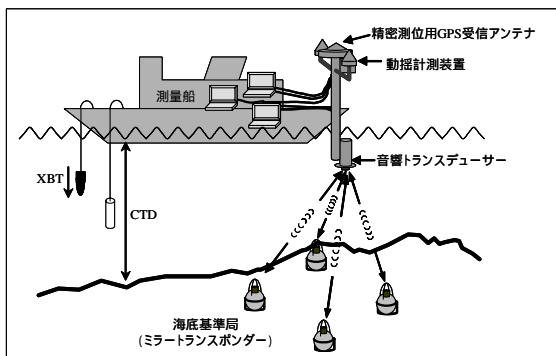
Tetsuichiro YABUKI: Ocean Research Laboratory

## 1 はじめに

海洋情報部では、東京大学生産技術研究所との技術協力の下、GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発を行っている(浅田及び矢吹, 2001; 矢吹, 2002)。観測システムを第1図に示す。

このシステムにより取得されたデータの解析過程は、大きく3つのプロセスに分けられる。一つ目は、船の位置を求めるキネマティック GPS (KGPS) 解析、二つ目は、船と海底局間の音波の往復走時を求める音響解析、そして三つ目は、これら二つの解析結果を結合し、海底局の位置を求める局位置解析である。

現在我々は、この最後の段階にあたる局位置解析のためのソフトウェア「SGOBS (Sea<sup>f</sup>loor Geodetic <sup>O</sup>B<sup>S</sup>ervation)」の開発を行っている。本稿では、現行バージョン (Ver. 2.5) について、その基本構造を紹介すると共に、この中で行っている音速度の補正方法について考察を行う。



第1図 観測システム。

Fig.1 Schematic Figure of the observation system.

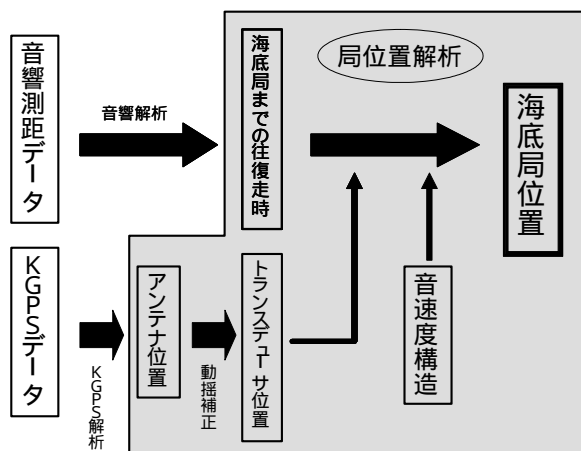
## 2 局位置解析ソフトウェア SGOBS

### 2.1 概要

SGOBS は、KGPS 解析結果と音響解析結果を結合して、海底局位置を決定するソフトウェアである。全体の解析の流れを第2図に示す。

SGOBS への具体的な入力データは、GPS アンテナ位置、音波走時、動揺計測パラメータ (ヘディング、ロール、ピッチ)、及び海中の音速度構造プロフィールである。

まず、動揺計測パラメータを用いて、KGPS 解析により求められた GPS アンテナの位置を、観測支柱のもう一方の端に取り付けた海中のトランスデューサ位置へと変換する。このトランスデューサ位置と音波走時から、音速度構造を介して、幾何学的原理に基づき海底局位置を決定する。その際、局位置と共に、音速度の時間変化係数も推定パラメータとしている。これらのパラメータの解法としては、ベイジアン最小自乗法に基づくイ



第2図 解析の流れ。

Fig.2 Flow chart of data analysis.

ンバージョン法(松浦, 1994)を適用している.

2.2 ベイジアンインバージョン法について

この手法は, 正規分布をもつ誤差  $e$  を含む観測データ  $y^0$  とモデルパラメータ  $x$  の間に,  $A$  を偏微分行列とした線形の観測方程式

$$y^0 = Ax + e \quad (1)$$

が成り立つと仮定し, モデルパラメータの初期値からの誤差分布がアприオリに与えられる場合に, モデルパラメータ解  $\hat{x}$  が次式によって計算されるというものである(松浦, 1994).

$$\hat{x} = x^0 + DA'(E + ADA')^{-1}(y^0 - Ax^0) \quad (2)$$

ここで,  $x^0$  はモデルパラメータ初期値,  $D$  はモデルパラメータ解の初期値からのずれを特徴づける共分散行列,  $E$  は  $e$  の誤差分布を特徴づける共分散行列である.

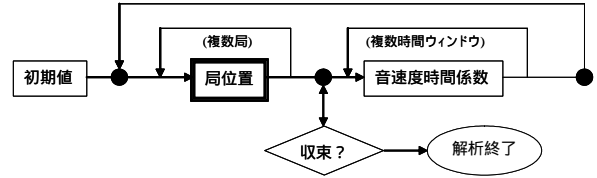
一般には, 観測データとモデルパラメータの関係は非線形であることがほとんどであるが, その場合でも真値近傍における微小な変化に対しては線形関係が成り立つと仮定し, 与えた初期値と真値との差を解として求める. これは式(1)及び(2)において,  $x^0=0$  として,  $y^0$  と  $x$  をそれぞれ初期値に対する値と考えることに相当する. そして, 実際の非線形の影響については, 繰り返し計算(iteration)により真値に収束させる.

ベイジアン手法, すなわちモデルパラメータの共分散行列  $D$  を導入する意味は, 初期値の信頼性に応じて拘束をかけられることである. その最も簡単な適用例として, パラメータの固定, 推定の選択を  $D$  の対角成分により自由に設定できることがある.

2.3 アルゴリズム

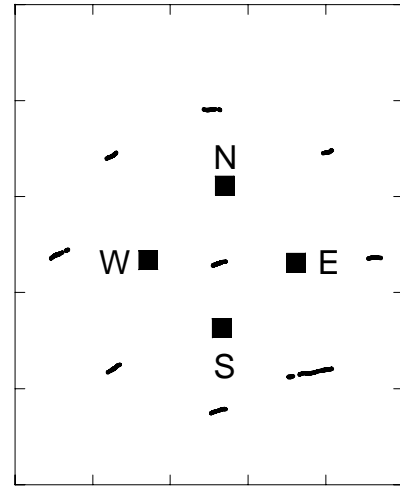
SGOBSの簡易なアルゴリズムを第3図に示す.

我々が展開している海底基準点では, 1点につき原則4局の海底局を東西南北に配置し, 測線観測を行っている. 第4図に, 海底局配置と1日の測線例を示す. まずこれら複数局についてそれぞれ



第3図 局位置解析ソフトウェアのアルゴリズム.

Fig.3 Algorithm for seafloor positioning software.



第4図 海底基準局配置図と測線例.

Fig.4 Distribution of the seafloor stations with an example of one-day observation lines.

れ同一の音速度構造で局位置解を求めた後, その残差データを用いて, 一定の時間ウィンドウ毎に音速度の時間変化係数を求める. このサイクルを局位置が収束するまで繰り返し, 最終的な局位置解を求める. 音速度係数の時間ウィンドウ幅は, 測線単位から最大1日単位まで選択できる.

このように局位置と音速度構造を分けて推定する最も大きな理由は, それぞれの推定パラメータ毎に, 用いる走時データの取舍あるいは重み付けに違いを持たせたいことである. 例えば, 後に述べる伝播距離による重み付けは, 海底局毎に違うため, 全局を同時に推定することとは両立しない.

2.4 モデルパラメータと観測方程式

次に, 具体的な観測データとモデルパラメータについて述べる. 上記アルゴリズムに示したように, 観測方程式は局位置解を求める部分と音速度構造を求める部分との2つに分かれている.

(a) 海底局位置の推定

まず局位置解について、式(1)の観測データ  $y^0$  は、例えば海底局 A について、以下のように記述される。

$$y^0 = \begin{pmatrix} \Delta t_{1(A)} \\ \Delta t_{2(A)} \\ \vdots \\ \Delta t_{n(A)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

右辺は、KGPS 解析と動揺補正により求められたトランスデューサの位置と海底局 A の初期位置座標から音速度構造を用いて計算された往復走時と、観測された往復走時の差 (O-C) の時系列を表している。

また式(1)のモデルパラメータ  $x$  は、海底局位置座標 (ローカル座標系の 3 成分) の初期値からの補正量として次のように表現される。

$$x = \begin{pmatrix} \Delta x_A \\ \Delta y_A \\ \Delta z_A \end{pmatrix} \quad (4)$$

(b) 音速度構造の推定 (誤差の補正手法)

海底局位置を精密に求めるためには、要求精度内で正確な海中の音速度構造が必要である。我々の通常の観測では、原則として一日の測距観測前後に CTD 観測を行い、測距観測中に XBT による水温観測を行っている。しかしながら、これらの観測機器の精度は十分ではなく、また、観測値 (水温、電気伝導度、水圧) から音速度を求める経験式 (例えば、Del Grosso, 1974; Wilson, 1962; Chen and Milleo, 1977) の選択によっても有意な違いが生ずる。さらに、音速度は時間空間で変化するため、これらを全てカバーする観測は実際上不可能である。したがって観測値を確定値として、これのみからセンチメートルレベルの測位を行うことは大変困難であるといわざるを得ない。

しかしながら音波走時は距離と速度の関数なので、走時データには距離の情報を含むと同時に、

その伝播経路の速度構造の情報を含んでいる。そこで SGOBS では、音速度構造を推定パラメータとすることにより、誤差の補正を試みている。これは、GPS 測位で通常行われている大気遅延量の推定などと同様の考え方である。

音速度構造を求める部分の観測データ  $y^0$  は、海底局を 4 局 (A~D) とすると、例えばタイムウィンドウ  $[t_{k(A)}, t_{l(D)}]$  について、以下のように記述される。

$$y^0 = \begin{pmatrix} \Delta t_{k(A)} \\ \Delta t_{k(B)} \\ \Delta t_{k(C)} \\ \Delta t_{k(D)} \\ \vdots \\ \Delta t_{l(D)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

音速度構造推定におけるモデルパラメータは、現行バージョンでは、音速度の時間変化を二次式で表したときの係数としている。すなわち、平均音速度の時間関数  $V(t)$  を

$$V(t) = V(t_0) + a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (6)$$

と表すと、モデルパラメータ  $x$  は、その係数の補正值として次式のように表現される。

$$x = \begin{pmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(6)で  $t_0$  は基準時刻、 $V(t_0)$  は音速度初期値の  $t_0$  における値である。

なお、ここで時間変化係数を定義するにあたり、深さ方向のプロファイルの形状は時間的に一定と仮定している。現実には浅い部分ほど時間変化が大きいなど、この仮定は厳密には成り立っていないと考えられるが、数値実験によると、局位置推定結果はほぼ平均音速に依存していると言ってよい (佐藤及び藤田, 2004)、現行精度においては問題ないと判断される。

また、入力データとしての音速度構造は、CTD

等の観測値から 1m 層で与えているが、プログラム内で、これを 200m, 400m, 800m, 1600m, それ以深という層毎に勾配を平均化して計算している。この場合、局位置推定結果は、現在の数 cm という精度においては、1m 層をそのまま用いる場合と比較してほとんど差異がないことを確認しており、これにより計算時間が大幅に短縮されるメリットがある。

ただ将来さらに高精度の議論になった場合、層厚を含めたこれらの仮定を見直す必要が出てくるかもしれない。

### 2.5 データの重み付けによる誤差の軽減

音速度誤差については、上記手法で正確に補正しようと試みてはいるが、時間関数近似の限界や空間不均質の影響及びパラメータ分離の不十分さ等の理由により、補正後も有意な誤差を含む場合が少なくない。この影響は、伝播距離が長くなるほど大きくなるため、伝播距離の長いデータの重みを適切に下げることが、結果の改善につながる可能性がある。

この観点から、SGOBS では、局位置推定の際、それぞれの海底局毎に、観測データの誤差行列 E の対角成分に重み付けを行えるようにしている。具体的には、海底局への音波の入射角を  $\theta$  として、 $\cos^n$  の重みを用いている。

このように遠くのデータの重みを下げることにより、データの幾何学的配置が実効上改善される効果もある。佐藤及び藤田 (2004) は、音速度構造に誤差を含む場合でも、海底局の周りのデータの幾何学的配置が均等であれば、水平成分については、誤差が相殺され、精度劣化をある程度防ぐことができることを示している。現在の観測方法では、第 4 図に示したように、それぞれの局に対するデータ配置は一方に偏ってしまうため、この重み付けが有効である場合が多い。

## 3 音速度初期値依存性と補正ストラテジー

局位置推定を行う際に重要なことの一つは、推

定パラメータ間の分離、すなわち局位置解の一意性の確保である。既に述べたように、SGOBS V2.5 では、音速度変化の時間二次式の係数をパラメータとして補正する機能を有しているが、我々の取得するデータの中に、局位置と音速度構造を要求精度内で分離できるだけの情報が含まれているかどうか、またそれが含まれていたとして、その情報を適切に取り出すための最善の手法はどのようなものが問題となる。

その一つの指標に、初期値に対する依存性がある。ある範囲で異なる初期値を与えた場合に、そこから求められる局位置解が一意的であれば、その手法は一意性が確保されているといえる。逆に、異なる初期値から求められた局位置解に有意な差があれば、音速度と局位置のパラメータの分離がうまくできていないことを意味する。

このような観点から、ここでは音速度の初期値を変えて局位置解を比較すると共に、現行の機能で行える範囲で補正ストラテジーを変え、より良い方法について検討する。

### 3.1 比較方法

まず、音速度構造の初期値として次の二通りを与えた。

(C) 朝夕の CTD 観測値を時間で線形補間したもの

(X) (C)について、水温のみ XBT 観測値で置き換えて計算したもの

また、音速度構造の補正は、以下の 4 通りの方法で行った。

(A)補正しなかった場合

(B)測線毎に補正した場合

(C)1 日毎に補正した場合

(D)まず 1 日毎に補正した後、これを初期値としてさらに測線毎に補正した場合

以上の初期値と補正手法を組み合わせた 8 通りの場合について、局位置解を求め、その結果を比較した。

3.2 結果

ここでは比較例として、当庁が2002年5月13日～16日の4日間、宮城県沖海底基準点で取得した観測データ（藤田及び佐藤，2004）について行った結果を例示する。

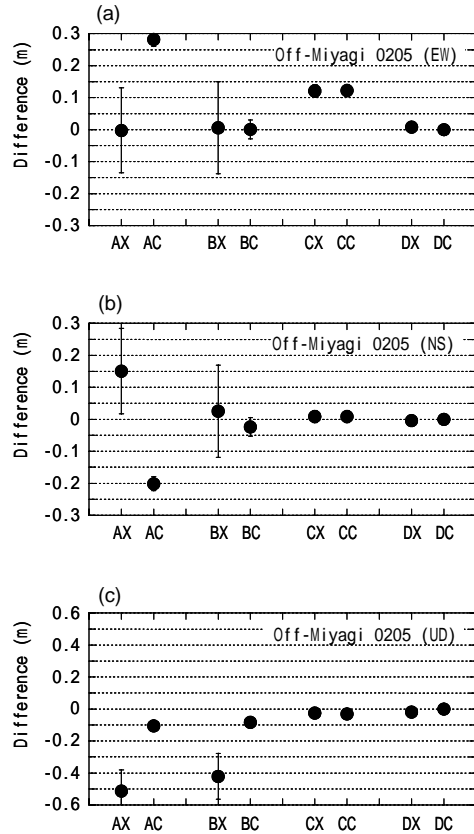
第5図に比較結果を成分毎に示す。またそれぞれの場合の解析後の走時残差を第1表に示す。なお、図のプロットは、海底局4局の座標値の平均について、CTDの初期値（C）から（D）の手法で求めた解（DCと表記、他も同様）を基準として、それぞれから求められた平均座標値との差を示している。また図のエラーバーは、局毎の差の自乗平均値を示している。

図を見ると、補正しなかった場合（A）には、上下成分に50cm程度、水平成分でも30～40cm程度の差が見られる。これだけを見ても、観測値のみからセンチメートルレベルの測位を行うことは困難であることがわかる。

次に、測線単位に補正した場合（B）には、差はかなり小さくはなるものの、局毎の大きなばらつきを含めまだ有意な差が残っている。これに対して、1日単位で補正した場合（C）を見ると、その差は1cmレベルとなっており、どちらの初期値を用いても、結果はほぼ変わらない、すなわち初期値依存性がほとんどなくなっていることがわかる。

さらに、（C）と（B）の組み合わせ、すなわち一旦1日単位の補正を行ってから、これを改めて初期値として測線単位で補正した場合（D）にも、初期値依存性は見られない。これは（C）の補正を行った時点で、初期値がほぼ同じになるため当然である。（C）と（D）の結果を比べると、東西成分に約10cmの差があるが、どちらが真値に近いかはこれだけでは判断できない。ただ第1表より、最後に測線毎の補正を行うことにより、走時残差が小さくなっていることがわかる。

（C）と（D）の手法をさらに詳細に比較するため、4日間のデータを1日毎のサブセットに分け、得られた解を比較した。第6図、第7図は、13



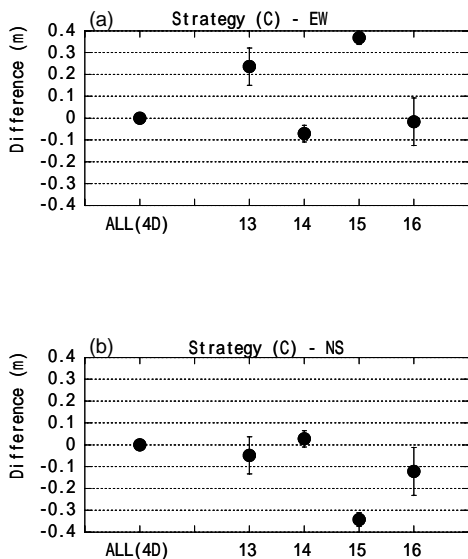
第5図 音速度初期値及び補正ストラテジーの違いによる局位置推定結果の比較：(a) 東西成分、(b) 南北成分、(c) 上下成分。

Fig.5 Comparison of positioning results due to differences of initial values and strategies for estimation of sound velocity: (a) EW component, (b) NS component, (c) UD component for the Off Miyagi reference point.

第1表 音速度初期値及び補正ストラテジーの組み合わせによる解析走時残差(msec)。

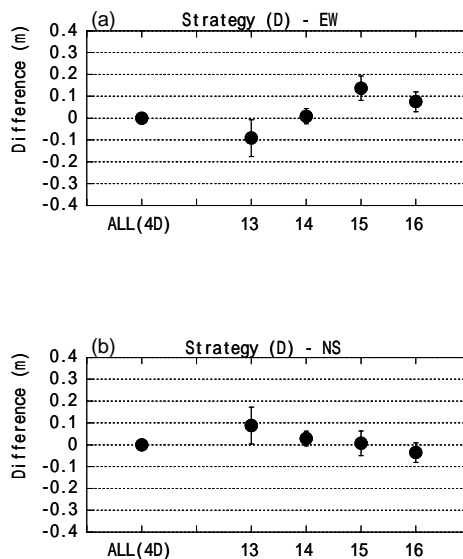
Table 1 Travel time residuals (msec) in analyses for the combination of initial values and strategies for the sound velocity correction.

	(A)	(B)	(C)	(D)
(C)	0.397	0.119	0.166	0.120
(X)	0.277	0.118	0.164	0.119



第 6 図 音速度補正戦略（C）による全日解と 1 日解の比較：(a) 東西成分、(b) 南北成分。

Fig.6 Comparison of positioning results between solutions from all-day data and one-day data in the case of the strategy (C) for estimation of sound velocity: (a) EW component, (b) NS component for the Off Miyagi reference point.



第 7 図 音速度補正戦略（D）による全日解と 1 日解の比較：(a) 東西成分、(b) 南北成分。

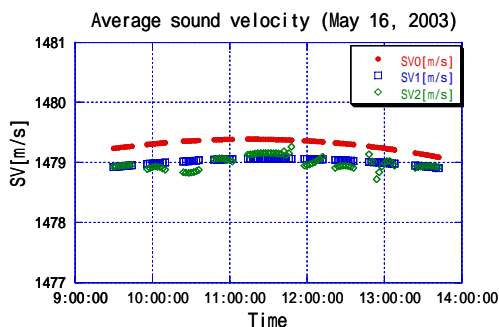
Fig.7 Comparison of positioning results between solutions from all-day data and one-day data in the case of the strategy (D) for estimation of sound velocity: (a) EW component, (b) NS component for the Off Miyagi reference point.

日～16日までの1日解の、4日解に対する差を、水平成分について示したものである。図から明らかに、(D)の手法により1日解の再現性が改善されていることがわかる。

以上の検討結果から、(C)の手法によりほぼ初期値依存性はなくなるが、さらに測線単位の補正を行う(D)の手法が、より良い結果を与えると判断される。

### 3.3 議論及び問題点

第8図は、5月16日の音速度補正に関して(D)の手法をとった場合の初期値、一日推定値、及び最終の測線単位の推定値をプロットしている。これを見ると、まず一日単位でバイアス的な音速度の補正がなされ、さらに測線毎にさらに細かい変動を補正しているように見える。しかしながら、最後の測線単位の補正曲線では、部分的には現実



第 8 図 音速度補正戦略（D）による解析過程における音速度時間変化（2003年5月16日）：SV0は初期値、SV1は1日補正值、SV2は最終の測線毎補正值。

Fig. 8 Temporal variation of sound velocity in the analysis with the strategy (D) for May 16, 2003; SV0 is the initial values, SV1 and SV2 are ones corrected with a day through and ones finally corrected with every line, respectively.

のものとは考えにくい急激な変化も見られる。他例では、こういった現象がさらに顕著に見られるものもある。

現実の音速度変化は複雑であり、これをある特定の関数にあてはめて補正することには限界がある。(D)の手法の考え方は、一日の変化について二次式で近似できない部分を測線単位の推定で補おうとするものであり、ある程度の妥当性と有効性をもっていると考えられるが、部分的にはデータに含まれるなんらかの別の要因を、音速度構造に無理矢理押し付けている可能性があることには留意しなければならない。

他方、我々の目的は音速度構造を正確に求めることではなく、局位置を正確に求めることにある。例えば KGPS から求められた高さ成分に時間ドリフト誤差が含まれているとすれば、数値解析的には音速度補正值によって吸収されてしまい、結果を改善する可能性もある。その場合、たとえ推定された音速度が正しくなくても、手法としては有効と考えるべきであろう。

音速度補正手法についての本稿の検討結果は、かなりの事例で確認したが、十分な一般性をもつかどうかは、さらに検証しなければならない。また音速度の補正関数については、物理的合理性を含め、より適切なものがないか検討する必要がある。いずれにしても完全な補正を行うことは不可能であるが、方法の工夫により局位置推定結果の精度、信頼性を高める努力を行っていきたい。

#### 4 おわりに

本稿では現在開発中の海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアについて紹介すると共に、音速度の補正手法に焦点を当て、その妥当性等について議論した。現行バージョンは、現在取得しているデータからある程度目標精度を満たす事例が確認されており、今後の基盤となりうる段階には達していると考えている。しかしながら、まだまだ課題は多く、さらに精度のよい安定した結果を目指して改良を重ねていかなければならな

い。

#### 参考文献

- 浅田昭, 矢吹哲一郎: 熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化, 地学雑誌, **110** (4), 529 - 543, (2001).
- Chen, C.T., and F.J. Milleo: Speed of sound in seawater at height pressures, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **62**, No.5, 1129-1135, (1977).
- Del Grosso, V.A.: New Equation for the Speed of Sound in Natural Water (with Comparison to other Equations), *The Journal of the Acoustical Society of America*, **56**, No.4, 1084-1091, (1974).
- 藤田雅之, 佐藤まりこ: 海底地殻変動観測データによる局位置再現性の評価, 海洋情報部研究報告, **40**, 72-78, (2004).
- 松浦充宏: インバージョン解析法, 「現代測地学」日本測地学会, 477 - 482, (1994).
- 佐藤まりこ, 藤田雅之: 海底地殻変動観測における海中音速誤差の局位置への影響について, 海洋情報部技報, **22**, 42-49, (2004).
- Wilson, W.D.: Extrapolation of the Equation for the Speed of Sound in Sea Water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **34**, No.6, 866, (1962).
- 矢吹哲一郎: 海底地殻変動観測を目指した音響技術開発, 水路部研究報告, **38**, 47-58, (2002).

## 衛星画像による流出油と変色水の検出

中村 啓美：海洋研究室

The detection of oil spills and discoloration water according to the satellite image.

Hiromi NAKAMURA: Ocean Research Laboratory

### 1 はじめに

海上における流出油の漂流拡散状況や、海底火山に伴う変色水の状況を、衛星画像で把握できれば、航空機・船舶による効率的な対応が可能となる。土出・井本・陰山(2000)は、平成元年～10年の海上災害の事例について、第1表に示す9衛星、7センサの衛星データを検索し検証を行った。その結果、油が確認できたのは SAR 画像による1例のみであったと報告している。また、土出・大谷・陰山(2000)は、火山性変色水が激しく噴出すれば、海表面の波の状態が変化してこれを検出でき、海底火山の活動状況を知ることができるのではないかと、SAR 画像について調べている。その結果、火山島周囲に見られる変色水を、SAR 画像から検出するのは極めて困難であったとし、更に事例検証が必要であると報告している。

これらの報告以降、Aqua(2002年5月4日打上げ) ADEOS- (2002年12月14日打上げ～2003年10月25日運用停止)などの地球観測衛星が打

第1表 過去に検索された衛星とセンサ

Table 1 Satellites and their sensors searched by Tsuchide, Imoto and Kageyama (2000).

衛星の名称	センサの名称
ERS-1	AMI
ERS-2	AMI
JERS-1	SAR
ADEOS	AVNIR
SPOT-1	HRV
SPOT-2	HRV
MOS-1	MES
MOS-1b	MES
LANDSAT-5	MSS, TM

上げられ、流出油や変色水の状況把握への利用も期待されるが、本報告では、2004年夏期に打上げが予定されている陸域観測技術衛星(以下 ALOS と言う)画像の利用に向け、ALOS に搭載される合成開口レーダー(PULSAR)、可視近赤外放射計(AVNIR-2)、パナクロマチック立体視センサー(PRISM)の3つのセンサ仕様と同様な観測センサを持った衛星で、主として、土出ら(2000)が報告した後の事例について、現在運用中のランドサット衛星(LANDSAT-7, 1999年4月15日打上げ)及びスポット衛星(SPOT-4, 1998年3月24日打上げ)の各画像を含めて検索し、検出を試みた結果を報告する。

### 2 流出油災害及び変色水の実例

第2表に流出油を含めた海上災害事例を示す。これは、「海上保安白書」、「海上保安レポート」および日本海難防止協会発行の「海と安全」を参照して、1995(平成5年)～2002(平成14年)の10年間からとった。表中、  
、  
、  
、  
及び  
は土出ら(2000)が検索した事例である。本報告では、重質油等欄の番号～の流出油事例を対象とした。なお、概位欄の斜字は各資料では不明であったので、検索するために概位を著者が海図から出したものである。

また、第3表の変色水の視認表は、「火山噴火予知連絡会報」掲載の「海底火山の最近の活動について」を参照し、1996年(平成6年)10月2日～2003年(平成15年)5月9日の約8年間から、伊豆諸島方面と南方諸島方面の変色水の視認記述欄のみ抽出して編集し、それぞれに検索のための番号を付した。

第2表 1995年(平成7年)~2002年(平成14年)の海上災害事例

Table 2 Maritime disaster case in 1995~2002.

重質油等	発生年月日	船種	船名	総トン数	発生場所	概位	事故原因	流出量他
	7.04.01	貨物船	MARQUESA	36,559	大分県津久見市沖	33-06N 131-54E	乗揚げ	重油約140kl流出
	7.06.22	貨物船	MINERAL DAMPIER	87,709	鹿児島県屋久島西方沖210海里	30-32 N 126-15 E	衝突・沈没	重油約107kl流出
	7.09.03	タンカー	宜洋丸	895	大分県西国東群香々地町沖	33-43N 131-32E	衝突	重油約94kl流出
	8.04.20	貨物船	SOUTHER VENTURE	25,725	沖ノ島島	20-01 N 136-10 E	乗揚げ	重油約700kl流出
	9.01.02	タンカー	NAKHODKA	13,157	島根県隠岐島沖	37-14 N 134-25 E	折損・沈没	重油約6,240kl流出
	9.04.03	タンカー	OSUNG No.3	19,684	対馬西方沖約65km、韓国領海内	34N - 35N 129E - 130E	座礁・沈没	186kl流出、対馬西海岸漂着
	9.07.02	タンカー	DIAMOND GRACE	147,012	東京湾、中ノ瀬航路	35-23 N 139-42 E	底触	原油約1,550kl流出
	11.09.24	貨物船	SEA HOPE	1,698	徳山市下松港沖	33-55N 131-52E	乗揚げ	重油約110kl流出
	11.11.23	タンカー	豊晴丸	199	徳山築港沖	34-02N 131-48E	衝突	重油約90kl流出
	14.03.31	貨物船	AIGE	2,847	島根県隠岐島沖	36-00N 133-32E	衝突・沈没	搭載油約120kl、流出量不明
	14.07.25	貨物船	CO-OP VENTURE	36,080	鹿児島県志布志湾	31-26N 131-01E	乗揚げ	搭載油約910kl、流出量不明
	14.10.01	自動車運搬船	HUAL EUROPE	56,835	伊豆大島 波浮港沖	34-39N 139-28E	乗揚げ	搭載油約260kl、流出量不明
軽質油	5.07.23	タンカー	遠洋丸	699	静岡県爪木崎沖	34-35 N 140-00 E	衝突	重質軽油約267kl流出
	5.12.23	タンカー	第1内海丸	1,583	今治市小島東灯標沖		衝突	灯油約94kl流出
	10.09.04	タンカー	第8大寿丸	998	北海道奥尻沖		衝突	軽油約260kl流出
ケミカル	6.02.14	タンカー	大翔丸	328	大阪府大阪港外	34-30 N 135-20 E	衝突	酢酸エチル約116kl流出
	12.05.09	タンカー	SUN SAPPHIRE	22,620	神戸港			キシリ約10tを含むバラスト水約40t
海上災害	5.01.13	タンカー	英晴丸	551	室蘭港	42-20 N 140-55 E	爆発	炎上3名死亡
	5.09.15	タンカー	KISOGAWA	11,637	和歌山県市江崎沖		火災	火災、1名死亡
	8.02.09	タンカー	SUNNY BREEZE	2,635	長崎県五島沖		爆発・炎上	1名行方不明

第3表 1992年(平成4年)10月2日~2003年(平成15年)5月9日の変色水の視認表

Table 3 Recognized discolored water from Oct.2, 1992 to May 9, 2003.

場所	概位	画像検索番号	変色水の視認年月日と状況	場所	概位	画像検索番号	変色水の視認年月日と状況
<b>伊豆諸島方面</b>				(続)硫黄島			
須美寿島(白根)	31-26N 140-02E	1	1997/11/21 島の北側に緑色の変色水				南岸から約200mの噴出点では、海面上約0.5~1mの盛り上がりながら数分~10分毎に熱水を噴出し、高さ数十mの水蒸気の白色噴気を伴う
伊豆島島	30-28N 140-18E	2	1997/3/10 島の西岸に薄い緑色の変色水 南岸に薄い白色に変色水				南岸から約100mの所に、長さ約20m幅約10mの南北に伸びる楕円形の堆積物が海面上に露出
		3	1997/11/19-2 島の南岸に黄緑色の変色水				噴出点付近を中心とする幅約500m長さ2,000mで南岸から沿って変色水、色は噴出点で灰黒色、噴出点から以外では灰色
		4	1998/2/26-27 島に北岸及び東岸に薄い黄緑色				灰色の変色水域の外側に幅約1,000m長さ約7,000mの緑色
		5	1998/10/27-28 南岸の山が石付近で乳白色				
		6	1999/1/12-13 島の北岸に薄白色				
		7	2001/10/31 島の南岸に長さ約800m幅約400mの緑色で岸側を底辺とする三角形の変色水域			29	2001/9/22 硫黄島南岸に沿って西南西方向に伸びる幅約300m長さ約1,700mの灰色
孺婦岩	29-46N 140-23E	8	1996/10/2~2002/5/21まで変色水認めず				上記外側には幅約1,000m長さ約6,000mで硫黄島南岸に沿って西南西方向に伸び、孺婦島の南岸で北西方向へ扇形に拡散する幅約3,000m長さ約
水曜海山	28-35N 140-52E		同上				
西之島	27-15N 140-53E	9	1997/3/10 島の東岸及び北西岸に薄い黄緑色				
		10	1997/11/19-2 島の北東岸に緑色(一部褐色) 島の北西岸に黄緑色			30	2002/1/11 北東岸において長さ約900m、幅約600mの扇型でごく薄い茶色
		11	1998/2/26-27 島の東岸に薄い黄緑色			31	2002/4/15 北東・南西・西・北側にエメラルドグリーン
		12	1998/10/28 南東岸と南西岸より薄乳白色			32	N24-26.6E141-22.7を中心とした幅約500m長さ約1,000mで東西方向に伸びる扇状のごく薄い黄緑色
		13	1999/1/12-13 南東岸から東へ延びる長さ約500mの薄乳白色	北福徳堆	24-26N 141-24E		
		14	2000/1/25-26 島の北西岸に薄い黄緑色	福徳岡ノ場	24-17N 141-30E	33	1996/12/9 黄緑色(200m x 50m)
		15	2002/2/28 島の西岸から北西岸の海岸線に北東方向に幅約200m長さ約2,000mの薄黄緑色 上記変色水の北東に北東方向に幅約200m長さ約1,000mのごく薄い緑色			34	1996/12/16 黄緑色(300m x 50m)
		16	2003/3/10 海岸線から茶褐色の変色水が東岸から南岸に至る海域、その先500m沖合いには薄い黄緑色の変色水			35	1997/1/27 薄い緑色(2000m x 100m)
海徳海山	26-40N 140-57E	17	2001/7/20 N26-07. E141-06で海底からの気泡の湧出、変色水なし			36	1997/2/17 黄緑色(5,000m x 560m)
噴火浅根	25-32N 141-15E	18	1997/3/10 小規模の薄い緑色			37	1997/3/10 乳白色の湧出
		19	1998/5/21 緑色の変色水域			38	1997/3/26 緑色(半径460m)
		20	1999/9/7 25-27.3N、141-13.4E付近2カ所に直径約50mに広がる斑点状の黄緑色			39	1997/4/14 緑色(3,700m x 900m)
		21	1999/9/16 薄黄緑色の半径約20mの変色水			40	1997/4/16 緑色(3,000m x 80m)
		22	2000/1/25-26 1カ所に固まった3点の斑点状の青白色 上記の北東方向に幅0.5km、長さ1.5kmの赤潮が、軽石らしきもの浮流 26日2点に減る、これより北北西方向に長さ0.2kmの薄い乳白色			41	1997/4/18 白濁(500m x 80m)
		23	2001/10/29 直径約100mの扇状の青白色 北硫黄島の西約2,000m付近に円形で直径約500mのごく薄い黄緑色			42	1997/4/23 薄い青緑色(1,600m x 300m)の中に濃い土色した箇所あり
		24	2002/2/28 直径約200mの円形で青白色を2カ所			43	1997/4/26 黄土色(200m x 100m)
硫黄島	24-47N 141-20E	25	1997/3/10 島の海岸線全域に黄緑色及び黄色			44	1997/5/1 小さな湧出点付近に半径100m程度の乳白色及び白濁した薄緑色
		26	1998/2/27 島の西側、釜若から千鳥ヶ浜、飛石鼻にかけて黄土色の比較濃い 北の鼻から日出浜にかけて黄緑色 南硫黄島西岸より南西方向へひる幅約100m長さ約1,000mの黄緑色			45	湧出点から長さ1,800mのしおり帯状の泡もしくは軽石の変色水
		28	2001/9/21 南岸釜浜のN24-45-44.7、E141-19-03.1付近の海域2ヶ所で噴出活動 各噴出点は海岸から約200mと約150mの海域で、2ヶ所の噴出点間の距離は約50~70m			46	1997/10/9 半径約500mの薄い黄緑色
						47	1998/2/16 長さ約1.9km、幅約370mの薄い黄緑色
						48	1998/2/27 N24-17.4E141-29.2の地点から西方向にN24-17.2E141-27.9の地点まで約1.2rの、黄緑色 湧出点は3箇所あり、それぞれ青白い海底らしき箇所から間欠的に湧出
						49	1998/5/21 東1rの半径約1rの青色
						50	1998/10/16 南硫黄島より60度1rの1rにおいて、半径500ヤードの薄い緑色
						51	1998/10/28 N24-17.1E141-29.7の付近の3ヶ所を起点とし、南西に伸びる幅約100m、長さ約500mの薄い黄緑色 同変色水は湾曲し円弧を描きながら幅約30mで西側に延びていた。円弧の大きさは南硫黄島とほぼ同じ大きさ
						52	1998/12/14 N24-15.3E141-24.6を起点とし、15度方向に延びる幅約50m長さ約2rの薄緑色
						53	1998/12/16 南硫黄島北方のN24-16.9E141-29.5を起点とし、30度方向へ幅30~50m長さ約1rのかなり薄い緑色
						54	1999/9/8 24-16.5N141-29.5Eを湧出点とする幅約1,000m長さ約4,000mで北東方向へ扇状にのびる黄緑色
						55	1999/11/22 N24-17.09E141-28.49を中心に半径約650mの白色及び緑色の変色水が点在

第 3 表 1992 年 (平成 4 年) 10 月 2 日 ~ 2003 年 (平成 15 年) 5 月 9 日の変色水の視認表 (続き)

Table 3 Recognized discolored water from Oct.2, 1992 to May 9, 2003. (continued)

場所	概位	画像検索番号	変色水の視認年月日と状況
(続) 福徳岡/場		56	2000/1/25-26・25日幅約0.3km、長さ約2kmの薄黄緑色 ・26日噴出点より湧出した変色水は青白色で北北西方向に延びながら海面に浮上し、海面上を黄緑色から薄黄緑色に変化しながら海面に浮上し、海面上を黄緑色から薄黄緑色に変化しながら幅約0.7km、長さ約3kmに延びていた また、噴出点西方に潮流の変化により取り残された薄黄緑色の変色水、湧出点付近に乳白色の長さ0.5kmの帯状浮遊物
		57	2000/4/13 ・幅約90m長さ約270mの楕円形でごく薄い青色
		58	2000/2/17 ・やや薄い変色し
		59	2001/3/6 ・N24-17.3E141-29.1の位置にある青白色の湧出点を起点とする南東方向へ延びる幅約50m長さ約2,000mの黄緑色
		60	2001/3/5 ・薄青白色の21箇所の湧出点を中心に幅約200m長さ約200mの濃黄緑色 ・その変色水の西南西に、幅約200m長さ約800mで西南西方向に広がる薄黄緑色
		61	2001/2/26 ・N24-18.0E141-28.5付近から南西方向に伸びる小規模の薄緑色
		62	2001/2/16 ・N24-16.5E141-30.1に南北に伸びる幅約20m、長さ約90mの帯状で薄い黄緑色
		62'	2000/12/25 ・青色から薄緑色に変化する東西方向に長さ約1km
		63	2000/10/31 ・N24-17.0E141-29.0付近から幅約100m長さ約500mで北西方向へ帯状にのびる青白色及び黄緑色の北西側に、扇状に拡散する幅約800m長さ約2,000mのごく薄い変色水
		64	2000/10/13 ・N24-17.2E141-29.2の海域に北西から南東にのびる幅150m、長さ1,800mの帯状で緑色
		65	2000/7/26 ・南硫黄島から北方向へ3海里の地点を中心として長さ約900mの青白色
		66	2001/6/13 ・福徳岡/場で半径約450mの青色の変色水
		67	2001/10/30 ・東西方向に並んだ3点からそれぞれ長さ約3,000m幅約50mで南南西に伸びる3本の帯状の変色水
		68	2001/12/6 ・100度方向に長さ約7,600mの深い11x5ドットクリーニング
		69	2002/2/10 ・長さ1.5海里幅約1000ドットでss175度の薄い11x5ドットクリーニング
		70	2002/3/1 ・福徳岡/場から湧出し、東方向に幅約200m長さ約1,500mでのびる濃い黄緑色の変色水 ・その変色水から南に焼(500mの海域に幅約50m長さ約1,500mで東方向にのびる線状で青白色 ・さらに線状変色水領域の南東約1,500mの海域に幅約200m長さ約400mで東西方向が長径をなす楕円形でこれら3ヶ所の変色水領域付近一帯に薄い黄緑色
		71	2002/3/13 ・半径約50mの緑色の変色水
		72	2002/12/19 ・N24-20.E141-26に存在した。
		73	2003/3/11 ・湧出点から南方に伸びる筋上の長さ1kmの青白色とそれに続く南側に南東方向に長さ約3km幅約1kmの薄い黄緑色
南日吉海山	23-32N 141-55E		1996/10/2 - 2003/5/9まで変色水認めず
日光海山	23-06N 142-17E		1996/10/2 - 2003/5/10まで変色水認めず
福徳海山	21-55N 143-28E		1996/10/2 - 2003/5/9まで変色水認めず

3 ALOS と検索した衛星センサの概要

2004 年夏期に打上げが予定されている ALOS に搭載される 3 つのセンサの特徴は、次のとおりとなっている。

フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー (PULSAR)

観測する区域の天候、昼夜に関係なくデータが取得できる。観測波長は L バンドを利用し、観測幅が 70km の高分解能モードでは、地上分解能 10m の詳細な観測が可能である。また、ScanSAR による広域観測モードでは約 250 ~ 350km の幅で観測を行うことができるものである。

高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)  
可視 近赤外域のマルチバンド波長を用いて、観測幅は 70km、地上分解能は 10m で観測し、衛星進行直行方向に観測域を変更するポイントング可能角度は 44 度である。

パンクロマチック立体視センサ (PRISM)  
地表を 2.5m の分解能で観測できる。3 組の光学系を持ち、衛星の進行方向に対して前方、直下、後方の 3 方向の画像を同時に取得できるので、高精度の地形データを高頻度に取得できる。

第 4 表 ALOS センサと検索対象衛星のセンサ  
Table 4 Sensors of ALOS and the satellites to be searched in this article.

ALOS 衛星 センサの名称	検索対象の衛星	
	衛星の名称	センサの名称
PULSAR (フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー)	JERS-1 (地球資源衛星 1 号)	SAR (合成開口レーダー)
AVNIR-2 (高性能可視近赤外放射計 2 型)	ADEOS (地球観測プラットフォーム技術衛星)	AVNIR (高性能可視近赤外放射計)
	LANDSAT-5 (地球観測衛星)	TM (新型多波長可視赤外画像放射計)
	LANDSAT-7 (地球観測衛星)	ETM+ (改良型新型多波長可視近赤外放射計)
PRISM (パンクロマチック立体視センサ)	SPOT-2 (スポット衛星)	HRV (高分解能可視近赤外放射計)
	SPOT-4 (スポット衛星)	HRVIR (高分解能可視近赤外中間赤外放射計)

第 5 表 センサの概要  
Table 5 The outline of the sensors.

	センサ名	観測幅	分解能	おナーイ角等	観測波長帯等
検索した衛星	SAR	75km	18m x 24m	35° (オフナディア角)	1.275MHz (L バンド)
	AVNIR	80km	16m 及び 8m	± 40° (ポインティング角)	可視, 近赤外, パンクロマチック
	TM	185km	30m, 120m		可視, 近・中間赤外, 赤外
	ETM+	185km	30m		可視, 近・中間・熱・赤外, パンクロマチック
	HRV	60km	10m, 20m	± 26° (ポインティング角)	可視, 近赤外, パンクロマチック
	HRVIR	60km	10m, 20m	"	HRV に短波長赤外がバンド 4 に追加
A L O S	PRISM	最大 70km	2.5m	約 ± 1.5° (ポインティング角)	立体視 (0.52-0.77 μm)
	AVNIR-2	70km	10m	± 44° (ポインティング角)	可視近赤外 (0.42-0.89 μm のバンド)
	PALSAR	40-70km 250-350km	10m 100m	10° - 51° (可変おナーイ角) 広域観測	1.27 GHz (L バンド)

以上のALOSの3センサと、検索した6衛星6センサの電磁波上の分類を第4表に示し、第5表に各センサについての概要を示した。

#### 4 画像検索の方法

画像検索は、宇宙開発事業団(NASDA)・地球観測センター(EOC)(現在は宇宙航空研究開発機構)のホームページの「画像検索・注文」で行った。

検索に必要な「観測領域」の東西南北の緯度経度は、対象地点がほぼ中心となるように30分~60分の幅を事例に合わせて適宜とった。「観測期間」については、開始を流出油発生日と変色水視認日、あるいはその前日とし、終了は概ね1週間後とした。なお、「雲量」指定は行わず、「ブラウザ画像」のあるシーンのみを検索した。

なお、運用中の熱帯降雨観測衛星(TRMM,1997年11月28日打上げ)の可視熱赤外観測装置(VIRS)については、同センターではブラウザ画像は検索はできなかったので行なわなかった。

#### 5 検索結果と検証

##### 5.1 流出油の検索

第2表の検索番号 ~ の重質油の事例について検索した結果、第6表が検索にかかった画像数である。表中、[-]は衛星の稼働期間外、[0]は検索にかからなかったもの、[\*]は土出ら(2000)が調べたものを示している。

結果、LANDSAT-5とLANDSAT-7のみが検索にかかった。そのうちLANDSAT-5(TM)の ~ ,LANDSAT-7(ETM+)のは、いずれも雲に覆われて海上を視認することが不可能な状況であり、またLANDSAT-7の ~ については雲がなく状況は最良であったが、流出油地点が画像の領域に含まれず、結局LANDSAT-7(ETM+)画像

の1例のみが検証できる状況であったので、この検証を試みた。

第6表 重質油流出事例における検索結果

Table 6 Retrieved heavy oil runoff case.

重質油等	発生日	検索衛星の名称とセンサ名称					
		JERS-1 (SAR)	ADEOS (AVNIR)	LANDSAT-5 (TM)	LANDSAT-7 (ETM)	SPOT-2 (HRV)	SPOT (HRV)
	7.04.01			1			
	7.06.22	0	-	0	-	-	-
	7.09.03			2			
	8.04.20	*	*	*	-	*	-
	9.01.02	*	*	*	-	*	-
	9.04.03		0	2	-	0	-
	9.07.02	*	*	*	-	*	-
	11.09.24	-	-	0	-	0	0
	11.11.23	-	-	0	-	0	0
	14.03.31	-	-	0	1	0	0
	14.07.25	-	-	0	9	0	0
	14.10.01	-	-	0	1	0	0

\*は土出・井本・陰山(2000)が検索済み  
-は衛星の稼働期間外

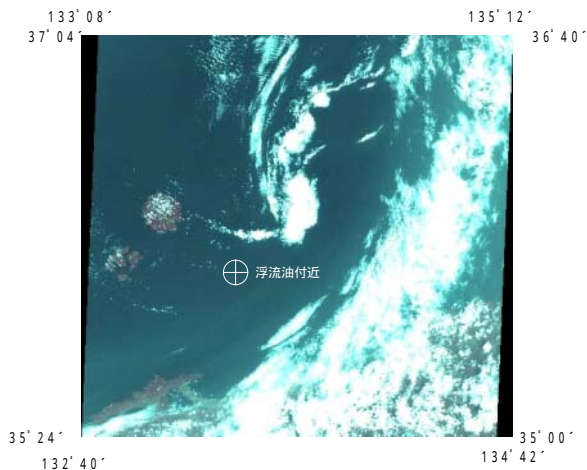
##### 5.2 流出油の検証

###### 5.2.1 流出油事故の概要

検索番号 ~ の流出油事故は、第八管区海上保安本部海洋情報部の漂流予測結果第1報によれば、平成14年3月31日03時30分頃、隠岐諸島南東約20海里において、第3更賜丸(総トン数78t、底引き網漁船)とAIGE号(IGA-、貨物船2,847t、積荷鋼材、燃料油c重油160t)が衝突し、AIGE号から油が流出したもので、油の湧出点36-00.3N,133-31.7Eから120度方向に長さ1,200m、幅500mで浮流しているというものであった。

###### 5.2.2 ブラウズ画像の検証

上記流出油事例に対する各衛星の検索期間は、事故発生の3月31日から4月8日までの9日間とし、第1図が検索にかかった。これは、LANDSAT-7(ETM+)が2002年(平成14年)3月31日01時30分頃(UTC)撮影した画像である。日本時間では10時30分頃で、衝突事故発生の約7時間後となる。図の右(東)側は雲に覆われているが、左中央部に隠岐諸島、その下に島根半島を識別できる。流出油の海域は画像の真ん中やや左下付近にあり、ETM+の分解能が30mと高いことと、4倍まで画像の拡大ができるが、このブラウザ画像からの流出油の検出はできなかった。LANDSAT-7(ETM+)データの波長帯、バンド別処理を行えば流出油の検出可能ではないかと推察されるので、ALOSでは、同様な観測波長を持ち、分解能も10mのAVNIR-2のデータ、特にバンド1~バンド3の画像に期待できると思われる。



第 1 図 LANDSAT-7 (ETM+) のブラウザ画像  
Fig. 1 LANDSAT-7(ETM+) image.

なお，LANDSAT-7 の ETM+ ( Enhanced Thematic Mapper Plus ) は，マルチ ( 可視域 ~ 熱赤外域 7 バンド ) とパンクロ 1 バンドを持つ光学センサで，分解能は可視・近赤外域で 30m，観測幅は 183km すなわち約 100 海里 × 100 海里が 1 画枠である．一方，ALOS の AVNIR-2 は分解能が 10m，マルチバンドを持ち，観測幅 70km でポインティング角 ± 44 度 ( ± 約 410 海里 ) の観測ができる．いずれも雲がある時や夜は観測できない．

また，土出ら ( 2000 ) が調べた以降に発生した検索番号 ~ の事例は，SAR を搭載した JERS-1 の運用が 1998 年 ( 平成 10 年 ) 10 月 12 日に終了したため，SAR 画像による検索はできなかった．SAR は夜間や天候に影響されず観測が可能であるため，PULSAR に向けた検証ができなかったのは残念であった．

5.3 変色水の検索とブラウザ画像の検証

第 7 表は，第 3 表の検索番号 1 ~ 73 事例のうち，検索した衛星と検索結果を示す．表中，[ - ] は衛星の稼働期間外，[ 0 ] は画像が無かったことを示している．LANDSAT-5，LANDSAT-7，ADEOS 及び SPOT-2 がかったが，ADEOS の検索番号 33 ~ 38 はほぼ全域が雲に覆われたり，変色水域の区域から外れた画像であった．SPOT-2 の検索番号 33 ~ 46 は，期間を通した検索で 12 枚かかったが，

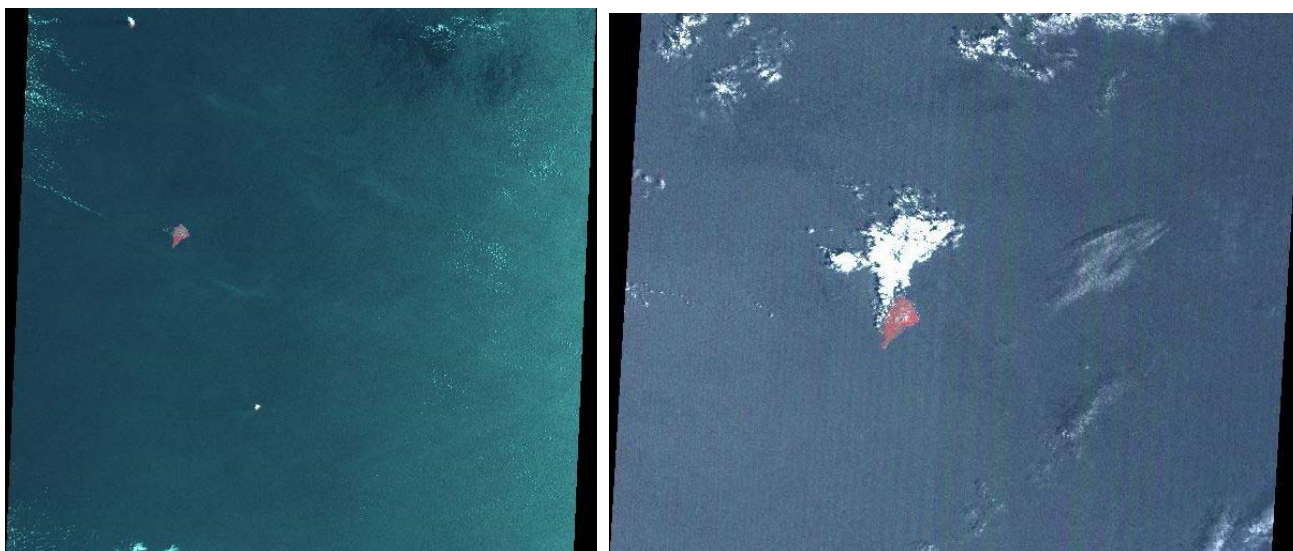
第 7 表 変色水の検索結果

Table 7 Retrieved discolored water case.

検索番号	検索した衛星名称(センサー) 検索にかかった画像数					
	JERS-1 (SAR)	LANDSAT-5 (TM)	LANDSAT-7 (ETM+)	ADEOS (AVNIR)	SPOT-2 (HRV)	SPOT-4 (HRVIR)
1	0		2	-	0	-
5	-	1	-	-	0	0
7	-	-	2	-	-	0
9	0	1	-	0	0	-
10	0	1	-	0	0	-
11	0	1	-	-	0	-
12	0	1	-	-	-	0
13	-	1	-	-	-	0
14	-	1	-	-	-	0
17	-	-	2	-	-	0
19	0	1	-	-	-	0
20	-	1	-	-	-	0
22	-	2	-	-	-	0
23	-	-	1	-	-	0
24	-	-	1	-	-	0
25	0	1	1	0	0	-
26	0	0	1	-	0	-
27	-	2	2	-	-	0
31	-	-	2	-	-	0
33	0	1	-	3	↑ 12 ↓	-
34	0	2	-	2		-
35	0	1	-	4		-
36	0	2	-	0		-
37	0	2	-	0		-
38	0	2	-	5		-
39	0	1	-	0		-
40	0	1	-	0		-
41	0	0	-	0		-
42	0	2	-	0		-
43	0	2	-	0		-
44	0	1	-	0		-
45	0	1	-	0	-	
46	0	1	-	-	-	
47	0	2	-	-	0	
48	0	1	-	-	0	
49	0	1	-	-	0	
51	-	2	-	-	0	
56	-	2	-	-	0	
59	-	2	0	-	0	
60	-	2	0	-	0	
62	-	2	0	-	0	
63	-	1	0	-	0	
64	-	2	-	-	0	
65	-	0	1	-	0	
66	-	2	1	-	0	

どれも全域が雲に覆われ検証不可能であった．なお，JERS-1，ADEOS，SPOT-1 各衛星画像は検索にかからなかった．

検索にかかった LANDSAT-7 ( ETM+ ) 画像に比べ，ADEOS ( AVNIR ) 画像は大尺度であったが，検証できるような画像がなく，あっても変色水域が極小であった時の画像であり，確認に至らなかった．土出ら ( 2000 ) は，ADEOS ( AVNIR ) が変色水を捉えた例を報告しており，ALOS では，AVNIR-2 データに期待できると思われる．参考までに，第 2 図は，今回検索で得た LANDSAT-7 ( ETM+ ) と ADEOS ( AVNIR ) の硫黄島付近のブラウザ画像である．



第2図 硫黄島付近のブラウザ画像（左：LANDSAT-7 右：ADEOS）

Fig. 2 The image near Ioshima (left : LANDSAT-7 right : ADEOS).

## 6 結論

宇宙開発事業団・地球観測センター（現在は宇宙航空研究開発機構）のホームページの画像検索によるブラウザ画像から，海上災害については1995年～2002年の重質油流出12件，変色水については1996年10月～2003年5月の伊豆諸島方面73件の各事例について検出を試みた．検索を行った6衛星（JERS-1 ,ADEOS ,LANDSAT-5 ,LANDSAT-7 ,SPOT-2 ,SPOT-4）の6センサ（SAR ,AVNIR ,TM ,ETM+ ,HRV ,HRVIR）にかかった画像は大変少なく，また雲域が多いもの，対象海域が画像の領域の外側であったもの等が多く，いずれのセンサ画像からも流出油や変色水を認める知見は得られなかった．しかし，ADEOSの可視近赤外放射計（AVNIR）の画像の検出報告（土出，2000）もあり，陸域観測技術衛星（ALOS）のAVNIR-2のデータから海上災害，変色水の状況把握が可能ではないかと推察されるが，曇りや夜間でも有効な合成開口レーダーPULSARに向け，JERS-1のSARによる1999年以後の事例検証ができなかったのは残念であった．

海上における流出油や変色水の状況は，リアルタイムな入手が必要であるので，ALOSの観測領域が変更可能なポイントング機能を駆使し，海上災害の監視に向けた実用化を期待したい．

最後に，人工衛星による観測，その観測センサの空間分解能，観測波長及び観測頻度が増加し，海洋分野の様々な計測が実用化されることを期待したい．

## 参考文献

- リモートセンシング研究会編：リモートセンシング・ノート - 原理と応用 - ，技報堂出版株式会社（昭55）
- 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）
- NASDA：陸域観測技術衛星（ALOS）リーフレット
- 地球観測センターホームページ：  
<http://www.eoc.nasda.go.jp/>
- NASDA：ALOS シミュレーション画像データセットリーフレット
- 坂田俊文：地球を観測する，日本放送出版協会，（1990）
- 長谷川均：リモートセンシングデータ解析の基礎，古今書院，（2001）

## 海軍水路部における海洋観測と当時の日本南岸域の海況について

杉山 栄彦, 手登根 功, 豊嶋 茂 : 海洋情報課

### Status of Oceanographic Research and Ocean Conditions in the South of Japan during World War II

Yoshihiko SUGIYAMA, Isao TEDOKON and Shigeru TOYOSHIMA: Oceanographic Data and Information Division

#### 1 はじめに

各国の海洋調査機関等において利用されずに埋もれている海洋データを発掘・救済するため、GODAR ( Global Oceanographic Data Archaeology and Rescue Project ) が IOC/IODE ( Intergovernmental Oceanographic Commission / International Oceanographic Data and Information Exchange ) のもと 1993 年から推進されている。さらに、西太平洋周辺国においては同プロジェクトが遅滞していることから西太平洋 ( WESTPAC ) を対象とした GODAR-WESTPAC が 2002 年から 5 年計画で実施されることになり、日本海洋データセンター ( JODC ) はその Project-Office を担当することになった。

このようなことから、JODC においても海上保安庁海洋情報部内に埋もれているデータの発掘に努め、海軍水路部による 1931 ~ 1947 年の海洋観測資料約 12,000 点を発掘しデジタル化を行った。本稿では、当時の海洋観測の実施状況と今回発掘した資料の概要及びこれらを基に解析した 1939 ~ 1944 年の日本南岸の海況について紹介する。

#### 2 海軍水路部の海洋観測状況

「海軍時代の水路部海洋調査業務 ( 城至成一 : 水路要報第 81 号 )」には、海軍水路部が海洋学立立場から大型の測量艦を用いて太平洋上に乗出し、本格的な海洋調査にとりかかったのは 1924 年 ( 大正 13 年 ) であると記載されている。

以降、海軍水路部は、測量艦や海洋観測船を増強するとともに他機関の調査船 ( 凌風丸, 蒼鷹丸,

白鳳丸, 神鷹丸等 )、捕鯨船等を必要の都度多数徴用し、本州南方海域の一斉観測を行うなど海洋調査を積極的に実施した。

さらに、1939 年からは、第 1 表に示すように日本沿岸の要所 19 箇所に海洋観測基地を順次設け観測網を拡充した。これらの基地は「水路部海象班 ( 以下これらを総称して「基地観測班」という )」と命名され、班長以下 10 数名による編成で、20 トン級の漁船を雇い、基地から 100 海里圏内に設けられた観測定線について、600m 層までの各層観測をほぼ毎月実施した。しかしながら、これらの基地観測班も戦局の悪化に伴い 1944 年 9 月には全て閉鎖された。

なお、これらをはじめとする水路部創設から昭和 20 年までの海洋調査業務については、水路要報第 81 ~ 84 号に城至氏 ( 当時海象課専門官 ) による詳細な記載があり参照されたい。

#### 3 資料発掘の経緯と資料整理

2001 年秋ごろ、当部海洋調査課 ( 現環境調査課 ) 職員から“倉庫に段ボールに詰められた戦前の海洋観測資料が在る”との知らせを受けた。GODAR の推進中でもあることから、即座に JODC で引き取ることを伝え、大小 30 余の段ボール箱を当課倉庫に搬入した。まずは、段ボール箱から資料を取り出し床に並べ殺虫剤を散布した。資料は埃まみれで色あせていたものの数値等ははっきりと判読できる状態にあり、数日後から観測表等の資料を一つ一つ調べ観測年、調査船、観測項目などに分類することから着手した。マスクや手袋を装着して従事したものの痒みに耐えての作業であった。

第 1 表 デジタル化を実施した観測機関別測点数

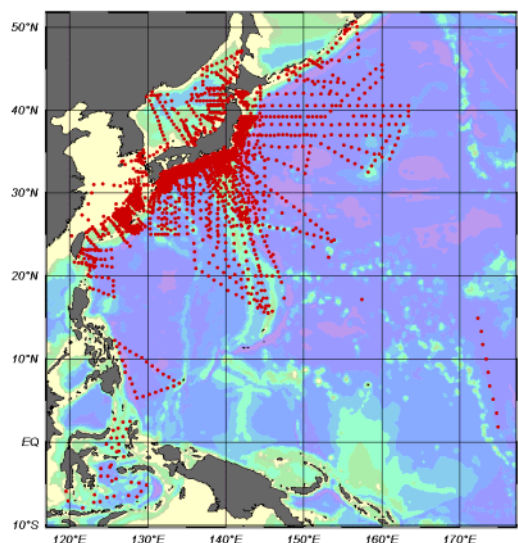
Table 1 Number of digitized stations for each oceanographic research organization.

機 関 名	観 測 船	開 設	閉 鎖	観 測 期 間	観 測 点 数
基地観測班					
釧 路	第十二金徳丸	1943 年 8 月	1944 年 9 月		
浦 河	第 八 富 丸	1943 年 3 月	"	1943 ~ 1944 年	42
八 戸	第 一 星 徳 丸	1942 年 7 月	1944 年 2 月	1943 年	8
女 川	弥 生 丸	1940 年 5 月	1944 年 9 月	1940 ~ 1944 年	1108
小 名 浜	第二海津見丸	1940 年 6 月	1944 年 2 月	1940 ~ 1944 年	1530
勝浦(千葉)	全 勝 丸	1940 年 9 月	1944 年 9 月		
下 田	瓜 木 丸	1939 年 5 月	1944 年 2 月	1939 ~ 1942 年	622
八 丈 島	第三毘沙門丸	"	1939 年 9 月	1939 ~ 1943 年	467
伊豆大島	"	1939 年 10 月	1943 年 12 月		
浜 島	宝 洋 丸	1940 年 6 月	1944 年 2 月		
紀伊勝浦	日 光 丸	1939 年 5 月	1944 年 9 月	1939 ~ 1944 年	1589
室 戸	姫 丸	1942 年 7 月	1944 年 2 月	1942 ~ 1944 年	215
土佐清水	い号大吉丸	1939 年 3 月	1944 年 9 月	1939 ~ 1944 年	1258
油 津	厚 生 丸	"	"	"	1610
古 仁 屋	第 六 虎 丸	1941 年 1 月	"	1941 ~ 1943 年	366
那 覇	第十六蓬萊丸	1939 年 10 月	1944 年 2 月	1939 ~ 1944 年	847
蘇澳(台湾)	第 八 共 栄 丸	1939 年 7 月	1944 年 9 月		
新港(台湾)	い号第三大和	1943 年 2 月	1944 年 2 月		
唐 津	い せ や 丸	1942 年 9 月	"	1942 年	13
釜山(韓国)	大 吉 丸	1943 年 2 月	1943 年 10 月		
水路部(測量艦等)				1931 ~ 1943 年	1184
水 産 庁				1939 ~ 1943 年	650
県水産試験場				1939 ~ 1941 年	632
そ の 他				1939 ~ 1947 年	55
合 計					12196

4 発掘資料の概要

戦前の水路部測量艦による観測データは、JODC 設立(1965 年)前後にデジタル化され、既に J-DOSS( JODC データオンラインシステム)に登録されている。今回の発掘資料の中から未登録データを選別し、それらのデジタル化を行った。その測点数は 1931 年から 1947 年(昭和 6 ~ 22 年)までの 12,196 測点、観測海域は日本周辺からフィリピン、インドネシア、マーシャル諸島の沖合にまで及んでおり、本州の東及び南沿岸域、沖縄周辺ではほぼ毎月観測されている。観測点の約 80%は前述の基地観測班によるものであるが、海軍が徴用した中央水産研究所や各県水産試験場の調査船によるデータも約 1,300 点含まれている(第 1 図及び第 1 表)。観測層は 600m 層或は

800m 層までが大部分であるが、4000m 層までのデータもかなり見られる。



第 1 図 観測点分布図

Fig. 1 Distribution of serial observations

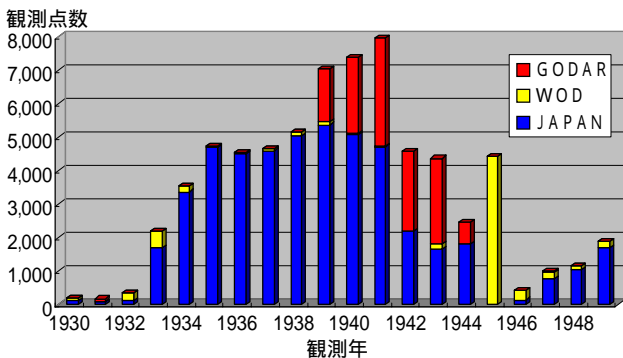
水温，塩分，pH はほとんどの観測点で測定されており，溶存酸素，珪酸塩も少数ではあるが見られる（第 2 表）. この当時，測量艦においても pH は観測されていたものの J-DOSS 中には見当たらず，今回の発掘により当時の pH データがかなり充足されることになる．

第 2 表 観測項目別測点数

Table 2 Number of stations for observed data items.

観測年	水温	塩分	PH	溶存酸素	ケイ酸塩
1931	42	42	22	22	
1939	1,464	1,447	944	73	
1940	2,197	2,187	2,163		15
1941	3,121	3,113	1,994		30
1942	2,467	2,466	1,940		
1943	2,320	2,243	2,155		17
1944	556	555	543		
1945					
1946	7	7			
1947	20	20	20	14	20
合計	12,194	12,080	9,781	109	82

1930～1949 年の日本周辺海域（第 3 図に示す海域）の各層観測数の推移を第 2 図に示す．現在 J-DOSS に登録されている日本の海洋調査機関の観測データを“ JAPAN ”，World Ocean Database 1998 から採用した日本国以外のデータを“ WOD ”，そして今回発掘・デジタル化したものを“ GODAR ”と表示した．このグラフからも分かるように，今回のデジタル化で 1942～1943 年頃のデータが充実することになる．

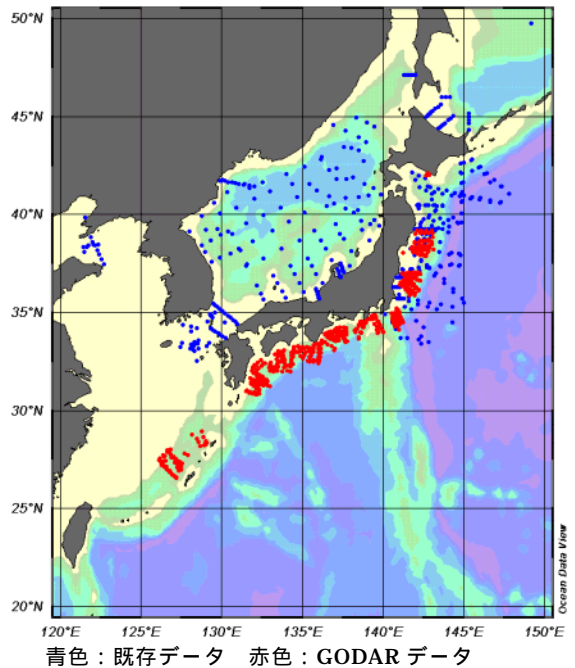


第 2 図 各層観測測点数の推移

Fig. 2 Time series for serial observed data.

特にこれまで空白であった日本沿岸の多くの海域が補完され沿岸海況を捉えるうえで大変貴重なものといえる．その一例として 1943 年夏期（7～

9 月）の状況を第 3 図に示す．また，1944～1945 年の観測点の分布を見ると，1944 年春～夏には沖縄周辺が，秋以降は日本の観測データは皆無となり，1945 年になると米軍等によるデータのみとなる．同年の年当初は沖縄や小笠原諸島付近，春には沖縄付近に集中し，夏には日本海を除く日本近海全域の観測が実施されており，戦局とともに観測位置が推移していった状況が窺える．



第 3 図 1943 年の夏期の観測点図

Fig. 3 Station plots for serial data in summer 1943

### 5 1939～1944 年の日本南岸の海況

1934～1943 年における黒潮大蛇行の存在については，吉田（1961）などによって報告されている．また，1951 年（昭和 26 年）に当庁が刊行した「日本近海海流図（1931～1949 年）」からもその状況が見て取れる（第 4 図）. しかしながら，同海流図は年 1 図程度（1940 年は 11 図あるが，1941 年，1944 年，1945 年はない）に過ぎないことから，J-DOSS に収録されている 1939～1944 年のデータに今回デジタル化したデータを加え，四季（冬；1～3 月，春；4～6 月，夏；7～9 月，秋；10～12 月）毎の日本周辺海域の 200m 層の水

温分布を作成し，日本南岸域の海況について黒潮大蛇行の推移を中心に追ってみた。

作図は，2003年9月からJ-DOSSからの提供フォーマットの一つとしてODVスプレッドシートを採用したこともあり，海洋データ可視化ソフトODV(Ocean Data View)の“VG Gridding(データ密度が十分でない場合に用い，データ密度に応じた矩形が自動的に採られる)”を用いて行った。必ずしもデータ数が十分でないので，正確な等値線図とはいえないまでも大まかな海況を捉えるには十分な結果が得られた。

1939年冬(第5.1図)においては，冷水域が室戸岬沖から遠州灘沖にかけて南北に扁平な形で存在しているが，夏(第5.2図)には遠州灘沖に明確な冷水塊を有す典型的な大蛇行の形状を呈している。この様子は第4図に示す海流図からも読み取れる。しかしながら，この状態は長く続かず1940年春(第5.3図)頃からは冷水域が四国沖に徐々に張り出し，1941年夏(第5.4図)には黒潮流軸の指標とされる15等温線も室戸岬沖では32.5N付近にあり，黒潮は都井岬東方から潮岬沖にかけてはほぼ東流であったろうと推測される。その後，四国沖の冷水域は一旦縮小するものの1942年春(第5.5図)には九州東方まで大きく拡大するとともに，冷水域の中心部も紀伊水道沖に移動し，黒潮は四国・紀伊半島の遥か沖合いにある。しかし，その年の夏(第5.6図)には四国沖の冷水域は消滅し中心部は遠州灘沖に移り元に復している。この状態は1943年春(第5.7図)まで続き，1943年秋(第5.8図)には冷水域は縮小し黒潮はB型となっている。それ以降については沖合いのデータがなく判然としないが，1944年の冬及び夏(第5.9図及び第5.10図)から見る限り黒潮はC型に移行し大蛇行は消滅したものと推察される。

以上のことから，この期間の大蛇行には西偏が見られること，大蛇行の終焉は1943年秋頃であることがいえるのではないだろうか。なお，このことは，岡田(1978)及び吉田(1961)によっても述べられている。

## 6 おわりに

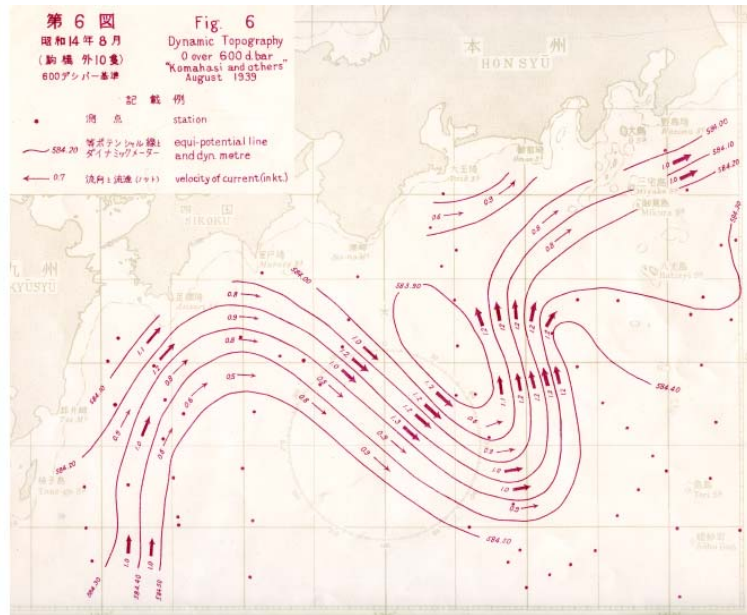
上述のように，発掘・デジタル化したデータと既存データを合わせて日本南岸の200m層水温分布図を描画し，当時の海況の把握を試みた。しかし，データの精査や当時の文献・論文の調査も不十分であり解析もまだ足りないが，当時存在していた大蛇行の動向の概観は捉えることが出来たものと思う。

今回発掘したデータの大部分は，基地観測班による100海里以内の沿岸域のデータである。戦時下において，傭船した20トン程度の漁船による観測は大変な労苦を伴ったであろうことは想像に難くない。これらのデータはJ-DOSSに収録し公開しており，このことで幾らかでも先人達の熱意，努力に報いられれば幸いである。そして，これらのデータは当時の沿岸域の海況把握，ひいては地球環境変動の研究等に貢献できるものとする。

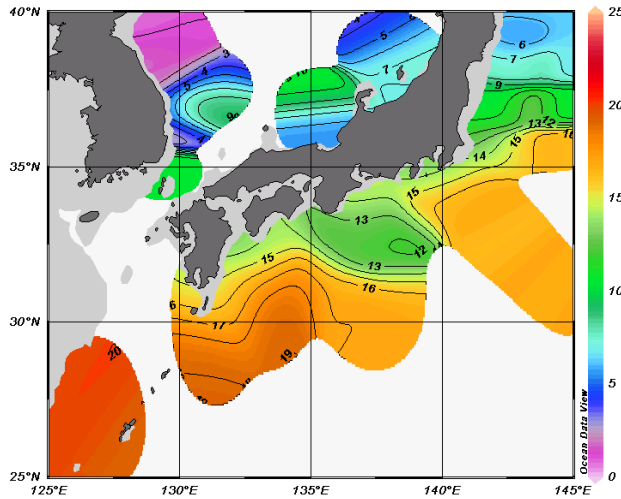
最後に，今回のデータ発掘や資料整理に奮闘された池田俊一氏，清水良夫氏をはじめとする当時の海洋情報課の職員の方々，さらには執筆にあたり貴重な助言をいただいた吉田昭三氏(日本水路協会)，佐藤敏氏(海洋情報課)に心からの謝意を表します。

## 参考文献

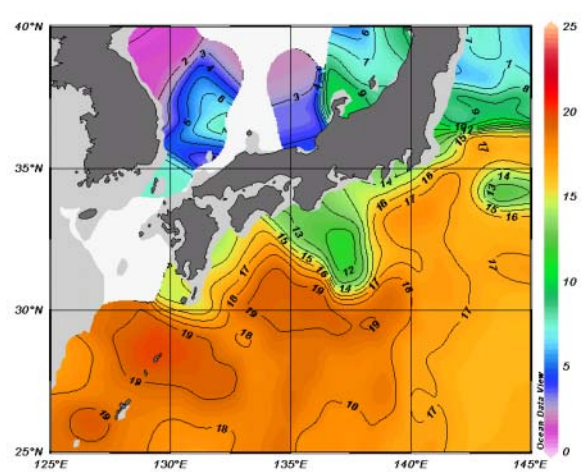
- 岡田正実：黒潮の大蛇行歴(1854～1977)と潮汐観測，月刊海洋科学，号外(Vol.1 No.2)，81-88，(1978)
- 城至成一：海軍時代の水路部海洋調査業務，水路要報，第81～84号，(1966～1968)
- 吉田昭三：遠州灘沖冷水塊と黒潮の変動について(その1)，水路要報，第67号，54-57，(1961)
- Ocean Data View ユーザーズガイド，(日本語翻訳：日本海洋データセンター，海洋情報研究センター)，(2002)



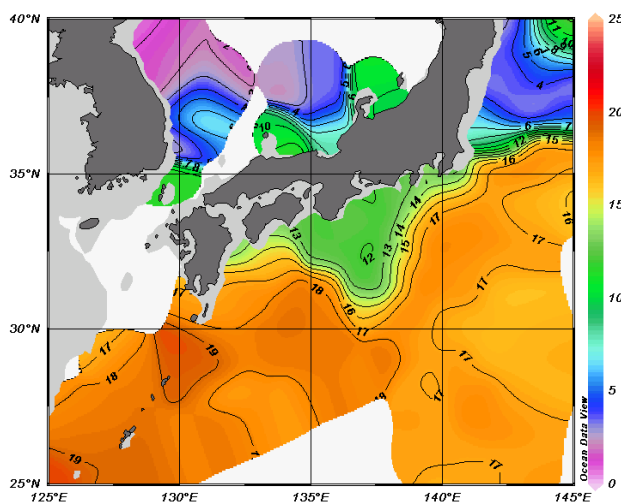
第 4 図 1938 年 8 月における日本南岸の海流(出典：日本近海海流図(海上保安庁))  
Fig. 4 Current chart in the South of Japan (Aug., 1939)



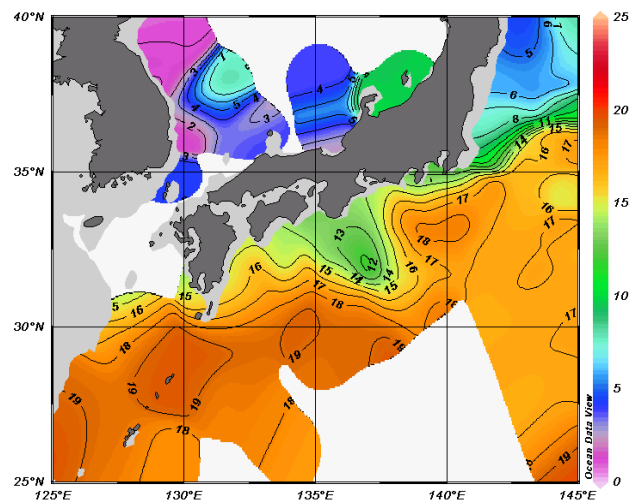
第 5.1 図 1939 年冬期 (200m 層水温)  
Fig. 5.1 Win., 1939 (200m Temp.)



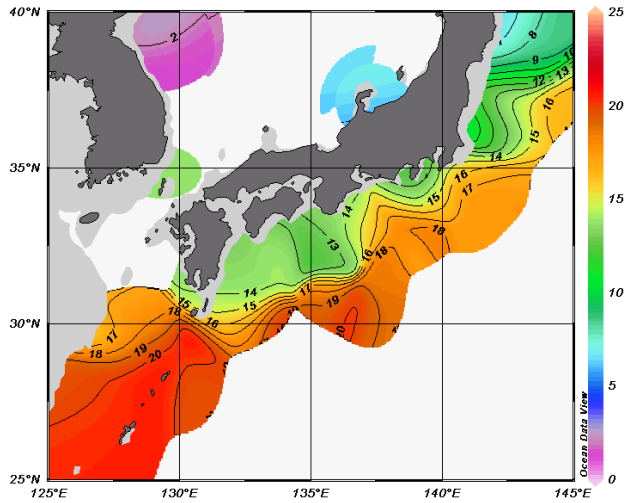
第 5.2 図 1939 年夏期 (200m 層水温)  
Fig. 5.2 Sum., 1939 (200m Temp.)



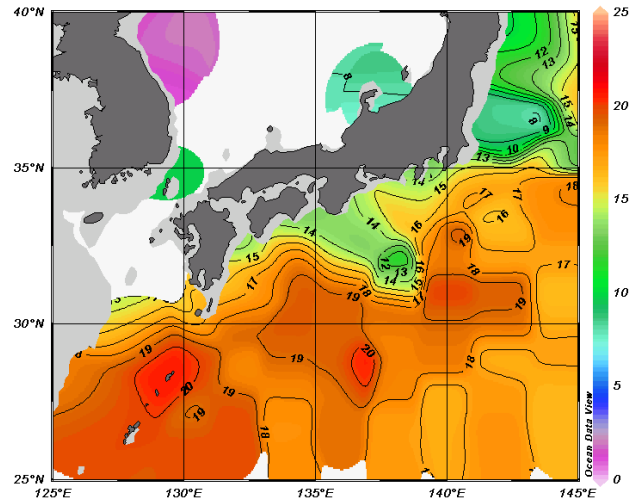
第 5.3 図 1940 年春期 (200m 層水温)  
Fig. 5.3 Spr., 1940 (200m Temp.)



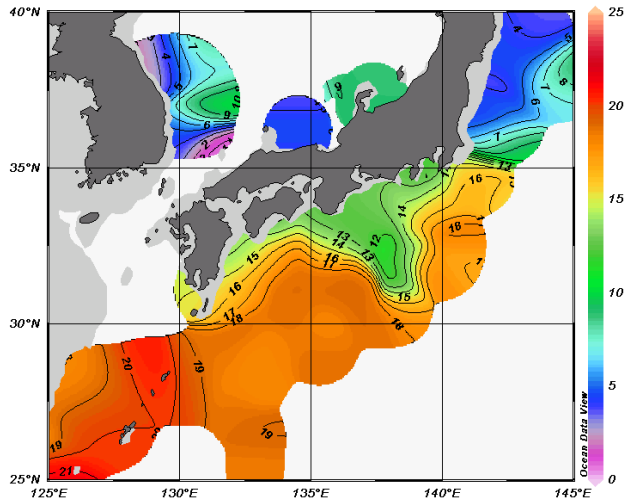
第 5.4 図 1941 年夏期 (200m 層水温)  
Fig. 5.4 Sum., 1941 (200m Temp.)



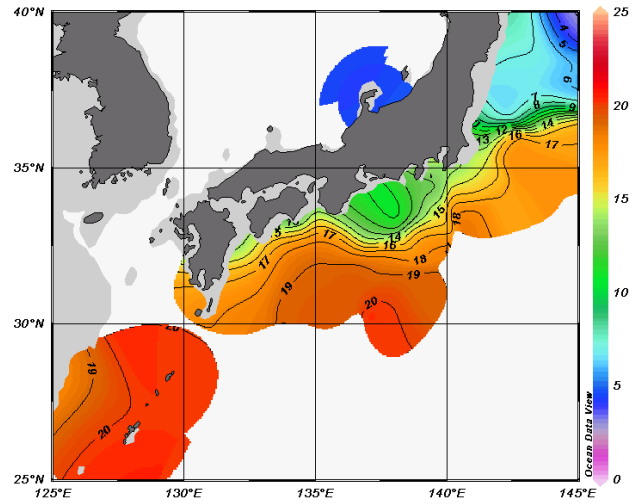
第 5.5 図 1942 年春季 (200m 層水温)  
Fig. 5.5 Spr., 1942 (200m Temp.)



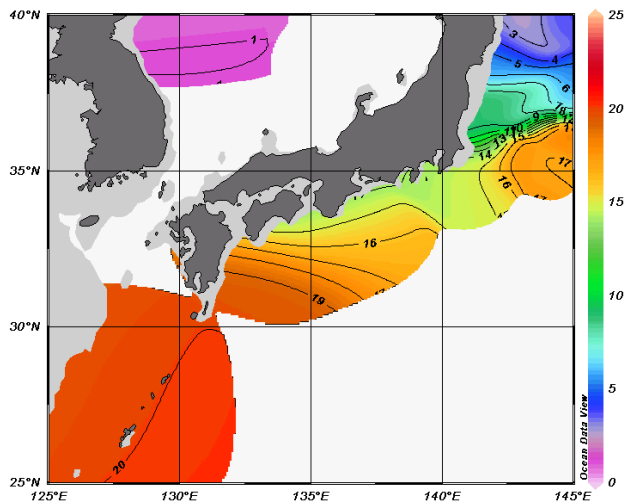
第 5.6 図 1942 年夏期 (200m 層水温)  
Fig. 5.6 Sum., 1942 (200m Temp.)



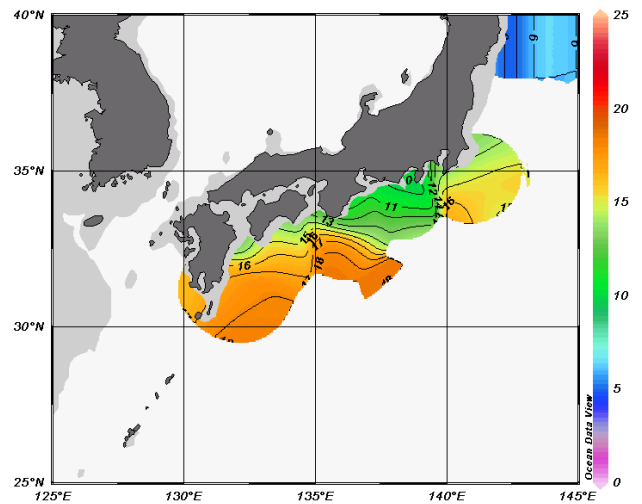
第 5.7 図 1943 年春季 (200m 層水温)  
Fig. 5.7 Spr., 1943 (200m Temp.)



第 5.8 図 1943 年秋期 (200m 層水温)  
Fig. 5.8 Fall, 1943 (200m Temp.)



第 5.9 図 1944 年冬期 (200m 層水温)  
Fig. 5.9 Win., 1944 (200m Temp.)



第 5.10 図 1944 年夏期 (200m 層水温)  
Fig. 5.10 Sum., 1944 (200m Temp.)

## 河川からの噴流等が漂流に与える影響について

木村信介：第十管区海上保安本部海洋情報部

### The effect of jet from rivers to the driftings

Shinsuke KIMURA: Hydrographic and Oceanographic Department, 10th R.J.C.G. Hqs.

#### 1 はじめに

平成 15 年 7 月，鹿児島市甲突川では河口から海部に流される海浜事故が，熊本県水俣市では集中豪雨により発生した土石流により犠牲者が内陸山間部から海部まで押し流される災害が発生した。犠牲者のなかには潮流と風の影響だけでは説明できないほど速い速度で長距離を漂流した例もあった。河川流が海部に流入した後どの程度沖合まで影響を与えるかについて調査された例は少なく不明な点が多い。2 件の事例における河川流の影響について考察した。



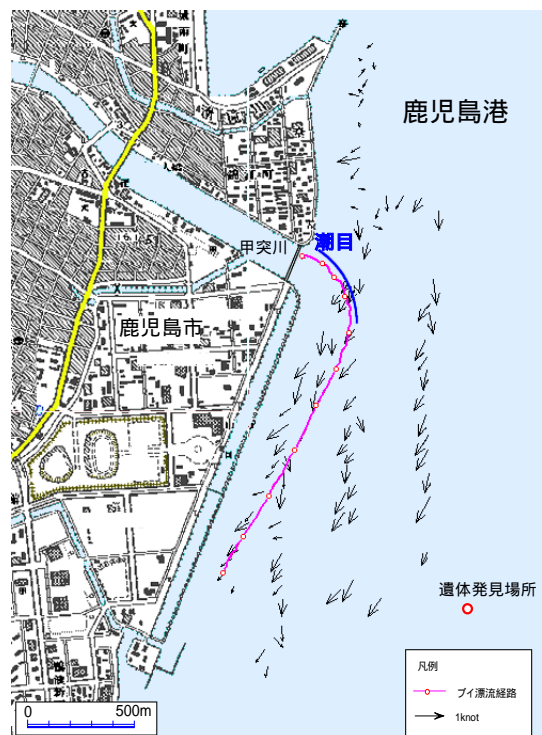
第 1 図 位置図

Fig.1 Location map

#### 2 甲突川遊泳者行方不明の例

平成 15 年 7 月 3 日，鹿児島市の甲突川河口で遊泳中の高校生が行方不明となり，20 日後に約 1.6km 離れた場所で発見された。この事故は社会的反響が大きく，長期間に渡って捜索が実施された。河口付近は急に深くなっているために足を取られ，漂流することなく直ぐに水面下へ沈んだと考えられるが，河口付近の流れ等についても問い合わせが相次いだ。

事故現場で，発生時と同様の潮時(下げ潮・南流)にブイの漂流と 20m 型測量船に搭載している超音波流速計(古野電機製 CI-60G，以下 ADCP と略記)による潮流観測を実施した。甲突川は降雨による流量変化が大きい河川で，事故発生は降雨の翌日であったが，本観測前の数日間に降雨はなく水量は少なめであった。観測は，SONY 製の小型 GPS を搭載したゼニライトブイ社製オープンコム対応ブイを河口付近から漂流させ，1 分間隔で位



第 2 図 ブイの漂流経路と潮流

Fig.2 Trace of a drifting buoy and tidal current

置データを収録した。結果を第2図に示す。河口付近には明瞭な潮目が形成され、ブイや河川から流出した漂流物は潮目に沿って河川水側を帯状に流れている。ブイの漂流経路からは河川流の流軸が沖合まで伸びているとは言えず、また ADCP により観測された各層の流向・流速からも河川水と海水の流れを識別できる程の違いは認められない。

ADCPの観測で河口付近の流況を把握することができなかったのは、ADCPの仕様のうち次の点が原因であると考えられる。

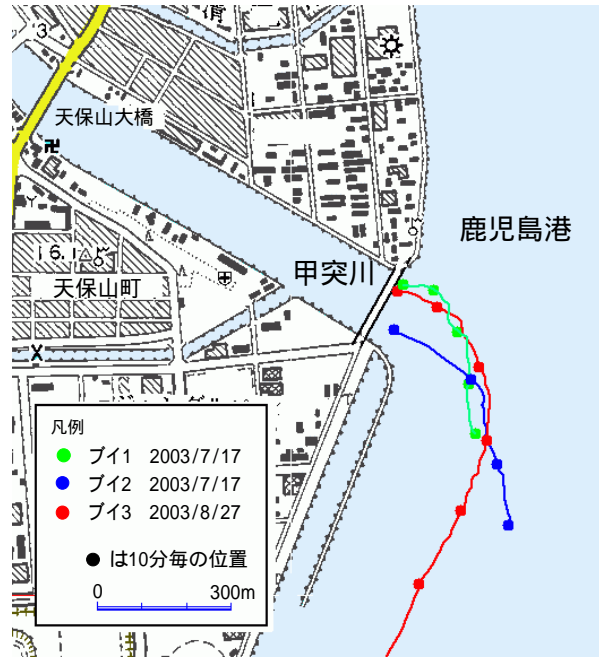
- ・最短でも 15 秒間のデータを平均化すること、及び、仕様変更により観測層を 3 層から 10 層に増やしたためサンプリング間隔が 3 秒から 15 秒になっていることから、小規模な流れは周辺の観測値と平均化されて判別できなくなってしまうこと。
- ・表面から水深 5m までの流れを観測できないこと。

第3図は別の日の観測結果も追加したブイの漂流経路を示す。また、第4図は各ブイの漂流距離と速度の関係を示す。第4図からは、河口付近では周辺の海部に比べて漂流速度が速い場所があり、速度変化も著しいことが読みとれる。ブイ 1, 2 は収録間隔を短く設定したため漂流速度の小さな変化を捉えていて、漂流速度はブイ 1 が 0.4~2.0kn、ブイ 2 は 0.5~1.3kn の範囲で変動し、平均速度はどちらも 0.9kn であった。なお、第5図のとおり、河口付近の海底地形は水深 30m 以上まで続く急な斜面であることから、地形が流れに影響を与えることは少ないと考えられる。

以上から、河口付近の流れについて、河川からの流量が少ない場合には漂流経路全体に大きな影響を与えることはないが、局地的に変化の大きい流れが存在するため海浜事故が発生する危険性が高いと考えられる。

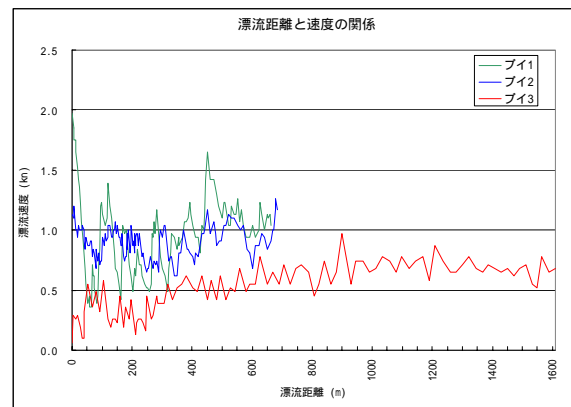
### 3 水俣水害の例

平成 15 年 7 月 20 日、熊本県水俣市付近では 0~7 時に 224mm、最大時間雨量 91mm の降水が



第3図 ブイの漂流経路

Fig.3 Trace of drifting buoys



第4図 漂流距離と速度の関係

Fig.4 The relation between distance and drifting speed

あり、4時30分に水俣川河口から約11km上流で土石流が発生し、犠牲者19名のうち6名が大量の木材等と共に八代海まで押し流された。

平常時の水俣川河口付近の航空写真(平成12年5月撮影)を第6図に示す。図中の赤矢印は地形と漂砂の状況から推測した河口付近の流れで、緑線は土砂による海水の濁りの境を示している。この写真からは平常時の河口付近では流れは緩やかで河川水や漂砂は沖合まで進出することなく沿岸沿いに留まっている。このため河川から漂流してきた物も沖合まで押し流されることはなく、海岸付近を起点とした漂流と同様に扱うことが可能であると考えられる。

一方、水俣川の水害発生時の状況を検証するために、遺体及び流木の発見位置を第7図に示す。遺体の発見時刻は次のとおりである。

土石流発生：20日 04:30

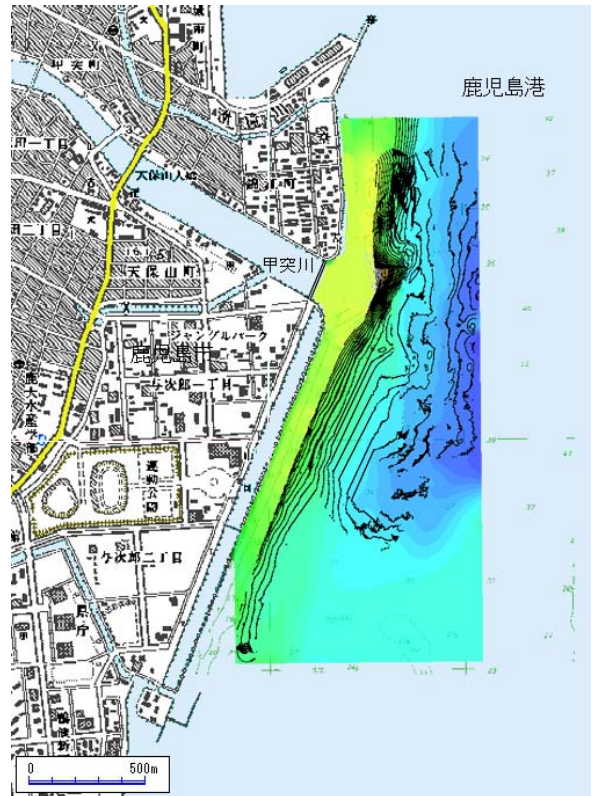
A点：20日 17:20      D点：23日 13:50

B点：23日 07:40      E点：23日 15:37

C点：23日 09:17      F点：25日 09:57

木材は21日に漂着しているのが確認された場所である。災害発生後、行方不明者の捜索は土石流発生現場付近を中心に開始されたが、A点で発見された遺体が水害によるものであると確認されたため、海部でも捜索が開始され、範囲は八代海及び長島の南側海域までと広範囲に設定された。

水俣川河口から最初に遺体が発見されたA点までの直線距離は約15.8海里あり、土石流発生の約13時間後に発見されている。A及びF点までの漂流経路を推測すると、水俣川から目吹瀬戸までは河川の増水と土石流によって発生した噴流により運ばれ、一方はF点で漂着、他方は以後を潮流と風によってA点まで運ばれたと考えられる。A点からの逆漂流予測によって目吹瀬戸通過時刻を予測し、水俣川河口から目吹瀬戸までは直線で漂流したと仮定すると、河口から目吹瀬戸まで約9海里を平均1.5kn程度で運ばれたことになる。水俣から目吹瀬戸にかけて当時の潮流推算値は0.0～0.3kn程度、方向は南南西～北北東であることから、噴流は潮流の影響をほとんど受けずに八代海



第5図 甲突川河口付近の海底地形

Fig.5 Bathymetric map at mouth of Koutuki river



第6図 水俣川河口付近の航空写真

Fig.6 Aerial photograph at mouth of Minamata river

を横断したと考えられる。

他の発見場所については、B 及び E 点は河口に達した後に噴流や潮流の影響をほとんど受けずに河口付近に漂っていたもの、C 及び D 点は八代海沖合まで流出した後に南北方向の潮流により漂流していたものと考えられる。また、D 及び F 点は漂着状態で発見されたことから、発見時刻より以前から発見場所に達していたと考えられる。

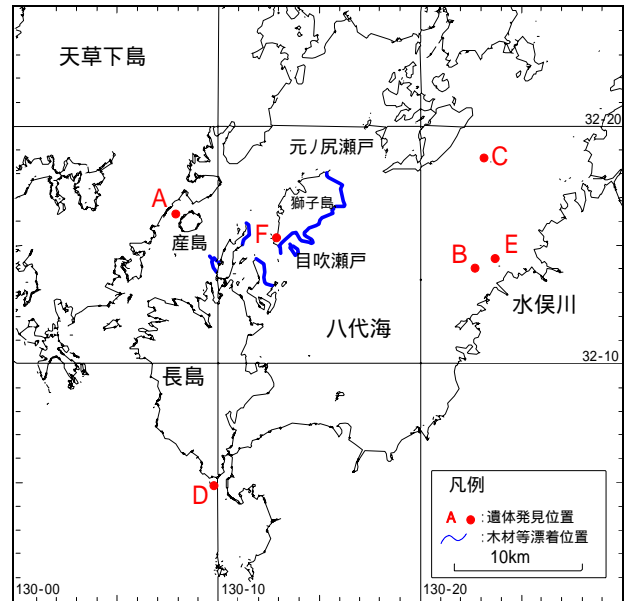
水俣川の河口から土石流発生場所までの距離は約 11km、高低差は約 80m でこの間の平均勾配は 1/127 程度である。水俣川の河床縦断面を第 8 図に示す。これは国内の一般的な河川と比較して特殊な条件ではないことから、他の河川でも増水時には同様の噴流が発生している可能性がある。

### 4 おわりに

河口付近では河川流の延長が海部まで及んでいることは容易に想像できるが、現段階でその影響の程度を推測できるほどの資料は整備されていない。本稿にも噴流の規模等を推測できるような資料はないが、河川からの噴流により長距離を漂流したという事例を踏まえ、今後同様の事例が発生した際に漂流予測等の参考になれば幸いである。

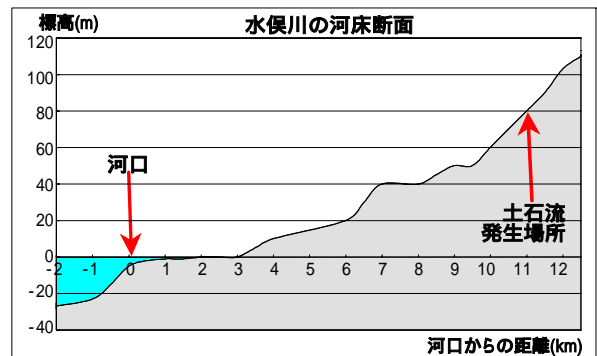
### 5 謝辞

本報告の作成にあたり、ご指導と資料の提供を頂いた鹿児島大学工学部の西隆一郎助教授に感謝の意を表します。



第 7 図 遺体及び流木発見位置

Fig.7 Places of found bodies and drifting timbers



第 8 図 水俣川の河床断面図

Fig.8 Cross section of river bed of Minamata river

「たぎり」と浅海用マルチビーム測深機

松尾 美明, 田 賀 傑 : 第十管区海上保安本部海洋情報部

"Tagiri" and Shallow-sea Multi-beam Echo sounder

Yoshiaki MATSUO and Masaru TAGA:

Hydrographic and Oceanographic Department, 10th R.C.G. Hqs.

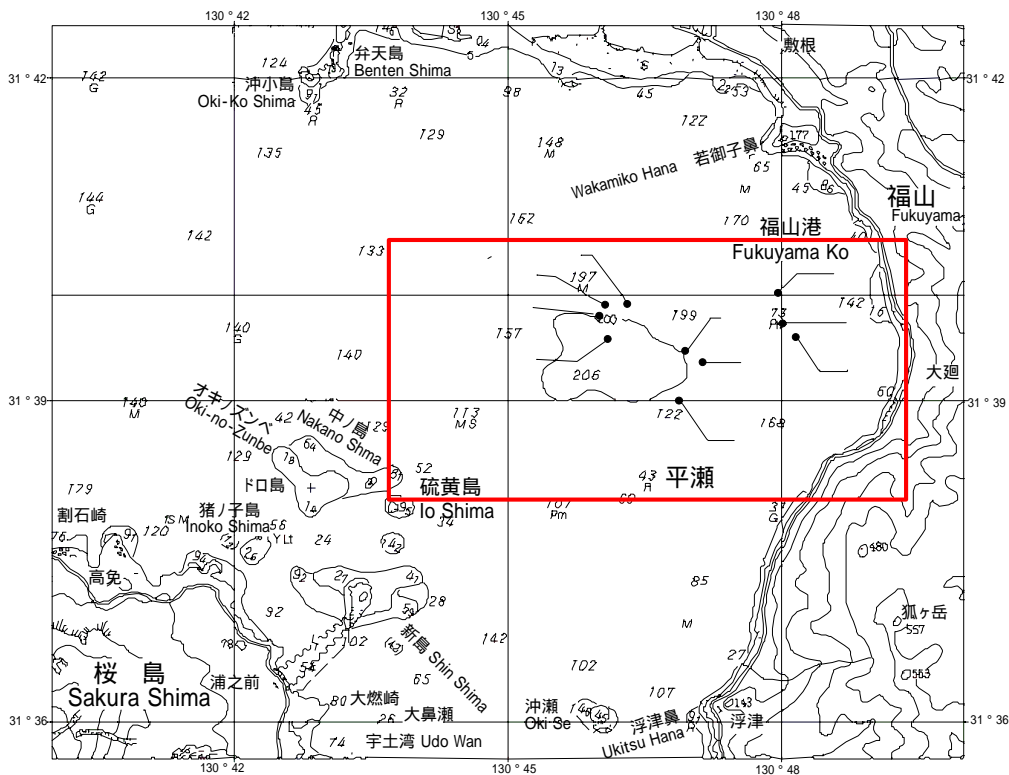
1 はじめに



鹿児島湾奥の福山町沖には、若尊カルデラと呼ばれる海底火山がある。平成 15 年 1 月、火山噴火予知連絡会は日本の活火山に関する再検討の中で、若尊カルデラを新たに活火山リストに追加した。ここでは「たぎり」と呼ばれるガスの湧出(写真 1)が以前より知られており、火山活動との関連が指摘されている。当本部では、若尊カルデラの活動状況を把握する試みの一つとして、測量船「いそしお」によりガスの湧出地点の調査を実施した。従来から、アナログ測深機でガス(泡)が捉えられることは知られていたが、今回の海域は、浅いところで水深 70m 台、深いところでは 200m

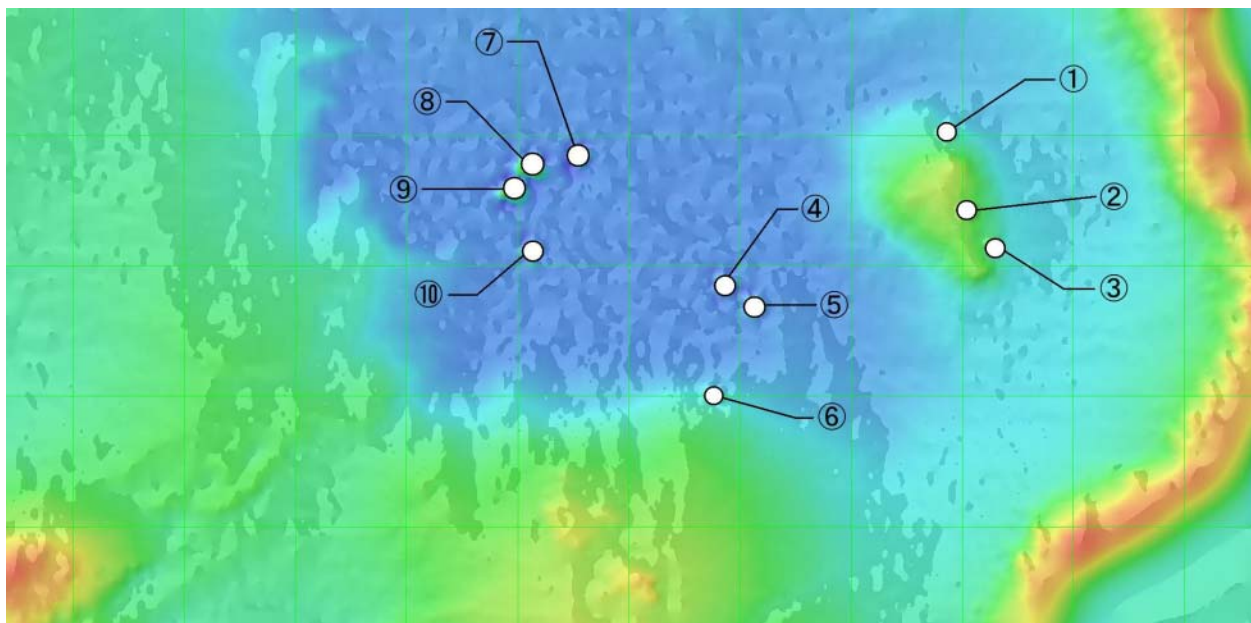


写真 1 たぎり(泡)

Photo. 1 Tagiri (Bubbles)



第 1 図  調査区域 泡記録の位置  
Fig. 1  Survey area Positions of Bubble



第 2 図 陰影図

Fig. 2 Shadow Image

台であり、かつ広いため、浅海用マルチビーム測深機をメインに使用して調査した。

調査区域の中でガスの湧出地点は、第 1 図及び第 2 図に示した 10 ヶ所である。本稿では、HYPACK Max によってガス（泡）を判別する方法について紹介する。

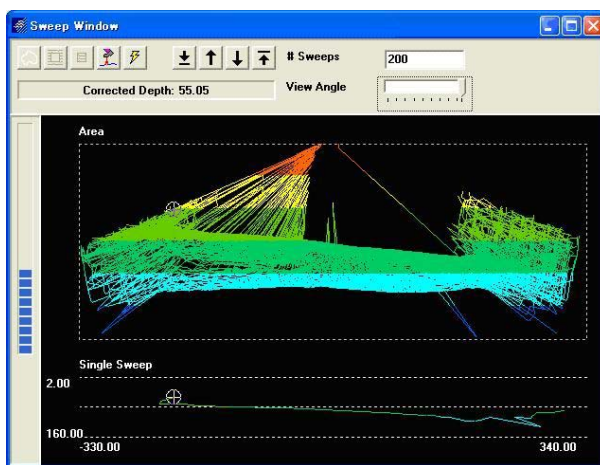
2 調査方法

たぎりは、海図上の水深 73m 付近では、常時確認できる（海面が静穏なとき）ので、その場所を

中心に、東西方向の測線を 100m 間隔で設定した。これは、アナログ記録とデジタル記録を対比できるようにし、処理の際の目安にするためである。

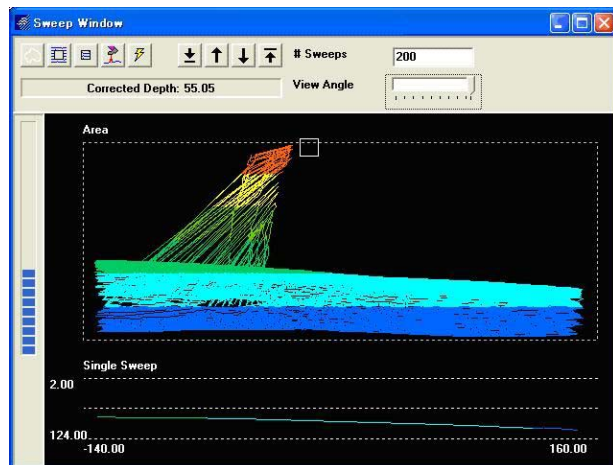
音響測深機は、浅海用マルチビーム測深機 (Seabat 8101ER) を主として使用し、補助として 100m 以浅は浅海用音響掃海機 (PDR601 型)、以深を中深海用音響測深機 (PDR103 型) を使用（いずれも船底装備）した。

3 データ編集



第 3 図 マルチビームの編集(編集前)

Fig. 3 Edit of Multi-beam Data (before)



第 4 図 マルチビームの編集(編集後)

Fig. 4 Edit of Multi-beam Data (after)

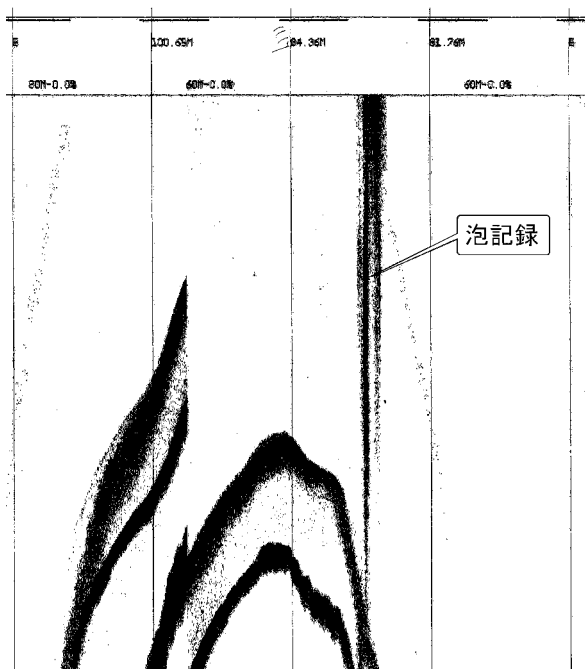
集録したデータを，HYPACK Max (MB Max) にてマルチビーム測深のデータ編集を行った．編集に当たっての留意点は，ノイズに対してあらかじめフィルターをかけるかどうかである．今回の目的は，海底から海面まで立ち昇る，泡の様子を見ることである．このため，Depth 及び Angle Limit 等のフィルタ - はかけないで，マニュアルでノイズの除去を行った．なぜなら，泡がどの高さまで立ち昇っているかわからないからである．ノイズの除去方法は，まずアナログ記録上のガスの記録とデジタル記録 (Sweep Window 画面) 上のガスの記録を対比させ，デジタル記録上でのガ

スの形を認識 (第 3 図) する．次に，画面の中で記録を見る角度を変更させたりして，明らかにノイズと言えるものは除去し，規則性のあるものは残していく，そして，ある程度の処理 (第 4 図) までいったら，Fill Matrix をかける (第 5 図)，これは，第 4 図の状態では，測深の点どうしを線で結んでいるためにわかりにくい (よく見ると斜めの線の間，立ち昇る泡の線が確認できる) ので，見やすくするために行く．そうすると，点どうしを結んだ線が消えて，点だけになり見やすくなる．なお，第 5 図の画面でもノイズの除去は可能である．次に，デジタル測深記録とアナログ測深記録 (第 6 図) を比較するために，第 6 図を第 7 図と同じ方向にした．これを見ると，アナログ記録は泡が噴出している感じだが，デジタル記録は泡が立ち昇る感じ (写真 1 参照) である．



第 5 図 Fill Matrix 後

Fig. 5 After Fill Matrix



第 6 図 アナログ記録 (PDR601 型)

Fig. 6 Analogue Record (Type PDR601)

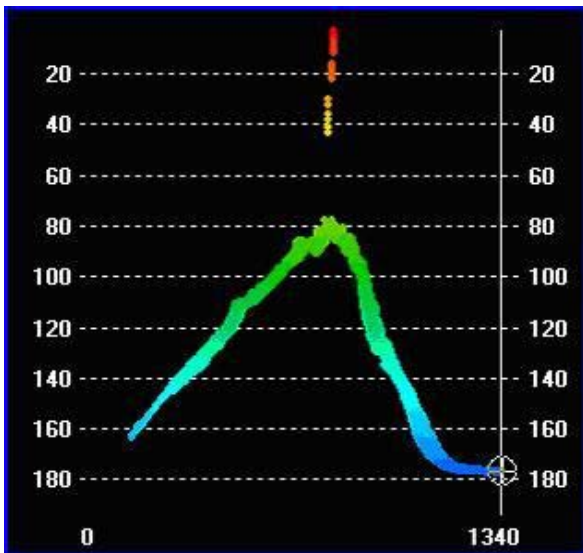
#### 4 成果



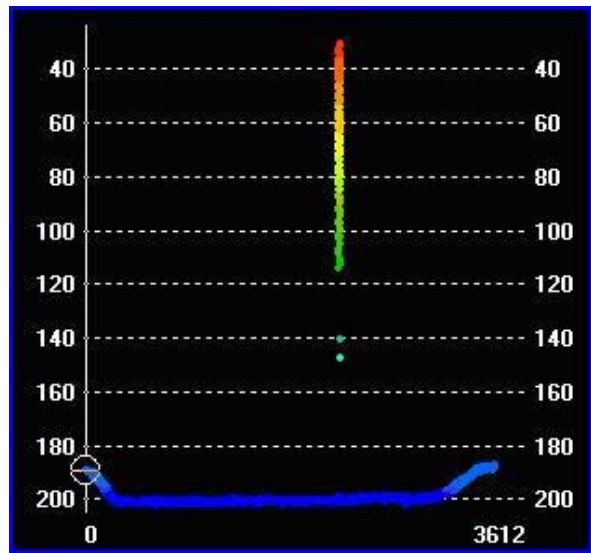
第 7 図 デジタル記録 (SeaBat 8101ER 型)

Fig. 7 Digital Record (Type SeaBat 8101ER)

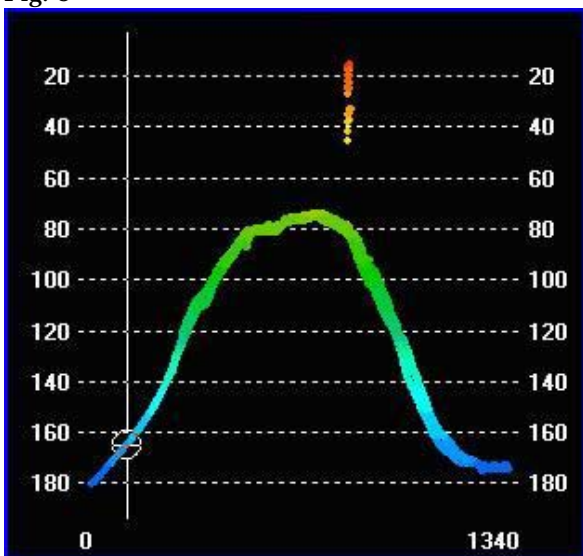
以下に，今回の処理で確認した 10 箇所 (第 8 図 ~ 第 17 図) のガス (泡) の記録 (Sweep Window) を掲載する．位置については，第 1 図に記載している．



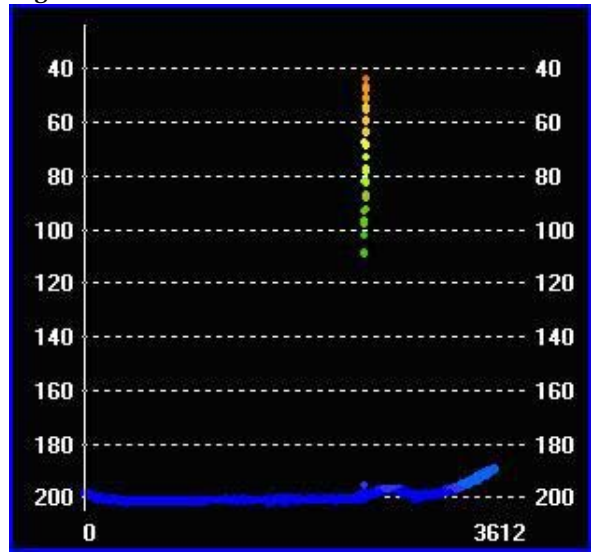
第 8 図 -  
Fig. 8 -



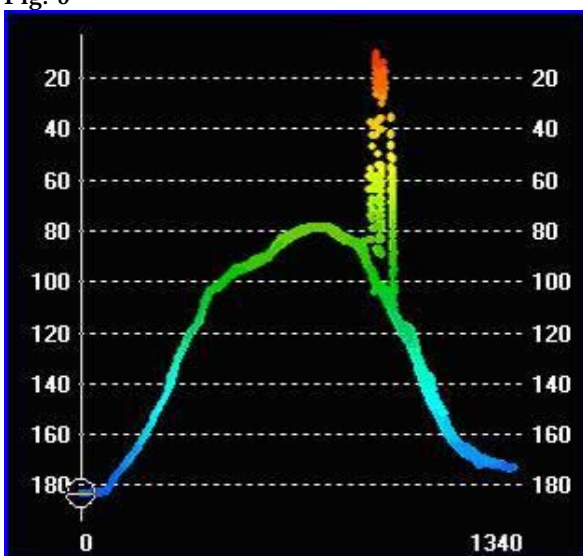
第 11 図 -  
Fig. 11 -



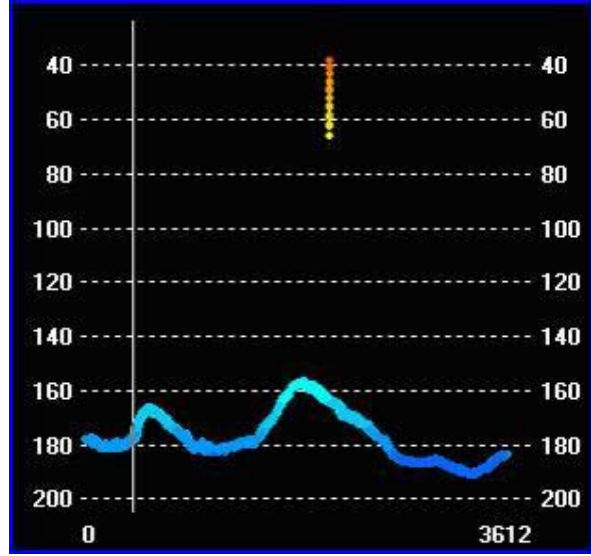
第 9 図 -  
Fig. 9 -



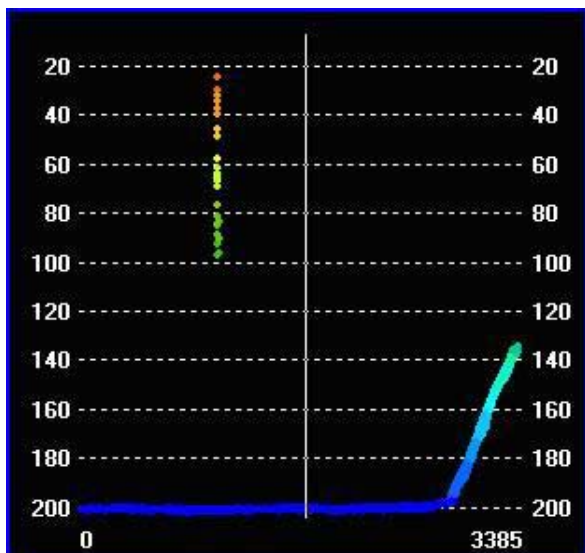
第 12 図 -  
Fig. 12 -



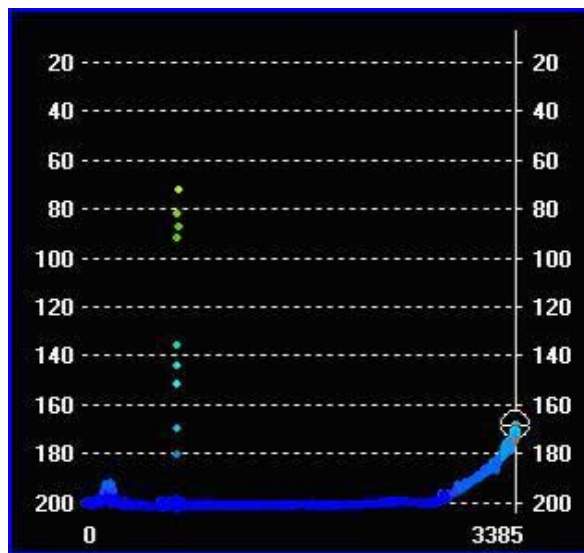
第 10 図 -  
Fig. 10 -



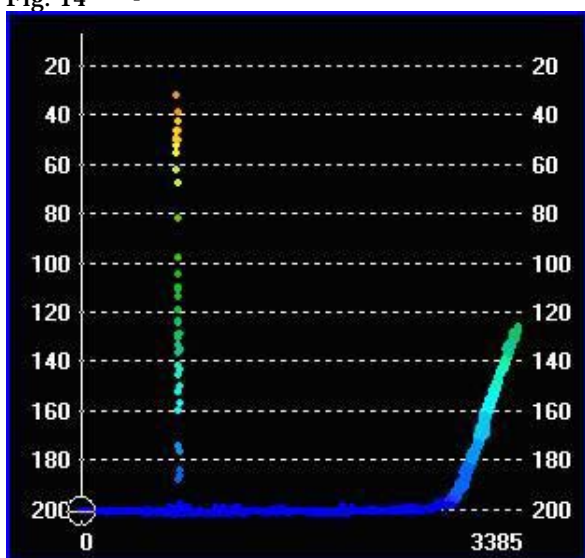
第 13 図 -  
Fig. 13 -



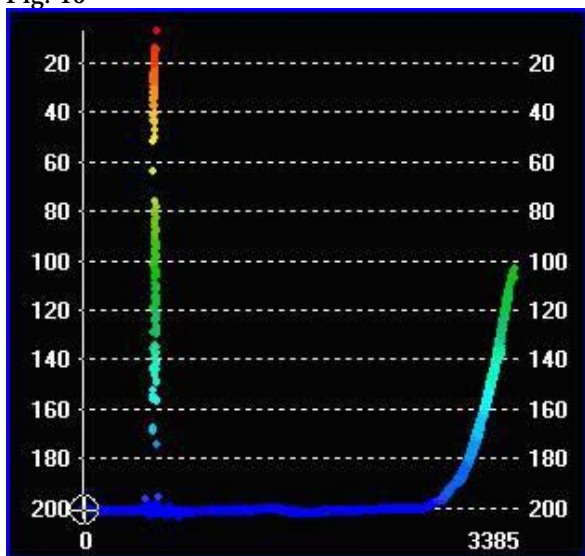
第 14 図 -  
Fig. 14 -



第 17 図 -  
Fig. 17 -



第 15 図 -  
Fig. 15 -



第 16 図 -  
Fig. 16 -

### 5 最後に

従来、ノイズとして除去の対象となっていたものが、記録として生かされる。マルチビーム測深機の解像度が良くなればなるほど、水深以外の調査に応用されてくるのではないかと思われる。

## 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

山尾 理 : 環境調査課

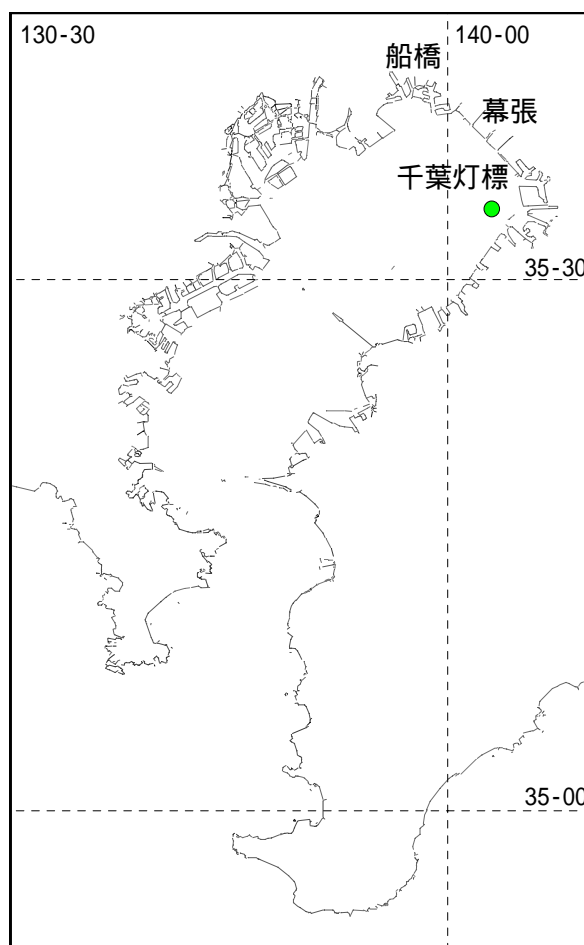
### Wind effect on the Temporal Variation of Water Quality at the innermost of Tokyo Bay in the Season of Strong Stratification

Satoshi YAMAO: Environmental and Oceanographic Research Division

#### 1 背景

富栄養化した内湾では、成層が強くなる夏季に、酸素の豊富な表層水より底層水への酸素供給が少なくなり、底層における酸素消費も活発になるため、底層水が貧酸素化することが多い。溶存酸素濃度が約  $4\text{mg l}^{-1}$  を下回ると魚類などに生理的变化が起こることが知られており（日本水産資源保護協会，2000），沿岸域における底層水の貧酸素化は、富栄養化による環境問題の一つと捉えられている。ここでは溶存酸素濃度が  $4.3\text{mg l}^{-1}$  を下回る水塊を貧酸素水塊と定義する。また貧酸素水塊が離岸風などの作用によって湧昇することで、貧酸素水塊中に含まれる硫化物が化学反応を起こし、海表面が青白もしくは青緑色に変色する青潮と呼ばれる現象が発生する。特に東京湾奥部の千葉港から幕張、船橋にかけての沿岸部において、底層の溶存酸素濃度が  $3\text{mg l}^{-1}$  以下である、北偏風が連吹する、北偏風の吹き始めから平均気温が  $4$  以上低下するもしくは、北偏風の風速が  $9\text{ms}^{-1}$  以上である場合に、青潮が発生することが知られている（国立環境研究所，1996）。

このような状況の下、海上保安庁も参画している東京湾再生のための行動計画では、赤潮や青潮の発生・挙動・消滅などを把握することを目的としたモニタリングの実施が掲げられている。そこで、本研究ではこの端緒となるべく、富栄養化の顕著な東京湾奥部において、特に水質の悪化する5～9月における、貧酸素水塊および青潮の挙動を捉え、特に青潮につながる貧酸素水塊の湧昇メカニズムを明らかにする。



第1図 調査地点

Fig.1 Observational station

第 1 表 水質センサーの仕様

Table 1 Specification of each sensor

	センサータイプ	測定レンジ	分解能	精度	生物付着防止策
深度	半導体圧力センサ	0 ~ 25m	0.1m	± 0.1m	空中待機方式
水温	サーミスタ	-5 ~ 40	0.01	± 0.02	空中待機方式
電気伝導度	電磁誘導セル	0 ~ 70mS cm <sup>-1</sup>	0.01mS cm <sup>-1</sup>	± 0.05mS cm <sup>-1</sup>	空中待機方式
塩分	実用塩分式	0 ~ 40	0.01	± 0.05	空中待機方式
クロロフィル	蛍光強度式	0 ~ 200 μg l <sup>-1</sup> (ウラニン基準)	0.1 μg l <sup>-1</sup>	± 2%	往復ワイパー方式
濁度	後方散乱光式	0 ~ 100ppm(カオリン基準)	0.01ppm	± 2%	往復ワイパー方式
溶存酸素濃度	ガルバニ電極	0 ~ 20mg l <sup>-1</sup> (0 ~ 200%)	0.01mg l <sup>-1</sup>	± 0.2mg l <sup>-1</sup>	回転ワイパー方式

## 2 方法

観測は千葉灯標（北緯：35° 34' 05" ，東経：140° 02' 45" ）に設置したモニタリングポストを用いて行われた。第 1 図に千葉灯標とその位置を示す。モニタリングポストは、自動昇降水質測定システム・流向流速プロファイラー測定システム・風向風速測定システムの 3 つの観測システムで構成されており、2003 年 4 月 1 日より海潮流の流向・流速、海上風の風向・風速の連続観測が、同年 5 月 3 日より水温、塩分、溶存酸素濃度、クロロフィル蛍光、濁度の連続観測が行われている。また観測された水温・塩分より密度を算出した（UNESCO, 1983）。

自動昇降水質測定システムは、深度・水温・電気伝導度ゾンデ、クロロフィル・濁度ゾンデ、溶存酸素ゾンデによって構成されており、これらの検出装置を毎正時に海底から海面まで上昇させることで、1m ごとに水質の自動測定が行われている。

深度・水温・電気伝導度ゾンデは、観測を行わない時間に空中で待機することで生物の付着を防止している。クロロフィル・濁度ゾンデは、往復式ワイパーにより、溶存酸素ゾンデは、回転式ワイパーにより生物防除を行っている。第 1 表にセンサーの仕様を示す。

流向流速プロファイラー測定システムは、超音波ドップラープロファイラー（NORTEK 製、AQUADOPP CURRENT PROFIRLER）と水中通信ケーブル・計測制御通信装置・無停電電源・DoPa 通信ユニットで構成されており、毎正時に

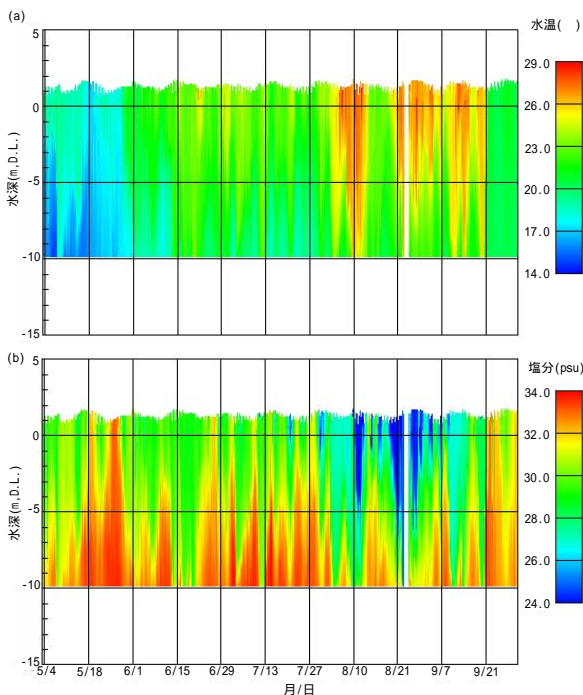
1m ごとに 1 分間平均流向流速が測定されている。

風向風速測定システムは、気象庁検定を受けた風向風速計（株日本エレクトリック・インスルメント製、N-262LV-D）と通信ケーブル・計測制御通信装置・DoPa 通信ユニットで構成されている。風向風速計により、15 分に一回 10 分間の最大風速と平均風速およびそれぞれの風向が測定されている。

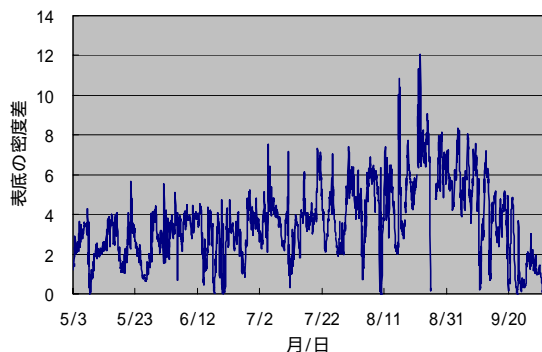
## 3 結果

### 2003 年春季から夏季にかけての海況・水質時間変動

第 2 図に(a)水温(b)塩分のイソプレスを、第 3 図に表底の密度差の時間変化を示す。水温・塩分ともに 5 月初旬にはすでに弱い成層が形成されていた。表層における 5 月初頭一週間の平均水温は 19.0、6 月末一週間の平均水温は 23.2 であり、この期間には気温の高まりとともに、表層水温は長期的に上昇していた。しかし、7 月初頭一週間の平均水温は 23.6、7 月末一週間の平均水温は 22.9 であり、この期間には表層水温が低下した。気象庁千葉測候所の観測によると、2003 年 7 月の平均気温は 22.3 であり、夏季であったにもかかわらずこの期間には、顕熱輸送は海洋から大気の方方向に働いていた。また 7 月の日照時間は平年値の 153.8 時間に対して、2003 年には 57.4 時間であった。日射量が少なかったことも表層水温が上昇しなかった一因であると考えられる。

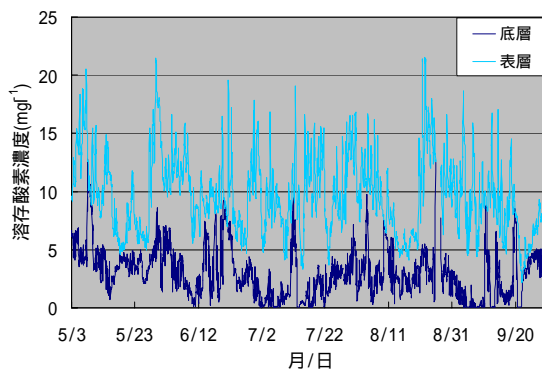


第 2 図 (a)水温 (b)塩分のイソプレス  
Fig.2 Isopleths of (a)Water temperature and (b)salinity



第 3 図 表底の密度差の時間変化  
Fig.3 Temporal variation in density difference between the surface and bottom layer

8 月に入ると、水温は徐々に上昇し、また表層の塩分が低下したことで、表底の密度差は大きくなった。また、9 月 20 日には、全層で急激に水温が低下し、表底の水温差はほとんどなくなってしまった。以降、9 月末まで水温成層の弱い状態が続いた。表底の密度差は、観測期間を通じて短周期の増減を繰り返し、下層水が湧昇し（塩分の等値線が右上がり）高塩分水が海面付近に達する状



第 4 図 表層・底層における溶存酸素濃度の時間変化  
Fig.4 Temporal variation in dissolved oxygen concentration in the surface and bottom layer

態や、低塩分水が堆積し（塩分の等値線が右下がり）海底にまで達する状態が繰り返してみられた。これらの現象から、安定した成層状態はあまり長く続かなかったことがわかる。

第 4 図に、表層・底層における溶存酸素濃度の時間変化を示す。観測開始直後より底層における溶存酸素濃度の低い状態が続き、期間中の 77.6% の時間、底層水は貧酸素化していた。また、表層水の貧酸素化も 10 回発生しており、最長では 9 月 21 日 18 時より 32 時間連続で表層に貧酸素水塊がみられた。表層に現れた貧酸素水塊は底層から湧昇したものであると考えられ、このときには青潮が発生していた可能性がある。

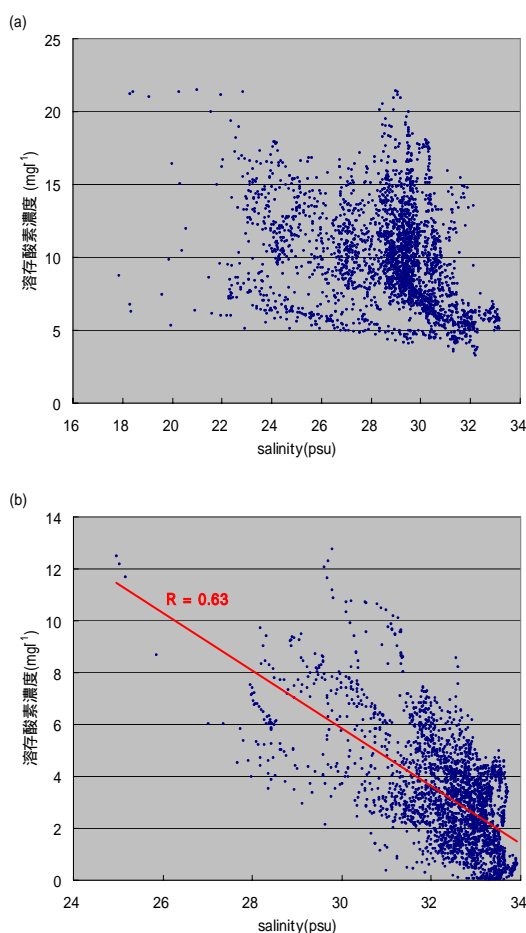
**溶存酸素濃度変化と水塊の物理構造との関係**

第 5 図に(a)表層(b)底層における塩分と溶存酸素濃度の散布図を示す。水中の溶存酸素濃度を变化させる要因としては、移流・拡散による溶存酸素濃度の異なる水塊の物理的な流入が考えられるほか、底層では、有機物分解に伴う酸素消費、表層では大気からの移入・植物プランクトンの光合成に伴う酸素供給の影響が考えられる。当該海域では、表層の溶存酸素濃度と塩分との相関は悪い（第 5 図 a）。塩分は保存量であるため、溶存酸素濃度と塩分の相関が悪いことによって、物理的な流動よりも大気からの移入や植物プランクトンによる光合成の方が、溶存酸素濃度の変化に対する

影響が強いことが示された。しかし、表層においても塩分 32psu 以上の高塩分帯では、溶存酸素は相対的に低濃度であり、濃度の変動幅も小さかった。つまり、表層であっても塩分が 32psu を超える場合には、大気からの移入や生物学的な酸素供給の影響は小さく、溶存酸素濃度は低いままである。一方底層では、塩分と溶存酸素濃度との間に相関関係があり（相関係数  $r=0.63$ ）、当該海域の底層では溶存酸素濃度分布に対して、移流・拡散が強く影響すると考えられる（第 5 図 b）。

塩分変化と流速の関係

底層における溶存酸素濃度は塩分との間に相関



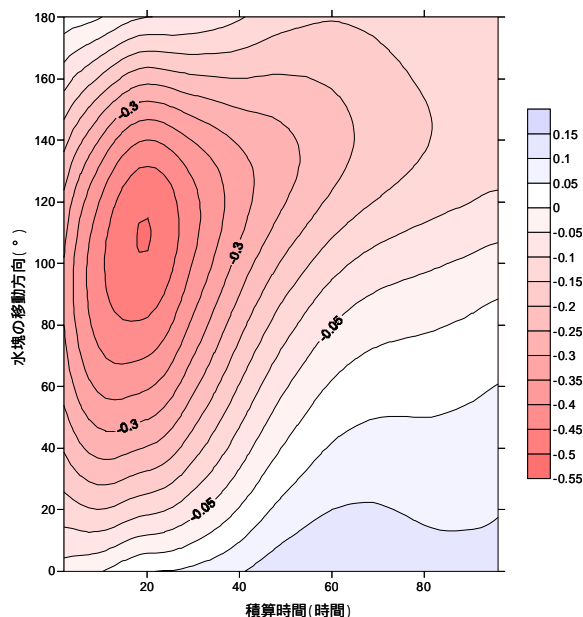
第 5 図 (a)表層(b)底層における塩分と溶存酸素濃度の散布図

Fig.5 Scatter diagrams between salinity and dissolved oxygen concentration in the (a)surface and (b)bottom layer

関係があり、また、表層においても高塩分時には溶存酸素濃度が低下する。そのため、当該海域における貧酸素水塊の挙動または青潮の発生メカニズムを解明するためには、高塩分水塊の挙動を知ることが肝要であると考えられる。塩分は保存量であるため、移流拡散によってのみ変化する。そこで、当該海域の塩分変化に対する移流の効果を明らかにするため、表層における残差流の積算値、つまり水塊の移動距離と、表層塩分の平均変化率との相関係数を求めた。

潮流による短周期変動の影響を除くため、25 時間の移動平均値から、塩分の平均変化率を求めた。ダッドソンの方法によって月ごと、層ごとに調和分解を行い、この調和定数から推算した潮流と実測流速との差として残差流を求めた。この残差流を直交する 2 方向に成分分解し、この 1 成分を積算することでその方向の水塊移動距離を求めた。流速の成分分解は 1° 刻みで繰り返し行い、また、流速の積算時間を 1 時間ごとに増加させ、移動距離と塩分の平均変化率との相関係数を調べた。この結果を比較することで、塩分の平均変化率と最も相関の高くなる水塊の移動方向および流速の積算時間の組み合わせを求めた。

第 6 図が表層流速を用いた計算結果である。横軸は流速を積算した時間を、縦軸は水塊の移動方向を真北からの角度で示し、コンターはそれぞれの場合における水塊移動距離と塩分変化率との間の相関係数である。この図から、表層では、19 時間積算した 109° 方向、つまりほぼ東南東-西北西の流速成分と平均塩分変化率との間で負の相関が最も高い。この相関係数は約 -0.50 であった。東南東方向の流速を正と設定しているため、平均的に東南東方向の流れが 19 時間程度続いた場合に表層の塩分が低下し、西北西方向の平均流が 19 時間程度続いた場合に塩分が上昇することが示された。一般的に、表層においては、低塩分水塊が水平的に移流してきた場合や大量の降雨があった場合に塩分が低下する可能性があるが、塩分の上昇は、高塩分水塊が下層より湧昇した場合、もしくは水平的に移流してきた場合にのみ起こると考

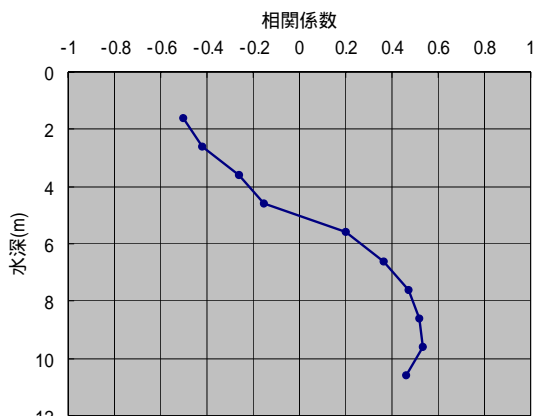


第 6 図 表層における塩分の平均変化率と水塊の移動距離との相関係数

Fig.6 Correlation coefficient between the rate of salinity variation and distance of water mass transportation in the surface layer

えられる。千葉灯標から東南東方向には約 2km 先に岸が存在する。仮に  $5\text{cms}^{-1}$  の平均流が西北西方向に 19 時間連続して発生した場合、水塊は 3.42km 流されることになり、千葉灯標付近はその補流として湧昇した下層水で表層まで満たされる。つまり、19 時間平均の西北西流と相関の高い、表層塩分の上昇は、下層水の湧昇によって起こっていることがうかがえる。

同様の計算を各層の流速と塩分について行った。第 7 図は各層における流速成分と塩分変化率との間で、相関係数の絶対値が最大となったときの相関係数を表している。また、第 2 表にはこの相関係数が得られた積算時間および塩分上昇を引き起こす水塊の移動方向を表している。海面から 2.6m までの水深では負の相関が、水深 10.6m から水深 7.6m では正の相関が比較的高かった。底層において最大相関係数が得られた移動方向は、 $75^\circ$  から  $96^\circ$  であり、平均時間は 17 時間から 23 時間であった。つまり、湧昇流を引き起こす表層の西流が 17 時間から 23 時間程度続いた場合に、湧昇



第 7 図 各層における塩分の平均変化率と水塊の移動距離との最大相関係数

Fig.7 Maximum correlation coefficient between the rate of salinity variation and distance of water mass transportation in each layer

第 2 表 各層における最大相関係数が得られた水塊の移動方向と流速の積算時間

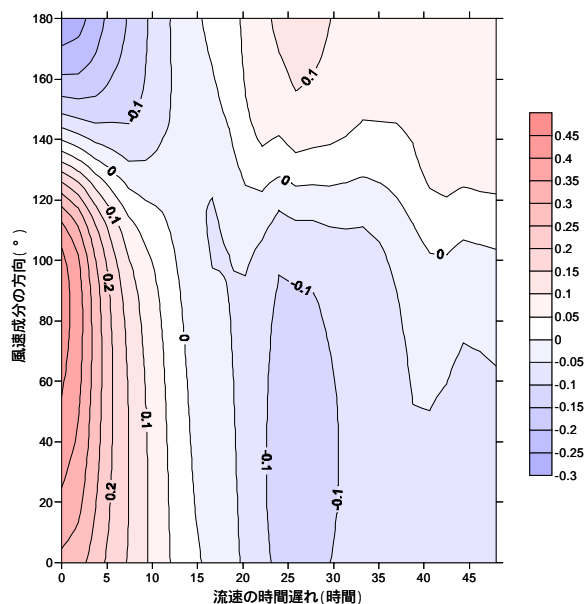
Table 2 Direction and calculation time of water mass transportation with maximum correlation coefficient in each layer

水深(m)	成分(°)	積算時間(時間)
1.6	289	19
2.6	297	19
3.6	285	16
4.6	290	9
5.6	128	47
6.6	100	24
7.6	96	23
8.6	95	22
9.6	87	19
10.6	75	17

流の補流として発生する東流によって、底層でも相対的に塩分の高い水塊が当該海域へ流入し、逆に表層で東流が 17 時間から 23 時間程度続いた場合には沈降流が発生することで底層の塩分が低下すると考えられる。

**流速に対する海上風の影響**

直線状海岸を持ち、ロスビーの内部変形半径以

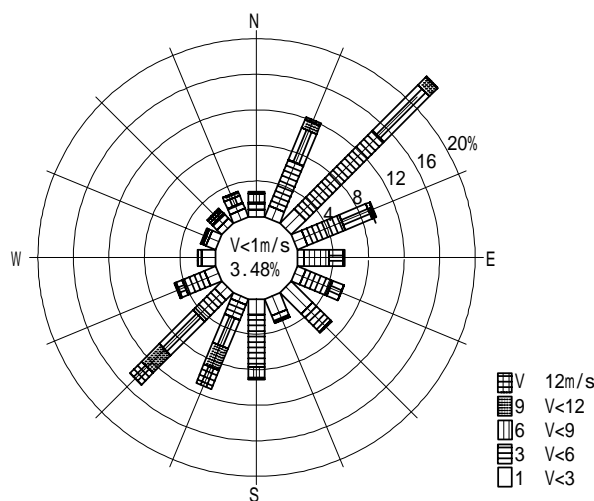


第 8 図 成分分解した風速と表層残差流速との相関係数

Fig.8 Correlation coefficient between the surface residual current velocity and wind velocity in each direction

上に開けた成層海域では，慣性周期程度の時間スケールで海岸に平行な風が岸を左手に見て吹いた場合に，沖に向けてエクマン輸送が発生し，その補流として沿岸湧昇が発達することが知られている．しかし，千葉灯標付近では，灯標からみて北東から南東方向にかけて回り込むように岸が存在し，どの方向に風が吹いた場合に沿岸湧昇が発生するのかを求めることは非常に難しい．また，東京湾東部では，成層期に，北偏風が吹くと湧昇流が発生することが知られている（宇野木，1985，松山ほか，1990，小田巻ほか，1991）が，湧昇を引き起こす風向を特定するまでには至っていない．そこで，塩分変化との関係から，沿岸湧昇を引き起こしていると考えられる表層の 289° 方向の流速成分と海上風の関係について調べた．

残差流を 289° 方向とこれに直交する 199° 方向の 2 成分に分解し，289° 方向の成分を求めた．同様に風速を直交する 2 方向に成分分解した．風速の成分分解は 1° 刻みで繰り返し行い，この一成分と残差流の 289° 成分との相関係数を調べることで，残差流の 289° 成分と最も相関の高くな



第 9 図 16 方位で示した風向別の風速頻度分布  
Fig.9 Wind frequency distribution in each direction shown by 16 directions

る風速成分の方向を求めた．第 8 図に風速の成分分解を行った角度に対する，相関係数のコンター図を示す．図の横軸は風に対する表層流速の応答遅れ時間である．流速の応答遅れなし，風速成分 86° の時に正の相関が最も高く，相関係数は 0.43 であった．これは，表層における 289° 方向（西北西）の残差流に対して，86° 方向つまりほぼ東から吹く風が最も強く影響することを示している．流速の応答時間を長く取ると相関係数は急激に減少し，海上風に対して，表層の流れはタイムラグなく応答することを示している．風速の分解方向を変えた場合には，相関係数は緩やかに変化し，56° から 104° の間では相関係数は 0.4 以上であった．つまり，風向が東でない場合でも，北北東から東南東の風が吹けば，風速によっては湧昇流が発生する．第 9 図は 16 方位で示した風向別の風速頻度分布図である．千葉灯標の海上 15m では，北東および，南西の風が卓越しており，6 ヶ月のうち，28.1%の期間に同方向からの 3ms<sup>-1</sup> 以上の風が吹いていた．これらの期間には，北東風によって湧昇流が，南西風によって沈降流が発生していることが予想され，当該海域の流動構造は風によって大きく左右されていることがわかる．

#### 4 まとめ

今回、多層の水質について5ヶ月、海上風・流速について6ヶ月の長期にわたって観測を行った。この結果から、

冷夏の影響で、2003年7月には表層水温が大気に冷却される時期が存在したこと

大気による加熱・冷却のどちらの期間においても、成層状態は不安定であったこと

湾内底層の貧酸素水塊は、観測期間中ほぼ定常的に存在すること

青潮の発生につながる、貧酸素水塊の湧昇も6ヶ月に10回という高い頻度で発生していたこと

高塩分の貧酸素水塊は表層の西流の補流として湧昇すること

表層の西流は、 $56^{\circ}$  ~  $104^{\circ}$  方向からの風によって起こりやすく、 $86^{\circ}$  方向の風によって最も起こりやすいこと

が明らかになった。

#### 引用文献

UNESCO : Algorithms for computation of fundamental properties of seawater , *UNESCO technical papers in marine science* , **44** , P53(1983)

宇野木早苗 : 東京湾・物理 , 全国沿岸海洋誌 , **P344-361(1985)**

小田巻実 , 佐藤敏 , 松島弘 , 西田浩志 , 下平保直 : 夏季の東京湾の流動の観測 , 水路部技術報告 , **9** , P67-76(1991)

国立環境研究所編集委員会 : 閉鎖性海域における水界生態系機構の解明及び保全に関する研究 , 国立環境研究所特別研究報告 , **20** , **P30-31(1996)**

日本水産資源保護協会 : 水産用水基準.2000年版 , **P21(2000)**

松山優治 , 当麻一良 , 大脇厚 : 東京湾の湧昇に関する数値実験 , 沿岸海洋研究ノート , **28** , **P63-74(1990)**

## FIA による海水試料中の鉄分析について

岡野博文：海洋研究室

## Analysis of Iron in Seawater Samples by Flow Injection Analysis

Hirofumi OKANO: Ocean Research Laboratory

## 1 はじめに

海洋における微量元素の1つである鉄(Fe)が、海洋の生物生産(基礎生産)に対して大きく関与しているとする Fe 仮説の提唱が注目を集めたことにより、海水中の微量の Fe を超高感度で分析するために、数多くの分析法が開発されている(例えば、宗林, 2002; 小畑, 2003)。

また海水中の Fe は、伊豆大島火山噴火の際に見られた変色海水(変色水)判定の上で、アルミニウムやケイ酸塩と共に重要な分析項目の1つでもある(土出ほか, 1987)。

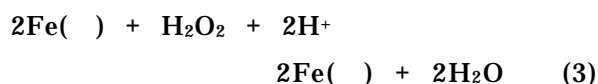
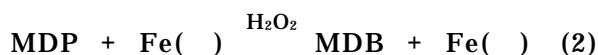
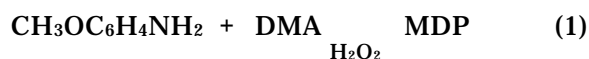
海洋情報部では、所定の前処理を経た後に、変色水中の鉄分析に、 $\text{Fe}^{2+}$ -ジピリジルを用いる吸光光度法によって分析を行っている(例えば、土出ほか, 1987)。2000年の三宅島噴火の際には、三宅島周辺海域に出現した変色水を、派遣された測量船等から採取後、航空機により羽田航空基地に運び、そこから更に築地の実験室に運び込み、鉄の分析が行われた(参考: 海洋情報部 Web ページ)。この時には、変色水採取から分析結果が出るまで数十時間を要している。

変色水の分析結果をより迅速に提供するには、試料の運搬時間、前処理時間、分析時間の3点を短縮することが必要である。

本報ではこれに関連して、現場に派遣された測量船内において自動分析が可能(つまり変色水採取現場から実験室までの運搬時間が短縮できる)なフローインジェクション分析法(FIA)を用いて、ファーンズ原子吸光光度計と同程度の分析感度で海水中の Fe を分析する例を紹介する。

## 2 鉄分析の原理

一般に金属元素は、ある種の化学反応において触媒として作用することが知られている。河島ほか(1981)は、微量の Fe が反応を触媒的に促進することを利用した Fe の高感度分析法を報告している。この分析法は、過酸化水素( $\text{H}_2\text{O}_2$ )が共存する酸性条件下、p-アニシジン( $\text{CH}_3\text{OC}_6\text{H}_4\text{NH}_2$ )と N,N-ジメチルアニリン(DMA)の反応によって、無色のバリアミンブルー-B塩基類似物質 N-(p-メトキシフェニル)-N',N'-ジメチル-p-フェニレンジアミン(MDP)を生成させる反応(1式)、次に生成した MDP が  $\text{Fe}^{2+}$  に酸化されて青色の N-(p-メトキシフェニル)-N',N'-ジメチル-1,4-ベンゾキノンジイミノニウムイオン(MDB)( $\lambda_{\text{max}} = 735 \sim 740\text{nm}$ )を生成する反応(2式)、更に(2)式で生じた  $\text{Fe}^{2+}$  が相対的に大量に存在する  $\text{H}_2\text{O}_2$  によって速やかに  $\text{Fe}^{3+}$  に再生される反応(3式)の3つの反応から成っている。ここで分析対象物質である Fe に着目すると、(2)式で  $\text{Fe}^{2+}$  は  $\text{Fe}^{3+}$  に変化するが、(3)式のとおり速やかに  $\text{Fe}^{2+}$  に再生され、再び(2)式の MDB 生成反応で使用される。



つまり、この反応系において  $\text{Fe}^{2+}$  は(3)式の反応により繰り返し再生されるために、 $\text{Fe}^{2+}$  は MDB 生成反応において触媒として働く。このことは、微量の  $\text{Fe}^{2+}$  によって(2)式の反応が進行す

ることになり、数多くの MDB が生成することになる。この結果として MDB 生成に起因する吸光度も大きなものとなる。そこで MDB の吸収極大波長をモニターすることで、微量の Fe でも大きな吸光度が得られ、高感度分析が可能となる。

なお、この反応系においては、はじめから Fe( ) が共存しても、相対的に大量に存在する H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> によって速やかに Fe( ) に酸化されるため、Fe( ) と Fe( ) の合計濃度が定量されることになる。

一般に吸光光度法を利用する分析においては、次のような原理で分析が行われる。試料や濃度既知の標準試料中の分析対象物質が発色試薬と反応し、分析対象物質と等モル濃度の色素が生成する。この生成した色素の吸収波長の吸光度を計測し、濃度既知の標準溶液の吸光度と比較することで濃度を算出する。このために試料中の分析対象物質が微量であれば生成する色素の量も微量となり、色素生成による吸光度も微小となり計測が困難となる。しかし、前述のような Fe 分析の場合に、分析対象物質は発色試薬による色素生成反応を触媒的に促進するため、一定時間内に微量の分析対象物質が結果的に数多くの色素生成反応を促進させる。このために分析対象物質のモル濃度以上の色素が生成し、色素生成に起因する吸光度変化が大きくなるため吸光光度法によって高感度分析が可能となる。この分析手法は、化学反応の促進の差（速度論的手法）による分析手法で、接触分析法（kinetic method）と呼ばれる。接触分析法は高感度ではあるが、速度論的手法による分析手法であるため、温度などの条件により大きく影響を受けるため、高精度（この場合 precision の意味）の分析を行うには、分析条件を厳密に制御する必要がある。その点 FIA は、厳密な反応条件の制御が可能であり、この反応を FIA に適用した Fe 分析法が報告されている（河島ほか，1984；高島・与座，1989）。

今回は、この高島と与座(1989)の方法をもとにして、キャリア溶液と海水試料の間でマトリックスの違いに起因するゴーストピーク防止のために、キャリア溶液を人工海水ベースに変更し、

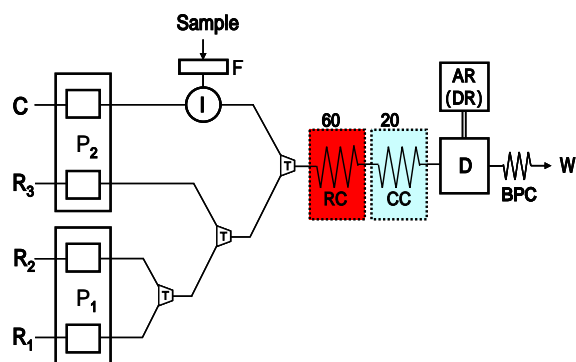
更に試料に起因する反応系の pH 変化を小さくするために、酢酸 - 酢酸ナトリウム系の緩衝溶液を試薬溶液に添加して分析を行った。

### 3 鉄分析用の FIA システムの構成

海洋情報部における FIA の使用例として、これまでに海水中の硝酸塩（岡野・並木，2002）やケイ酸塩の分析（岡野，2003）が紹介されている。FIA システムは、船内に専用の化学実験室を持つ大型測量船のみならず、実験室を持たない中型測量船の観測準備室等の片隅にでも設置でき、少々の船体動揺の中でも分析を行うことが十分可能なシステムである。

今回は、相馬光学製分光光度計 S-3250，2 台のサヌキ工業製 FIA システム FI-3000，Yokogawa Hokushin Electric 社製アナログレコーダーと島津製作所製データ処理装置クロマトパック C-R6A の各機器を、内径 0.5mm のポリテトラフルオロエチレン（PTFE）チューブやケーブルで繋いで構築した FIA 分析システムを使用した。

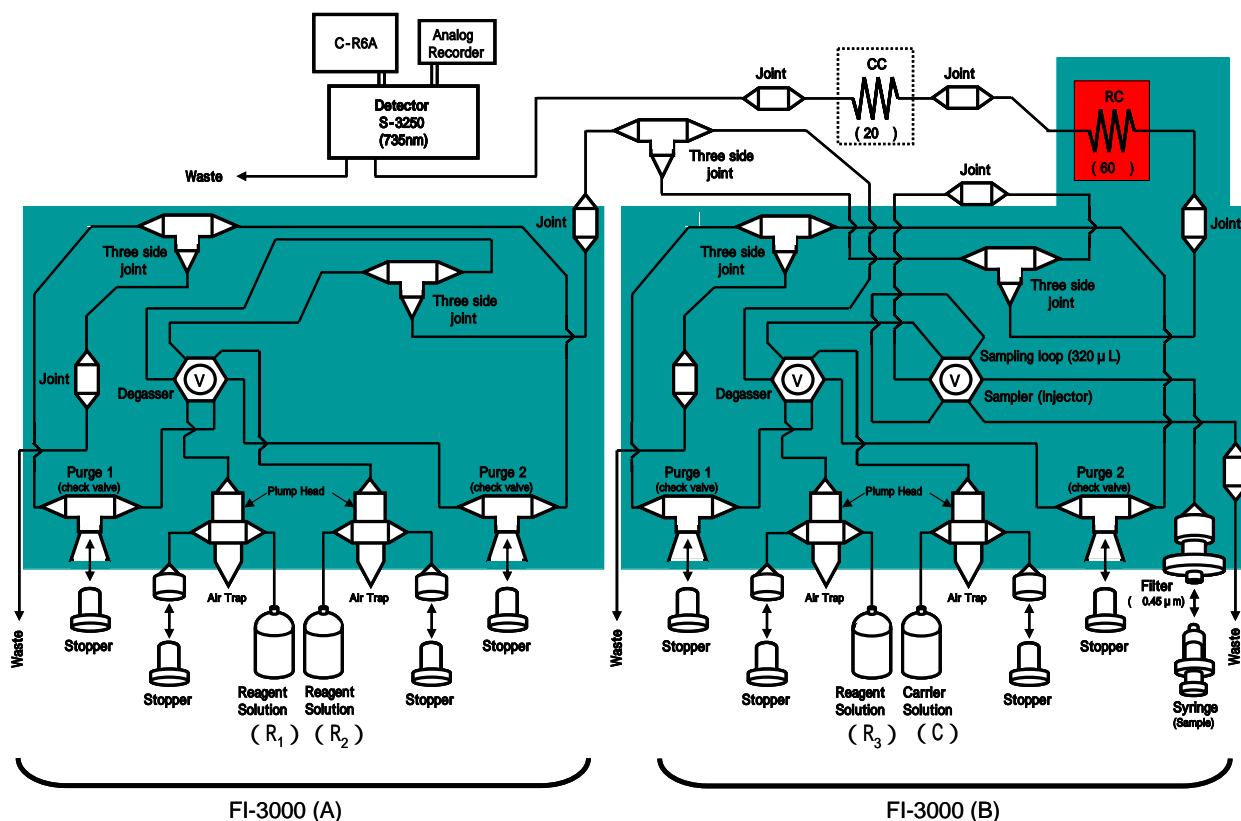
鉄分析用 FIA システムの送液流路概念図(マニ



第 1 図 鉄分析用 FIA の送液流路の概念図(マニホルド)。

Fig. 1 Manifold of FIA system for iron analysis.

C: Carrier solution, R<sub>1</sub>: Reagent solution, R<sub>2</sub>: Reagent solution, R<sub>3</sub>: Reagent solution, P<sub>1</sub>: Pump, P<sub>2</sub>: Pump, I: Injector (valve on six sides, 320μL of sampling loop), F: Filter (pore size 0.45 μm), T: Three side joint, RC: Reaction coil, CC: Cooling coil, D: Detector (Spectrophotometer, 8μL of flow cell), AR: Analog recorder, DR: Digital recorder, W: Waste.



第 2 図 鉄分析用 FIA システムの配管詳細図 . 図中の陰影部分は FI-3000(A) と (B) を表示 .  
 Fig. 2 Conceptual drawing for laying PTFE tubes in the FIA system. The shade areas stand for the inner area in FI-3000(A) and (B).

ホルド) を第 1 図に示す .

この FIA システムは、試薬溶液 ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) とキャリアー溶液 (C) の 4 つの流れ (4 流路) が三方ジョイント部分で順次合流する「4 流路系」と呼ばれるシステムである . キャリアー溶液が流れる途中に試料導入部 (I: 六方バルブ) があり、ここから  $0.45 \mu\text{m}$  のカートリッジ式メンブレンフィルター (F) でろ過された試料水が、容量  $320 \mu\text{L}$  のサンプルループにより一定量 ( $320 \mu\text{L}$ ) ずつキャリアー溶液中に導入され、内径  $0.5\text{mm}$  の PTFE チューブ中を流れる . 一方、 $R_1$  と  $R_2$  の試薬溶液の流れは三方ジョイント部分で合流し、 $R_1$  と  $R_2$  の混合試薬溶液の流れとなり、更に次の三方ジョイント部分で  $R_3$  の試薬溶液が合流し、 $R_1$ ,  $R_2$  と  $R_3$  の混合試薬溶液の流れとなる . この混合試薬溶液とキャリアー溶液の流れは、三方ジョイント部分で合流し、 $60^\circ\text{C}$  に保たれた恒温槽中の反応コイル (RC) で、MDP の酸化反応が促進されている .

恒温槽で加熱された混合溶液がそのまま分光光度計 (D) に送液されると、フローセル部分の温度上昇に起因するノイズやドリフトが生じ、高感度分析の障害となる . そこで、反応コイルと分光光度計の間に冷却コイル (CC) を設置し、流れる溶液の冷却を図った .

実際に FIA システムを構築した際の流路配管などを、FI-3000 (2 台使用) を中心に第 2 図に示す .

#### 4 試薬の調整

試薬の調製に際して、塩酸は有害金属測定用、 $1000\text{mg/L}$  鉄標準溶液は原子吸光分析用、他の試薬は特級試薬を使用した .

##### 4.1 キャリアー溶液 (人工海水)

キャリアー溶液には、海上保安庁水路部海象課 (1970) を参考にし、次のような人工海水を調製

し分析に供した。

容器に, NaCl 23.48g, MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 10.64g, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3.92g, CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O 1.46g と KCl 0.66g を取り, 純水で溶かして 1L とした。

#### 4.2 1 mol/L(M) の酢酸ナトリウム溶液

容器に, CH<sub>3</sub>COONa 41.02g (又は CH<sub>3</sub>COONa · 3H<sub>2</sub>O 68.04g) を取り, 純水で溶かして 500mL とした。

#### 4.3 pH3.2 の緩衝溶液

容器に, 1M の酢酸ナトリウム溶液を 250mL, 1M の塩酸を 237.5mL, 純水 762.5mL を取り, 混合した後, pH メーター, 希塩酸, 希水酸化ナトリウム溶液を用いて pH3.2 に調整した。

#### 4.4 R<sub>1</sub> の試薬溶液

容器に, 過酸化水素水 (約 30%) 16.5g と緩衝溶液 (pH3.2) 250mL を取り, 混合して調製した。

#### 4.5 R<sub>2</sub> の試薬溶液

容器に, p-アニシジン塩酸塩 (CH<sub>3</sub>OC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>NH<sub>2</sub> · HCl) 7.98g, 塩化 1,10-フェナントロリニウム一水和物 0.006g, 緩衝溶液 (pH3.2) 250mL を取り, 混合して調製した。

#### 4.6 R<sub>3</sub> の試薬溶液

容器に, N,N-ジメチルアニリン ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>) 6.06g, conc.HCl (塩酸) 4.2mL, 緩衝溶液 (pH3.2) 250mL を取り, 溶解・混合して調製した。

#### 4.7 検量線作成用標準溶液

200mL のメスフラスコに, 2mL の 1000mg/L 鉄標準溶液と 1mol/L の塩酸を 2mL 取り, 標線まで純水を入れて混合し, 10mg/L の鉄標準溶液を調製した。

別の 200mL メスフラスコに, この 10mg/L 鉄標準溶液 2mL と 1mol/L の塩酸を 0.2mL 取り, 標線まで人工海水を入れて混合し, 100 μg/L の鉄標準溶液を調製した。

100mL のメスフラスコに, 1mol/L の塩酸を 0.2mL 取り, 次にこの 100 μg/L 鉄標準溶液の適当量 (0, 0.5, 1, 2, 5, 7, 10, 15, 50mL) を取り, 標線まで人工海水を入れて混合し, 検量線作成用標準溶液 (0, 0.5, 1, 2, 5, 7, 10, 15, 50 μg/L) を

第 1 表 装置の設定条件。

Table 1 The condition of equipments in FIA system.

装置名	設定条件
FI-3000 (A)	送液流量: 0.25mL/min. × 2
FI-3000 (B)	送液流量: 0.5mL/min. × 2 恒温槽設定温度: 60 試料導入量: 320 μL (Sampling loop vol.)
S-3250	測定波長: 735nm ABS range: 0.02ABS フローセル容量: 8 μL フローセル光路長: 10mm
アナログレコーダー	range: 0.5mV/cm chart speed: 20cm/h
データ処理装置(C-R6A)	ATTEN = 4 SPEED = 2

調製した。

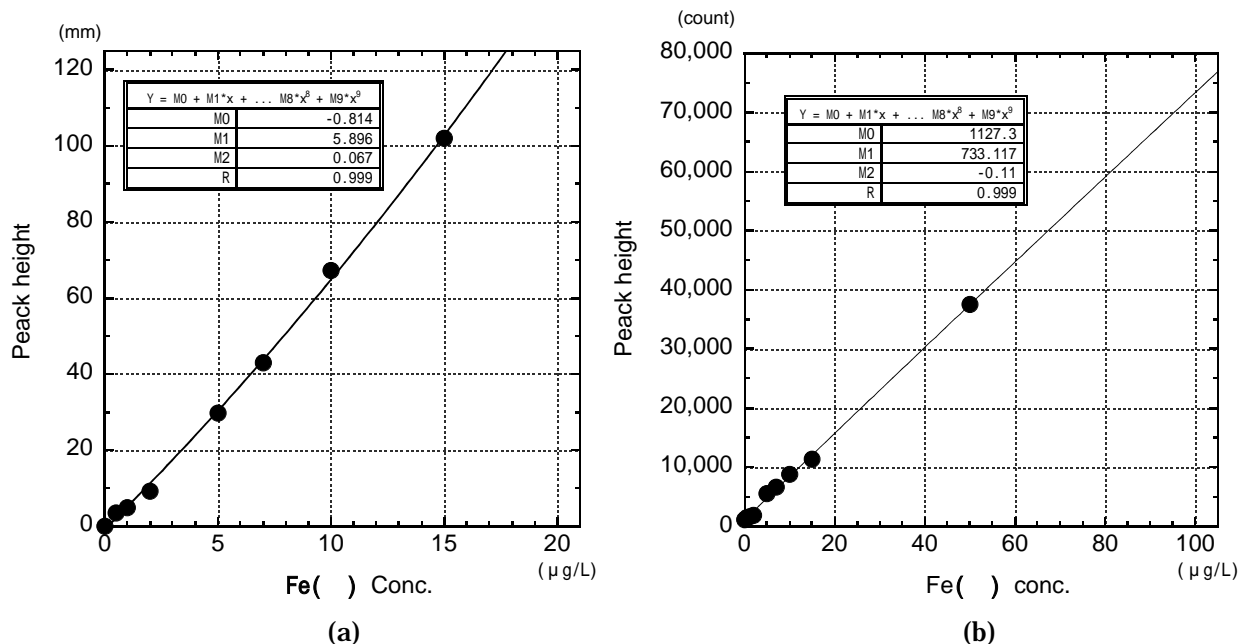
### 5 変色水の分析例

長崎県にある橘湾において巡視船により採取され, 築地庁舎に送られて来た海水試料 (変色水及び変色水周辺海水) の分析を行った際に, 本法を適用した。この時の分析例を以下に示す。

#### 5.1 検量線作成と分析精度

分析を行った際の各装置の設定条件を第 1 表に示す。今回は対象試料中の Fe 濃度について知見が無かったので, 低濃度域での吸光度変化を確実にモニターするためにアナログレコーダーを, また比較的高い濃度域での吸光度変化をモニターできるようにデータ処理装置を, 分光光度計の 2 つの出力部に接続した。第 1 表の設定条件において, 上述の 4.7 で調製した標準溶液の分析により, 第 3 図(a)と(b)の検量線を作成した。

第 3 図(a)はアナログレコーダーのデータ (ピーク高さ) により作成された検量線で, この時のアナログレコーダーの range 設定 (Full Scale の吸光度 0.02 : 以下 0.02ABS) では, 50 μg/L と 100 μg/L の標準溶液を分析した場合には, 標準溶液のピークがスケールオーバーを起こしたためにピーク高さが得られなかった。このため, 測定値が得られた 0 ~ 15 μg/L の濃度範囲で検量線の作成



第 3 図 検量線の例 .

Fig. 3 The calibration curves of Fe ( ).

を行った . この濃度範囲においては , 検量線に直線性が認められた .

第 3 図(b)はデータ処理装置のデータ(ピーク高さ)により作成した検量線で , この時の設定感度 (ATTEN=4) では , 標準溶液に使用した濃度範囲 (0 ~ 100 µg/L) の全てでピーク高さを得ることが出来た . 得られたデータでは , 0 ~ 50 µg/L の濃度範囲において検量線に直線性が認められた .

検量線作成時における標準溶液繰り返し分析の精度を相対標準偏差 (RSD) で表すと , アナログレコーダーで得られたデータから算出した場合には , 0 µg/L 標準溶液分析時 (n=5) で 2.8% , 2 µg/L 標準溶液分析時 (n=5) で 4.3% であり , データ処理装置で得られたデータから算出した場合には , 0 µg/L 標準溶液分析時 (n=4) で 0.5% , 2 µg/L 標準溶液分析時 (n=5) で 9.1% であった .

### 5.2 検量線の適用について

標準試料分析時に , アナログレコーダーにおいて 50 µg/L と 100 µg/L の標準試料のピークが , スケールオーバーを生じた原因は , 見掛けの分析感度を高める (この場合は分光光度計の出力信号増幅の意味) ために , ベースラインが安定する範囲で分光光度計 S-3250 の Full Scale の吸光度(以

後 ABS range) とアナログレコーダーの range 設定を小さくしたためである . 分光光度計 S-3250 の ABS range とアナログレコーダーの range 設定の両方又はどちらか一方を大きく設定すれば , 50 µg/L と 100 µg/L の標準試料のピーク高さが記録されるように改善できるが , 見掛けの分析感度の低下を招く結果となる . 今回の分析においては , 試料中の鉄濃度の範囲が不明であったため , アナログレコーダーは , このまま高感度分析の設定で分析を行うことにした .

第 3 図の(b)において , 100 µg/L の標準溶液のピーク高さが , 0 ~ 50 µg/L の標準溶液のピーク高さから求めた検量線より外れている . このことから , 今回の分析条件・分析システム設定によって試料分析を行う際は , 検量線の直線性が確認できた 0 ~ 50 µg/L の濃度範囲で適用することにした .

なお 0 ~ 50 µg/L より広い濃度範囲で分析する必要がある場合には , 試料注入量を少なくする (サンプルループの短縮化) , 或いは FI-3000 の送液速度の増加 , 反応コイルの短縮 , 恒温槽設定温度の低温化などにより , ある程度までは改善できるので , これら諸条件に関する技術・知識の集積が今後必要である .

第2表 海水試料の分析結果 .

Table 2 The results of samples analysis.

試料名	pH	ケイ酸塩 ( $\mu\text{mol/L}$ )	鉄 ( $\mu\text{g/L}$ )
変色水 (No.2)	8.03	9.4	4.6
変色水周辺海水 (No.3)	8.07	8.9	2.3
変色水周辺海水 (No.4)	8.10	8.3	2.3

### 5.3 海水試料の分析

海水試料は、橘湾において採取された変色水 (No.2) と変色水周辺海水 (No.3 と No.4) として、試料採取方法や試料保存方法 (酸添加の有無など) 等について不明なままポリ容器に入れられ、嚴重に梱包の上で送付されてきたものである。

Fe 分析を行うに先立って、海水の pH をガラス電極法により、また海水中のケイ酸塩 (溶存態のケイ酸塩) を FIA 法 (岡野, 2002) によって分析を行った。Fe 分析の際には、変色水及び変色水周辺海水ともにポリ容器中に沈殿は生じておらず、しかも透明な海水であったことから、塩酸処理のみで分析に供した。これらの分析結果を第2表に示す。

第2表より、変色水は2つの周辺海水に比べて、Fe とケイ酸塩濃度は高く、pH が低い値を示した。これは、変色水であれば周辺海水に希釈等されても、周辺海水に比べて Fe やケイ酸塩の濃度は高く、pH に差異が見られると考えたとおりの傾向であった。

今回の分析では、変色水と変色水周辺海水ともに透明で、沈殿生成も見られなかったことから、分析が容易な試料であった。今後、着色・懸濁や沈殿の生成が見られる変色水などを分析する場合は、試料中の Fe を溶存態 Fe にまで分解する必要がある。このためには、試料の前処理が重要となるが、土出ほか (1987) が使用した分解法では前処理のみに 30 時間以上を要し、中型測量船内等では実施困難である。このため実際に中型測量船内での Fe 分析を考えた場合、船内で行える前処理法が必要であり、今後の検討課題である。

## 6 まとめ

本報告では、FIA システムを用いた海水試料中の鉄の分析について、システムの詳細、試薬等の調製法、実試料の分析例について紹介を行った。

この分析システムは、原子吸光光度計と同程度の分析感度を有し、測量船への運搬・搭載が容易な自動分析装置であることから、試料の前処理法次第では、今後の調査などにおいて、このシステムによる成果が期待される。

最後に、本稿について海洋科学技術センターの齊藤千鶴博士から貴重なご意見をいただいた。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 宗林由樹： 2.2.海水の微量元素，海の研究，**11**，**1**，p.37-40，(2002).
- 小畑元： 海水中の微量金属(とくに鉄)に関する海洋分析化学的研究，海の研究，**12**，**5**，p.449-460，(2003).
- 土出昌一，柴山信行，背戸義郎，桑木野文章，佐藤寛和，小坂文予，信国正勝，當重弘，福島秀生： 伊豆大島沿岸に見られた変色水の分析，水路部研究報告，**23**，p.15-128，(1987).
- 河嶋拓治，畠山直子，鎌田政明，中野恵文： 日本化学会誌，**84**，(1981).
- 河嶋拓治，阿多誠文，鎌田政明，中野恵文： 第15回中化連講演予稿集，**154**，(1984).
- 高島良正，与座範政： 図説フローインジェクション分析法-基礎と実験-，廣川書店，p.136-140，(1989).
- 岡野博文，並木正治： FIA による海水試料中の硝酸塩分析について，水路部技報-水路部創立130周年記念号-，**20**，p.29-39，(2002).
- 岡野博文： FIA による海水試料中のケイ酸塩分析について，**21**，p.97-102，(2003).
- 海上保安庁水路部海象課化学係： 海水分析法，p.3，(1970).
- 海上保安庁海洋情報部 Web ページ: 三宅島の火山活動情報，付近の変色水分析の結果について，<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

## GC-MS を用いた有機スズ化合物分析における基本的な分析条件の検討

岡野博文：海洋研究室

清水潤子：環境調査課

### Analytical Condition of Organotin Compounds by GC-MS

Hirofumi OKANO : Ocean Research Laboratory

Junko SHIMIZU : Environmental and Oceanographic Research Division

## 1 はじめに

金属元素の1つであるスズ(Sn)は、古来より青銅の主要成分として使われ、人に対する毒性が比較的到低い金属元素であるとされてきた。

近代においては、スズと有機化合物から作られた有機スズ化合物が、防腐剤、農薬、防汚塗料などとして利用されるようになり、1960年代半ば頃からは、付着性海洋生物に対する防汚効果があることから漁網防汚剤や船底防汚塗料として各地で大量に使われるようになった。

しかし、1980年代後半に、養殖いけすにおいて漁網防汚剤として大量に使用されていた有機スズ化合物の一種TBTO(tributyltin oxides)の養殖魚に対する催奇性の疑いが一時的に社会問題化し(その後この原因は有機スズではなく使用されていた溶媒によるものであったとして騒動は沈静化した)、また1990年代初頭には、船底防汚塗料として使用されていたTBT(tributyltin)やTPT(triphenyltin)などの一部の有機スズ化合物が巻き貝に対するインボセックスの原因物質の疑いがあるとの報告があり、外因性内分泌攪乱化学物質(別名:環境ホルモン)の1つとして疑いのある物質として大きく問題化されてきた。このため有機スズ化合物は、使用自粛の行政指導が行われ、また化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律によって、TBTOが第1種特定化学物質に指定され製造・輸入が禁止となり、その他のTBT化合物やTPT化合物は第2種特定化学物質に指定されたこと等による規制の強化、関係業界による使用自粛や代替物質の開発などが進み、現在では、一部の外航船等を除き使用されていない。このた

め今後は環境中に負荷される有機スズ化合物の量は小さくなっていくと考えられる。

ところで海上保安庁においては、有機スズ化合物問題に対処するために、海上保安試験研究センターと海洋情報部による取り組みが行われている。

海上保安試験研究センターにおいては、船底防汚塗料の取り締まり(鑑定等)に関する研究が行われている(柴ほか、2003)。

海洋情報部においては、海洋の科学的調査の一環として、主要湾域の海洋汚染調査において、海底堆積物中のTBTが新たに調査項目に加わることが決定し、これに伴い有機スズ化合物をはじめとする、多くの有機汚染物質の高感度分析に不可欠なガスクロマトグラフ-質量分析計(GC-MS)が初めて導入され、清水(2000:2002)によりGC-MSを用いた有機スズ化合物の分析例が報告されている。

しかし、海洋情報部におけるGC-MSに関する基本的な技術・知識の集積はまだまだ少ない。そこで本報では、GC-MSを用いて有機スズ化合物の分析を行う際に必要な基本的な分析条件の検討を行い、標準溶液の分析を行った例を紹介する。

## 2 実験

### 2.1 分析装置

今回使用したGC-MSは、島津製作所製ガスクロマトグラフGC-17A、卓上型質量分析計GCMS-QP5050Aとオートインジェクターから構成されており、GC-17AにJ&W社製キャピラリーカラムDB-1(30m×内径0.25mm、膜厚0.25μm)を取り付けて使用した。

## 2.2 使用器具・試薬

使用したガラス器具は、中性洗剤による洗浄・すすぎの後に、2N 硝酸に一晩以上漬け、水道水と純水で順次すすいだ後に、十分に乾燥して使用した。

n-ヘキサン、メタノール、ジエチルエーテル、無水硫酸ナトリウムは残留農薬試験用を、また硫酸は有害金属測定用の試薬を使用した。1M 臭化n-プロピルマグネシウム/THF 溶液及びMBT(monobutyltin), MPT(monophenyltin), DBT(dibutyltin), DPT(diphenyltin), TBT, TPT, TPET(tripentyltin), TeBT(tetrabutyltin)の各有機スズ化合物は、関東化学社製の試薬を使用した。

## 2.3 基本条件

### 2.3.1 基準溶液

一般に TBT や TPT などの有機スズ化合物はガスクロマトグラフ(GC)中のカラムへの吸着により、このままの状態では GC での分析に不向きである。このため Grignard 試薬(一般式  $RMgX$ : R はアルキル基, X は Br や I など)やテトラエチルホウ酸ナトリウム( $NaBEt_4$ )などのアルキル化剤によって誘導体化処理を行った後に GC 分析に供される(環境庁, 1998: 岩村ほか, 1999)。

しかし、分析条件検討のために、mono-体, di-体, tri-体の有機スズ化合物(一般式  $R_{4-n}SnX_n$ : R はアルキル基, X は陰性基,  $n = 1 \sim 3$ )に毎回誘導体化処理を行うことは、実験操作の上で非常に煩雑であり、実験効率が悪い。そこで誘導体化処理を行った場合に生成する tetra-体(一般式  $R_4Sn$ : R はアルキル基)の有機スズ化合物を基準の有機スズ化合物に選び、基本的な分析条件の検討を行った。

基準の有機スズ化合物としては、入手が容易なテトラブチルスズ(TeBT:tetrabutyltin)を選び、 $10 \mu g/ml$  の n-ヘキサン溶液を調製して使用した。

### 2.3.2 GC パラメータ

GC-MS による分析を行うには、GC 部の各基本パラメータを設定する必要がある。今回は清水(2000)で使用されたパラメータに準じて設定を行った。この時の各パラメータの初期設定を第 1 表

に示す。

### 2.3.3 オートインジェクター

試料を GC に高い精度で安定して注入するためにオートインジェクターを使用した。この時のオートインジェクターの設定を第 2 表に示す。

### 2.3.4 MS パラメータ

GC-MS 分析において、同一機器を用いても、

第 1 表 ガスクロマトグラフの基本パラメータ。

Table 1 The parametric condition of GC.

項目	設定値
カラム温度	60
平衡時間	2min.
気化室温度	280
インターフェース温度	300
サンプリング時間	1.00min.
スプリット/スプリットレス	スプリットレス
キャリア圧力	71.8kPa
カラム流量	1.2mL/min.
線速度	39.9
全流量	11.6mL/min.
キャリアガス流量	13.7mL/min.

第 2 表 オートインジェクターの設定。

Table 2 The parametric condition of auto injector on GC.

項目	設定値
試料洗浄回数	3
溶媒洗浄回数	3
吸入後待ち時間	0.2sec.
注入速度	高速
注入後待ち時間	0.3sec.
ソルベントフラッシュ	0
ポンピング回数	5

第 3 表 質量分析計の基本パラメータ。

Table 3 The parametric condition of MS.

項目	設定値
走査開始質量数	50
測定終了質量数	450
走査間隔	0.5sec.
しきい値	1000count
走査速度	1000amu/sec.
溶媒溶出時間	7min.
測定開始時間	9min.
GCプログラム時間	31.0min.
測定終了時間	31.0min.
表示形式	スペクトル
検出器電圧	1.5kV

分析条件を変化させた場合には，分析対象物質のピークが出てくる時間（保持時間：retention time）が変動するので，retention time が変動しても分析結果が得られるスキャンモードで計測を行うこととした．質量分析計（MS）のスキャンモード測定時における初期設定を第 3 表に示す．

### 2.3.5 スプリットモード

スプリット法は，注入された試料が気化室内で気化した後に定温に保ったカラムに導入される基本的な注入法であるが分析感度が低い特徴がある．

一方，スプリットレス法は，カラムを低い温度に設定し，注入した試料を気化室内で気化した後に，低温のカラムに導き，カラム先端に試料成分を凝縮させ，その後にカラム温度を上昇することで，凝縮した試料成分を一気に遊離する方法で（一種の濃縮効果による）分析感度の高い結果が得られる方法である．微量の有機スズ化合物を分析するために，GC のスプリットモードは，スプリットレス法に設定した．

### 2.3.6 昇温プログラム

スプリットレス法は，段階的なカラム温度の設定（昇温プログラム）が必要不可欠な方法である．

そこで，高橋（1997），島津製作所（1998），環境庁（1998），清水（2000）で例示されている昇温プログラムを使用して，昇温プログラムの検討を行った．各昇温プログラムの概要を第 4 表に示す．

第 4 表 各昇温プログラムの概要．

Table 4 The parametric condition of temperature control on column in GC.

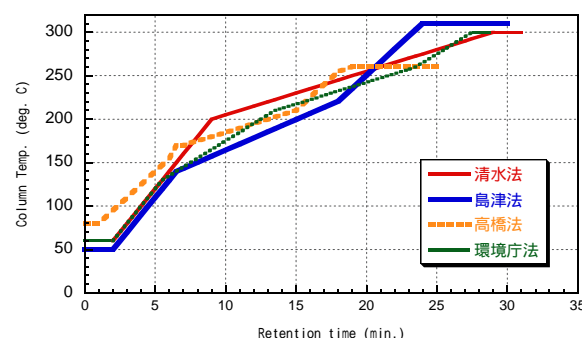
出典	設定した気化室温度	昇温プログラム
高橋(1997)	200	80 (1min.) (15 /min.) 170 (1min.) (5 /min.) 210 (15 /min.) 260 (7min.)
島津製作所(1998)	280	50 (2min.) (20 /min.) 140 (7 /min.) 220 (15 /min.) 310 (6min.)
環境庁(1998)	270	60 (2min.) (20 /min.) 130 (10 /min.) 210 (5 /min.) 260 (10 /min.) 300 (2min.)
清水(2000)	280	60 (2min.) (20 /min.) 200 (5 /min.) 300 (2min.)

## 3 考察

### 3.1 昇温プログラムの検討

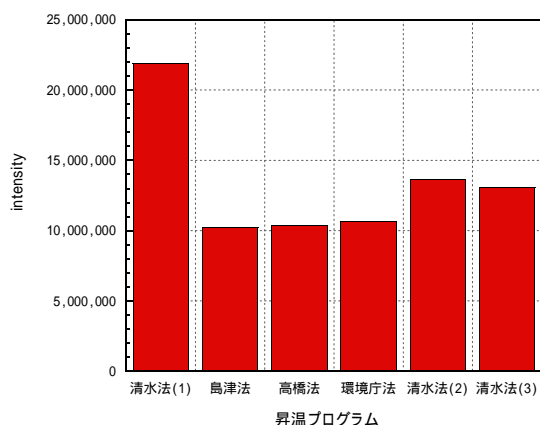
有機スズ分析の際に昇温プログラムの違いによる GC-MS の応答の知見を得るために，GC パラメータ，オートインジェクター，MS パラメータ，スプリットモードの設定を固定し，4 つの昇温プログラムについて，10 μg/ml の TeBT 溶液に対する GC-MS の応答をピーク高さで比較してみた．

まず今回試みた各昇温プログラム（第 4 表）における retention time とカラム温度の関係を第 1 図に示す．第 1 図から，各昇温プログラムとも試料注入後 1～2 分間は初期温度を保ち，その後 15～20 /min で急速に昇温し，カラム温度 130～200 付近から 5～7 /min. で比較的穏やかに昇



第 1 図 各昇温プログラムにおける保持時間とカラム温度の関係．

Fig. 1 Column temperature plotted against retention time at 4 methods as indicated.



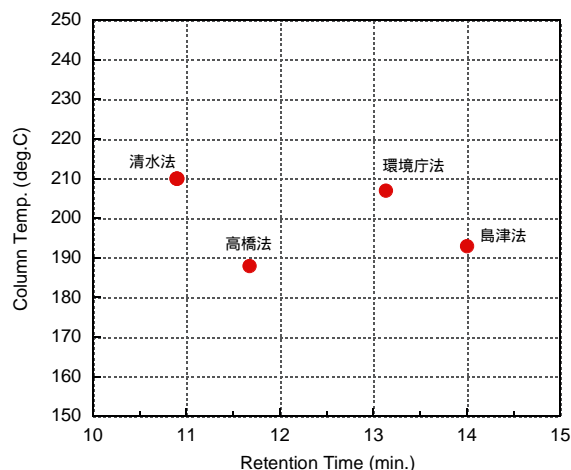
第 2 図 各昇温プログラム条件下における TeBT 標準溶液のピーク高さ .

Fig. 2 Peak height of TeBT standard solution under the condition each temperature programs.

温後, カラム温度 260~300 まで昇温し, この温度で 2~7 分間保ち, 設定した分析時間が終了後, 最初のカラム温度 50~80 にまでカラムは冷却される. なお GC-MS の状態の変化を小さくするように, 同じ日に清水法, 島津製作所法 (島津法), 高橋法, 環境庁法, 清水法, 清水法の順で各昇温プログラムでの分析を行った .

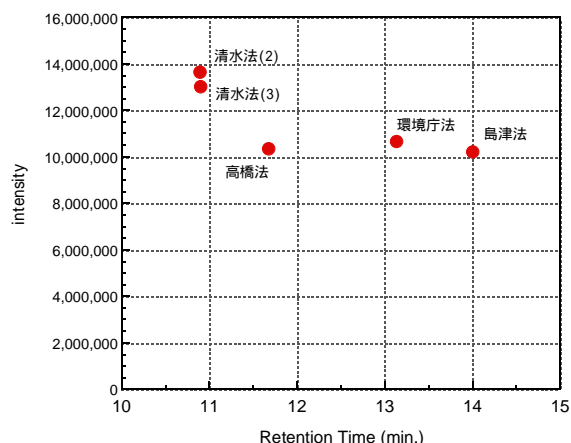
ピーク高さの比較にあたっては, 昇温プログラムの変更毎に生じるベースラインの変動を補正するため, 得られたピーク高さとの差で比較を行った. この結果を第 2 図に示す .

第 2 図において, 最初に分析を行った清水法(1)における正味のピーク高さ ( Intensity ) が, 2 つ目以降の分析に比べて, 非常に高い値が得られた. そこで, 環境庁法での昇温プログラムによる分析後に, 清水法 (清水法(2)と清水法(3)) を再度行ったところ, 清水法(1)よりもピーク高さが小さい値が得られた. これまでも度々, 一日の最初に GC-MS に注入した試料の有機スズのピーク高さが予想よりも高く出た場合があった. また, 一日の最初に GC-MS に注入する試料が, 本来なら有機スズ化合物を全く含まない 1000 倍濃縮検定済みの n-ヘキサンの場合であっても有機スズのようなピークが検出される場合もあった. このことは, 実験室雰囲気 GC-MS が長時間暴露され



第 3 図 各昇温プログラム条件下における TeBT 分析時の Retention time とカラム温度の関係 .

Fig. 3 The column temperature plotted against the retention time of TeBT under the condition each temperature programs.



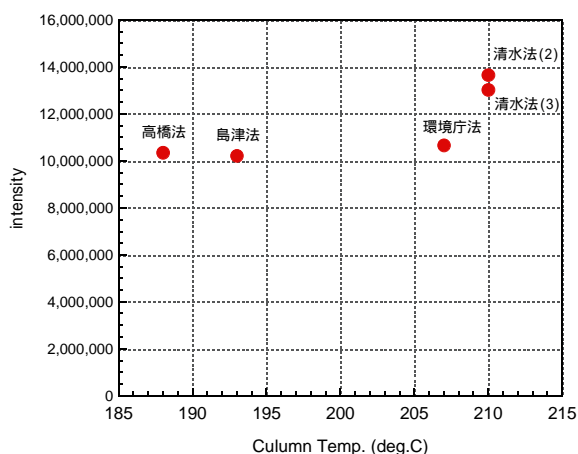
第 4 図 各昇温プログラム条件下における TeBT 分析時の retention time とピーク高さの関係 .

Fig. 4 The intensity of peak plotted against the retention time of TeBT under the condition each temperature programs.

たことによる汚染によって, 一日の最初の試料に有機スズのようなピークが表れたのか, それとも前の分析の影響なのか, 原因については今後の検討課題である. この様なことが過去にあったことから, 一日の最初に注入した試料の分析結果である清水法(1)のピークは, TeBT 標準溶液に含まれる有機スズ化合物量を正しく反映したピークではないと判断し, 清水法(1)の結果を除外して考えた. しかし, それでも 4 つの昇温プログラムの中では,

清水法のピークが高かった。

TeBT ピーク検出時の retention time と、第 1 図に TeBT ピーク検出時の retention time を当てはめて算出した、昇温プログラム上で設定しているカラム温度との関係を第 3 図に示す。また TeBT ピーク検出時の retention time とピーク高さの関係を第 4 図に示す。それから、TeBT ピーク検出時の retention time を第 1 図に当てはめて算出した昇温プログラム上で設定しているカラム温度とピーク高さの関係を第 5 図に示す。TeBT ピーク検出時間は、清水法 > 高橋法 > 環境庁法 > 島津法の順で早くなっている。第 3 図から、ピーク検出時の retention time とカラム温度の間には、高橋法を例外として、残りの清水法、環境庁法、島津法の間では、カラム温度の高い場合にピーク検出時間が早い傾向が見られた。TeBT ピーク検出時間が早ければ、試料当たりの分析時間が短くできる可能性が高い。このことは、多数の試料を分析する場合に作業時間短縮の観点から有利となる。第 4 図から TeBT のピーク高さは、清水法 > 環境庁法 > 高橋法 > 島津法の順である。一般的にはピーク高さが高い方が分析感度の点で有利である。第 5 図から TeBT ピーク検出時のカラム温度が高い方が、より高いピークが得られる傾向にあった。



第 5 図 各昇温プログラム条件下における TeBT ピーク検出時のカラム温度とピーク高さの関係。

Fig. 5 The intensity of peak plotted against the column temperature as detecting TeBT peak under the condition each temperature programs.

つまり昇温プログラムの設定において、ピーク検出時のカラム温度が高い方がより高いピークが得られる可能性が高い。そこで、今回検討した 4 つの昇温プログラムにおいて、分析の早さ、ピーク高さの点から最も良い結果を示した清水法を採用することにした。

### 3.2 繰り返し分析の結果

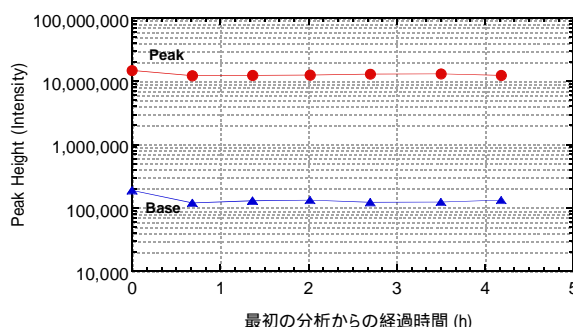
清水法を用いた場合の繰り返し分析の精度を検討するために、TeBT 標準溶液 (10 μg/ml) の繰り返し分析 (n=7) を行った。第 5 表に繰り返し分析の結果を、第 6 図に繰り返し分析を行ったときの、最初の分析後の経過時間に対するピークとベースの Intensity をプロットした結果を示す。

第 5 表と第 6 図に示したように、今回の分析でも、前述 3.1 と同様に、最初の TeBT 標準溶液分

第 5 表 TeBT 標準溶液の繰り返し分析結果。

Table 5 The result of repeat analysis of TeBT standard solution.

No.	Peak Ht.	Base Ht.	Peak Ht.
1	14869530	189773	14679760
2	12201230	120240	12080990
3	12413890	129895	12283990
4	12481530	131834	12349700
5	13036420	122772	12913650
6	13128260	123749	13004510
7	12336010	132126	12203880
Average of No.1 ~ 7			12788069
SD of No.1 ~ 7			839099
RSD (%) of No.1 ~ 7			6.6
Average of No.2 ~ 7			12472787
SD of No.2 ~ 7			354424
RSD (%) of No.2 ~ 7			2.8



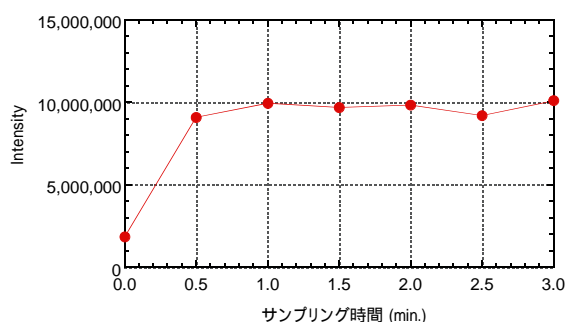
第 6 図 最初の分析後の経過時間に対するピークとベースの Intensity の変化。

Fig. 6 The height (Intensity) of peak and base plotted against the passage time after the first analysis.

析時のピークが高い値を示した。またベースの値も高い値であった。しかし、2回目以降の分析では、ピークとベース共に安定している。そこで、最初のピークは本来の値を示していないと考えられることから、2回目以降の分析値を採用すると、TeBT標準溶液の繰り返し分析(n=6)における精度は、相対標準偏差(RSD)で2.8%であった。

### 3.3 サンプル時間の検討

試料注入後のキャピラリーカラムへの試料導入のためのサンプリング時間を検討するために、サンプリング時間を0~3min.の範囲で変化させ、この時のTeBT標準溶液に対するピーク高さの変化を第7図に示す。サンプリング時間が0min.から、0.5min., 1.0min.と増加するに従ってピーク高さも高くなるが、1.0min.以降のピーク高さは横ばい状態となった。ピーク高さの安定性と分析時間を考慮し、以後のサンプリング時間は1.5min.に設定することにした。



第7図 キャピラリーカラムへの試料導入のためのサンプリング時間に対するピーク高さの変化。

Fig. 7 The peak height ( $\Delta$ Intensity) plotted against the sampling time.

## 4 標準溶液の分析例

上記で検討した分析条件を用いて、GC-MS-SIM (SIM: Selected Ion Monitoring) による有機スズ化合物標準溶液の分析を行った。

### 4.1 有機スズ化合物標準溶液の調製

有機スズ化合物標準溶液は、清水(2000)に準じて、100  $\mu$ g/ml の DBT, TBT, DPT, TPT, TPET, TeBT の各 n-ヘキサン溶液及び 1000  $\mu$ g/ml の

MBT, MPT の各 n-ヘキサン溶液を調製し、これを貯蔵用標準原液として冷暗所に保存した。この貯蔵用標準原液は、使用時に n-ヘキサンにより 10  $\mu$ g/ml に希釈して分析に使用した。

### 4.2 有機スズ化合物標準溶液の分析

調製した有機スズ化合物標準溶液の分析は、清水(2000)の方法を一部変更して、以下の手順で行った。

共栓付試験管(容量 15~20ml)に、前述 4.1 で希釈調製した 10  $\mu$ g/ml の各有機スズ化合物標準溶液を 1ml ずつ適宜取り (STD-A については MBT, DBT, TBT, MPT, DPT, TPT, TPET の各標準溶液を、STD-B については TBT, TPT, TPET の各標準溶液を試験管に取った)、ロータリーエバポレーターによる減圧濃縮(40 以下の条件)と窒素ガス吹き付けにより 1ml 程度にまで濃縮を行い、1ml の臭化 n-プロピルマグネシウムの THF 溶液(1M)を加え、30 分程度放置の後に、水冷を行いながら 10ml の 0.5M 硫酸を徐々に加える。その後に全量を分液ロートに採り、メタノール(10ml)、精製水(10ml)、5%ジエチルエーテル含有 n-ヘキサン(2.5ml)を加え、抽出を行い、残った水層に 5%ジエチルエーテル含有 n-ヘキサン(2.5ml)を加え、再び抽出を行う。2 回の抽出で得られた有機層を合わせて、精製水(10ml)で 2 回洗浄後、無水硫酸ナトリウムで脱水を行った後に、メスフラスコ(容量 10ml)に全量を取り、内部標準として 10  $\mu$ g/ml の TeBT 標準溶液を 1ml 加え、n-ヘキサンにより標線まで希釈して、GC-MS-SIM の分析に供した。

### 4.3 有機スズ化合物標準溶液の分析結果

内部標準(TeBT)のみを含んだ n-ヘキサン(300 倍濃縮検定済み)、前述の 7 種類の有機スズ化合物(各 1  $\mu$ g/ml の濃度)と内部標準を含んだ STD-A 及び 3 種類の有機スズ化合物(TBT, TPET, TPT の 3 種類が各 1  $\mu$ g/ml の濃度)と内部標準を含んだ STD-B の分析を行った際のピーク検出結果を第 6(a), 6(b), 6(c)表に示す。

第 6(a)表 STD-A 分析でのピーク検出結果 .

Table 6(a) The result of peak detection on STD-A analysis.

Sample	Peak No.	NAME	M/Z	R.TIME	I.TIME	F.TIME	A/H(sec)	AREA	HEIGHT	ID No.	備考
STD-A	1	MBT	263	9.083	9.043	9.127	1.18	307399	260593	1	
	2		261	9.083	9.043	9.127	1.15	245515	213474		
	3	DBT	277	9.667	9.643	9.703	1.272	19236	15123	2	
	4		275	9.669	9.643	9.7	1.245	15707	12620		
	5	TBT	277	10.264	10.23	10.293	1.277	21002	16449	3	
	6		275	10.266	10.227	10.293	1.391	15884	11417		
	7	TeBT	291	10.882	10.843	10.92	1.357	27111	19977	4	内部標準
	8		289	10.879	10.85	10.917	1.348	19965	14807		
	9	MPT	283	11.04	10.99	11.093	1.523	281664	184931	5	
	10		281	11.039	10.997	11.077	1.52	210905	138784		
	11		281	11.093	11.077	11.12	1.286	5926	4610		
	12	TPeT	305	12.622	12.59	12.673	1.66	17730	10678	6	
	13		303	12.626	12.59	12.667	1.498	14246	9508		
	14	DPT	317	14.582	14.53	14.637	2.117	95144	44940	7	
	15		315	14.583	14.53	14.64	2.089	67994	32542		
	16	TPT	351	19.282	19.223	19.357	2.707	87562	32345	8	
	17		349	19.285	19.22	19.35	2.696	67188	24923		

第 6(b)表 n-ヘキサン分析でのピーク検出結果 .

Table 6(b) The result of peak detection on n-hexane analysis.

Sample	Peak No.	NAME	M/Z	R.TIME	I.TIME	F.TIME	A/H(sec)	AREA	HEIGHT	ID No.	備考
n-hexane	1		263	8.982	8.97	8.987	0.415	49	119		
	2		263	9.127	9.12	9.193	1.487	229	154		
	3		277	9.567	9.55	9.577	0.672	91	136		
	4		277	9.588	9.577	9.63	1.373	196	143		
	5		277	9.68	9.63	9.687	0.875	172	196		
	6	TeBT	291	10.892	10.857	10.927	1.296	22586	17431	4	内部標準
	7		289	10.893	10.857	10.93	1.369	16663	12171		
	8		283	11.02	11.01	11.07	2.487	240	96		
	9		283	11.089	11.07	11.123	1.63	767	470		
	10		281	11.096	11.063	11.127	1.315	3926	2986		
	11		305	13.812	13.77	13.83	1.211	151	125		
	12		303	13.309	13.293	13.317	0.635	76	120		
	13		317	16.412	16.397	16.423	0.699	91	130		
	14		315	17.435	17.42	17.487	0.976	143	147		
	15		315	17.533	17.487	17.543	0.435	76	175		
	16		351	24.975	24.96	24.997	0.55	60	110		
	17		351	28.113	28.11	28.16	1.579	67	42		
	18		351	29.537	29.533	29.54	0.221	11	51		
	19		351	30.232	30.217	30.24	0.429	59	137		

第 6(c)表 STD-B 分析でのピーク検出結果 .

Table 6(c) The result of peak detection on STD-B analysis.

Sample	Peak No.	NAME	M/Z	R.TIME	I.TIME	F.TIME	A/H(sec)	AREA	HEIGHT	ID No.	備考
STD-B	1	TBT	277	10.281	10.253	10.323	1.291	16361	12672	3	
	2		275	10.283	10.25	10.317	1.321	12671	9591		
	3	TeBT	291	10.905	10.873	10.94	1.262	21265	16849	4	内部標準
	4		289	10.905	10.87	10.94	1.23	16310	13256		
	5		283	11.077	11.073	11.08	0.195	33	170		
	6		283	11.102	11.08	11.133	1.646	1035	629		
	7		281	11.108	11.083	11.137	1.178	3881	3295		
	8	TPeT	305	12.643	12.607	12.683	1.756	13484	7677	6	
	9		303	12.644	12.603	12.687	1.651	11112	6731		
	10	DPT	317	14.58	14.577	14.623	1.279	260	203	7	
	13		315	14.589	14.563	14.607	0.907	184	203		
	14		315	15.13	15.127	15.15	1.114	62	56		
	11		317	17.638	17.623	17.647	0.379	44	116		
	12		317	18.755	18.753	18.763	0.263	28	107		
	15	TPT	351	19.305	19.243	19.373	2.479	62411	25181	8	
	16		349	19.306	19.243	19.37	2.543	46629	18337		

第 7 表 STD-B の定量結果 .

Table 7 The result of STD-B analysis.

ID	NAME	M/Z	R.TIME	AREA	IS RATIO	CONC. ( $\mu\text{g/ml}$ )	備考
1	MBT	263	不特定	-	-	-	
2	DBT	277	不特定	-	-	-	
3	TBT	277	10.281	16361	0.77	0.99	
4	TeBT	291	10.905	21265	1.00	1.00	IS: 内部標準
5	MPT	283	不特定	-	-	-	
6	TPeT	305	12.643	13484	0.63	0.97	
7	DPT	317	14.58	260	0.01	0.00	
8	TPT	351	19.305	62411	2.93	0.91	

不特定: GC-MS によってピークが同定されなかった意味 .

ここで, STD-A と n-ヘキサン の 2 つの分析データを用いて, STD-B 中に含まれる 3 種類の有機スズ化合物 (内部標準の TeBT は除く) を定量した結果を第 7 表に示す. なお STD-B は, 前述のとおり TBT, TPeT, TPT の 3 種類 (内部標準は除く) を含み, MBT, DBT, MPT, DPT の 4 種類は含まれていない n-ヘキサン溶液である. 第 7 表の定量結果を見ると, MBT, DBT, MPT の 3 種類について, GC-MS でピークが同定されていないが, これは元々 STD-B 中にこの 3 種類の有機スズ化合物が含まれていないことから当然の結果である. しかし, 元々含まれていない DPT が極微量ながら検出されたことは, STD-A と STD-B での DPT ピークは質量 (M/Z) 317 をモニタリングしている SIM 分析であり, かつ DPT ピークの R. TIME (retention time) もほぼ同じ時間であり, しかも元々 STD-A と STD-B 共に n-ヘキサンベースの溶液であることから, 夾雑物によるゴーストピークではなく,

各  $1 \mu\text{g/ml}$  濃度で調製していた TBT, TPeT, TPT の 3 種類は  $0.99, 0.97, 0.91 \mu\text{g/ml}$  の各値を示しており, 本来の値と良く合っていた.

今回の TeBT を内部標準とした分析によって, MBT, DBT, TBT, MPT, DPT, TPT, TPeT の 7 種類の有機スズ化合物の良好な分析ピークが得られ, 分析が可能であることが分かった.

## 5 まとめ

海洋情報部に導入された GC-MS を用いて, 有機スズ化合物を分析する際に必要な GC 部の基本的な分析条件の検討を行い, 検討した分析条件を

有機スズ化合物標準溶液の GC-MS-SIM 分析に適用した. 今回検討した分析条件を用いることにより, 7 種類の有機スズ化合物に対して十分に分析が可能であることが分かった. 今後は, 今回の結果を実試料分析に適用し, 更なる分析技術・知見を蓄積していく必要がある.

なお, 今回の検討に際して, 愛媛大学沿岸環境科学研究センター (当時) の高橋真博士に貴重な資料等を提供していただいた. ここに感謝の意を表します.

## 参考文献

- 柴多喜男・青木繁・鈴木僚: 船底防汚塗料中の有機スズ化合物の分析方法等に関する研究, 平成 14 年度研究成果報告書, (2003)
- 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)
- 清水潤子: GC/MS を用いた海底堆積物中における有機スズ化合物の定量法の検討, 水路部技報, 20, 19-28, (2002)
- 環境庁: トリブチルスズ化合物, トリフェニルスズ化合物の分析法 外因性内分泌攪乱化学物質調査暫定マニュアル (水質, 底質, 水生生物), (1998)
- 岩村幸美・門上希和夫・陣矢大助・花田喜文・鈴木學: 同位体希釈/ガスクロマトグラフィー/質量分析法による水質及び底質中の有機スズ化合物の一斉分析, BUNSEKI KAGAKU, 48, 6, 555-561, (1999)
- 高橋真: 沿岸海洋生態系における有機スズ化合物汚染とその蓄積特性, 愛媛大学農学研究科修士論文, (1997)
- 島津製作所島津環境ホルモン分析情報センター: 環境ホルモン分析資料集 (外因性内分泌攪乱化学物質), 6-11, (1998)

## 海底火山活動に伴う変色海水化学分析の迅速化

野上 健治：東京工業大学火山流体研究センター

小坂 丈予：東京工業大学名誉教授

松本 敬三，野坂 琢磨：環境調査課

**A speedup of chemical analysis of discolored seawater samples on submarine volcanic activity****Kenji NOGAMI: Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology****Joyo OSSAKA: Professor Emeritus, Tokyo Institute of Technology****Keizou MATSUMOTO and Takuma NOSAKA: Environmental and Oceanographic Research****Division****1 はじめに**

気象庁の定義によれば、北方領土を含めた日本国内には現在 100 以上の活火山が存在しており、その 4 分の 1 以上が琉球弧並びに小笠原－マリアナ弧上に点在する海成・海底火山である。陸域の火山では地震や地殻変動、噴気温度などの連続観測が行われているが、海底火山では観測機器を常設すること自体が技術的に困難であり、現状では海底火山活動の連続観測は行われていない。

海底火山活動時に、噴火口直上付近の海面が淡青、白、黄、黄褐、赤褐色を呈する現象を変色海水と呼んでいる。これは発泡や軽石の浮遊などと並んで海面上にあらわれる顕著な現象の一つである（小坂，1986）。この呈色はごく微細な  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  系の低結晶質沈殿物の懸濁によるものであり（小坂，1975）、この沈殿物は海底火山から放出された **Si**、**Fe**、**Al** などを含む酸性熱水が海水によって中和された結果生ずるものである（小坂・他，1977）。

その色調や化学組成、規模が火山活動の消長に対応して変化する（小坂 1986；小坂・他，1996 等）ため、その目視観測や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。

2000 年 6 月 26 日夕方の群発地震発生に端を発した三宅島の火山活動でも、その翌日の 27 日に三宅島西方海域で変色海水が発生した。海岸に近

い海域での噴火が懸念され、海底火山活動の状況の判断基準となる変色海水中の **Si**、**Fe**、**Al** の成分割合を求めるための化学分析が急がれた。福岡ノ場（小坂・他，1996）や伊豆大島（小坂・他，2000）などでは、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を、共存している海水中に溶解した後、分析に供したが、この方法では溶解処理に時間を要することが欠点であった。

本稿では、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  系低結晶質沈殿物を人工的に作り、三宅島噴火時の様な緊急時、迅速に対応できる分析前処理法を開発したので報告する。

**2 分析前処理法の検討****2-1 試薬の調整**○**Si** 溶液

**Si** 濃度の高い酸性溶液は人工的に作り難いので、**Si** の濃度が高く、**Fe**、**Al** の濃度が低い、群馬県草津温泉万代鉱源泉で採取した温泉水を用いた。

○**Fe** 溶液

特級  $\text{FeCl}_3$  を 0.02N 塩酸溶液に溶解し、**Fe** として約 1000mg/kg になるように調整した。

○**Al** 溶液

特級  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\sim 18\text{H}_2\text{O}$  を 0.02N 塩酸溶液に溶解し、**Al** として約 1000mg/kg になるよう

に調整した.

○海水

神奈川県城ヶ崎海岸で採取した海水を定量分析用 5 種 A(孔径 7 $\mu$ m) の濾紙 (以下「5A 濾紙」) で濾過し, 実験に供した.

各溶液中の Si, Fe, Al の濃度を ICP (Inductively Coupled Plasma (高周波誘導結合プラズマ) ) 発光分光分析法 (原口紘丞ほか, 1988) により測定した結果を第 1 表に示す.

2-2 人工的沈殿の生成

第 2 表に示した量の Si 溶液, Fe 溶液, Al 溶液及び海水を 500ml ビーカーにとり混合攪拌後, 72 時間静置し, 様々な組成の SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 系の低結晶質沈殿物を作成した. (写真 1)

2-3 沈殿物の溶解

生成した沈殿を定量分析用 5 種 C(孔径 1 $\mu$ m) の濾紙 (以下「5C 濾紙」) で濾別し, 濾液を 250ml

第 1 表 各溶液中の Si, Fe, Al 濃度 (mg/kg)

Table 1 The silicon, iron, and aluminum concentration in each solution(mg/kg)

	Si	Fe	Al
Si 溶液	172	11.9	60.7
Fe 溶液	0	913	0
Al 溶液	0	0	927
海水	0.23	0	0



写真 1 人工沈殿

Photo.1 Artificial precipitation

メスフラスコで受けた. さらに, 濾紙上の沈殿物は蒸留水で十分洗浄し, 先の 250ml メスフラスコで受け蒸留水で定容 (濾液 A) した. なお, この濾液 A は, 沈殿しなかった Si, Fe, Al の量を求めるために分析に供した. また, 反応させた Si, Fe 及び Al の量が既知なので, 濾液 A 中の 3 成分の量をそれから差し引けば各成分の沈殿量と組成が間接的に求められる.

濾別した沈殿物はその濾紙ごと 100ml ビーカーに移し, 蒸留水を 5~10ml, 1N 塩酸溶液を 5.0ml 加えた. 濾紙全体を溶液中に浸し, ビーカ

第 2 表 沈殿作成に供した溶液の量 (ml)

Table 2 Quantity of the solution used for generation of artificial precipitation.(ml)

	Si溶液	Fe溶液	Al溶液	海水
#1	1	0.3	0	200
#2	1	0.6	0	200
#3	1	0.9	0	200
#4	1	0	0.3	200
#5	1	0	0.6	200
#6	1	0	0.9	200
#7	1	0.3	0.3	200
#8	1	0.3	0.6	200
#9	1	0.3	0.9	200
#10	1	0.6	0.3	200
#11	1	0.6	0.6	200
#12	1	0.6	0.9	200
#13	1	0.9	0.3	200
#14	1	0.9	0.6	200
#15	1	0.9	0.9	200
#16	4	0.2	0	500
#17	4	0.2	0.2	500
#18	4	0.2	0.4	500
#19	4	0.2	0.6	500
#20	4	0	0	500
#21	4	0.6	0.2	500
#22	4	0.6	0.4	500
#23	4	0.6	0.6	500
#24	4	0.6	0.8	500



写真 2 電子レンジによる溶解

Photo.2 The dissolution by the microwave oven.

第3表 定量結果 (μg)

Table 3 Fixed quantity result. (μg)

Exp	pH	濾液Aの分析値			間接的に求めた沈殿量			濾液Bの分析値			差		
		Si	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si	Fe	Al	Si	Fe	Al
#1	7.85	100	0	0	120	290	60	100	300	40	-20	10	-20
#2	7.82	100	0	0	120	560	60	100	580	50	-20	20	-10
#3	7.77	110	0	0	110	830	60	110	810	60	0	-20	0
#4	7.88	90	0	110	130	10	230	90	10	190	-40	0	-40
#5	7.80	100	0	120	120	10	500	100	10	490	-20	0	-10
#6	7.76	80	0	100	140	10	790	100	10	790	-40	0	0
#7	7.87	80	0	110	140	290	230	100	290	220	-40	0	-10
#8	7.81	80	0	110	140	290	510	110	280	500	-30	-10	-10
#9	7.41	70	0	100	150	290	790	110	280	800	-40	-10	10
#10	7.72	90	0	60	130	560	280	110	570	260	-20	10	-20
#11	7.67	90	0	80	130	560	540	110	560	550	-20	0	10
#12	7.58	80	0	70	140	560	830	120	570	850	-20	10	20
#13	7.68	90	0	70	130	830	270	110	840	260	-20	10	-10
#14	7.65	80	0	90	140	830	530	110	850	540	-30	20	10
#15	7.47	80	0	80	140	830	820	120	850	840	-20	20	20
#16	7.74	**	**	**	**	**	**	340	220	120	**	**	**
#17	7.85	**	**	**	**	**	**	360	220	250	**	**	**
#18	7.89	**	**	**	**	**	**	370	230	430	**	**	**
#19	7.86	**	**	**	**	**	**	400	220	620	**	**	**
#20	7.95	**	**	**	**	**	**	340	40	100	**	**	**
#21	7.69	**	**	**	**	**	**	370	560	330	**	**	**
#22	7.74	**	**	**	**	**	**	390	560	480	**	**	**
#23	7.74	**	**	**	**	**	**	390	560	630	**	**	**
#24	7.74	**	**	**	**	**	**	410	570	820	**	**	**

\*\* : 測定を行っていない

一に時計皿をかぶせた後、500W の家庭用電子レンジで30秒間加熱と2分間空冷を3回繰り返し沈殿を溶解した(写真2)。30秒以上加熱すると突沸する恐れがあるので、注意する必要がある。

この溶液を5A濾紙で濾別し、濾液を100mlメスフラスコで受けた。沈殿物を完全に溶解させるために再度5C濾紙の入った先の100mlビーカーに蒸留水を5~10ml, 1N塩酸溶液を5.0ml加え、加熱・溶解・濾過処理を行い、先の100mlメスフラスコで受けた。5A濾紙を蒸留水で十分に洗浄し、先の100mlメスフラスコで受け、蒸留水で定容(濾液B)した。なお、この濾液Bは、沈殿生成されたSi, Fe, Alの量を求めるために分析に供した。

### 3 結果

3成分の重量について、間接的に求めた結果と濾液A, 濾液Bを分析した結果を第3表に示した。この表から「間接的に求めた沈殿量」と「濾液Bの分析値」との差を比較すると、FeとAlは比較的0を中心としたばらつきであるが、Siについて

は、#3が0である他は負に偏っていた。このことは、今回の実験では、添加するSi溶液の量が少なかったことに加えて、Fe, Alに比べてSiは沈殿率が低く(小坂・他, 1977)、沈殿量が少ないことに起因するものと考えられる。従って分析に供する沈殿量が十分に多ければ解消される問題であろう。

また、従来行っている海水試料に塩酸を加えて沈殿を溶解する前処理法では、試料をICP発光分光分析法で測定する場合、試料溶液が高塩分溶液であるためにNa等による干渉が起こったり、長時間の分析に伴いネブライザー先端に塩分等が析出し溶液の噴霧が不安定になるため、正確な測定結果が得られなくなることがあったが、濾液Bのように、沈殿を海水から分離し、低結晶質沈殿物だけを溶解した試料であれば、試料溶液中の塩分濃度は低く押さえられ、また、含有元素も限られることから、これらの要因による誤差を小さくすることができる。

また、濾液BについてICP発光分光分析法の分析値と比較するために、土出ら(1987)の方法に従い吸光度法(Si, Fe)と原子吸光法(Al)による分

析を実施した。その結果を第4表に示す。Feについては、分析値の比が0.98~1.07と最も良く合致していた。Alについては0.68~1.28と濃度に関係なく差異が見られた。また、Siについては1.08~1.45と全ての試料について吸光光度法による分析値が高かった。なお、偏りが見られる点については今後の課題としたい。

4 おわりに

変色海水の原因である沈澱物を海水から分離し、塩酸と蒸留水を加えて電子レンジにより加熱溶解することによって、従来行われてきた分析前処理法に比べ、所要時間を短縮できる。更にこの方法では、塩濃度の低い試料溶液を分析に供するため、これまでは分析が困難であった希薄な変色海水試料も採取量を増やして本法を適用すれば、分析値の精度の向上が期待できる。分析方法の差異による誤差については、低濃度の場合に顕著であるが、沈澱を溶解処理した溶液の定容量を減らすことや、試料量を調整することで軽減できるものと考えられる。

また、今後、自然界の変色海水試料を用いて検

Table 4 The result of a cross-check. ( $\mu$  g)

Exp	東工大			海洋情報部		
	ICP発光分光分析法			吸光光度法		原子吸光法
	Si	Fe	Al	Si	Fe	Al
#4	90	10	190	120	10	130
#5	100	10	490	120	10	540
#6	100	10	790	130	10	690
#7	100	290	220	130	290	240
#8	110	280	500	140	300	620
#9	110	280	800	130	290	830
#10	110	570	260	140	560	290
#11	110	560	550	140	570	640
#12	120	570	850	150	600	1050
#13	110	840	260	160	880	330
#14	110	850	540	150	890	660
#15	120	850	840	150	870	1045
#17	360	220	250	390	220	320
#18	370	230	430	430	230	490
#19	400	220	620	440	220	740

証を行っていくこととする。

参考文献

小坂丈予：西之島海底火山の噴火と地球化学—その噴出物の成分と活動を探る，現代化学，**55**, 12-20, (1975).

小坂丈予・太平洋子・平林順一・森 彰：海水中で生成したシリカーアルミナ含水低結晶物質と沈澱アロフェンとの比較，鉱物学雑誌，**13**, 特別号, 178-186, (1977).

小坂丈予：伊豆小笠原諸島近海における海底火山活動とその温泉化学的研究，温泉科学，**36**, 75-84, (1986).

小坂丈予・平林順一・野上健治・土出昌一・足立紀佳：福徳岡ノ場海底火山活動に伴う変色海水，火山，**41**, 107-113, (1996).

小坂丈予・足立紀佳・土出昌一・野上健治：1986年伊豆大島噴火に伴う変色海水の化学組成，火山，**45**, 271-280, (2000).

土出昌一・柴山信行・背戸義郎・桑木野文章・佐藤寛和・小坂丈予・信国正勝・當重 弘・福島秀生：伊豆大島沿岸に見られた変色水の分析，水路部研究報告，**23**, 100-103, (1987)

原口紘丞，久保田正明，森田昌敏，宮崎 章，不破敬一郎，古田直紀：ICP発光分析法 日本分析化学会編，共立出版(1988).

# 災害対策システム運用装置による海底火山活動の監視手法について

大谷康夫, 山根勝雄: 海洋調査課

笹原昇, 西澤あずさ: 海洋研究室

小野智三: 第六管区海上保安本部

## Monitoring submarine volcanic activity using T-phases recorded at ocean bottom stations

Yasuo OTANI, Katsuo YAMANE: Hydrographic Surveys Division

Noboru SASAHARA, Azusa NISHIZAWA: Ocean Research Laboratory

Tomozo ONO: Hydrographic and Oceanographic Department, 6th R.J.C.G. Hqs.

### 1 はじめに

海洋情報部において、地震や火山活動の情報は漁船からの通報や関係機関の公開情報によって知り得ることが多い。海上保安庁は、航空機等によりこの情報を迅速に確認し、災害の未然防止に対応すべく努力している。特に海底火山噴火においては通行船舶に対し安全な航海のために情報を早期に提供する必要があるが、現在のところ当庁が担うべき航海の安全確保に関し、海域における地震発生も火山噴火活動も共に前兆現象を把握する段階には至っていない。

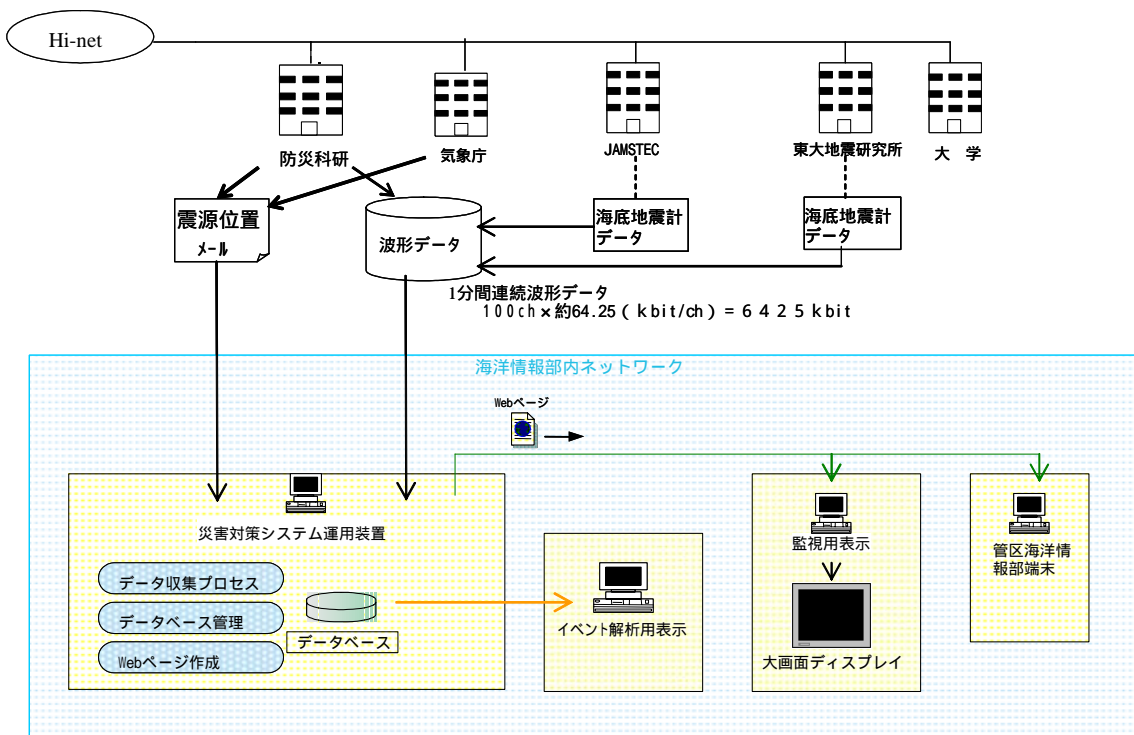
ここでは、得られた情報をより迅速に確認する

他の方法として、日本全国に展開されている地震観測網や海底に設置されている海底地震計の情報を入手し、海域で発生する火山噴火や地震の監視を行う災害対策システム運用装置について紹介する。

また、これまでに実際に同装置によって得られた海底火山噴火や地震の活動に伴う情報例をあげ、その監視方法の可能性を述べることとする。

### 2 システムの概要

災害対策システム運用装置は、第1図に示すように各防災機関や研究機関から地震に関する情報



第1図 システム構成およびデータフロー図

Fig.1 System configuration and data flow.

を、ネットワークを利用し自動的に入手している。海洋情報部が情報を入手するに当たっては、防災機関としての責務を担うための開発研究を目的として、各提供機関に対してデータの利用許可を受けている。したがって、得られた情報を元に作成された Web ページは海洋情報部内だけで見ることができる。

(1)震源情報

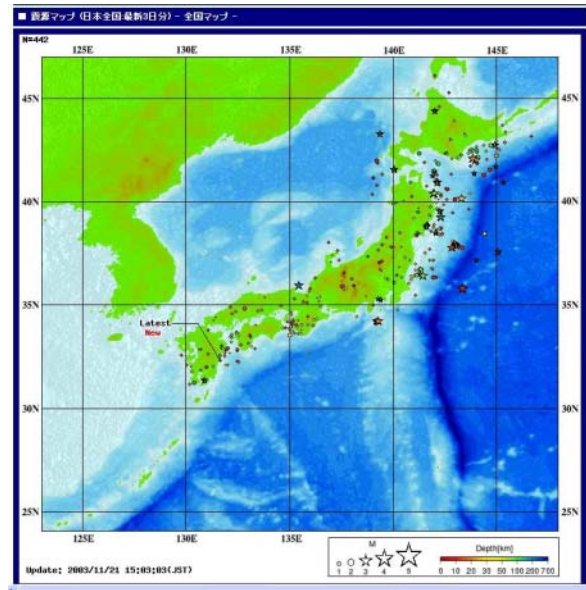
震源データは防災科学技術研究所及び気象庁から提供を受け、毎分ごとに新たに発生する地震の位置を第 2 図に示すように部内 Web ページの地図上に表示する。この Web ページを開いておけば自動的に最近 3 日間の震央位置を見ることができる。震央位置はマグニチュードによって 5 段階の記号で表示され、カーソルを記号上に置くことにより発生時刻が表示される。また、勤務時間外にも速やかに対応できるようにマグニチュード 5.5 以上の地震発生時には、登録された携帯電話等のメールアドレス宛に震源情報を自動的に送信するよう設定している。得られた震源情報は同システムに約 3 ヶ月間保存している。

(2)連続波形情報

日本周辺には各機関が配置している地震観測点が約 1,150 カ所ある。このうち海洋情報部は海域を監視するために必要とする約 50 箇所 100 チャンネル分の波形データ（地震計、海底地震計、ハイドロフォンなど）を 1 分または 10 分間隔で提供を受け、1 分毎ファイルに分割して約 2 ヶ月間システム上で保管している。これらの波形データは第 3 図に示すようにバンドパスフィルターで処理し、部内 Web ページに 20 分毎に簡易表示され、地震観測点ごとに見ることができる。

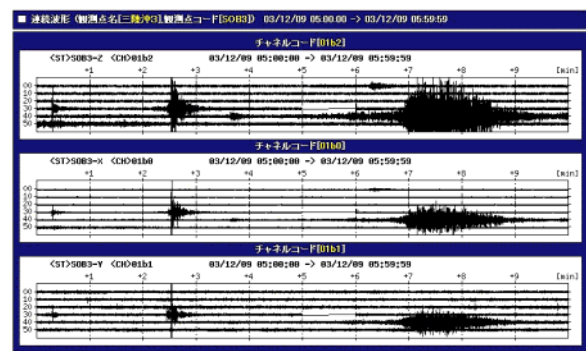
一般に各地点のデータは 3 チャンネル（上下振動、X 方向、Y 方向）からなるが、1 チャンネル（上下振動のみ）のものも存在する。

また、詳細な波形は本システム上において波形表示専用のソフトウェアで見ることがもできる。全ての機関の連続地震波形データは WIN フォーマ



第 2 図 震央位置図表示例

Fig.2 Epicenter map.



第 3 図 地震記録表示例（2-10Hz BP filter）

上段：上下振動 中段：X 方向 下段：Y 方向

Fig.3 Display of seismogram.

Top: Vertical, Middle: X direction,

Bottom: Y direction.

ット（卜部・東田，1992）で提供されている。波形を表示する場合には専用の UNIX 系解析表示プログラム win を利用することが必要である。このプログラムは東京大学地震研究所の Web 上で公開され、本災害対策システム運用装置上にもインストールされている。

3 イベント連続波形データの処理

杉岡・深尾(1999)によれば、T 相（地震計に検知される水中音）には地震に起因するものと海底

火山活動に起因するものが存在し、SOFAR チャンネル軸を中心とした低速度層を屈折しながら伝搬するとされている。実際にこの T 相が海底に設置された地震計によってどのように捉えられているか調べてみた。

(1)発生位置の判別

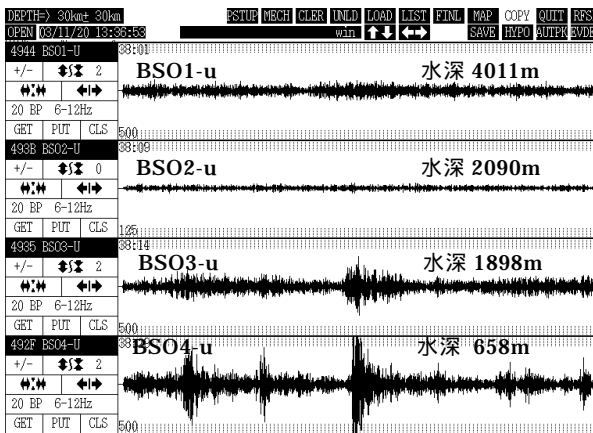
現在ある海底地震計の配置では、地震計の記録から南方諸島海域及び南西諸島海域における発震位置を正確に特定することは難しい。しかし、多発する地震海域や火山噴火活動は発生する位置が定まっていることから、各海底地震計で地震や噴火による水中音から発生する T 相の到達時刻を比較することで対象とする海域または海底火山で発生した波形であるか判定することが可能である。

さらに、P 波、S 波及び T 相の到達時間を揃えてそれぞれリデュース表示することにより、複数起こった地震か反射波か、または水中を伝わってきた波であるかを見極めることも可能である。

(2)T 相の判別

房総半島沖合に設置された海底地震計で、南方海域（福岡ノ場）で発生している T 相と考えられる上下動の最も顕著な波形を取り出し、その特性を調べてみた。

まず、設置された深さの異なる海底地震計の各



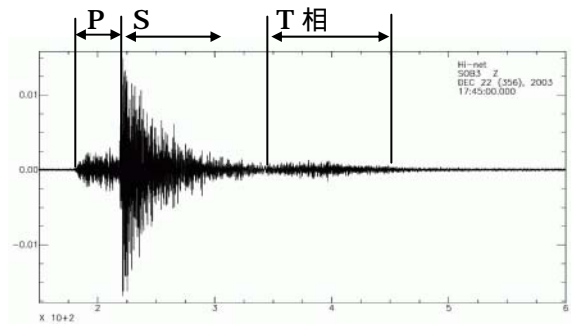
第 4 図 房総沖海底地震計の深度別記録

Fig.4 Comparison of seismograms recorded at different depth by ocean bottom seismograph installed off Boso.

記録から、T 相が存在すると考えられる時刻の波形を切り出し、その振幅を比べてみた。この結果は第 4 図に示すように水深 658m に設置された BSO4-U の海底地震計に波形がはっきりと現れている。そのほか水深 1,898m に設置された BSO3-U にも若干の波形を検知することができるが、水深の深い場所に設置された海底地震計では検知できていない。

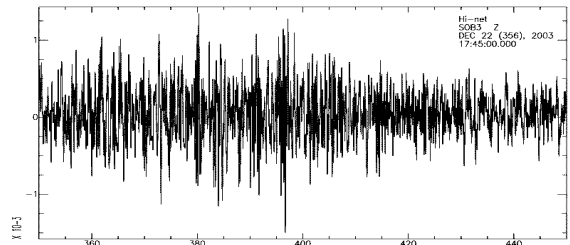
なお、これらの波形は 6Hz より低い周波数域では振幅が非常に小さい。これは、この波形が後述するように海底火山噴火に伴う噴火音であり、SOFAR チャンネル層を伝播したためと考えられる。

次に、北海道釧路沖（水深約 1,600m）の海域で発生したマグニチュード 5.8、震源の深さ約 30km の地震について、各海域の海底地震計記録の特性を調べてみた。サンプリング周波数は地震



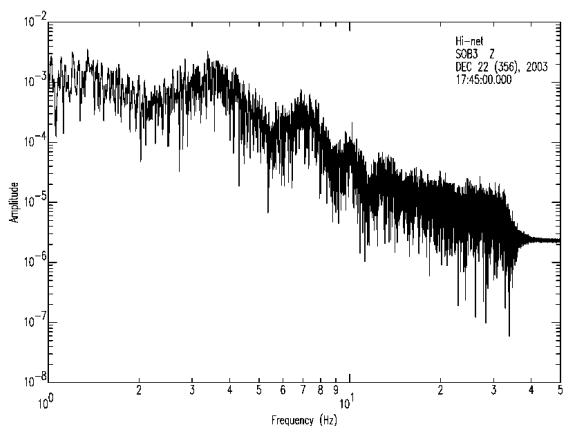
第 5 図 2003 年 12 月 22 日 17 時 47 分釧路沖地震の三陸沖海底地震計における波形（2-15Hz BP filter）

Fig.5 Seismogram recorded by ocean bottom seismograph off Sanriku from the Kushiro-oki Earthquake at 17:47 December 22, 2003.



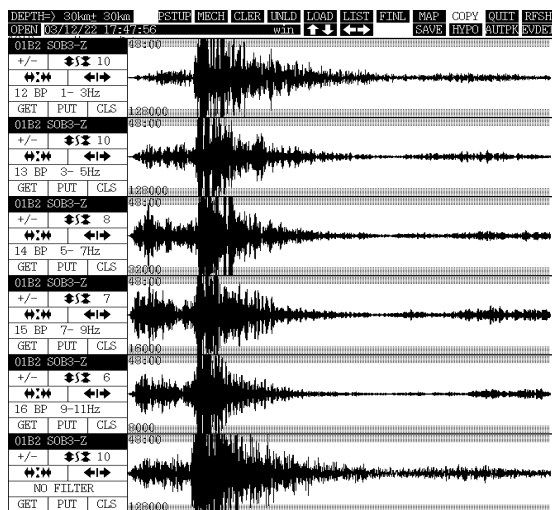
第 6 図 三陸沖海底地震計における釧路沖地震の T 相  
Fig.6 T-phase recorded by ocean bottom seismograph off Sanriku from the Kushiro-oki Earthquake.

計によって違うが、多くは 100Hz である。第 5 図に示すように、三陸沖水深 1,057m に設置されている海底地震計で T 相が観測された。この T 相を切り出して拡大したものを第 6 図に、FFT で変換した周波数特性を第 7 図に示している。第 7 図において、3.5Hz 及び 7Hz と 10Hz の付近にピークが認められる。これらのピークは、P 波及び S 波から T 相に変換される場合に見られるもので、



第 7 図 三陸沖海底地震計における釧路沖地震 T 相波の周波数特性

Fig.7 Frequency characteristic of T-phase recorded by ocean bottom seismograph off Sanriku from the Kushiro-oki Earthquake.



第 8 図 三陸沖海底地震計記録の各周波数帯域の波形  
Fig.8 Seismograms of each frequency band recorded by ocean bottom seismograph off Sanriku. The frequency band for each trace is shown in the left box.

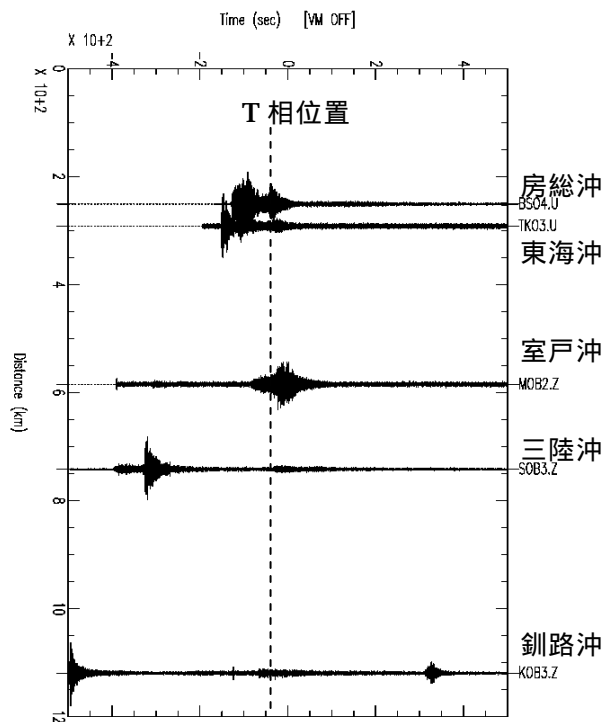
Jacques, Emile (1998) により研究されている。

第 8 図には T 相の各バンドパスフィルター毎の P 波及び S 波との相对比较を図示した。この図から T 相を抽出するためには、7Hz から 9Hz のバンドパスフィルターを使用するのがよいと解る。

なお、T 相の検出には震源と海底地震計の位置関係も重要である。釧路沖で発生したマグニチュード 4 から 5 の地震については、三陸沖の海底地震計では T 相が検知されるが、それよりも西側に位置する海底地震計では何れも T 相は明確に検知されなかった。一方、南方諸島や伊豆諸島の付近海域の地震については、発生場所や規模によって各々違った海底地震計で T 相が検知されている。

(3)火山監視手法の検討

今回は火山噴火による T 相が地震に伴う T 相と同じ水中音であることから火山噴火のかわりに南方諸島方面に位置する比較的大きい八丈島近海地



第 9 図 八丈島近海地震の記録を 1.5km/sec でリデュース表示  
Fig.9 Seismograms from Near-Hachijushima Earthquake. (Reduction velocity: 1.5km/sec)

震に伴う T 相を用いて監視手法を調べることにした。

最初に，T 相の記録された海底地震計の上下動のチャンネルを選択し，地震発生時刻から 30 分間の波形を切り出した．次に波形処理ソフトウェアである SAC を使用するため，WIN フォーマットから SAC フォーマットへ変換した．最後に S/N を向上させるための 2 から 15Hz バンドパスフィルターを通して，発震位置からの水中伝播速度でリデュース表示を行った．その結果を第 9 図に示す．室戸沖以外の房総沖，三陸沖，東海沖及び釧路沖で T 相の存在を確認することができたことから火山噴火による T 相もリデュースし確認することができると云える．

ここで，室戸沖では振幅の小さい P 波と T 相の位置に振幅の大きな波形が検知されているが，これまでの解析だけでは T 相であると断定できない．

#### (4)海底火山活動の実例検証

平成 15 年 11 月初旬から 12 月にかけて変色水が視認され，火山活動が活発化していた福徳岡ノ場について，海底火山活動の監視方法の可能性を検証する．

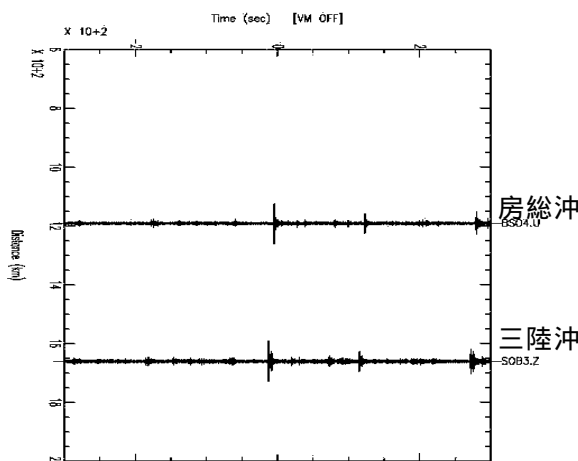
福徳岡ノ場は平成 15 年 11 月 5 日に変色水が認められ，その後も活発な変色水湧出を伴う活動を繰り返している．11 月 20 日の 13 時 27 分には断続的に海底からの噴火に伴う変色水の湧出が視認された（写真 1 参照）．

この時刻の連続波形を切り出し，前述した八丈島近海地震と同様に処理を行った．発震位置からの水中伝播速度でリデュースしたところ，第 10 図に示すように房総沖及び三陸沖の海底地震計に同様な波形が認められた．釧路沖の波形は不運にも公開されていなかったため，房総沖と三陸沖の 2 局のみの比較ではあるが良く整合している．つまり，表示された記録は福徳岡ノ場において発生していると推定される．この波形は地震によって発生した T 相の紡錘型波形とは違い，海中で噴火したため打突した音のように断続的な単発の減衰型波形を呈している．また，振幅のやや大きい波



写真 1 2003 年 11 月 20 日福徳岡ノ場の変色水  
（第三管区海上保安本部羽田航空基地撮影）

Photo.1 Discolored water of Fukutoku-oka-no-ba on November 20, 2003.



第 10 図 2003 年 11 月 20 日 13 時 25 分頃の福徳岡ノ場の波形

（7-12Hz BP filter，1.6km/sec リデュース）

Fig.10 Seismograms of Fukutoku-oka-no-ba around 13:25 November 20, 2003.

（7-12Hz BP filter, Reduction velocity: 1.6km/sec）

形は約 2～3 分間隔で起こっていることも判読できる．

以上により，海底地震計の記録からフィルタリング及びリデュースすることによって T 相を確認し，海底火山活動状況を監視することが可能であると云える．

#### 4 おわりに

ラム(強化版),地震学会講演予稿集, No.2,  
331-331, (1992)

南方諸島海域における火山活動において,本土近傍に設置された海底地震計で捉えるには遠距離まで到達する大きな震動が必要であるが,地中を伝わる地震波は減衰されるために火山に起こるような微弱な震動は遠方まで達しない.しかしながら噴火に伴い水中を伝わる音は過去において,はるか米国の沿岸まで達したことが確認されており,発震位置からの距離に加え到達経路もT相の受信に影響を与える.今後はこの性質を利用して,南方海域をはじめとする全ての海底火山について,個々に噴火に伴う水中音を監視する画面を作成するとともに,噴火活動のイベントを自動的に判断するソフトを開発し,火山活動の監視の強化を図っていきたい.

また,今回は海底地震計によってのみT相の抽出を検討したが,陸上沿岸域に設置されたS/Nがよい地震観測点において,規模の大きい地震の場合にはT相が検出されたことがあり,これらについても今後の海底火山監視に利用できるよう開発を進めていきたい.

最後にこの度の災害対策システム運用装置を構築するにあたってご協力をいただいた防災科学技術研究所,海洋科学技術センター及び気象庁ならびに各大学の研究機関の方々に感謝いたします.

#### 参考文献

Jacques Talandier, Emile A.Okal; On the Mechanism of Conversion of Seismic Waves to and from T Waves in the Vicinity of Island Shores, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.88 No.2, 621-632, (1998)

斉藤正徳; 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, *物理探鉱*, vol.31 No.4, 112-135, (1978)

杉岡裕子, 深尾良夫; 水中音波で探る海底火山活動, *超音波テクノ*, vol.11, 7-11, (1999)

ト部卓, 末田進也; WIN--微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログ