

総 説

GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測[†]

～海上保安庁の取り組み（レビュー）～

藤田雅之*

GPS/Acoustic seafloor geodetic observation

—Progress by the Japan Coast Guard (review)—

Masayuki FUJITA*

Abstract

Progress in the GPS/Acoustic seafloor geodetic observation carried out by the Japan Coast Guard during the 5-year period since 2000 is reviewed, especially focusing on the development of data analysis methods and their results. A precision better than several centimeters has been attained in the seafloor station positioning through tremendous efforts for improving accuracy of component techniques both in software and hardware. A couple of remarkable results have been presented: an intraplate crustal velocity off Miyagi Prefecture caused by the subduction of the Pacific plate and co-seismic displacements associated with large earthquakes having occurred along the Nankai Trough in 2004 and off Miyagi in 2005. Further issues to be tackled in the future are summarized.

1 はじめに

GPS 測位と音響測距を組み合わせることによる海底地殻変動観測のアイデアは、スクリップス海洋研究所 Spiess 教授による論文 (Spiess, 1985) にさかのぼる。彼らのグループは、1994 年から、この技術を用いて Juan de Fuca 海嶺付近で観測を開始し、海底におけるプレート運動を検出したという結果を報告した (Spiess and Hildebrand, 1995; Spiess et al., 1998)。これが、プレリミナリーながらも、実際に海底で捉えられた変動が報告された世界最初の事例であるといつてよい。

海上保安庁では、2000 年より GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測を開始し、以来約 5 年が経過した (浅田・矢吹, 2000, 2001; Fu-

jita, 2003; Mochizuki et al., 2003, 2005 a; Fujita et al., 2006)。2000 年以前が機器開発への格闘期であったとすれば、実際に海底基準点を設置し、観測データを取得しはじめた 2000 年以降は、観測運用とデータ解析手法の開発から初期成果導出に至る 5 年間であったと総括することができよう。

音響測距技術を中心とした海底地殻変動観測の歴史及び海上保安庁における GPS/音響測距技術の機器開発の経緯については、矢吹 (2002) に詳しくレビューされている。本稿では、それとの重複は最小限に留め、2000 年以降の約 5 年間における海上保安庁の取り組みについて、データ解析手法の開発及び観測成果に重点を置きつつ、最新

[†]Received December 15, 2005; Accepted February 21, 2006

* 航法側地室 Geodesy and Geophysics Office

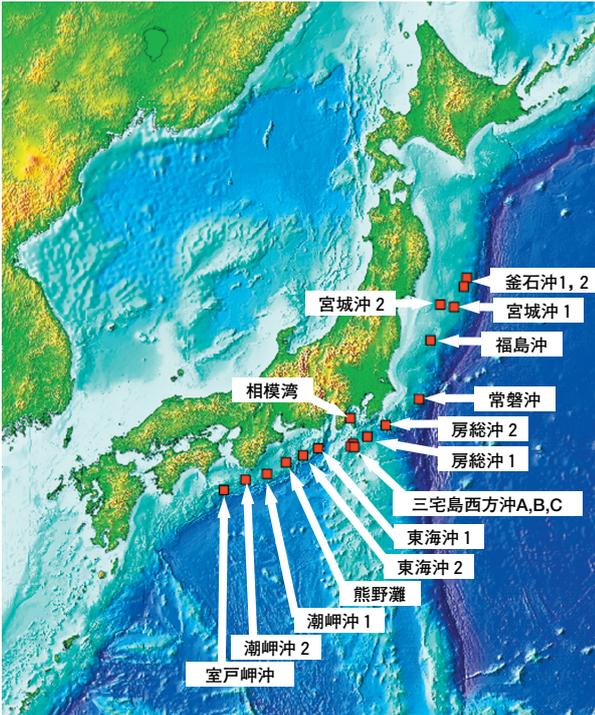


Fig. 1 Distribution of seafloor reference points installed by the Japan Coast Guard.

の動向までをまとめる。なお、これらの取り組みは、東京大学生産技術研究所との技術協力の下に行ってきたことを付記する。

2 海底基準点の展開

海上保安庁では、科学技術庁（当時）の科学技術振興調整費「南海トラフにおける海溝型巨大地震災害軽減のための地震発生機構のモデル化・観測システムの高度化に関する総合研究（平成8年度～12年度）」によって、GPS/音響結合方式の測定装置の開発を行った（矢吹，2002）。2000年2月、この研究の結果として、南海トラフに近い熊野灘の水深2000mの海底に、4台一組の音響トランスポンダーを設置し、これがその後運用されている海上保安庁の海底基準点第1号となる（浅田・矢吹，2000）。

それ以降平成16年（2004年）度までに、主に太平洋側の海溝沿い陸側に海底基準点を展開してきた。Fig.1に、海上保安庁が現在までに展開した海底基準点を示す。

これらのうち、「三宅島西方沖」海底基準点は、2000年6月に始まった三宅島の火山活動を

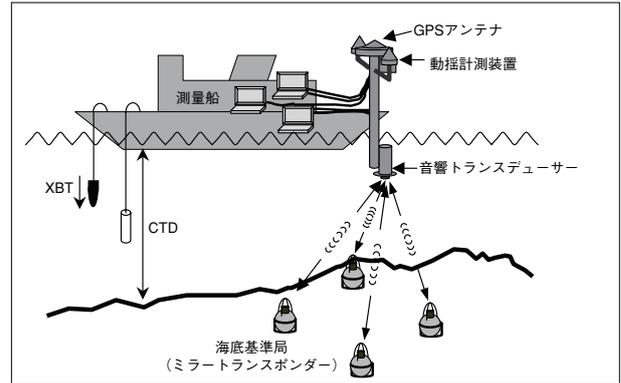


Fig. 2 Schematic picture of the GPS/Acoustic seafloor geodetic observation system.

を受けて設置したものである。三宅島の噴火後、マグマが海底を神津島方向へ移動しているという研究結果が出されたことから（酒井・他，2001），これを監視するための海底測地の重要性がクローズアップされた。このような経緯の中、海上保安庁では、三宅島と神津島の間3箇所に海底基準点を設置することとなった。

それ以外の海溝沿い陸側に配置されている基準点は、地震調査研究推進本部による「基盤的調査観測計画」に基づいて設置している（地震調査研究推進本部，2001）。この計画の中で、海上保安庁は、「海溝沿い陸側に100km間隔で海底基準点を整備」することが求められた。これは、海溝沿いで発生するプレート間巨大地震の発生メカニズムを明らかにするためには、陸域のみならず、震源域により近い海底での地殻変動データが不可欠であるという認識に基づいている。本計画に従い、まず日本海溝沿いから基準点の展開を開始し、次に南海トラフ沿いにも拡げていった。

ただし、平成16年（2004年）度に設置された「宮城沖2」海底基準点は、文部科学省の「宮城県沖地震に関するパイロット的な重点的調査観測」プロジェクトによるものであり（文部科学省研究開発局，2005），地震調査研究推進本部によって近い将来の大地震の発生確率が高いと評価されているこの海域において海溝軸直交方向の変動分布を捉えるため、既設の「宮城沖1」の陸側に配置された。

3 観測システムの概要と観測方法

観測システムの概念図を Fig. 2 に示す。このシステムは、海底に設置した3~4台の音響送受波装置（ミラートランスポンダー）と測量船の船尾に取り付けた約8mの支柱及びその上下に取り付けたGPSアンテナと音響トランスデューサ、支柱の方位と傾きを測定するための動揺計測装置からなる（畝見, 2004）。現在のシステムで使用している船舶は、約600トンの中型測量船「明洋」及び「海洋」である。

海上のGPS観測で取得するデータは、陸上の地殻変動監視のための基準点（淵之上・他, 2005）で取得しているものと同様、2周波の搬送波位相データである。ただし、キネマティック測位が目的であるため、高周波でサンプリング（通常2Hz）を行う。

海中の音響測距に用いる信号は、M系列と呼ばれるコード化した10kHzのパルス信号である。海底のミラートランスポンダーは、船上のトランスデューサから発信されたパルスを受信し、一定時間（約1秒）保った後、これをそのままの波形で返信する。これを再び船上のトランスデューサが受信し、発信波形と共に記録する。

上記以外にも、海中の音速度構造を把握するため、CTD, XCTDによる水温、塩分観測及びXBTによる水温観測を適宜行う。

なお、個々の観測機器については2000年以降も改良が重ねられており、具体的な機器の詳細及び変遷については、畝見（2004）、成田・他（2005）を参照されたい。

このシステムを用いた実海域における観測は、一つの海底基準点について数日間の観測を一まとまり（エポック）とし、これを繰り返すキャンペーン観測方式によっている。1回のキャンペーンにつき、1日あたり5~7時間の観測を、原則として3~4日以上行っている。観測時には、測量船が走行する際のノイズが音響測距の障害となるため、クラッチを切り離れた状態で波と風まかせの漂流観測を行う（畝見, 2004）。このように、観測中に測線のコントロールができないた

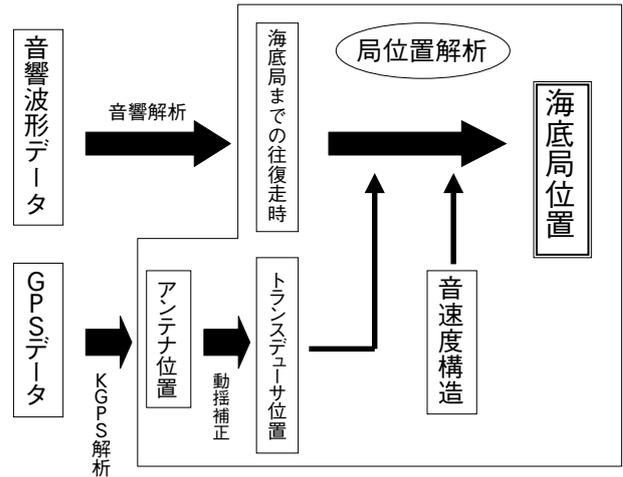


Fig. 3 Flow chart of data analysis.

め、1測線あたりの観測時間を20分程度（流れによっては最長60分程度まで）として、測線間で測量船を移動させることにより、できるだけバランスのよい測線配置を実現するよう配慮している。

4 データ解析手法

海底地殻変動観測のデータ解析は、大きく（1）船の位置を求めるキネマティックGPS（KGPS）解析、（2）船と海底局間の音波の往復走時を求める音響解析、（3）これら二つの結果を結合して海底局の位置を求める局位置解析の3つの段階に分けられる。解析の流れを Fig. 3 に示す。以下に、それぞれの手法について概説する。

（1）KGPS解析

海底地殻変動観測におけるKGPS解析では、多くの場合、近傍に位置の基準点を設けることができないため、長距離基線解析を高精度に行うことが課題となる。そのため海上保安庁では、NASA/GSFCのColombo博士が長距離基線解析用に開発したソフトウェアIT（for Interferometric Translocation: Colombo and Evans, 1998; Colombo et al., 2000）を導入した。ITでは、長距離基線での測位精度劣化の原因となる、電離層や大気空間不均質の影響による誤差を取り除くためのさまざまな工夫がなされている。

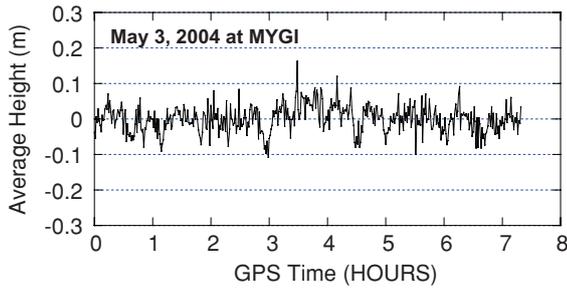


Fig. 4 Example of comparison between the GPS-determined sea surface height (1-minute average, tide corrected) and the geoid height for the purpose of estimating errors included in the kinematic result (Fujita et al., 2006).

しかしながら観測開始当初は、ITを用いてもなかなか良好な測位結果が得られない時期もあった。それが徐々に改善され、最近では安定した運用が可能となっているが、ここに至る主な改善要因として、(1) 結果を丹念に評価することにより多くの知見が蓄積し、これを観測計画や解析運用にフィードバックしていること、(2) 観測に用いる GPS アンテナの性能が、海陸共に向上したこと、(3) IT が多少改良されていること、などが挙げられる。

藤田・矢吹 (2003) は、得られた KGPS 測位解の信頼性を検証し、結果の取捨選択の判断に役立つため、測位解の簡単な評価手法を提案した。この方法は、測量船が海面に拘束されていることを利用して、測位解として得られた高さの長周期成分を海面の時間変化と比較することにより、測位解の精度を判断するものである。具体的には、高さの 1 分平均値に潮汐補正を加えた結果とジオイド高との差を求め、その時間変化を監視している。

現在この目的のため、海洋潮汐モデルとして Nao 99. Jb (Matsumoto et al., 2000) を、ジオイドモデルとして Fukuda (1990) を用いている。Fig. 4 に、「宮城沖 1」海底基準点における評価図の一例を示す。

この方法の問題点は、評価結果に、それぞれのモデル誤差に加え、潮汐・ジオイド以外の影響が含まれることである。前者のモデル誤差について

は、例えば沿岸域では相対的に両モデルの精度が劣化するし、後者の例としては、気圧の変化や黒潮等海流によるダイナミックハイトの影響等が挙げられる。しかし、これまでの運用では、少なくとも Fig. 4 に示した「宮城沖 1」等の沖合の観測点においては、この評価図が測位解信頼性の優れた判断基準となっている。

これらの測位解評価の知見の蓄積は、実海域での観測計画にもフィードバックされる。例えば、長基線 KGPS 解析精度は、短基線 KGPS 解析あるいはスタティック測位解析に比べて、観測衛星数の減少や DOP の劣化に対してかなり敏感であり、条件が悪くなると、測位評価すなわち測位精度が著しく悪化する。この観点から見ると、日本周辺では条件が不十分である時間帯が予想外に多いことがわかってきた。そこで、視認衛星の条件に鑑みて、測位観測の時間帯を考慮することで、よりよい解析条件を確保する努力を行っている。その結果、取得したデータの利用率は格段に上がり、安定した測位精度確保の実現につながっている。観測を行う上で、衛星の視認条件を考慮することは、原理的に当然のこととも言えるが、実際に観測計画に反映する上では、その根拠として、測位結果の定量的評価が必須である。

さらに、IT を用いて以下のようなさまざまな測位評価を行うことにより、より安定した測位精度の確保に役立てると共に、将来に向けた知見も蓄積している。

河合・他 (2005 a) は、陸上 GPS アンテナの機種の違いによる測位評価結果の違いに着目し、アンテナ機種として Choke Ring や Trimble Zephyr を用いた場合、旧タイプの Trimble Micro Centered を用いた場合に比べて明らかに評価結果がよいことを示した。ただし、この評価における船上の観測には Zephyr アンテナを用いているため、この測位精度の違いがアンテナ特性の善し悪しによるものか、アンテナの組み合わせによるものかが検討課題となっている。後者の場合、アンテナ位相中心の情報を考慮することにより、さらに測位精度が向上することが期待される。

河合・他 (2006) は、基線長の異なる複数の陸上基準点データからの IT による測位解を比較した。その結果、基線長 200 km~1500 km では、測位結果の善し悪しと基線長の間にはほとんど相関がない、言い換えれば、基線長 1500 km でも通常我々が利用している測位解に比べて遜色ない精度が得られることが示された。さらに、KGPS の 1500 km 解を、後述する海底局位置解析にも適用し、近傍の陸上基準点を用いた場合と同等の位置決定精度が得られることも確認した。これらのことから、将来例えば海溝軸を越えた海洋プレート上など、かなり沖合に海底基準点を設置した場合でも、KGPS 解析に関しては、IT を用いることにより、現行精度の確保が十分可能であると期待される。

また河合・他 (2005 b) は、GPS 衛星の視界条件を改善するために、船上で最も視界条件のよいマスト上に設置したアンテナにより取得したデータを用いた測位評価を行い、船尾支柱上のアンテナを用いた場合に比べて、改善される場合が多いことを報告した。さらに松本・他 (2006) は、マストアンテナで取得したデータによる測位解を、海底局位置決定へ適用した場合について検討し、予備的な結果を得ている。

(2) 音響解析

音響解析は、音響波形から音波の往復時間を決定するためのデータ解析であり、言い換えれば、送信波と受信波の立ち上がり時刻を正確に決定するという作業である。海中での音波の速度が約 1.5 km/s であることを考えると、センチメートルレベルの測位精度を達成するために必要な読み取り時刻の決定精度は、少なくとも数 μ 秒以下と考えなければならない。

音響波形の立ち上がりを高精度に決定するためには、相互相関法と呼ばれる手法が用いられる (浅田・矢吹, 2001; 富山, 2003)。これは、M 系列信号の特性を利用して行うものであり、数値的に作成した参照波形と送受信波形の相互相関をとり、波の立ち上がりを、相関波形 (振幅が変動

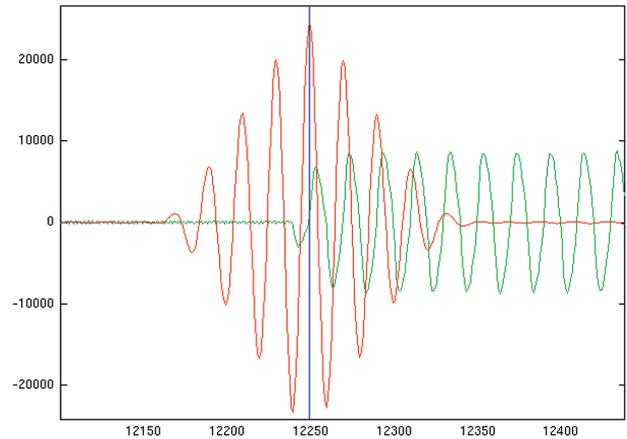


Fig. 5 Example of cross-correlogram for the transmitted acoustic signal (red) superimposed on the original waveform (green) (Toyama, 2003).

する正弦波) の最大振幅を与える「山」の位置として決定するという方法である。Fig. 5 に、送信信号部分の相関解析例を示す。この方法の利点として、多少のバックグラウンドノイズの中からも立ち上がりを正確に同定できること、計算機で容易に読み取ることができること等が挙げられる。この方法を用いると、相関波形の 1 波長が 100 μ 秒相当であることから、数 μ 秒の時刻決定精度は、原理的には十分に達成可能である。

ところが、実際の解析においては、観測波形がさまざまな要因により完全な M 系列波形とはならないため、相関波形の最大振幅を与える「山」が相対的に不明瞭となり、原波形の立ち上がりとは整数波長分ずれた「山」を、音響解析ソフトウェアが誤って同定してしまう場合がある (富山, 2003)。そこでこれまでは、ソフトウェアによる立ち上がり同定の後に、解析者が一つ一つの波形データについて原波形との照合を行い、ソフトウェアが誤った「山」を選択していないかを確認する作業を行ってきた。しかし最近では、同定すべき「山」の判断基準の検討に加え、音波の送波器である船上トランスデューサの更新 (成田・他, 2005; Mochizuki et al., 2005 a) による送信波形の改良等も相まって、ソフトウェアによる立ち上がり決定の誤謬率がかなり低下しており、計算機のみによる自動運用も視野に入ってきたところである。

他方で、音響解析結果の精度に関連して、ハードウェアの構造からみた原理的問題も残っている。我々の観測目的にとって、音響トランスデューサは「点音源」であることが理想であるが、実際には形状及び発信メカニズムに依存する有限の波源特性をもっている。具体的には、測距信号の出入射角度に応じて送受信レスポンス（位相応答）に差が生じ、それが測距誤差となりうる。

Mochizuki et al. (2005 b) は、このような観点から水槽実験を実施し、トランスデューサの位相特性および位相中心を把握すると共に、それらが局位置決定に与える影響を調べた。その結果、こうした位相特性の考慮の有無は、決定局位置、特に高さにバイアスとしては現れるものの、同一のシステム構成で観測を行う限り、その時間変化（地殻変動）の把握にはあまり影響しないことを示した。しかし、例えば船上トランスデューサあるいは海底局が更新された場合等に備え、観測の連続性を維持していく上で、これらの個体特性を把握しておくことは大変重要である。

(3) 局位置解析

前述の2つの解析結果を組み合わせ、最終的に海底局の位置を求める解析を、ここでは局位置解析と呼ぶ。基本的原理は、複数の観測基点の位置情報とそこからの距離をデータとして球面の交点を求める、いわゆる幾何学的3次元コンパスの考え方である。

浅田・矢吹 (2001) は、この目的のため、フォワード法を用いた局位置解析ソフトウェアを開発し、熊野灘等のデータから初期成果を導出すると共に、観測データ、推定パラメータ等について、誤差の性質を詳細に吟味した。

藤田・他 (2004) は、それらの知見を基に、線形最小自乗法に基づくインバージョンの手法（松浦, 1994）を導入した。このために開発されたソフトウェアを「SGOBS」と呼ぶ。SGOBSで用いられているアルゴリズムをFig.6に示す。局位置の推定は、海底に設置した3~4局それぞれにつ

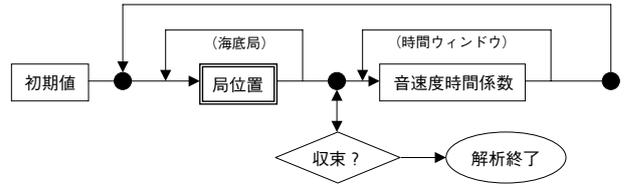


Fig. 6 Algorithm of parameter estimation applied to get the seafloor station position using the round-trip travel time of acoustic waves.

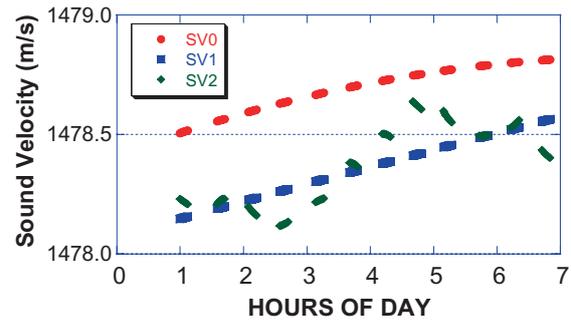


Fig. 7 Representative plots of estimated average acoustic velocity, on April 24, 2004 at MYGI (Fujita et al., 2006). SV 0 (red) represents an initial value given from the observed velocity profile, SV 1 (blue) is the curve after the daily session estimation as the first step and SV 2 (green) is the one estimated for each observation line as the second step.

いて独立に行われるが、最終的にはその重心位置（平均位置）を基準点の局位置解とする。

SGOBSでは、この技術における主要な測位誤差要因である海中の音速度を推定パラメータとして、その誤差の影響を軽減する工夫を行っている。具体的には、海中の平均音速度の時間変化を多項式近似し、その係数を推定パラメータとして、逐次的に解く手法を採用している。

佐藤・藤田 (2004) は、局位置解析の結果は、音速度構造の鉛直プロファイルの形状にはほとんど依存せず、ほぼ平均音速度によって決まっていることを示した。これは、鉛直方向の音速度変化が最大でも4~5%程度、波線の入射角に換算してせいぜい2~3°であり、大局的には直進していると考えられることによると解釈される。ただし、夏場の海表面付近など、部分的に鉛直プロファイルの傾斜が大きくなることがあるので、そ

の影響には注意する必要がある。

これらの知見を基に、SGOBSでは、海中音速度構造として200 m, 400 m, 800 m, 1600 mに境界をもつ層を設定し、各層中深さ方向に線形の速度変化を与えている。ただし、音速度推定を行うタイムウィンドウの中では鉛直プロファイルの形状は一定とする。すなわち解くべきパラメータは、平均音速度に関する時間係数のみである。この層構造近似で、現行精度上は問題がないと考えられる。

音速度構造の初期値としては、CTD, XBT, XCTDによる水温、塩分の観測値からDel Grosso (1974)の改正式を用いて計算したものを与える。現在採用している手法は、これを出発点に、まず1日(5~7時間)の音速度変化を二次曲線近似により推定し(「1日補正」と呼ぶ)、さらにその結果を初期値として、測線毎(20~60分)の時間変化を推定している。Fig.7に、推定された平均音速度の時間変化の一例を示す。図から、前者で全体の系統誤差(バイアス)が、後者で1日補正の二次曲線で近似されない細かい時間変化が補正されていることがわかる。このような二段階方式をとっている理由は、後者のみでは、観測値に含まれている比較的大きなバイアス誤差を十分に補正することができないことによる。

これに関連して、社・他(2005 a, b)は、XBT及びXCTDの観測値に含まれるバイアスに着目することにより、音速度初期値の改善を試みた。まず社・他(2005 a)では、XBTデータにおいて、Kizu et al.(2005)が提案した新しい深度換算式を用いることにより、音速度初期値に含まれるバイアスを大きく軽減できることを示した。また社・他(2005 b)は、XCTDデータに関する新しい深度換算式の導出を試み、同様に初期値を改善した。

これらの努力の結果、現在では上記の1日補正を行う意味は、当初に比べてやや小さくはなっている。また個別に見ると、時間変化のパターンによっては、1日補正を行うことがかえって結果を悪化させる事例もあり、注意が必要である。しか

しながら、上記二段階方式は、最大公約数的な基本ストラテジーとして依然有効であり、個別の事例にどう対処していくか、さらにロバストなストラテジーが考えられるかが、今後の課題である。

石川・藤田(2005)は、海底局位置の鉛直成分(高さ)を既知として拘束する手法により、水平成分の決定精度が向上することを示した。この手法は、インバージョンのパラメータ推定において、高さが音速度パラメータと分離しにくいことから、これを固定することにより音速度推定精度を向上させるという考え方に基づいている。この手法の問題点として、比較期間の中で高さが大きく変動していないという仮定が成立する場合に限られること、元々決定精度が悪い高さの固定値の妥当性をどう確保するかということがある。これまでのところ、観測エポック数が多く、固定する高さの値を適切な範囲で決定できる「宮城沖1」海底基準点の解析にこの手法を適用し、よい結果を得ている。

ところで、本来は高さの変動も重要なデータである。海底の高さ変動を計測するための別の手法として、海底圧力計を用いる方法が試みられており、良好な結果が得られた例も報告されている(Fujimoto et al., 2003; Baba et al., 2005; Phillips and Chadwell, 2005)。しかしながら、海底圧力計には長期ドリフトという問題があり、まだ地殻変動検出という目的で十分確立した技術とは言えない。我々のGPS/音響測距技術においては、現時点ではまだ高さの決定精度は不十分と言わざるを得ないが、条件さえ良ければ、数cmレベルの再現性を示す場合もあり、潜在的には高さの高精度決定も可能であると期待している。例えば藤田・他(2005)では、複数台の海底局間の相対位置を拘束する手法による高さの決定精度向上の可能性を示しており、海底局間相対測位の技術開発と共に将来の課題である。

最後に、キャンペーン観測により求められた最終的な局位置解(エポック解)の精度評価手法について補足しておく。既に述べたように、我々の観測では、1回のキャンペーン観測につき通常3

～4日以上 of データを取得しており、最終的なエポック解は、これら全日のデータを一度にインバージョン解析することにより求めている。他方、1日分のデータ（サブセットデータ）からも、精度的には不十分なながらも、一つの局位置解が求められることから、日数分の独立なサブセット解を求め、その再現性（サブセット再現性）を評価することにより、最終的なエポック解の精度指標としている。実際、こうして求めたサブセット再現性は、海域や季節、観測された海中水温構造の安定性とも相関があることが示されており（Fujita et al., 2006）、有効な評価手法として活用されている。

これに関連して石川・他（2006）では、サブセット再現性と海中水温構造との関係について考察を深めると同時に、2005年に行った「宮城沖1」海底基準点での集中観測データを用いて、サブセット再現性が相対的に悪い場合でも、十分な観測日数の確保によりエポック解の精度が改善され、条件の良い場合に匹敵する数 cm の精度が得

られることも示している。

一方、上記 2005 年の集中観測データからは、船尾観測支柱の動揺計測値に有意なバイアス誤差が含まれていることも明らかとなり、これに対処することにより、局位置決定精度の安定性向上に寄与した。これについては、今後の検討結果も含め、別稿で詳しく報告される予定である。

本稿で概観した局位置解析インバージョンの方法論、解析条件及び評価手法については、Fujita et al. (2006) にも、その定式化と共に詳述されている。

5 主な成果

次に、これまでに得られた主な観測成果について概観する。

(1) 観測精度の確認等

浅田・矢吹（2001）は、2000年に設置した直後の「熊野灘」海底基準点における2度の観測結果から、2 cm 程度の繰り返し再現性が得られる

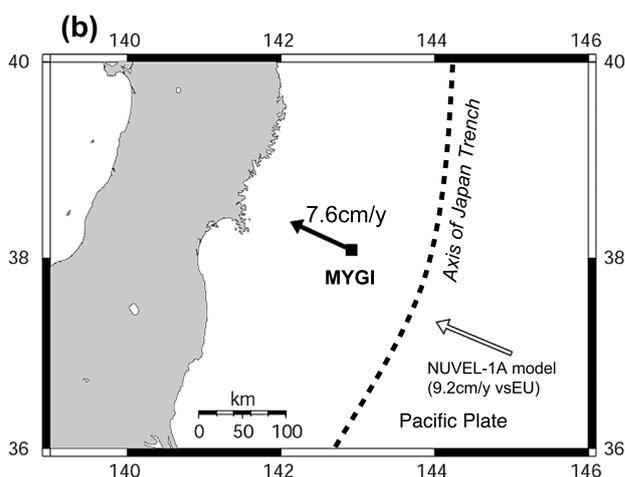
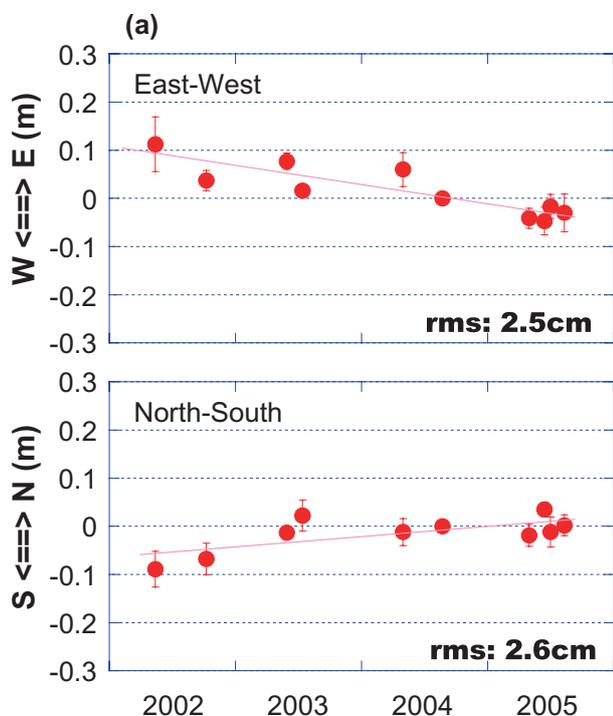


Fig. 8 Result at the seafloor reference point MYGI : (a) Time series in the horizontal components during the period 2002 – 2005. The position reference is Shimosato, in central Japan. (b) Crustal velocity vector at MYGI relative to the Eurasian plate evaluated from the time series shown in (a) after correcting for the intraplate velocity at Shimosato.

ことを示した。また、「三宅島西方沖」海底基準点のデータからも、センチメートルレベルの再現性が確認された（例えば、Mochizuki et al., 2003）。「三宅島西方沖」については、その後も顕著な変動は認められていない。

藤田・佐藤（2004）は、後述する「宮城沖1」海底基準点のデータから、異なる観測エポック間の位置決定再現性を吟味し、数 cm の精度が得られることを示すと同時に、音速度構造の不安定による精度劣化についても議論した。

(2) 「宮城沖1」で検出されたプレート内変動

宮城県沖海域は、地震調査委員会の長期評価により近い将来の大地震発生確率が極めて高いとされている場所である。この海域に、2001年9月海底基準点「宮城沖1」を設置し、翌年から本格的に観測を開始した。「宮城沖1」においては、上記の背景から海上保安庁としても、本観測技術

の精度評価の目的も兼ねて、重点的に多くのデータを取得してきた。

2004年には、本基準点において、それまでの約2年間の時系列から、ユーラシアプレートに対する相対変動を検出することができた（Fujita et al., 2004）。求められた変動の速度ベクトルは、西北西に約8 cm/年というものであり、当庁の観測から有意な地殻変動が定量的に捉えられた初めての例となった。これは同時に、国内でも初めてのことである。

さらにFujita et al. (2006)は、上記の期間に2005年4月までのデータを加えて再解析し、ユーラシアプレートに対する速度ベクトルを、西北西（方位角295度）に8.5 cm/年と求めた。回歸直線の周りの測位解水平各成分の再現性は約2 cmとなり、それまでの目標精度を上回るものであった。

さらに後述する宮城県沖の地震前までのデータ

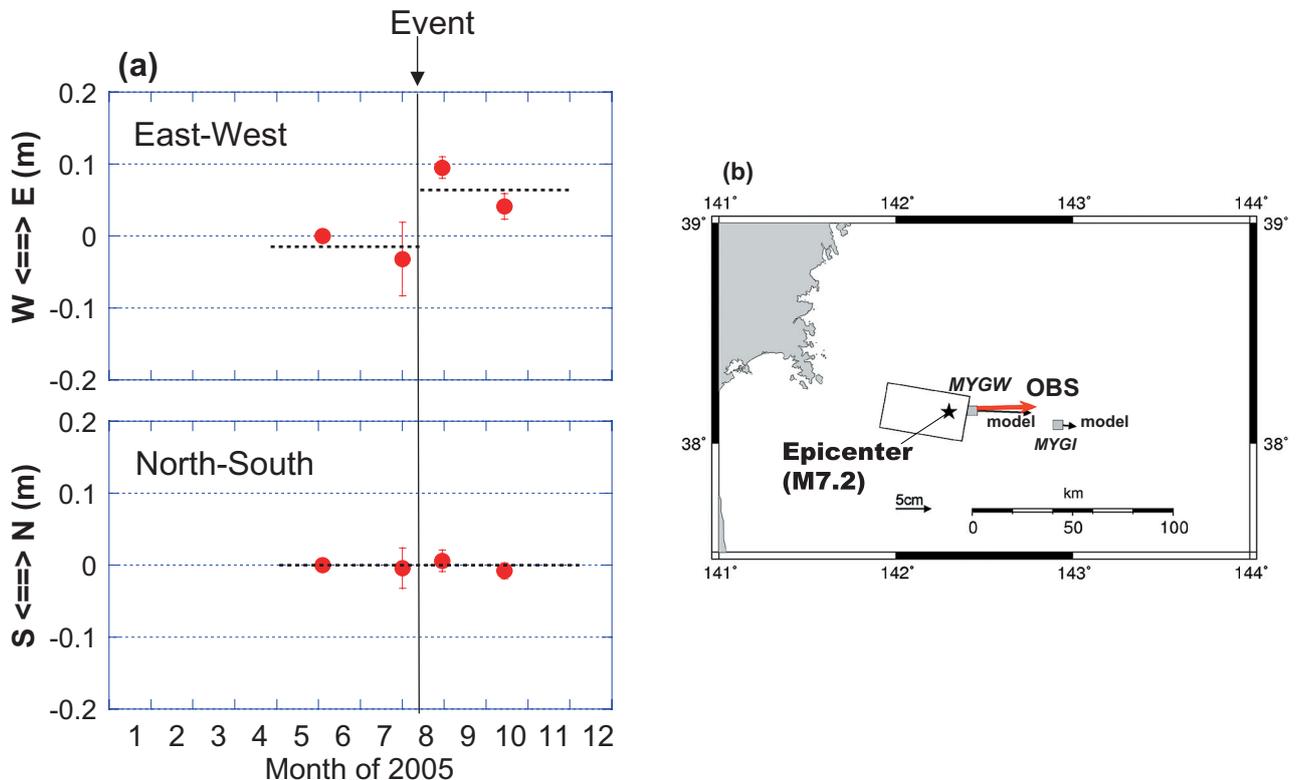


Fig. 9 Co-seismic displacement associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake (Matsumoto et al., 2006) : (a) Time series at MYGW in the horizontal components from four campaign observations during the period from June to October, 2005. (b) Observed co-seismic displacement vector at MYGW and synthetic vectors both at MYGW and MYGI calculated from the GSI's rectangular fault model.

を加えると共に、若干のソフトウェアの改善も行って再解析した最新の結果を Fig. 8 に示す（図中「宮城沖 1」は MYGI と表記）。Fig. 8 (a) の時系列は、海上保安庁の SLR 観測点である和歌山県下里の位置を基準としたものであり、下里のユーラシアプレートに対する速度（291 度方向に 3.2 cm/年；Sengoku, 1998）を考慮することにより、Fig. 8 (b) の速度ベクトルを算出している。これによると、「宮城沖 1」の速度ベクトルは、295 度方向に 7.6 cm/年となる。

得られたベクトル値は、東北日本の陸域における GEONET 観測点のユーラシアプレートに対する速度ベクトル（金華山付近で 3~4 cm/年；Miura et al., 2004）と、日本海溝から陸側に沈み込む太平洋プレートの運動（例えば NUVEL-1 A モデル（DeMets et al., 1994）では、ユーラシアプレートに対して 293 度方向に 9.2 cm/年）からみて、方向は整合的であり、値も両者の中間的なものとなっている。このことから、観測されたベクトルは、現実の変動を捉えていると判断するに十分な結果であり、この海域下の強いプレート間カップリングを示唆するものと考えられる。

（3）地震に伴う変動の検出

2004 年 9 月、紀伊半島南東沖で M 6.9 と M 7.4 の地震が連続して発生した。震源から約 60 km 離れている「潮岬沖 1」海底基準点におけるこの地震前後の測位結果を比較したところ、地震に伴う（コサイスマック）と思われる変動が検出された（海上保安庁海洋情報部, 2005）。

また 2005 年 8 月には、宮城県沖で M 7.2 の地震が発生した。この地震の震源域は、2004 年に設置した基準点「宮城沖 2」のごく近傍であり、上述の「宮城沖 1」からは約 60 km 離れている。前項で触れたように、海上保安庁では 2005 年、これら 2 つの基準点で集中観測を行っていたところであり、地震後にも再測を行い、前後の決定位置を比較した結果、震源近傍の「宮城沖 2」で、東向きに約 10 cm の有意なコサイスマック変動を検出した（Matsumoto et al., 2006）。一方、「宮

城沖 1」における地震前後の差は、解のばらつきの範囲内であった。Fig. 9 に、「宮城沖 2」の時系列と変位ベクトルを示す（図中「宮城沖 2」は MYGW と表記）。また同図 (b) には、陸域の GEONET 観測点で観測されたコサイスマック変動を説明する矩形断層モデル（国土地理院地理地殻活動研究センター, 2005）から計算される、両海底基準点における予測変動ベクトルを共に示している。図から、両海底基準点における観測結果は、モデルから予測される変動と矛盾しないことがわかる。

こうした海底におけるコサイスマックな地殻変動データは、海底震源断層の滑り分布をより詳細に議論するための貴重な情報となる。

6 他機関の動向

ここで、国内外の海上保安庁以外の機関による GPS/音響測距方式の海底地殻変動観測への取り組みの現状について簡単に述べる。

冒頭に紹介したスクリップス海洋研究所のグループは、初期成果導出以降も精力的に技術開発を進めている（Chadwell et al., 2002；Chadwell, 2003）。最近、Gagnon et al. (2005) は、ペルー沖海底での観測結果について示し、陸上の GPS 測位結果と併せて、この海域のプレート境界の固着の上限が非常に浅くまで達していると報告した。この結果は、沈み込みプレート境界の浅い部分は固着していないとするこれまでの常識を覆すものであり、論議を呼んでいる。

日本では、東北大学、名古屋大学のグループが、それぞれ GPS/音響測距技術の研究開発を進めている。東北大学では、ブイ方式のシステムを、名古屋大学では、当庁と同じく測量船を用いたシステムをそれぞれ開発している。両グループ共、最近になって観測精度が向上し、宮城県沖や熊野灘において地殻変動を捉えたという報告が出始めている（舟越・他, 2005；Kido et al., 2005；Tadokoro et al., 2005）。2005 年は、日本の海底地殻変動観測技術が新たな段階に入った年ということができよう。

7 今後の課題

海上保安庁の海底地殻変動観測は、細かい技術的問題はなお残っているものの、当初の目標精度を達成するための要素技術はほぼ確立し、システムとして実用化されたといっても過言ではない。しかしながら、陸上観測の測位精度やその安定性には、当然ながらまだはるかに及ばず、これで満足するわけにはいかない。また、高さの高精度決定も重要な課題である。

さらに、運用面における課題は多い。将来的に観測点を増やし、社会的な期待に十分応えていくためには、現在のシステムによる運用には観測効率上限界があり、新しい技術を含めたインフラ整備がどうしても必要である。

具体的な整備事項として、例えば、海況への脆弱性を改善するための大型測量船の利用、音響トランスデューサの船底装備、それも含めた観測機材の常設化がまず挙げられる。さらに観測効率を大幅に向上させるためには、現在の漂流観測ではなく、走行しながらの測線観測を実現することも必要である。また現在、自律型海中ロボット (AUV; Autonomous Underwater Vehicle) を利用した自動観測 (浅田・他, 2005) についても技術開発が進められており、その実用化が待たれる。

さらに将来的には、海底ケーブルや衛星通信を用いたリアルタイム化が課題となってくるであろう。

8 おわりに

本稿では、海上保安庁で推進している GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測について、観測運用が開始された 2000 年以降の約 5 年間の取り組みについてまとめた。現在徐々に、注目すべき具体的成果が開始しており、着実に前進しているといえるが、その一方で、上にも述べたさまざまな課題もある。将来、次の 5 年あるいは 10 年を総括するとすれば、「インフラ整備」あるいは「新技術」がキーワードになるかもしれない。逆に、これらの実現を目指しつつ、さらなる精度向上、成果導出に向けて努力していく必要が

ある。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、この期間、常に密接な共同研究者として協力いただいた東京大学生産技術研究所の望月将志氏並びに海洋情報関係諸氏に、内容確認とアドバイスをいただいた。記して感謝する。なお、下記参考文献中に明に名前が列記されていない方々の中にも、本稿の内容に関連して多大な貢献のある海上保安庁職員が多数おられることを申し添える。

要 旨

海上保安庁の GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測の取り組みについて、2000 年以降約 5 年間の進捗状況を、特にデータ解析手法の開発及び観測成果に重点を置きつつまとめた。まず観測精度については、それぞれの要素技術のソフトウェア、ハードウェア両面における改良の努力により、現在までに数 cm の海底局位置決定精度が達成されている。また観測結果として、宮城県沖における太平洋プレート沈み込みの影響によるプレート内変動や 2004 年紀伊半島南東沖地震、2005 年宮城県沖の地震に伴う変位が捉えられるなど、注目すべき成果が報告されている。今後もさらなる精度向上とインフラ整備を目指さねばならない。

参考文献

- 浅田昭, 矢吹哲一郎 (2000), 海底音響基準ネット, *生産研究*, **52**, 293-296.
- 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.
- 浅田昭, 浦環, 望月将志, 浅川賢一, 藤田雅之 (2005), 海底ステーションを基地とする海中観測ロボットによる自動海底地殻変動観測手法の開発, *月刊地球*, 号外 No. 51, 199-203.
- Baba, T., K. Hirata, T. Hori, and H. Sakaguchi (2005), Offshore geodetic data conducive to

- the estimation of the afterslip distribution following the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, in press.
- Chadwell, C. D., F. N. Spiess, J. A. Hildebrand, and H. Dragert (2002), Seafloor geodetic evidence of episodic spreading 25 km east of the Juan de Fuca Ridge, *EOS. Trans. AGU*, **83**, Fall Meet. Suppl., Abst., T 22 A-1130.
- Chadwell, C. D. (2003), Shipboard towers for Global Positioning System antennas, *Ocean Engineering*, **30**, 1467-1487.
- Colombo, O. L., and A. G. Evans (1998), Precise, decimeter-level differential GPS over great distances at Sea and on Land, *Proc. ION GPS-98*, Nashville, Tennessee.
- Colombo, O. L., A. G. Evans, M. I. Vigo-Aguiar, J. M. Ferrandiz, and J. J. Benjamin (2000), Long-baseline (>1000 km), sub-decimeter kinematic positioning of buoys at sea, with potential application to deep sea studies, *Proc. ION GPS 2000*, Salt Lake City, U.S.A.
- Del Grosso (1974), V. A., New Equation for the Speed of Sound in Natural Water (with Comparison to other Equations), *J. Acoust. Soc. Am.*, **56**, No. 4, 1084-1091.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein (1994), Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191-2194.
- 淵之上紘和, 河合晃司, 藤田雅之 (2005), 海上保安庁のGPS連続観測～データ収録・解析システムの更新とその評価～, *海洋情報部技報*, **23**, 50-56.
- Fujimoto, H., M. Mochizuki, K. Mitsuzawa, T. Tamaki, and T. Sato (2003), Ocean bottom pressure variations in the southeastern Pacific following the 1997-98 El Niño event, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(9), 1456, doi:10.1029/2002GL016677.
- Fujita, M. (2003), Seafloor geodetic observation - GPS/acoustic combination technique -, *Hydro International*, **7**, 41-43.
- 藤田雅之, 矢吹哲一郎 (2003), 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.
- 藤田雅之, 佐藤まりこ (2004), 海底地殻変動観測における局位置決定再現性の評価, *海洋情報部研究報告*, **40**, 85-92.
- 藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一郎 (2004), 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.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Sato, M. Mochizuki, M. Katayama, S. Toyama, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2004), Seafloor geodetic observation along the major trenches around Japan—Focusing on results at off-Miyagi area -, *EOS Trans. AGU*, **85** (47), Fall Meet. Suppl., Abstract G 41 A-06.
- 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志, 佐藤まりこ, 矢吹哲一郎, 浅田昭 (2005), 宮城県沖海底の地殻変動と重心推定法による時系列の検証, *日本測地学会第104回講演会要旨集*, 47-48.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo (2006), GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, **58**, 265-275.
- Fukuda, Y. (1990), Precise determination of local gravity field both the satellite altimeter data and the surface gravity data, *Bull. Ocean Res. Inst.*, Univ. Tokyo, 133 pp.
- 舟越実, 藤本博巳, A. Sweeney, 桑野亜佐子, 日野亮太, 三浦哲, 長田幸仁 (2005), 東北日本沈み込み帯における小型ブイを用いたGPS/音響海底測位, *地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集*, **J 062-001**.

- Gagnon, K., C. D. Chadwell, and E. Norabuena (2005), Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements, *Nature*, **434**, 205-208.
- 石川直史, 藤田雅之 (2005), 海底地殻変動観測における局位置解析手法と精度の向上について, *海洋情報部研究報告*, **41**, 27-34.
- 石川直史, 藤田雅之, 松本良浩 (2006), 海底局位置決定における海中水温構造の影響, *海洋情報部研究報告*, **42**, 15-30.
- 地震調査研究推進本部 (2001), 地震に関する基盤的調査観測計画の見直しと重点的な調査観測体制の整備について.
- 海上保安庁海洋情報部 (2005), 「潮岬沖東」海底基準点における海底地殻変動観測結果, *地震予知連絡会会報*, **73**, 518-519.
- 河合晃司, 成田誉孝, 藤田雅之, 石川直史, 淵之上紘和, 長岡継 (2005 a), 長基線 KGPS 測位精度の機種 (アンテナ) 依存性について, *海洋情報部技報*, **23**, 66-72.
- 河合晃司, 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志 (2005 b), 長距離 KGPS の精度評価について, *海洋調査技術学会第 17 回研究成果発表会講演要旨集*, 31-32.
- 河合晃司, 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志 (2006), 長基線 KGPS の精度評価について, *海洋情報部技報*, **24**, 80-88.
- Kido, M., H. Fujimoto, K. Tsuka, and T. Tabei (2005), Earthquake-Induced Seafloor Displacement at Kumano-Nada in Nankai Trough, Detected by Repeated GPS/Acoustic Surveys, *Eos Trans. AGU*, **86** (52), Fall Meet. Suppl., Abstract G 51 B-0827.
- Kizu, S., H. Yoritaka, and K. Hanawa (2005), A new fall rate equation for T-5 Expendable Bathythermograph (XBT) by TSK, *J. Oceanogr.*, **61**, No. 1, 115-121.
- 国土地理院地理地殻活動研究センター (2005), 2005 年 8 月 16 日宮城県沖地震による地殻変動と断層モデル, *日本測地学会第 104 回講演要旨集*, 123-124.
- 社泰裕, 石井春雄, 藤田雅之, 加藤弘紀 (2005 a), XBT (T-5) の新しい深度換算式の適用結果, *海洋情報部技報*, **23**, 89-92.
- 社泰裕, 石井春雄, 藤田雅之, 加藤弘紀 (2005 b), XCTD-2 F の深度換算式較正の試み, *海洋情報部技報*, **23**, 93-98.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000), Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, *J. Oceanogr.*, **56**, 567-581.
- Matsumoto, Y., M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochizuki, T. Yabuki, and A. Asada (2006), Under-sea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/Acoustic seafloor geodetic observation, submitted to *Earth Planets Space*.
- 松本良浩, 藤田雅之, 河合晃司, 石川直史, 矢吹哲一朗, 望月将志, 浅田昭 (2006), 海底地殻変動観測における GPS マスト局アンテナの利用, *海洋情報部技報*, **24**, 94-98.
- 松浦充宏 (1994) インバージョン解析法, 「*現代測地学*」477-482, 日本測地学会.
- Miura, S., T. Sato, A. Hasegawa, Y. Suwa, K. Tachibana, and S. Yui (2004), Strain concentration zone along the volcanic front derived by GPS observations in NE Japan arc, *Earth Planets Space*, **56**, 1347-1355.
- Mochizuki, M., M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida, and A. Asada (2003) Construction of seafloor geodetic observation network around Japan, *Recent advances in marine science and technology 2002*, 591-600.
- Mochizuki, M., M. Fujita, M. Sato, Z. Yoshida, M. Katayama, T. Yabuki, and A. Asada (2005 a), Repeated trials of seafloor geodetic observation around Japan, *Recent advances in marine*

- science and technology*, 2004, 11-18.
- Mochizuki, M., T. Ishikawa, Y. Narita, Z. Yoshida, H. Matsushita, Y. Matsumoto, K. Kawai, M. Fujita, and A. Asada (2005 b), Introduction of the Concept of the Transducer's Phase Center to the Seafloor Geodetic Station Positioning, *Eos Trans. AGU*, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract G 51 B-0825.
- 文部科学省研究開発局 (2005), 糸魚川—静岡構造線断層帯および宮城県沖地震に関するパイロット的な重点的調査観測 (平成14~16年度) 成果報告書.
- 成田誉孝, 畝見潤一郎, 望月将志 (2005), 海底地殻変動観測における機器の現状とその運用について, *海洋情報部技報*, 23, 53-60.
- Phillips, K. A., and C. D. Chadwell (2005), Refined Deformation Models of the South Flank of Kilauea Volcano, Hawaii Based on Seafloor Geodetic Data from 2000 to 2004, *Eos Trans. AGU*, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract G 53 B-0882.
- 酒井慎一, 山田知朗, 井出 哲, 望月将志, 塩原肇, 卜部 卓, 平田直, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 西澤あずさ, 藤江剛, 三ヶ田均 (2001), 地震活動から見た三宅島2000年噴火時のマグマの移動, *地学雑誌*, 110 (2), 145-155.
- 佐藤まりこ, 藤田雅之 (2004), 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.
- Sengoku, A (1998), A plate motion study using Ajisai SLR data, *Earth Planets Space*, 50, 611-627.
- Spiess, F. N. (1985), Suboceanic geodetic measurements, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 23, 502-510.
- Spiess, F. N., and J. A. Hildebrand (1995), Employing geodesy to study temporal variability at a mid-ocean ridge, *EOS Trans. AGU*, 76, 451-455.
- Spiess, F. N., C. D. Chadwell, J. A. Hildebrand, L. E. Young, G. H. Purcell Jr., and H. Dragert (1998), Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 108, 101-112.
- Tadokoro, K., R. Ikuta, M. Ando, T. Okuda, S. Sugimoto, G. M. Besana, and M. Kuno (2005), First Observation of Coseismic Seafloor Crustal Deformation due to M 7 Class Earthquakes in the Philippine Sea Plate, *Eos Trans. AGU*, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract G 41 A-0348.
- 富山新一 (2003), 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.
- 畝見潤一郎 (2004), 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.
- 矢吹哲一朗 (2002), 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.