

## GPS／音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展<sup>†</sup>

—この 10 年の歩み—

佐藤まりこ<sup>\*1</sup>, 藤田雅之<sup>\*2</sup>

Progress in GPS/acoustic seafloor geodetic observation<sup>†</sup>

Mariko SATO<sup>\*1</sup> and Masayuki FUJITA<sup>\*2</sup>

### Abstract

Progress in the GPS/acoustic seafloor geodetic observation by the Japan Coast Guard during the 10-year period is reviewed. In 2000, the first measurement system was developed and the observation started at the seafloor reference point in the Kumano-nada region. Continuous efforts during this period enable us to attain robustly a precision of 2–3 cm in the positioning repeatability. Along with the technical progress, notable seafloor movements associated with the oceanic plate subduction as well as the large earthquakes along the Japan trench and the Nankai Trough have been detected, which contribute to the earthquake research. In particular, huge displacements detected on the seafloor associated with the Tohoku-oki earthquake ( $M$  9.0) in March 2011 emphasized an indispensable role of the seafloor observation by elucidating a possible huge slip near the trench, which cannot be inferred from the terrestrial data. A target in the next decade of the seafloor geodesy is to come close to the terrestrial measurement level in the aspects of both operation and positioning accuracy.

### 1 はじめに

海上保安庁では、1990年代から GPS／音響測距結合方式の海底地殻変動観測装置の開発を進め、2000年に熊野灘の海底に4台の音響トランスポンダー（海底局）を設置したのを皮切りに、日本海溝や南海トラフといった太平洋側の海溝沿い陸側に海底基準点を展開し、測量船による繰り返し観測を行ってきた。観測を開始してからも、観測及び解析の両面から日々改良を行ってきており、現在では、安定的に繰り返し位置決定精度2～3 cmが達成されると共に、観測効率も大幅に

向上している。

また、この技術により、これまでに海洋プレートの沈み込みに伴う定常的な地殻変動や地震に伴う地殻変動の検出に成功しており、これらの成果は、特に海溝型地震発生メカニズムの解明へ向けた海域の貴重な情報として高く評価されるまでに至った。特に、2011年3月に発生し、未曾有の大災害をもたらした東北地方太平洋沖地震 ( $M$  9.0) は記憶に新しいが、この地震発生メカニズムを理解する上で、海底地殻変動観測データの役割が改めて注目され、今後に向けて、その重要性

<sup>†</sup>Received December 1, 2011 ; Accepted January 19, 2012

\*1 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

\*2 第三管区海上保安本部海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 3<sup>rd</sup> R.C.G. Hqs.

はますます強調されている。その意味で、この10年間は、海底地殻変動観測にとって、観測・解析技術の実用化から成果導出、社会的評価の獲得に至る飛躍の期間であったと言えよう。

これまでの海上保安庁における海底地殻変動観測をレビューする資料として、1990年代に行われた技術開発については矢吹(2002)に、2005年までの取り組みと初期成果については藤田(2006)に詳しくまとめられている。本稿では、2006年以降の取り組みと成果に重点を置きつつ、海底地殻変動観測の10年を総括する。なお、これらの技術開発は、東京大学生産技術研究所との技術協力の下で行われてきたことを付記する。

## 2 海底地殻変動観測の概要

海底地殻変動観測は、キネマティックGPS(KGPS)測位と音響測距を組み合わせて、海底に設置した基準局(海底局)の位置をセンチメートルの精度で測定する海底の測位手法で、この観測を繰り返し行うことで海底局の位置変化、すなわち海底の地殻変動を捉えることを目的としている。

観測システムをFig.1に示す。観測システムは、船上のGPS受信装置・アンテナ、音響トランスデューサ、動揺計測装置からなる船上局と、海底

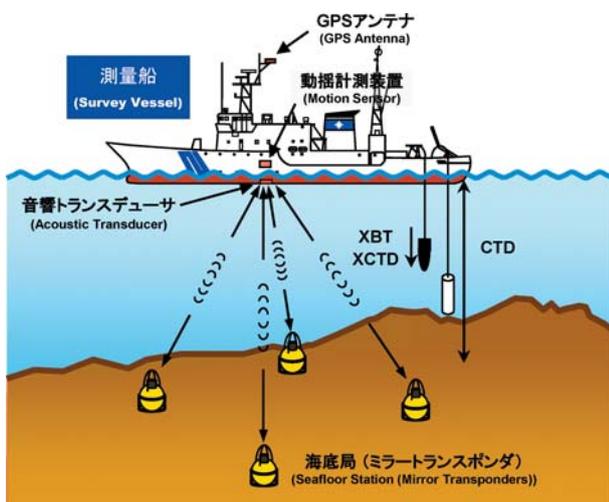


Fig. 1 Schematic picture of the GPS/acoustic seafloor geodetic observation system developed by Japan Coast Guard.

に設置した3~4台の海底局(ミラートランスポンダ)から構成される。ここで、3~4台の海底局をまとめて「海底基準点」と呼ぶ。

観測では、時々刻々と変化する船の位置をGPSで、船の動揺を動揺計測装置で計測しながら、船上の音響トランスデューサと海底局との間の音波の往復時間を計測する音響測距を行っている。音響測距にはM系列信号を用い、それぞれ固有の識別信号が割り当てられた3~4台の海底局に対して1台ずつ順に計測を行い、1つの海底基準点における1航海あたりの観測(キャンペーン観測)で合計約5000回分の音響測距データを取得する。また、音波の往復時間を距離に換算するために必要な海中の音速度情報を得るため、適宜CTD, XCTD及びXBT観測を行っている。

データ解析は、大きく(1)時々刻々と変化する船の位置を求める「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2つの結果を結合して個々の海底局の位置を求める「局位置解析」の3つのプロセスからなる。最終的に、得られた海底局位置の平均を取り、海底基準点の位置(3~4台の海底局の重心位置)としている。

観測及び解析手法の詳細については、藤田(2006)及びFujita et al. (2006 a)を参照されたい。

## 3 海底基準点の展開と更新

海上保安庁でこれまでに設置している海底基準点をFig.2に示す。これらの海底基準点は、政府の地震調査研究推進本部における取り組みの一環として、海溝型巨大地震の発生メカニズムを明らかにするため、太平洋側の海溝沿い陸側に展開している。

このうち、Fig.2で赤い四角で示した三陸沖から室戸岬沖にかけての海底基準点は、本観測を開始した2000年から2004年までに順次設置された(藤田, 2006)。これらの海底基準点については、海底局の電池の寿命が約10年とされていることから、2009年より順次、既設の海底局の更新作業を実施しており、観測の継続性確保に努めている。



Fig.2 Seafloor reference points installed by Japan Coast Guard. Solid red and yellow squares represent those installed during 2000–2004 and during 2011–2012, respectively. Red labels represent those renamed in 2012.

る (石川, 2011).

さらに、2011年11月から2012年1月にかけて、観測海域を南海トラフの西側及び陸側に拡大し、新たに9点の海底基準点を設置した。これにより、南海トラフ沿いの海底基準点は、東海・東南海・南海地震の震源域をほぼ面的にカバーすることとなった。なお、これを機に、海底基準点の名称を整理し、2012年1月から一部の既設点の名称を Table 1 のとおり変更した。

#### 4 観測技術の進展

海上保安庁の海底地殻変動観測技術は、2000年にほぼ現在の観測システムの原型が開発され、実海域における観測を開始した (浅田・矢吹 2000, 2001)。しかしながら、当初から安定的にセンチメートルの精度が確保されていたわけではなく、その後も、測位の高精度化、安定化に向けて、誤差要因を一つ一つ洗い出し、対処して、観測・解析にフィードバックすることによ

Table 1 Renaming of the seafloor reference points in 2012.

旧名称	→	新名称
常磐沖	→	銚子沖
熊野灘	→	熊野灘1
潮岬沖1	→	熊野灘3
潮岬沖2	→	潮岬沖
室戸岬沖	→	室戸沖2

り、ようやく現在の繰り返し精度 2~3 cm の測位が可能となった。ここでは、この間の技術進展に大きく貢献したと考えられる主な取り組みについて、観測面と解析面に分けて紹介する。

#### 4.1 観測システム

初期の観測システムの詳細については、その運用を含め、畝見 (2004) に詳しくまとめられている。ここでは主としてそれ以降の改善点について記述する。

##### 4.1.1 トランスデューサの船底装備と航走観測の実現

観測面における最大の改良点は、船上の音響トランスデューサを船底に取り付けることにより、航走観測を実現したことである (川井・他, 2009)。

当初のシステムは、測量船の船尾に、約 8 m の支柱を鉛直に立て、その上下両端に GPS アンテナと音響トランスデューサを取り付けたものであった。このシステムによる測線観測は、航走時に発生するスクリューからの音響ノイズや支柱への負荷を避けるため、風と波まかせで漂流しながら行わざるを得なかった (畝見, 2004)。しかしながら、この方法では、測線のコントロールができない上、測線間の移動に観測時間の約半分を費やさなければならず、観測の効率化が大きな課題であった。

この問題に対処するため、2008年3月、音響トランスデューサの船底装備を含め、観測機器を測量船「明洋」に常設することにより、航走観測

を可能とした。具体的には、GPS アンテナは前部マストに、音響トランスデューサは GPS アンテナのほぼ真下の船底に固定した。また、動揺計測装置は船体中央付近にある重力計室に設置した。この配置では、音響トランスデューサがスクリューの前にあるため、航走してもスクリューからのノイズの影響を受けずに済む。

この改良により、従来の漂流観測に比して、測線間の移動にかかる時間が不要となったことに加え、支柱揚げ降ろしのための甲板作業がなくなり、夜間を含む 24 時間観測が可能となった。その結果、漂流観測で 1 回のキャンペーン観測に必要なデータ数を取得するために費やしていた 2~4 日の観測期間が、航走観測では約 1 日に短縮されるなど、観測の時間密度が大幅に向上した。

加えて、測線のコントロールが可能となったことも、効率化に寄与している。漂流観測と航走観測の音響測距データの配置例を Fig. 3 に示す。両者のデータ数はほぼ同じであるが、漂流観測に比べてデータの幾何学的配置が向上していることが

わかる。これまでも、観測データの幾何学的配置の向上が、海中音速構造の誤差がもたらす水平位置決定への影響の低減に寄与することが示唆されていたが（佐藤・藤田，2004）、佐藤・他（2009）は、実際のデータを用いて両者の測位結果の比較を行い、航走観測では漂流観測よりも少ないデータ量で、より精度の安定した結果が得られることを示した（Fig. 4）。

航走観測の実現により、従来、天候条件を含むシップタイムの制約から、結果的に年 1 回程度しか観測できない海底基準点も複数あったところ、現在は、全ての点で年 2~3 回の観測回数が確保されている。

なお 2010 年 12 月には、同様の観測装置一式を大型測量船「拓洋」にも設置し、航走観測方式により海底地殻変動観測を実施できる測量船が 2 隻となった（氏原・成田，2012）。これにより、今後、観測の機会のさらなる増加が期待される。

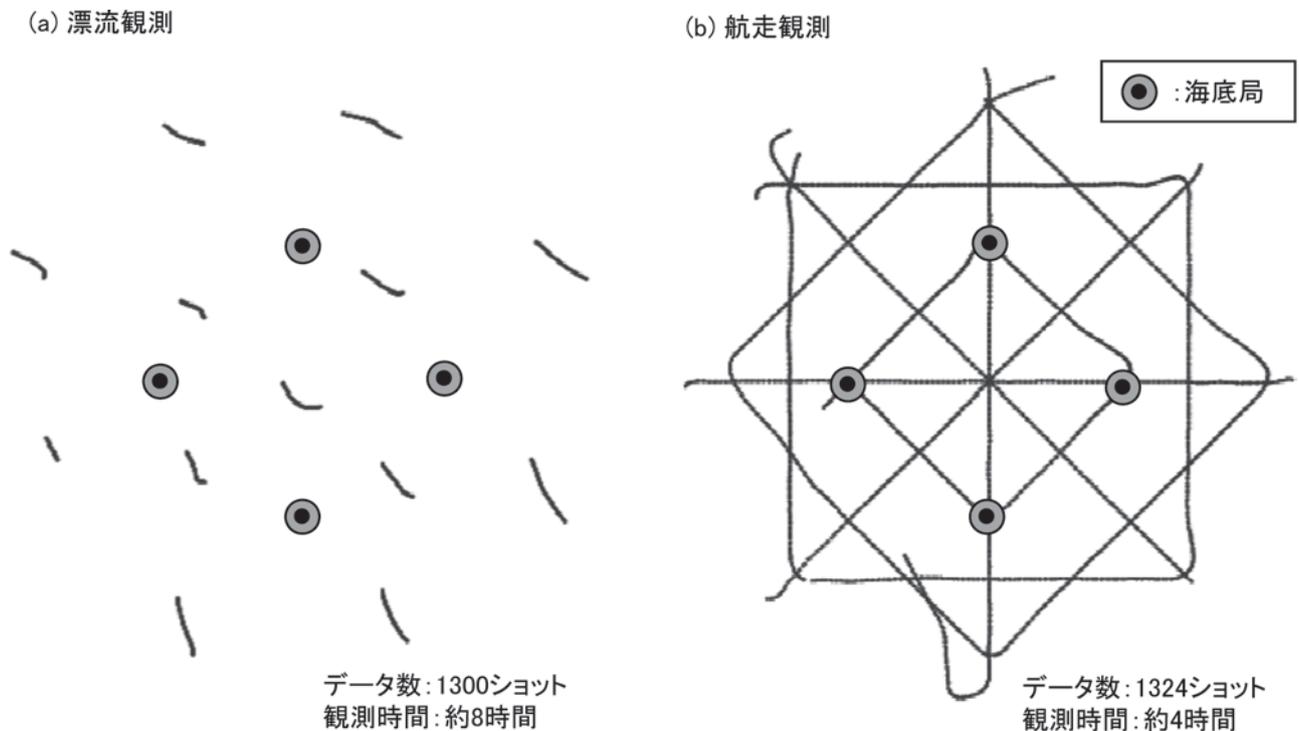


Fig. 3 Typical examples of acoustic measurement line distributions at a seafloor reference point: (a) for the drifting and (b) for the sailing observations.

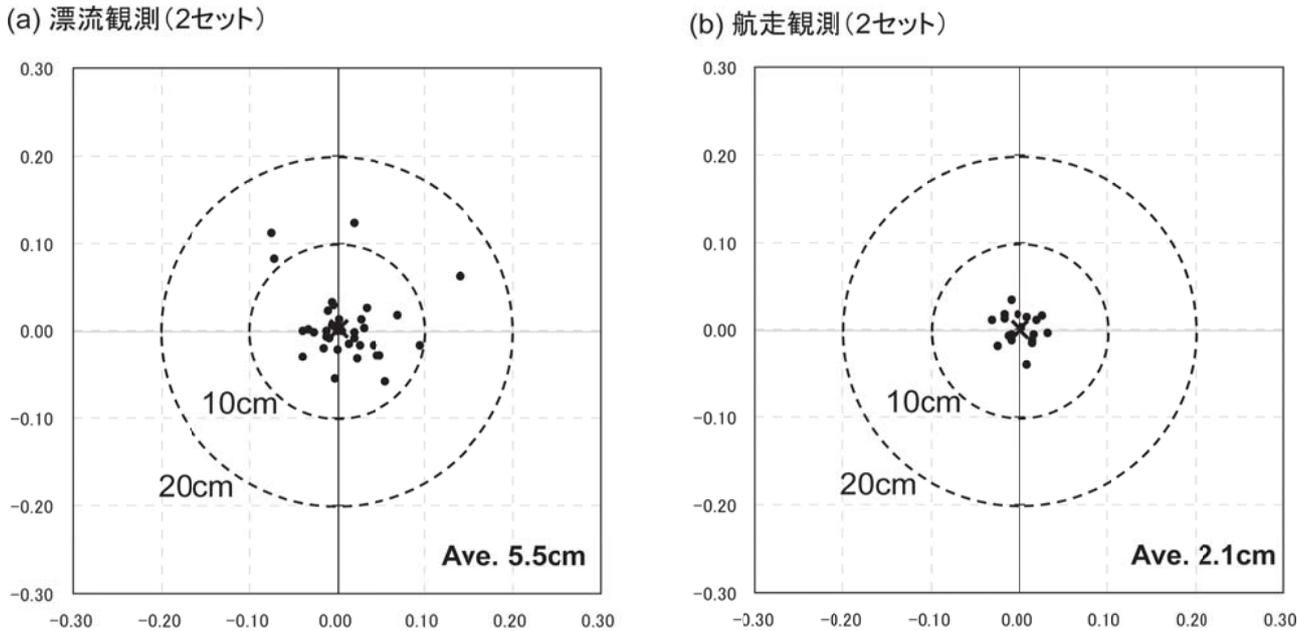


Fig. 4 Comparison of stability of the determined positions of the seafloor reference points between (a) for the drifting and (b) for the sailing observations (after Sato et al. (2009)).

#### 4.1.2 音響トランスデューサの改良

音響信号の送受信に使用する音響トランスデューサは、我々の観測目的にとって「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。

当初の観測システムに使用されていたトランスデューサは、船上局、海底局共に、リング形状の振動子を持つ円筒形型であった。このトランスデューサの振動子は、大きさが15 cm程度と音響測距に用いる信号の波長と同等である上、海底局との位置関係によって位相が変わるという特性を持ち、これにより音響測距に有意な誤差が生じることが指摘されていた (Mochizuki et al., 2002)。

##### (1) 船上局の改良

そこで2003年、まず船上局用に、位相特性を改善した球形の振動板を持つトランスデューサを導入した (成田・他, 2005)。このトランスデューサは、緩やかな曲率を持つ振動板を振動させて音響信号の送受信を行うもので、通常の観測で用いる出入射角の範囲内で、極力位相特性をフラットとするよう設計されている。このトランス

デューサの導入により、船上局からの送信波形が改善され、後述する音響波形解析における送受信時刻決定の安定性が向上した。

なお、望月・他 (2007) は、新旧トランスデューサの水槽試験を行って位相の角度依存性を計測し、得られた位相特性から音響位相中心を求めた。その結果、位相中心位置は、円筒形トランスデューサでは頭頂部から12 cm内側、球形トランスデューサでは9 cm内側に求められた。

##### (2) 海底局の改良

海底局についても同様の問題を克服するため、東京大学生産技術研究所では、次世代型海底地殻変動システムの開発の一環として、さらに優れた位相特性をもつ球形振動子を用いたトランスデューサの開発が行われた (望月・他, 2008)。このトランスデューサは角度依存性がほとんどなく、音響測距にとって、ほぼ理想的な位相特性を有している。

このトランスデューサを搭載した新型海底局は、2009年から行っている海底基準点の更新及び新設分から順次設置している。

#### 4.1.3 その他

##### (1) ルビジウム発振器による時刻同期

この観測システムでは、GPS データ、音響測距データ、測量船の姿勢（動揺）データによる解析結果を結合して海底局の位置決定を行うため、これらのデータの時刻を高精度で同期させる必要がある。

当初は、動揺収録装置に内蔵された GPS 時計を基準として、1分ごとに動揺収録装置と音響波形収録装置のパソコンの時計を合わせていたため、パソコンの内蔵時計の発振精度や LAN 接続による通信の遅延等により時刻同期精度が低かった。これを改善するため、2003年9月に、ルビジウム発振器による基準信号を用いた GPS 時刻同期型リアルタイムクロックを導入した。これにより、全ての収録データが GPS 時刻に同期されるようになり、時刻同期精度が向上した（畝見, 2004; 成田・他, 2005）。

ルビジウム発振器導入後は、4.2 (3) で述べる GPS アンテナ-音響トランスデューサ間のバイアス推定値のばらつきが低減しており、観測システムの計測精度の向上が示唆されている（松本・他 2007）。

##### (2) 海中音速度構造把握のための観測の効率化

海中音速度構造把握のための水温・塩分の計測は、当初、1日2回のCTD観測とそれを補間する1時間毎のXCTDまたはXBT観測により行い、これらのデータから計算された音速度を次節で述べる局位置解析の初期値としていた（石川・松本, 2007）。

齋藤・佐藤（2009）は、観測効率化の観点から、CTD等による水温・塩分の計測頻度と海底局の位置決定精度との関係を調べ、従来の1時間に1回の計測から8時間に1回程度まで計測回数を減らしても、局位置解析の初期値として十分であることを示した。現在は、この結果を考慮しつつ、約4時間に1回の計測を行っている。

##### (3) 海底局更新に係る技術的対応

2009年より実施している海底局更新においては、観測の継続性確保のため、旧海底局の電池が切れる前に新局を投入している。その際、音響測距において受信信号の混信を起ささないためには、新旧海底局の識別信号は全て異なっている必要がある。しかしながら、識別信号は従来5種類しかなかったため、新たなコードパターンを作成することにより、これを10種類に拡張した（佐藤 2010）。

また石川（2011）は、「熊野灘」と「釜石沖2」海底基準点の新旧同時観測データを用いて、新旧海底局の位置座標の差（オフセット値）を求め、その結果から、キャンペーン観測3回分のデータにより、 $\pm 1$  cm以内のばらつきでオフセット値が決定できると報告した。これに基づき、海底局を更新する際は、更新後3回のキャンペーン観測で新旧海底局の同時観測を行うことにより、オフセット値を決定することとしている。

#### 4.2 データ解析手法

データ解析手法については、藤田（2006）でその基本構造が詳しくレビューされている。ここではその簡単な概要と補足に加え、それ以降に行われた検討結果及び改善点について述べる。

##### 4.2.1 KGPS 解析

KGPS 解析は、NASA/GSFC の Colombo 博士が開発したソフトウェア IT (for Interferometric Translocation: Colombo and Evans, 1998: Colombo et al., 2000) を使用している。IT は、長距離基線解析用に開発されており、長距離基線で測位精度の劣化の原因となる電離層や大気の空間不均質による影響を取り除くためのさまざまな工夫がなされている。河合・他（2006）は、基線長の異なる複数の陸上基準点のデータを用いて測位解の比較を行い、1,000 km を超える基線長でも数 cm の精度での測位が可能であることを示した。

IT は、何度かバージョンアップされており、その内容については、河合・他（2007）でまとめ

られている。その後も、新たに打ち上げられた衛星に対応するなどいくつかの変更が加えられ、現在は Ver. 4.2 を使用している。

実際の運用にあたっては、衛星数が少ない時間帯や衛星配置 (DOP) が悪い時間帯は観測を中断するとともに、得られた測位解とジオイドモデルや海洋潮汐モデルから予想される海面変動を比較して測位結果の信頼性を評価する (藤田・矢吹, 2003) など、安定した測位結果が得られるよう努めている。

また、KGPS 解析で使用する暦 (GPS 衛星の軌道・時刻情報) についての検討もなされてきた。GPS 暦の最終解である精密暦が公表されるまでの時間 (約 3 週間) が、海底測位結果の早期導出の大きな制約になることから、河合・他 (2007) は、17 時間後に公開される速報暦の利用可能性を探るため、速報暦と精密暦の違いによる測位解の比較を行い、両者はほとんど差がないことを示した。航走観測への移行後も、比較的大きな地震発生直後の機動観測結果の速やかな導出を目的として同様の検討を行った。その結果、精密暦と速報暦の使用による局位置の差は約 3 mm であり、速報暦による解が速報値として十分有効であることが示された (齋藤・他, 2010)。

#### 4.2.2 音響解析

音響解析は、浅田・矢吹 (2001) の手法を基に作成された音響解析ソフトウェア「sas」(富山, 2003) を使用している。これは、M 系列信号の特性を利用して、数値的に作成した参照波形と観測された送受信波形の相互相関を取り、その相関波形のピークから音響信号の送受信時刻を決定する手法によっている。

実海域における観測時の受信波形は、船体の動揺の影響で、ドップラー効果による周波数変化を受けている。そこで、解析では、段階的に周波数を変化させた参照波形を用いて相関処理を行うことにより、ドップラー効果を考慮した解析を行っている。また、海中における測距信号の伝搬中の散乱や減衰による受信波形の崩れやマルチパスの

影響を極力抑えるため、相関処理の際に、相関波形のピークを強調するよう参照波形を変形するなど、受信時刻の読み取り誤差を低減するための工夫がなされている。

#### 4.2.3 局位置解析

局位置解析は、海上保安庁で開発された局位置解析ソフトウェア「SGOBS」(藤田・他, 2004) を使用している。このソフトウェアは、線形最小自乗法に基づくインバージョン法を用いて海底局位置座標を推定するものであるが、局位置に加え、海中音速度の時間変化係数もパラメータとして推定することにより、測位の高精度化を図っている。SGOBS は適宜改良が重ねられ、現在のバージョンは Ver. 3.3.3 である。

この解析手法では、個々の海底局の 3 次元座標値を独立に決定することができるが、目的や条件によっては、特定のパラメータもしくはパラメータ間の相対値を数値的に拘束し、推定パラメータ数を減らすことにより、位置決定精度の向上を図ることができる。以下に、このような手法をまとめる。

石川・藤田 (2005) は、海底局位置の鉛直成分 (高さ) の値を既知として固定することにより、水平成分の位置決定精度が向上することを示した。これは、線型インバージョンによるパラメータ推定の際、高さと言速度が分離しにくいことから、高さを拘束することにより、音速度の推定精度が向上することによって考えられる。ただしその前提として、観測エポック間における高さの変動が十分小さいと仮定している。我々はこれを「高さ固定手法」と呼んでおり、特に、海中の音速構造が複雑な宮城沖や福島沖ではこの手法を適用し、成果をあげている (藤田, 2006; Matsumoto et al, 2008 a; Sato et al., 2011 a)。

しかしながら、実際には、高さ変化も重要な情報である。そのため、高さも推定しつつ、海底局位置を高精度に決定する試みとして、藤田・他 (2005) は、同一海底基準点を構成する 3~4 台の海底局の相対位置関係を既知として拘束し、その

重心位置を推定することにより、3次元的位置決定精度向上の可能性を示した。これを、「重心推定法」と呼んでおり、当時は固定値として用いる海底局の相対位置関係をどのようにして決定するかが課題であった。

松本・他(2008)は、この考え方をさらに発展させ、複数の観測エポックについて、エポック間で海底局間の相対位置関係は不変、重心位置の変化はフリーという条件の下で、これらのデータを一括して解析し、海底局間の相対位置関係と重心位置の変位量を同時に推定する「複数エポック一括局位置解析手法」を提案した。これにより、水平成分のみならず鉛直成分も数 cm の再現性が得られることが示された。

石川・佐藤(2012)は、これらの手法を漂流観測と航走観測が混在するデータに適用し、海底局の3次元的位置決定精度が向上することを示した。具体的には、まず航走観測で得られた全てのデータに「複数エポック一括局位置解析手法」を適用することにより、海底局間の相対位置関係を求め、その相対位置関係を漂流観測を含む全てのエポックに適用し、「重心推定法」により再解析したものである。この手法は、地震時など海底局の相対位置関係が大きく変化している場合には適用できないが、非地震時の定常変動においては、今までよりも短期間で高精度な移動速度の検出が可能となると期待される。

また、上記で述べた手法以外にも精度向上への取組がなされている。松本・他(2007)は、2005年に「宮城沖1」海底基準点で実施された集中観測の結果を細かく分析し、GPSアンテナと音響トランスデューサ間の相対位置関係や、動揺計測装置の計測軸と観測支柱の軸との不一致に起因するバイアス誤差を発見した。さらに、このバイアス値を局位置解析で補正することにより、時系列データのばらつきが改善されることを示した。現在は、測量船、観測システムごとに決定されたバイアス値を固定値として与え、海底局の位置決定を行っている。

## 5 主な成果

### 5.1 海洋プレートの沈み込みに伴う地殻変動

海底地殻変動観測の主たる目的は、海溝沿いにおける非地震時の定常変動、すなわち海洋プレートの沈み込みによって蓄積される歪みの状況をモニターすることである。海上保安庁が観測を開始した2000年からこれまでに、宮城沖、福島沖、東海沖、相模湾など多くの海底基準点で、このような海洋プレート沈み込みに伴う定常的かつほぼ一定速度の地殻変動を検出している(Fujita et al., 2006 b; Matsumoto et al., 2008 a, 2008 b; 齋藤・他 2008; Sato et al., 2011 a)。

これらの定常変動は、次節で述べる東北地方太平洋沖地震( $M$  9.0)の影響により、日本海溝沿いの海底基準点はもちろんのこと、ほとんどの点において、地震時の不連続を含めて大きく変化した。このため、ここではこの地震前までのデータから求められた移動速度を Fig. 5 及び Table 2 に示す(海上保安庁, 2012)。この結果は、石川・佐藤(2012)の手法を全観測点に適用したもので、現時点で最も信頼性が高いと考えられる。なお、移動速度の算出にあたっては、漂流観測で、取得データ数が少ないエポックの結果は、局位置解の信頼性が低いため、使用していない。また、釜石沖、銚子沖及び房総沖の海底基準点では、観測データが少ないため、参考値である。

図に示すように、宮城沖では5~6 cm/年、福島沖では2 cm/年、南海トラフ沿いの海底基準点では2~5 cm/年の移動速度が得られており、これらの方向及び大きさは、概ね陸上の電子基準点の移動ベクトルと整合的である。

さらに、東北地方沖合いの海底基準点に着目すると、宮城沖の2点に比べて、福島沖の点は移動速度が有意に小さいことがわかる。Matsumoto et al. (2008 a) は、これらの海底基準点における2008年3月までのデータを用いて、この移動速度の違いがプレート間の固着状況の違いを示唆するとする議論を行った。

一方、南海トラフ沿いの海底基準点についても場所による違いが見られるが、一部の点において

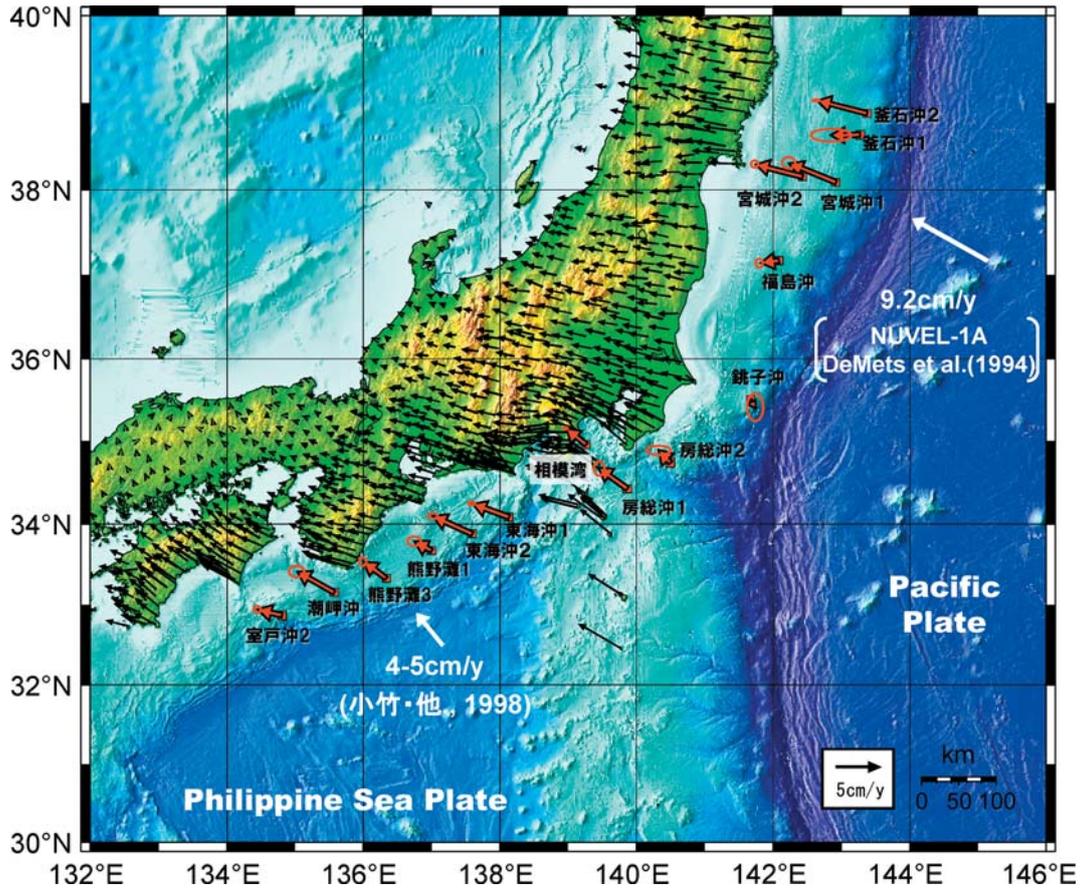


Fig. 5 Crustal velocity vectors at the seafloor reference points obtained from observations before the 2011 Tohoku-oki earthquake ( $M$  9.0) (Red arrows). Black arrows show crustal velocity vectors at GEONET stations during 2005.4–2010.4 (Nakagawa et al., 2009). White arrows show the Pacific plate motion estimated by DeMets et al. (1994) and the Philippine Sea plate motion estimated by Kotake et al. (1998) (after JCG (2012)).

Table 2 Obtained crustal velocities before the 2011 Tohoku-oki earthquake ( $M$  9.0).

海 域	海底基準点	方位角 (°)	速度 (cm/y)	観測期間	観測回数	備考
日本海溝	釜石沖2	285	5.6	2002.7-2010.11	6回	参考値
	釜石沖1	270	3.2	2007.7-2010.11	5回	参考値
	宮城沖1	293	5.5	2006.12-2011.2	9回	
	宮城沖2	285	5.3	2006.12-2010.11	9回	
	福島沖	262	2.0	2003.6-2011.2	10回	
	銚子沖	148	1.1	2007.7-2010.7	5回	参考値, 旧常磐沖
相模トラフ	房総沖2	317	1.9	2007.9-2010.11	6回	参考値
	房総沖1	307	3.9	2007.9-2010.11	6回	参考値
	相模湾	309	2.8	2004.1-2011.3	9回	
南海トラフ	東海沖1	290	4.2	2006.8-2011.1	9回	
	東海沖2	295	4.7	2007.8-2011.1	10回	
	熊野灘1	299	2.1	2007.8-2011.1	7回	旧熊野灘
	熊野灘3	307	3.1	2006.6-2011.1	10回	旧潮岬沖1
	潮岬沖	301	4.6	2007.8-2011.1	8回	旧潮岬沖2
	室戸沖2	284	2.7	2006.9-2010.12	9回	旧室戸岬沖

は地震前までの観測エポック数が必ずしも十分とは言えないため、その信頼性の評価を含め、どこまで議論できるかは今後の検討課題である。

## 5.2 地震に伴う地殻変動

### 5.2.1 2005年宮城県沖の地震 ( $M 7.2$ )

2005年8月16日、宮城県沖で $M 7.2$ の地震が発生した。この地震の震央から東に約10 kmにある「宮城沖2」海底基準点において、地震前後2回ずつの観測から、同地震に伴う約10 cmの東向きの変位を検出した(Matsumoto et al., 2006)。この結果は、陸上の電子基準点データに基づく国土地理院の断層モデル(国土地理院地理地殻活動研究センター, 2005)から推定される変位と、方向、大きさともに整合的である。一方、震央から約60 km離れた「宮城沖1」海底基準点での地震前後の差は観測精度の範囲内にあり、有意な地殻変動とは判断できなかった。

さらにSato et al. (2011 a)は、「宮城沖2」における2010年までの時系列のトレンド変化に着目し、その特徴に基づいて、①地震時、②地震後2006年12月まで、③それ以降、の3つのフェーズに分けて議論した(Fig. 6)。そして、それぞれのフェーズを、①コサイスマック変位、②余効変動、③海洋プレートの沈み込みに伴う定常変動、によるものと解釈した。

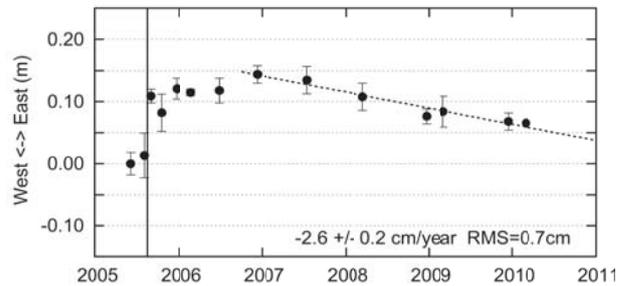
同論文は、これら「宮城沖2」で得られた一連の成果は、地震による歪みの解放から余効変動を経て、再び歪みの蓄積が始まるまでの過程を示唆するものであり、海底地殻変動観測でこのような過程を捉えたのは世界初の事例であると報告した。

### 5.2.2 2011年東北地方太平洋沖地震 ( $M 9.0$ )

2011年3月11日に、宮城県沖を震源とする $M 9.0$ の地震が発生した。この地震の震源域は長さ約500 km、幅約200 kmと推定されており、観測史上4番目となる巨大地震であった。

海上保安庁では、地震の発生を受け、3月末から4月にかけて日本海溝沿いに設置している海底

(a) 東西成分



(b) 南北成分

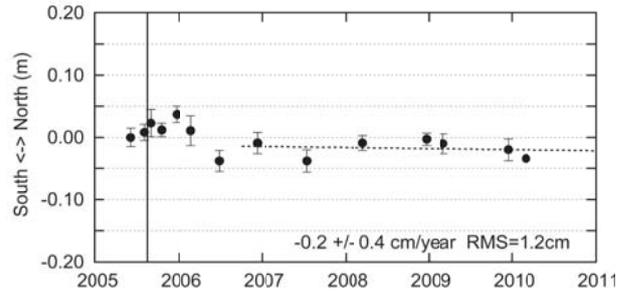


Fig. 6 Time series of the determined horizontal positions at MYGW associated with and after the 2005 Miyagi-oki earthquake ( $M 7.2$ ) (after Sato et al. (2011 a)).

基準点の観測を実施し、地震に伴う大規模な変位を検出した(Sato et al., 2011 b)。

得られた変位ベクトルをFig. 7に示す。震源のごく近傍に位置する「宮城沖1」海底基準点では、東南東方向に約24 mの水平移動量を観測した。24 mという変位量は、陸上で観測された最大移動量(電子基準点「牡鹿」で約5.3 m; Ozawa et al., 2011)の4倍以上に相当する。また、「宮城沖1」から約70 km北東にある「釜石沖1」海底基準点でも約23 mの変位が観測されており、20 mを超える変位が、周辺の海底で南北方向数10 kmにわたって発生したことが示唆される。

また、上下方向については、「宮城沖1」で約3 mの隆起を観測したほか、「宮城沖2」を除く全ての海底基準点で隆起しており、全ての電子基準点において沈降という陸上の結果とほぼ逆になっている。これを、海溝軸に直交方向の「宮城沖1」、「宮城沖2」、電子基準点「牡鹿」で並べて見ると、「宮城沖1」と「宮城沖2」の間で隆起から沈降に転じており、海溝型地震の発生メカニズムから予想される、海溝近傍が隆起し、陸側へ行く

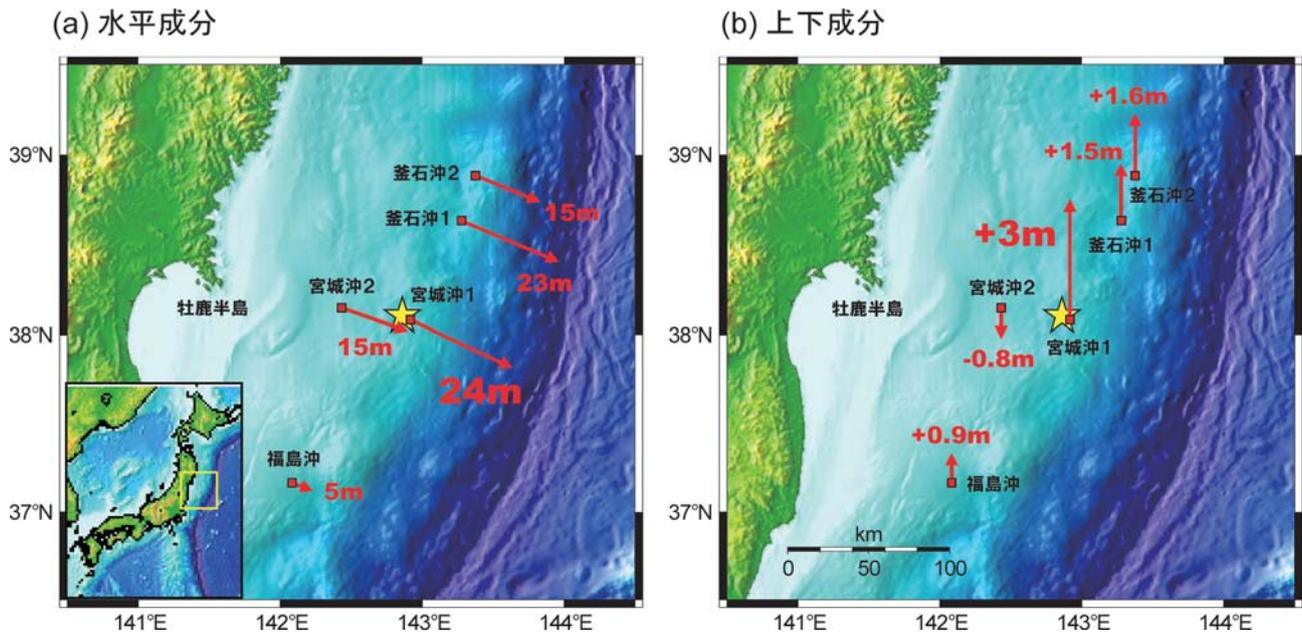


Fig. 7 Co-seismic seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake ( $M$  9.0) in the (a) horizontal and (b) vertical components (after Sato et al. (2011 b)).

に従って沈降に転じるというイメージを実証したものとと言える。

さらに、これら海底における変位データは、陸上の GPS 観測結果と合わせて、地震時のプレート境界のすべり分布の推定に大きく貢献した。陸上の変位量から推定されるプレート境界の最大すべり量は 30 m 前後であるのに対し、海底変位量を併せて推定すると、すべりのピークが海溝側にシフトするとともに、最大すべり量が 50~60 m まで大きくなる (国土地理院, 2011)。このことは、海溝軸に近いところで巨大なすべりが発生したことを示すものであり、今回の地震による巨大津波の発生メカニズムを理解する上で、大変貴重な情報となった。

このように、今回の結果は、海底における地殻変動データが、海域で発生する地震の震源断層を推定する際に、陸上データからだけではわからない有益な情報を持っていることを明確に実証した。

## 6 他機関の動向

海底地殻変動観測は、海上保安庁のほか、国内では東北大学と名古屋大学のグループでも取り組

みを進めている。ここでは、それらの取り組みについて簡単に紹介する。

大学の研究グループでは、主に測位精度向上や観測システムのセミリアルタイム化を目的とした技術開発を行っており、その一環で取得したデータを利用することにより、2004 年頃より徐々に、地殻変動の検出にも成功している (Fujimoto, 2006)。当初の成果として、2004 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖地震 ( $M$  7.4,  $M$  6.9) による地殻変動を検出したほか、駿河湾、熊野灘等で定常的な変動を検出している (Kido et al., 2006; Tadokoro et al., 2006; 水上・他, 2007; 田所・他 2008)。

また最近の成果として、東北大学は、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震で、「宮城沖 1」海底基準点の北東約 50 km に位置する海底基準点で、GPS/音響測距結合方式による観測結果としては最大となる 31 m の海底の変位を検出した (Kido et al., 2011)。名古屋大学は、4.2 (3) で述べた重心推定法を適用し、熊野灘の海底基準点においてフィリピン海プレートや陸上の電子基準点の動きと統合的な結果を導出している (田所・他 2011)。

本来の技術開発面でも精力的な取り組みが続けられている。海底地殻変動観測をさらに高精度化するため、主要誤差要因の一つである海中音速構造の空間不均質による影響を考慮した観測・解析システムの検討が行われている（例えば Kido, 2007；江藤・他, 2011）。

さらに、海底地殻変動観測のセミリアルタイム化を目指した次世代型の海底地殻変動観測システムの開発も行われている。セミリアルタイム化の実現は、現在のような船を用いた観測では極めて困難であることから、これら次世代型システムでは、現在の船上局の機能を果たすものとして、東京大学生産技術研究所では自律型航行ロボット（AUV）、東北大学では係留ブイの利用に取り組んでいる。これらの技術が実用化すれば、地震に至る過程をより詳細に捉えることが可能になると期待される（Fujimoto, 2006；藤本・他, 2008；望月・他, 2008）。

## 7 おわりに

海上保安庁において海底地殻変動観測システムが開発され、観測を開始してから10年以上が経過した。観測技術・解析技術もままならない状態から、多くの研究者・職員等の弛まぬ努力により、センチメートルの精度での海底測位が可能となり、今では「海底でも観測すれば成果が出せる」と普通に言える時代になった。観測当初からの目的であった、海底地殻変動観測の成果を陸上のGPS観測結果と併せて、歪みの蓄積を示唆するバックスリップ分布の推定や地震時のすべりモデルの推定に利用できるようになりつつあることは、我が国の地震調査研究にとって大きな前進と言えよう。しかしながら、陸上のGPS観測と比較するとまだ、観測点数、観測頻度、観測精度のいずれにおいても1桁以上及ばない。海底地殻変動観測にとって、次の10年は、陸上のGPS観測にどこまで迫れるかが最大の課題となるであろう。

## 謝 辞

海底地殻変動観測は、歴代の航法測地室職員、測量船「明洋」、「海洋」及び「拓洋」乗組員並びに東京大学生産技術研究所浅田研究室諸氏ほか多くの方々の協力の下に実施されてきました。KGPS解析の陸上基準点データとして、国土地理院のGEONETデータを提供していただいています。「宮城沖2」海底基準点は、文部科学省のプロジェクト「宮城県沖地震に関するパイロット的な重点的調査観測」により設置されました。また、東京大学生産技術研究所の望月将志博士には、本論文の改善に資する大変有益なコメントをいただきました。記して感謝いたします。

## 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（2001），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。
- 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.
- 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.
- 江藤周平・永井悟・田所敬一（2011），地震学的手法を用いた海底地殻変動観測のための海中音速構造の時空間変化の検出，*日本地震学会2011年度秋季大会講演予稿集*，256。
- Fujimoto, H. (2006), Ocean Bottom Crustal Move-

- ment Observation Using GPS/Acoustic System by Universities in Japan, *J. Geodetic Soc. Japan*, **52**, 265-272.
- 藤本博己・木戸元之・長田幸仁・金田義行 (2008), GPS/A 方式海底地殻変動連続観測に向けた観測システムの開発, *測地学会誌*, **54**, 181-187.
- 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・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.
- 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.
- 藤田雅之 (2006), 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)～, *海洋情報部研究報告*, **42**, 1-14.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo (2006 a), GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, **58**, 265-275.
- Fujita, M., Y. Matsumoto, T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, K. Kawai, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo (2006 b), Combined GPS/Acoustic Seafloor Geodetic Observation System for Monitoring Off-shore Active Seismic Regions near Japan, *Proc. ION GNSS-2006*, Fort Worth, Texas.
- 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・松本良浩 (2007), 海底地殻変動観測における海中音速度処理手法, *海洋情報部技報*, **25**, 100-106.
- 石川直史 (2011), 海底地殻変動観測における海底音響基準局の更新, *海洋情報部研究報告*, **47**, 44-50.
- 石川直史・佐藤まりこ (2012), 海底地殻変動観測における重心推定法の評価, *海洋情報部研究報告*, **48**, 74-84.
- 海上保安庁 (2012), 東北地方太平洋沖地震前までの海底地殻変動観測結果 (再解析), **第 194 回地震予知連絡会資料**.
- 川井仁一・浅倉宜矢・松本良浩 (2009), 測量船「明洋」への海底地殻変動観測用送受波器の船底装備について, *海洋情報部技報*, **27**, 50-55.
- 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.
- 河合晃司・石川直史・松本良浩・望月将志 (2007), 海底地殻変動観測における KGPS 解析の現状について, *海洋情報部技報*, **25**, 107-111.
- Kido, M., H. Fujimoto, S. Miura, Y. Osada, K. Tsuka and T. Tabei (2006), Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/Acoustic surveys, *Earth Planets Space*, **58**, 911-915.
- Kido, M (2007), Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean, *Earth Planets Space*, **59**, e 33-e 36.
- Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino and Y. Ito (2011), Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L 24303, doi: 10.1029/2011 GL 050057.
- 国土地理院 (2011), 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震海底地殻変動観測の解析結果を加えて推定したプレート境界面上の地震時のすべり分布モデル, **第 190 回地震予知連**

絡会資料.

- 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回講演会要旨集*, 123-124.
- 小竹美子・加藤照之・宮崎真一・仙石新 (1998), GPS観測に基づくフィリピン海プレートとの相対運動と西南日本のテクトニクス, *地震第2輯*, 51, 171-180.
- Matsumoto, Y., M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochizuki, T. Yabuki and A. Asada (2006), Undersea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Earth Planets Space*, 58, 1573-1576.
- 松本良浩・石川直史・藤田雅之 (2007), 海底地殻変動観測における音響トランスデューサ位置のバイアス誤差の推定, *海洋情報部研究報告*, 43, 17-28.
- 松本良浩・藤田雅之・石川直史 (2008), 海底地殻変動観測における複数エポック一括局位置解析手法の導入, *海洋情報部技報*, 26, 16-22.
- Matsumoto, Y., T. Ishikawa, M. Fujita, M. Sato, H. Saito, M. Mochizuki, T. Yabuki and A. Asada (2008 a), Weak interplate coupling beneath the subduction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Earth Planets Space*, 60, e9-e12.
- Matsumoto, Y., M. Sato, M. Fujita, T. Ishikawa, H. Saito, M. Mochizuki, T. Yabuki and A. Asada (2008 b), Undersea crustal movement off the Tokai District, central Japan, detected by GPS/Acoustic seafloor geodetic observation, *Report of Hydrographic and Oceanographic Researches*, 44, 1-8.
- 水上知子・藤本博己・長田幸仁・木戸元之・三浦哲 (2007), GPS/音響結合観測による福島県沖の海底地殻変動, *日本地球惑星科学連合2007年大会予稿集*, J 165-015.
- Mochizuki, M., M. Sato, M. Fujita, Z. Yoshida, T. Yabuki and A. Asada (2002), Trials for better precision of seafloor geodetic observation system, *EOS Trans. AGU*, 83 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract, G 52 A-0966.
- 望月将志・成田誉孝・石川直史・吉田善吾・河合晃司・松下優・川井仁一・淵之上紘和・松本良浩・藤田雅之・浅田昭 (2007), 海底地殻変動観測用音響トランスデューサの音響位相特性と音響位相中心, *海洋情報部研究報告*, 43, 29-36.
- 望月将志・浅田昭・浦環・藤田雅之 (2008), 海中ロボットを利用する次世代海底地殻変動観測システムの開発, *測地学会誌*, 54, 189-197.
- 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司・畑中雄樹・宗包浩志・石本正芳・湯通堂亨・石倉信広・菅原安宏 (2009), GPS連続観測システム(GEONET)の新しい解析戦略(第4版)によるルーチン解析システムの構築について, *国土地理院時報*, 118, 1-8.
- 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.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita and T. Imakiire (2011), Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, 475, 373-376, doi: 10.1038/nature10227.
- 齋藤宏彰・佐藤まりこ・松本良浩 (2008), 海底地殻変動観測で捉えられた「相模湾」海底基準点の移動速度, *海洋情報部技報*, 26, 23-27.
- 齋藤宏彰・佐藤まりこ (2009), 海底地殻変動観測における海中音速測定頻度の局位置への影響について, *海洋情報部研究報告*, 45, 23-33.
- 齋藤宏彰・関由貴子・梅原直人・浅倉宜矢・佐藤

- まりこ (2010), 海底地殻変動観測の KGPS 解析における速報暦の有効性について, *海洋情報部研究報告*, 46, 32-38.
- 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.
- 佐藤まりこ・浅倉宜矢・齋藤宏彰 (2009), 船底トランスデューサによる航走海底地殻変動観測の評価 (速報), *海洋情報部技報*, 27, 56-65.
- 佐藤まりこ (2010), 海底基準局の識別信号の追加について, *海洋情報部研究報告*, 46, 108-115.
- Sato, M., H. Saito, T. Ishikawa, Y. Matsumoto, M. Fujita, M. Mochizuki and A. Asada (2011 a) Restoration of interplate locking after the 2005 Off-Miyagi Prefecture earthquake, detected by GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01312, doi: 10.1029/2010 GL 045689.
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki and A. Asada (2011 b), Displacement Above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Science*, 332, 1395, doi: 10.1126/science.1207401.
- Tadokoro, K., M. Ando, R. Ikuta, T. Okuda, G. M. Besana, S. Sugimoto and M. Kuno (2006), Observation of coseismic seafloor crustal deformation due to  $M$  7 class offshore earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2006 GL 026742.
- 田所敬一・杉本慎吾・武藤大介・渡部豪・生田領野・安藤雅孝・奥田隆・木元章典・佐柳敬造・久野正博 (2008), 駿河-南海トラフにおける海底地殻変動繰り返し観測, *測地学会誌*, 54, 127-139.
- 田所敬一・生田領野・渡部豪・永井悟・奥田隆 (2011), 東南海地震の想定震源域における海底地殻変動モニタリング, *日本地震学会 2011 年度秋季大会講演予稿集*, 151.
- 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.
- 氏原直人・成田誉孝 (2012), 測量船「拓洋」への海底地殻変動観測装置設置について (速報), *海洋情報部研究報告*, 48, 85-90.
- 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.

## 要 旨

海上保安庁の海底地殻変動観測技術における約 10 年間の進展について総括した。2000 年に観測システムの原型が完成し, 「熊野灘」海底基準点で観測を開始して以来, 観測及び解析の両面における弛まぬ努力により, 観測精度は, 今や安定的に繰り返し位置決定精度 2~3 cm を確保できるまでになった。この技術的進展とともに, 日本海溝, 南海トラフ沿いに展開した海底基準点において, 海洋プレート沈み込みに伴う定常変動や地震に伴う変動等を次々に検出し, 我が国の地震調査研究に大きく貢献し始めている。特に, 2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震 ( $M$  9.0) に伴う大規模な海底変動を捉えたことは, 陸上の GPS 観測だけではわからなかった海溝付近の大規模すべりの情報を与え, 海底観測の重要性を示すこととなった。今後は, 観測運用面, 精度面において陸上観測にどこまで迫れるかが課題である。