

海底地殻変動観測における重心推定法の評価[†]

石川直史^{*1}, 佐藤まりこ^{*2}

Evaluation of the method of estimating the center positions of transponder array
via constraining the geometry of transponder array[†]

Tadashi ISHIKAWA^{*1} and Mariko SATO^{*2}

Abstract

For the precise GPS/Acoustic seafloor positioning, we evaluate a new method for estimating the position of transponders. Conventionally we estimate three-dimensional coordinates of each transponder independently. With this new method, in contrast to conventional method, we estimate movement of center position of transponder array via constraining the geometry of array. The best estimated geometry used in this method is calculated using all data obtained by sailing observation up to the present. As a result of new method, the variability of estimated positions is reduced and the precision in estimating the crustal velocity was improved.

1 はじめに

海洋情報部では、東京大学生産技術研究所の技術協力の下、GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測の技術開発及び海底基準点の展開を行っている。海底基準点は、これまで主に日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に設置しており、測量船による繰り返し観測を行っている（佐藤・他，2008）。

本観測は、測量船の位置を「キネマティック GPS (KGPS) 測位」で決定するとともに、測量船に装備された音響トランスデューサと海底に設置された海底音響基準局（以下、海底局という。）との間の距離を「音響測距観測」で測り、それらを組み合わせて海底基準点の位置をセンチメートルの精度で求めるものである。

本システムによって得られた各種の観測データは、藤田・他（2004）による海底局位置解析ソフトウェア SGOBS を用いて解析し、海底局の位置座標の推定を行なっている。

2 海底局位置解析ソフト SGOBS の概要

SGOBS は、KGPS 解析による GPS アンテナの位置、音響解析による音波往復走時、船体の動揺計測値及び海中の音速度構造を入力データとし、これらの結果を結合し、ベイジアン最小自乗法に基づくインバージョン法を用いて最適な海底局の位置を推定するソフトウェアである。

我々が展開している海底基準点は、1 点につき 4 台（一部の海底基準点では 3 台）の海底局アレイから構成されており、水深と同程度の直径を持

[†]Received November 21, 2011 ; Accepted January 16, 2012

*1 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

*2 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

つ円周上の東西南北に4台を配置している。SGOBSでは、まずCTD観測等から得られた音速度で4台の海底局のそれぞれの暫定位置座標を求めた後、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。そこで得られた新しい音速度を用いて再度局位置座標を求める。このサイクルを音速度を変えても位置座標の変化が十分小さくなるまで繰り返し行い、最適な位置座標を求める。

最終成果としては、4台の海底局の重心位置座標を海底基準点の位置として定義し、その値の年々の変位から、海底の地殻変動速度を求めている。このことは、4台の海底局アレイの相対位置関係が不変であることを前提としているが、海底局が設置されている1~2km四方位程度の狭い領域内では、局所的な地殻変動は起きていないと思われるので、各観測エポックにおいて、海底局アレイの位置関係は不変であると考えられることは自然である。

通常行なっている解析では、相対位置関係を拘束せずに、各海底局の位置座標を独立の推定パラメータとしている。この場合、各観測エポックで相対位置関係は誤差によってばらつき、最終的な重心位置座標が真値からずれてしまうことになる。

藤田・他(2005)は、何らかの方法で海底局アレイの相対位置関係を既知とすることができれば、これを拘束条件として、4局の重心位置のみを推定パラメータとして解析することで(重心推定法)、従来手法に比べて解のばらつきが小さくなる可能性を示した。しかしながら、海底局アレイの相対位置関係の真値を直接測定する方法は現状では存在しないため、相対位置関係をどのように与えるかが課題であった。

松本・他(2008)では、海底局アレイの相対位置関係に変化がなく、長期にわたって不変であるという前提に立てば、観測を繰り返すことで蓄積された多数の観測エポックのデータを一括して解析することによって、エポック間で不変な相対位置関係の最確値を推定できるとして、その手法

(一括局位置解析)についての検討を行った。この手法では、通常観測エポックごとに独立に扱っているデータを一括して取り扱うことで、海底局アレイの相対位置関係と各エポックにおける重心の変動量を一度に求めることが可能となる。

具体的には、全てのエポックの観測データを用いて第1観測エポックにおける4局の位置座標を推定するとともに、第2観測エポック以降は、第1エポックの位置から相対位置関係を保持したまま平行移動するというモデルを与えることで、4局の独立な位置座標ではなく、アレイ全体の平行移動量を推定する。第1観測エポックのみが4局の位置座標を独立なパラメータとして取り扱うが、第2観測エポック以降の全てのデータもこの推定に寄与するため、ここで得られた4局の相対位置関係が最確値となる。

3 重心推定法の評価

本稿で行う重心推定法による解析手順は以下のとおり。

1. 航走観測方式による全エポックの観測データを使用し、基準となる4局の座標値を求める
2. 各観測エポックの座標値は、1.で求めた基準座標から相対位置関係を変えずに平行移動するものとして、平行移動量を求める

なお、ここで求めているのは、海底局アレイ全体を剛体とした時の平行移動量であり、重心の位置座標を直接求めているわけではないが、考え方としては、藤田・他(2005)の重心推定法と同一であるため、本稿の手法も便宜上重心推定法と名付けた。

松本・他(2008)の手法では、使用するデータ数(エポック数)が多いほど相対位置推定の確度が高くなると考えられるが、データ品質の悪いエポックを推定に含めると逆に確度が低くなるおそれがあるため、使用するデータの選定が必要となる。

我々の観測システムは、2008年に測量船の船底に音響トランスデューサを常設したことで大き

く変化した。それ以前は、船のスクリューを止め漂流しながらの観測であったため、風や海流の影響でデータの空間的バランスを理想どおりに配置することが困難であった。本観測では、観測データを4局の海底局アレイの中心点に対してバランスよく取得することにより、音速度等の誤差が水平位置推定へ与える影響を小さくすることができる(佐藤・藤田, 2004)。これは、GPS測位にお

いてDOP値で評価される衛星配置の偏りによる精度低下と同じ原理である。

船底装備によって航走しながらの観測が可能となったため、データの空間的なバランスが大きく改善され、その結果、従来の漂流観測方式にくらべ、海底局位置の推定値のばらつきが低減し、安定した測位結果が得られるようになった(佐藤・他, 2009)。

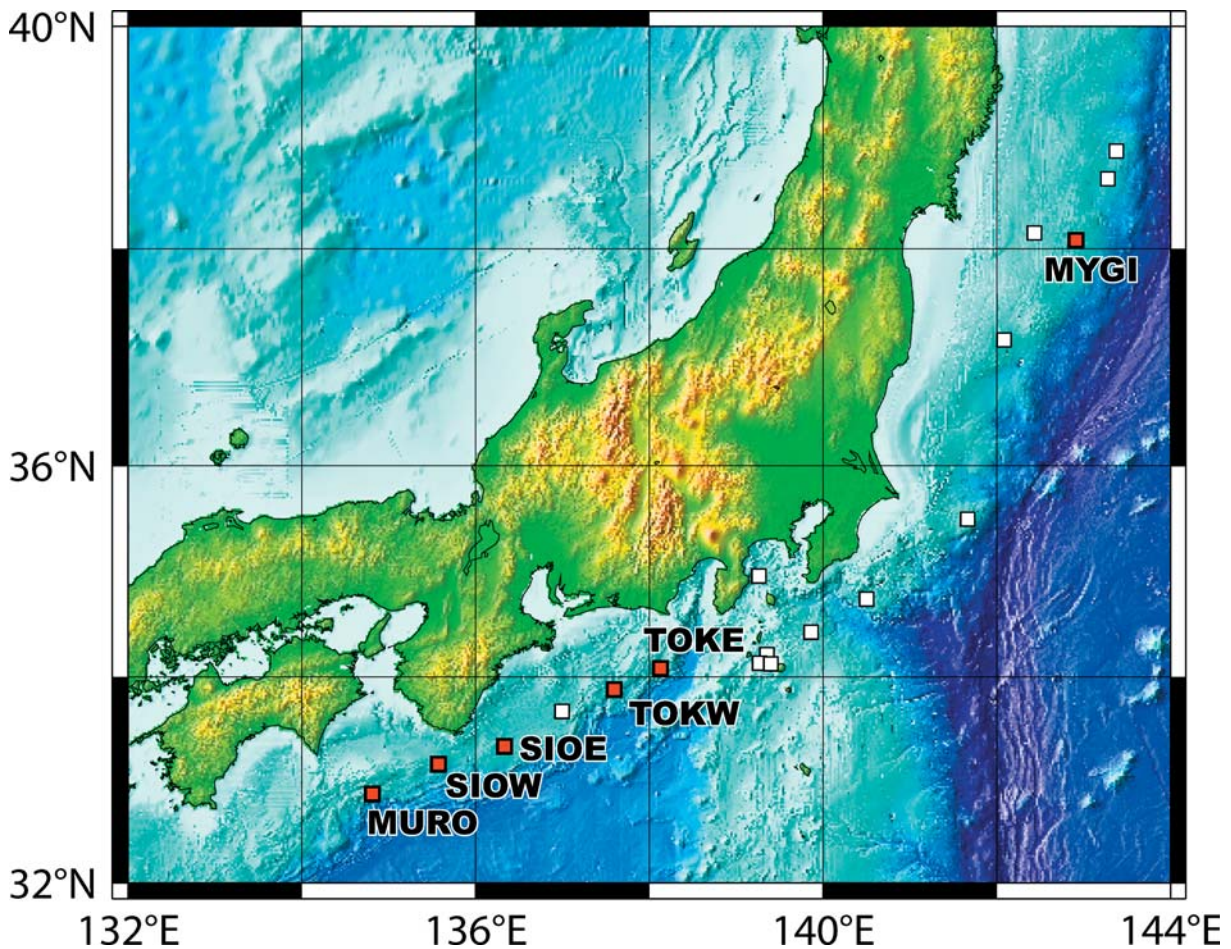


Fig. 1 Location of seafloor reference points. Red squares stand for the reference points used in this study.

Table 1 Data summary used in this study.

宮城沖1(MYGI)		東海沖1(TOKE)		東海沖2(TOKW)		潮岬沖1(SIOE)		潮岬沖2(SIOW)		室戸岬沖(MURO)	
エポック	データ数	エポック	データ数	エポック	データ数	エポック	データ数	エポック	データ数	エポック	データ数
2009MAR	5828	2008JUL	6345	2008JUL	6401	2008SEP	6318	2008SEP	5484	2008SEP	10829
2009JUN	5122	2009MAY	5136	2009FEB	4973	2009FEB	4717	2009APR	5305	2009FEB	6874
2009DEC	5325	2009JUL	5072	2009JUL	5672	2009MAY	5252	2009JUL	5628	2009MAY	5475
2010MAR	5641	2009AUG	5217	2010JAN	5824	2009JUL	5866	2010JAN	5841	2009JUL	7792
2010JUL	5504	2010AUG	4948	2010AUG	4980	2010JAN	5324	2010AUG	4900	2010JAN	5240
2010NOV	5460	2010DEC	4800	2010DEC	5056	2010AUG	5072	2011JAN	5022	2010AUG	4984
2011FEB	5512	2011JAN	1640	2011JAN	5004	2011JAN	5033	2011JUN	4919	2010DEC	5042
:	:	2011JUN	4772	2011JUN	4961	2011JUN	5060	:	:	2011JUN	5092

本稿では、相対位置関係の推定に関して、漂流観測方式のデータは用いずに、航走観測方式で得られたデータのみを用いた。使用したデータは宮城沖の海底基準点1点および南海トラフ沿いの海底基準点5点 (Fig. 1) において取得したもので、観測年月、データ数は Table 1 のとおりである。

(1) サブセット解の評価

既に述べたように本観測では、音響データの空間的配置が精度に大きな影響を与えるため、現在の航走観測では、海底局の中心に対して対称となる測線配置で観測を行なっている。これを1セットとして、1回の観測エポックで4セットの観測を実施することを基本としている。最終的には、4セット分全てのデータを使用して求めた位

置が、その観測エポックの成果となる。4セット全てのデータから求めた位置に対する、1セット分のデータから求めたセットごとの解 (サブセット解) のばらつきが、その観測エポックにおける精度評価の指標となる。

Table 1 の海底基準点において過去に取得したデータについて、サブセット解のばらつきを評価した結果を Fig. 2 に示す。ここでは、table 1 に記載した航走観測によって取得したデータに加えて、2008年以前の漂流観測によるデータも使用し、通常の解析手法と重心推定法によるサブセット解のばらつきとその標準偏差を、漂流観測と航走観測のそれぞれの場合について評価した。図のプロットは、観測エポックごとに求めたサブセット解の4セット解に対する位置をひとまとめに図

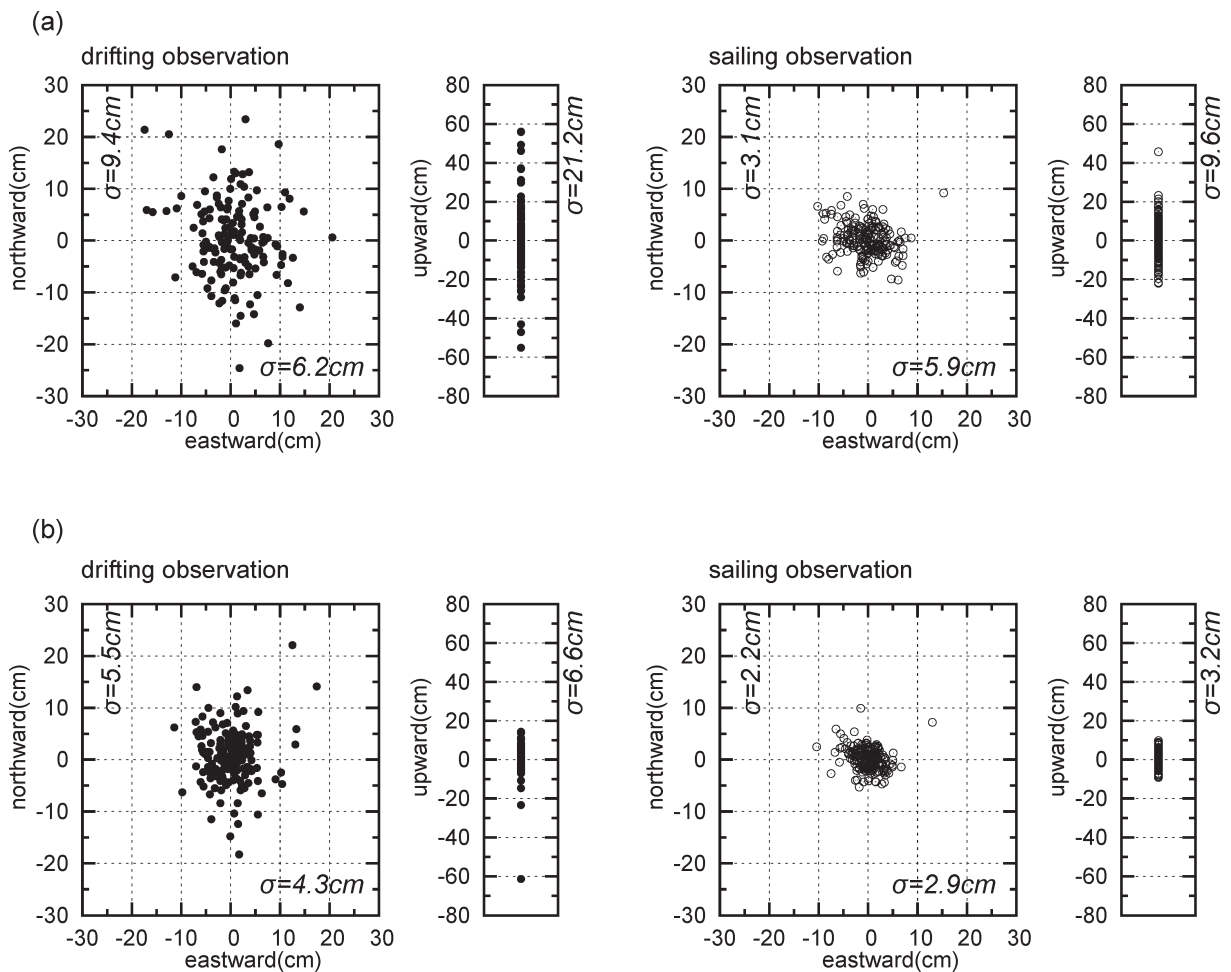


Fig. 2 Subset repeatability of estimated positions analyzed by (a) conventional method and (b) the method of estimating the center position of array. σ stands for standard deviations of variability of repeatability of each axis.

示したもので、原点は各エポックの4セット解である。

この結果から重心推定法におけるサブセット解のばらつきの標準偏差は通常解析手法のおよそ半分になっており、重心推定法によって、解の安定性が増したことが分かる。

Fig. 2の結果から、航走観測方式では、1セット分のデータから得られる結果は標準偏差にして3~6 cmのばらつきを持つことが分かる。データ数を2セット、3セットと増やしていくことで標準偏差は小さくなり、現在は4セット分のデータを取得することで、1回の観測エポックの結果として5 cm以内の精度（標準偏差にして2 cm程度）を確保できるようにしている。今回の結果は、重心推定法を用いることで、より少ないセット数でも精度が確保できる可能性を示しており、将来的な観測時間の短縮に繋がることが期待される。

(2) 相対位置関係の評価

次に、一括解析手法で求めた相対位置関係の妥当性について検討を行う。Fig. 3は各海底基準点において、解析に使用するエポック数によって相対位置関係がどれだけ変化するかを示したものである。使用するエポックはTable 1の最初のエポックから1つずつ順に次のエポックを付け加え

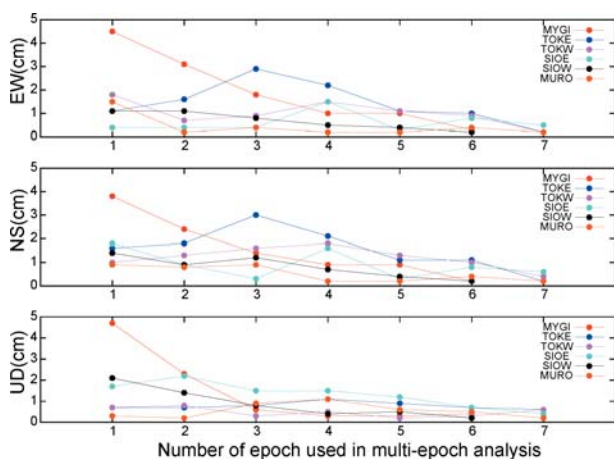


Fig. 3 The variation of the geometry of transponder array with respect to the number of epochs used in multi-epoch analysis.

ていき、全エポックを使用して求めた相対位置関係を基準としたときの4局の位置のずれのRMSを図示したものである。使用するエポックが増えるにつれてずれは小さくなっていくが、TOKEの3エポック解やSIOEの4エポック解などデータを増やしたことで、ずれが大きくなっている例もある。これは、追加したエポックのデータの品質が低いためと考えられる。

そこでこの差が、最終的な位置推定に与える影響を見るために、例としてTOKEの3エポック解とMYGIの2エポック解の相対位置関係を使用して解析を行い、全エポック解の相対位置関係を使用した場合との比較を行った。Fig. 4に、比較結果を示す。TOKEの例では、推定位置の差は大きくても1 cm程度で、線形回帰で求めた地殻変動速度も高々1 mm/yrの差である。MYGIの例では、TOKEよりも差が大きくなっていく。

4局がなす四角形について、使用エポック数による形状の変化をFig. 5に示す。ここでは基準となる全エポック分のデータから得られた四角形を対角線の長さが20 cmの正方形としている。これから分かるように、TOKEの場合は基準正方形と大きさに違いはあるものの形状はほぼ相似形であり回転もほとんどなく、基準正方形を単に拡大・縮小した形となっている。相対位置関係のずれが大きくても四角形の形状が相似形に近ければ、重心位置に大きな違いはないと考えられるため、Fig. 4においてTOKEの差が小さかったと推察される。一方MYGIの例では、使用エポック数が少ない場合は、四角形の形状が崩れており、このことがFig. 4においてTOKEよりも大きな差が現れた原因と考えられる。

四角形が相似形を保ちながら、拡大・縮小する主な原因は音速度推定の際に生じる系統的誤差である。鉛直座標の推定に関しては、データを上下対称に取得することが不可能なため、音速度と鉛直座標のパラメータの分離が悪くなり、水平方向に比べて相対的に精度が低下する(石川・他, 2005)。これは、音速度と局位置のパラメータ推定の際に、音速度を速くして深い位置として

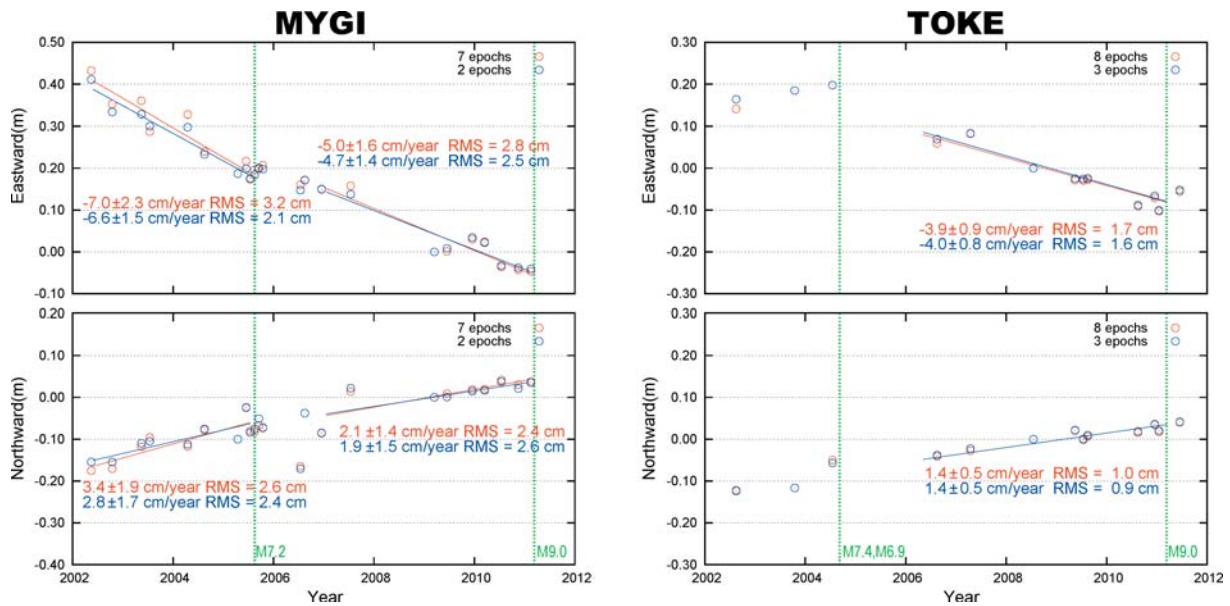


Fig. 4 Time series of estimated positions of seafloor reference point MYGI and TOKE. The difference between the colors of these plots stands for the difference of the number of epochs used in determining the geometry of transponder array. Green lines stand for the date of the occurrence of large earthquakes which induce coseismic movement.

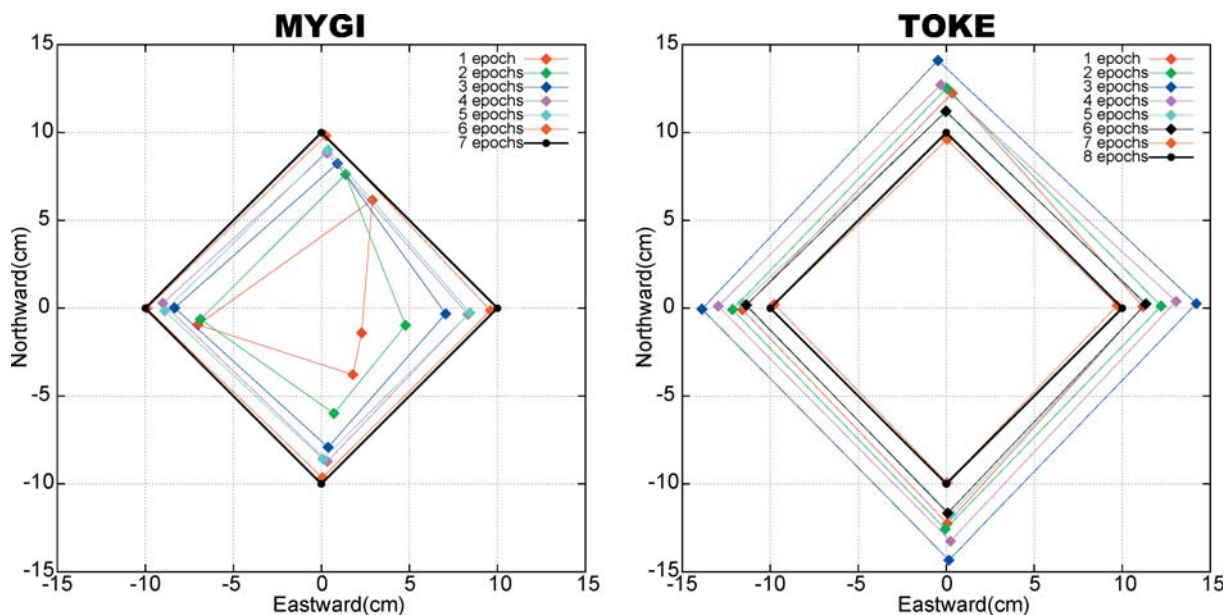


Fig. 5 The variation of square shape of four transponders with respect to the number of epochs used in multi-epoch analysis.

推定するか、音速度を遅くして浅い位置に推定するか、どちらが正しいかを決定することが難しくなるからである。水平方向に関してデータを偏りなくバランス良く取得していれば、推定位置の上下動に合わせて四角形が拡大・縮小する形にな

り、中心位置は大きく変化しないため、水平位置座標の推定に与える音速度推定の系統的誤差の影響は小さくなる。従って、四角形が正しい値から相似形を保っていれば、水平の地殻変動を求めるに十分な精度を持つ。

このことから、相対位置関係の妥当性を評価するには、各局の絶対位置座標ではなく、四角形の形状を評価することが妥当であると言える。Fig. 5 の TOKE の例では、絶対位置座標がずれていても、四角形の形状自体は大きく変化せず安定しており、少ないエポック数でも妥当な形状が推定できている。MYGI の例では、エポック数が少ない場合は形状が崩れているが、エポック数を増やすことで形状が安定していくことから、ある程度のエポック数を確保できれば、条件の悪いデータが混ざっていても妥当な形状を求めることは可能であると考えられる。

(3) 時系列の評価 (南海トラフ)

最後に、時系列についての比較を行う。Fig. 6 に通常解析で求めた時系列と重心推定法で求めた時系列を示す。

ここでは、2004年9月に発生した紀伊半島南東沖地震 ($M 7.4$, $M 6.9$) の影響が及ばない2006年以降、2011年3月の東北地方太平洋沖地震 ($M 9.0$) 発生までの約5年間の結果を対象として線形回帰を行い地殻変動速度を求めている。図中の速度の誤差は回帰直線の傾きの誤差を95%信頼区間で示したもので、RMSは回帰直線からのデータ分布のばらつきである。通常解析のプロットのエラーバーは基準となる海底局の相対位置関係からの各局のずれ量のRMSであり、相対位置関係を固定した重心推定法のプロットにはエラーバーは付けていない。図中の白抜き丸は航走観測による結果、括弧付きの結果はデータ数が少ないため信頼性の低い結果であることを示している。地殻変動の基準となる固定点はユーラシアプレート安定域としている。

この結果から重心推定によってデータのばらつきが軽減した結果、回帰直線の推定精度が向上していることが分かる。

(4) 時系列の評価 (宮城沖)

東北沖の海域では、南海トラフ沿いの海域に比べて音速度構造が複雑に変化し、結果のばらつき

が相対的に大きいため、石川・他 (2005) による高さ固定手法による精度の改善を行っており、これまでに、定常的な地殻変動や2005年の宮城県沖の地震及び2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を検出することに成功している (例えば、佐藤・藤田, 2012)。

Fig. 7 に MYGI について、通常解析、高さ固定手法、重心推定法の3つの手法による時系列結果を示す。ここでは、2002年から2005年8月の宮城県沖の地震 ($M 7.2$) まで及び、その地震の余効変動の影響が収まったと考えられる2006年12月から2011年3月の東北地方太平洋沖地震 ($M 9.0$) 発生までの2つの期間について線形回帰を行い地殻変動速度を求めている。図の凡例は Fig. 6 と同一である。

この結果から、高さ固定手法、重心推定法の結果は、通常解析よりも結果が改善していることがわかる。

高さ固定手法は、本来測定可能である高さ方向の情報を犠牲にしており、また、鉛直方向の地殻変動が想定できる場合には適用できないという欠点を持っている。重心推定法ではこれらの欠点を持たずに、同程度の精度が確保できているため、高さ固定手法よりも優れているといえる。

Fig. 8 に通常解析と重心推定法のそれぞれについての鉛直方向の結果について示す。通常解析の結果では、精度が改善された航走観測の結果においても10 cmを超えるばらつきが現れているが、重心推定法では数 cm のばらつきに収まり大幅に改善されている。鉛直方向の地殻変動速度は水平方向に比べると小さいと考えられるため、現状のデータ数では重心推定法の結果をもってしても、有意な変動を捉えることは難しいものの、さらなるデータの蓄積によって、将来的には鉛直方向の地殻変動も捉えられると期待される。

6 まとめ

重心推定法を用いた解析により、海底局位置の推定精度が向上することが分かった。

これまでに十分なデータを蓄積している海底基

(a)

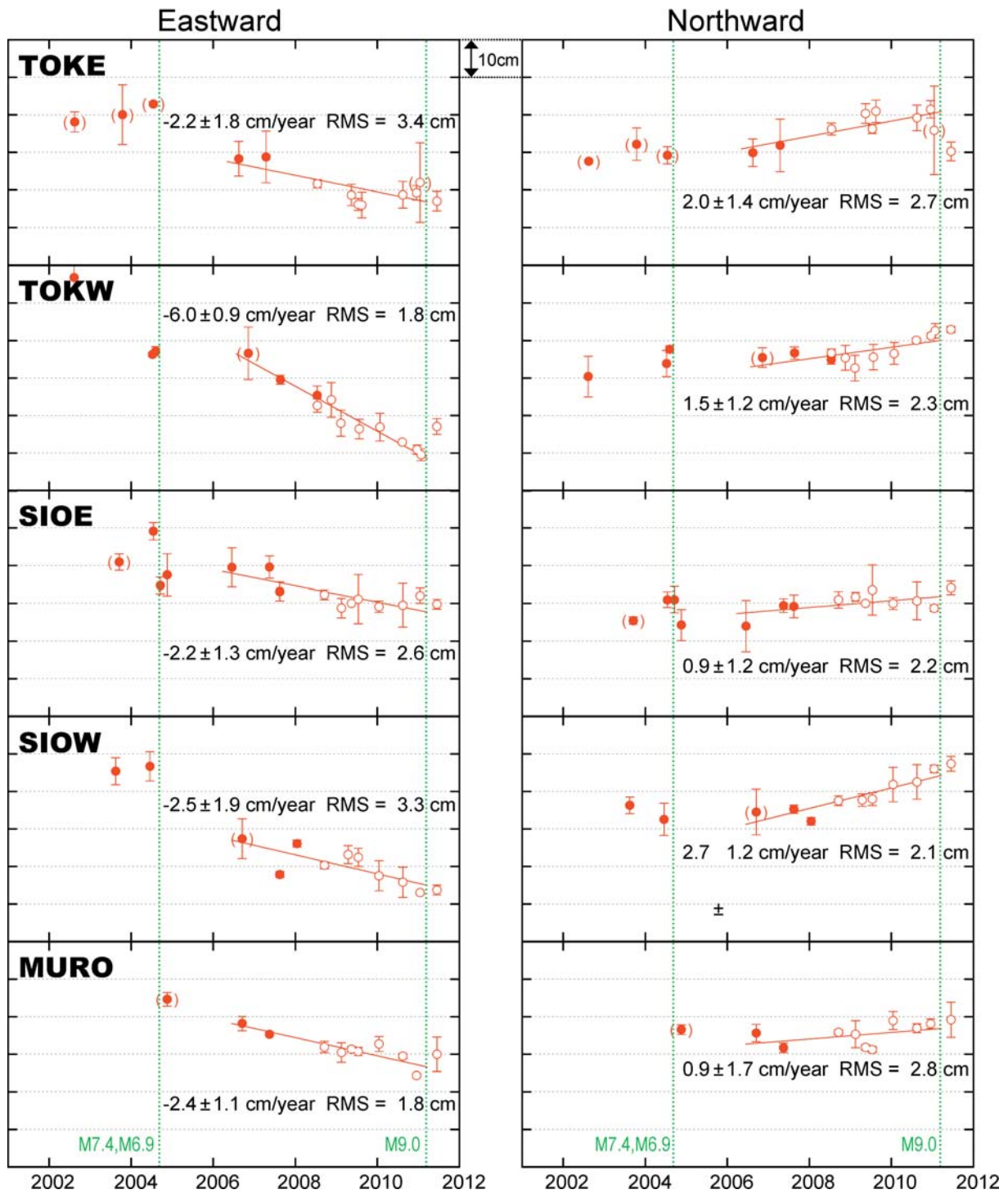
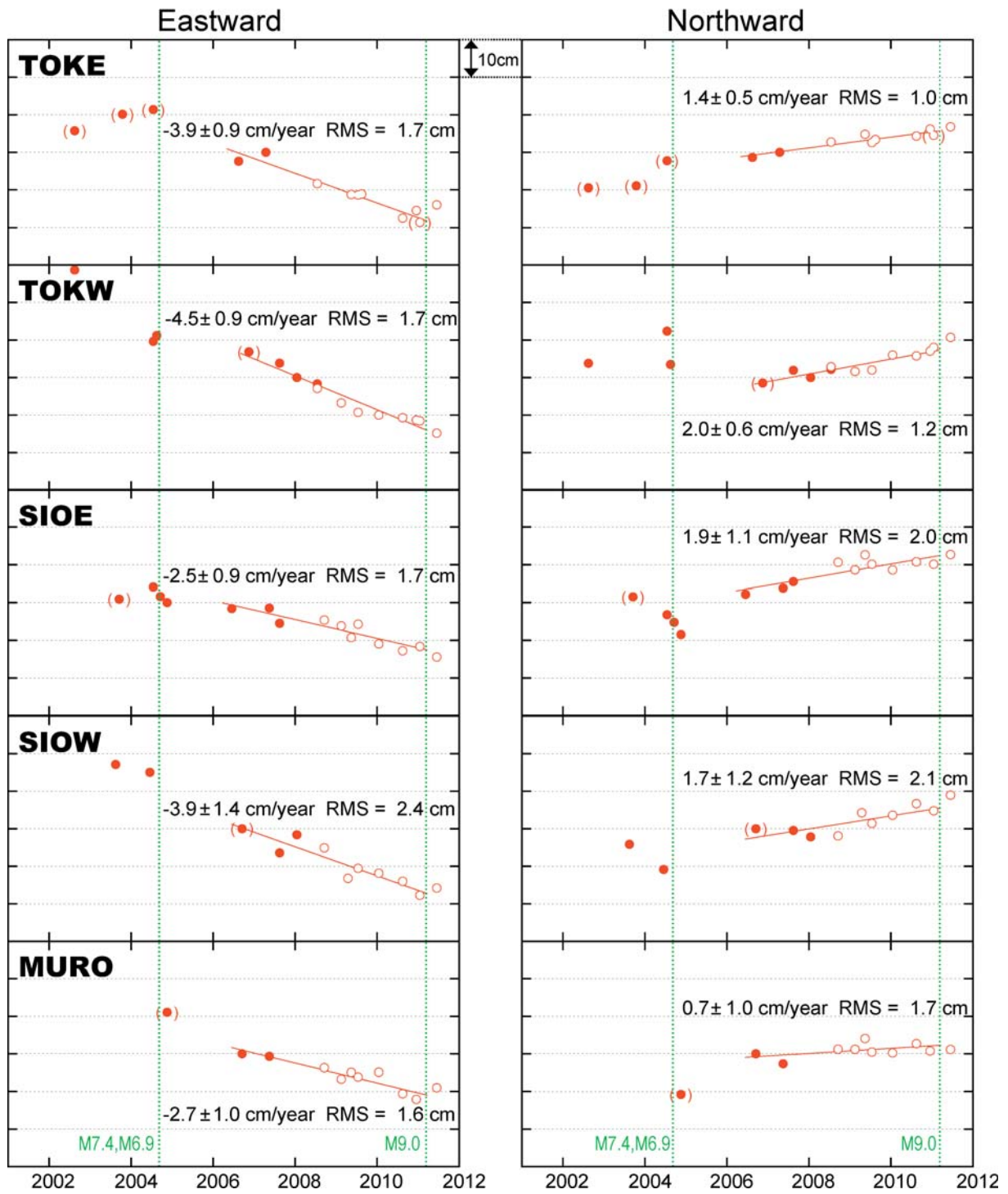


Fig. 6 Time series of horizontal positions at seafloor reference points installed along the Nankai Trough. The results are obtained by (a) conventional method and (b) the method of estimating the center position of array. Green lines are same notations as in Fig. 3.

(b)



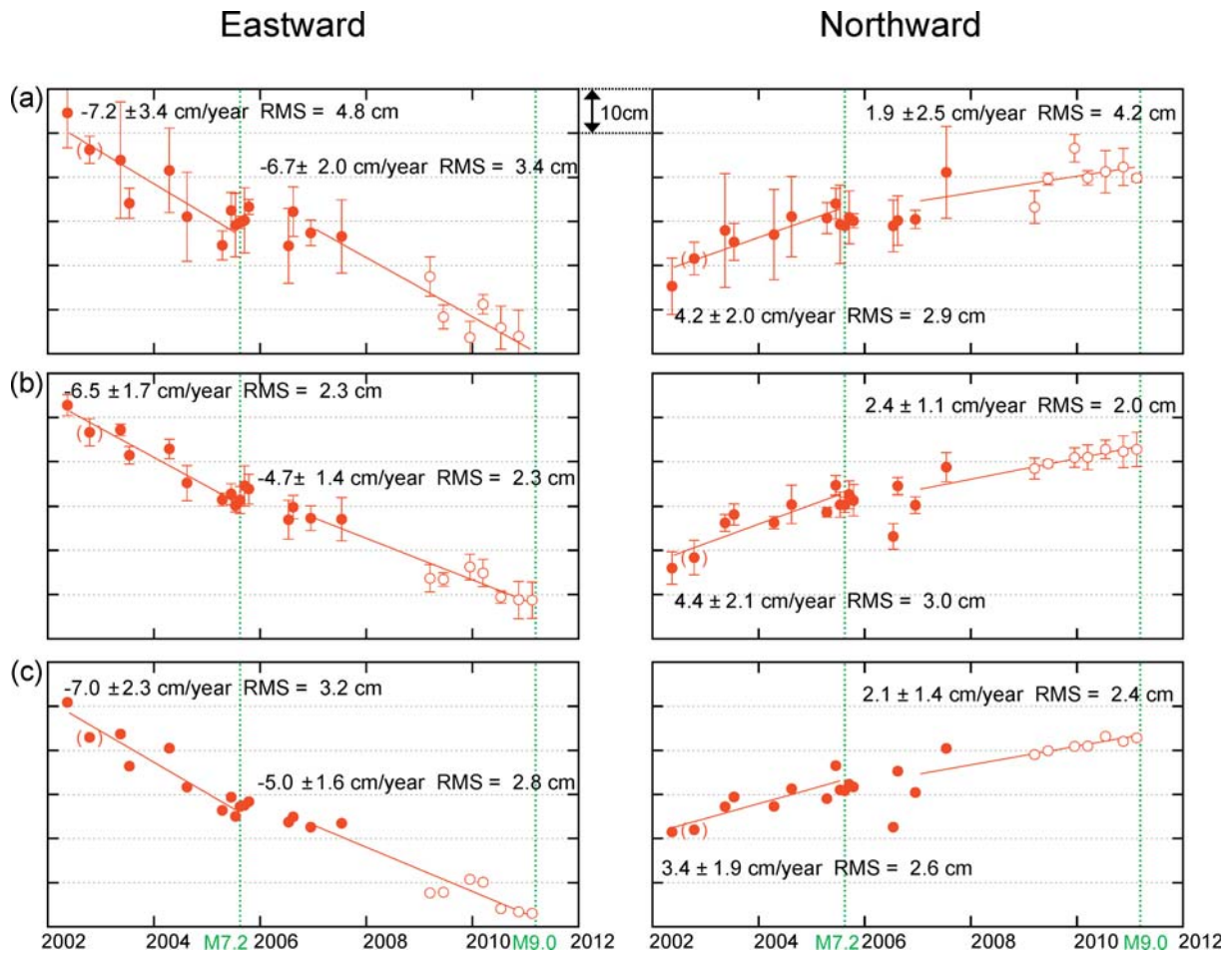


Fig. 7 Time series of horizontal positions of the seafloor reference point off Miyagi (MYGI). The results are obtained by (a) conventional method, (b) conventional method with height constraint and (c) the method of estimating the center position of array. Green lines are same notations as in Fig. 3.

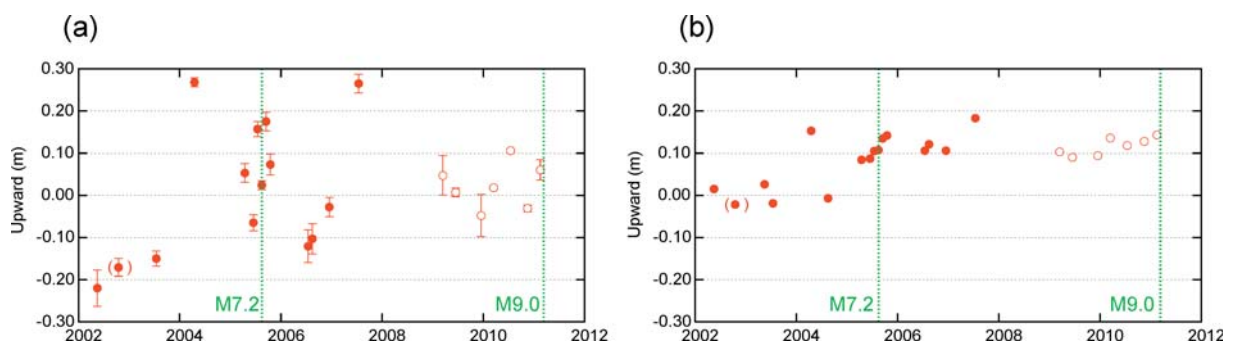


Fig. 8 Time series of vertical positions of the seafloor reference point off Miyagi (MYGI). The results are obtained by (a) conventional method and (b) the method of estimating the center position of array.

準点については、本手法を用いることでさらなる精度の向上が可能となる。さらに、少ないセット数でも必要な精度が確保できるため、今後の観測時間の短縮も見込めることになる。

謝 辞

KGPS 解析に用いる陸上基準点の一部として、国土地理院提供の電子基準点 1 秒データを利用させていただきました。KGPS 解析には、NASA/GSFC の Colombo 博士開発のソフトウェア「IT」を使用しました。査読していただいた東北大学の木戸元之博士から有益な助言を頂いたことで本稿が改善されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 藤田雅之・佐藤まりこ・矢吹哲一朗 (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・松本良弘・望月将志・佐藤まりこ・矢吹哲一朗・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*, 47-48.
- 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.
- 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.
- 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度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・木戸元之・田所敬一 (2008), GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測～観測成果と新たな取り組み～, *測地学会誌*, 54, 113-125.
- 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・藤田雅之 (2012), GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測技術の進展—この 10 年の歩み—, *海洋情報部研究報告*, 48, 26-40.

要 旨

海底地殻変動観測における海底局位置推定に関して重心推定法の評価を行った。本手法は、通常独立に推定している 4 台の海底局の位置座標を、海底局間の相対位置関係が不変であると仮定し重心位置の変位のみを推定することで、精度向上を目指すものである。拘束する相対位置関係は、これまでに航走観測によって取得した全エポックのデータを一括解析することで、最適な値を求めた。重心推定法を適用することで、海底局位置解のばらつきが抑えられ、地殻変動速度の推定精度が向上した。さらに短時間のデータであっても所定の精度が確保できる可能性があることがわかった。