

海底基準局の更新に係る時系列連続性確保のための新しい解析手法

氏原直人*¹, 佐藤まりこ*², 石川直史*³, 渡邊俊一*¹

New analysis method for maintaining the observation continuity after replacement of seafloor stations

Naoto UJIHARA*¹, Mariko SATO*², Tadashi ISHIKAWA*³, and Shun-ichi WATANABE*¹

Abstract

Japan Hydrographic and Oceanographic Department (JHOD) has been carrying out GPS/acoustic seafloor geodetic observation for monitoring crustal movements. Since 2009, we have replaced seafloor transponders, starting from the oldest sites, before runout of the battery to ensure the continuity of observation. In this report, we propose a new method applying array constraint analysis (Ishikawa and Sato, 2012) for maintaining the continuity of observation results between from new and old transponders, and consider the possibility that the number of parallel observations or the number of the ranging data obtained in parallel observations can be reduced.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では、東京大学生産技術研究所の技術協力のもと、2000年からGPS/音響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（藤田，2006，佐藤・藤田，2012）。2012年現在，日本海溝沿いと南海トラフ沿いの海域に海底基準点を24点展開し，観測を実施している（Fig. 1）。

海底地殻変動観測では，キネマティックGPS（KGPS）測位と音響測距観測を組み合わせ，海底に設置した音響基準局（海底局）の位置を繰り返し精度2～3cmで求めている。この観測を繰り返し行うことにより，海底の地殻変動を捉えることができる（Fig. 2）。

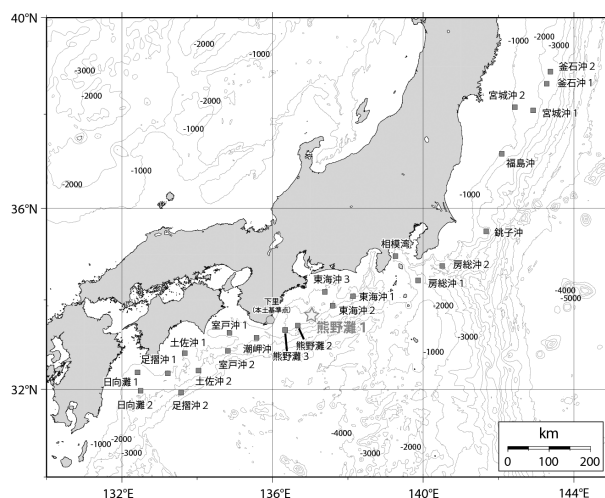


Fig. 1 Location of seafloor reference points. A star shows the seafloor reference point “KUM 1” used in this study.

*1 海洋調査課 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office, Hydrographic Surveys Division

*2 技術・国際課 海洋研究室

Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

*3 海上保安大学校 海事工学講座

Academic Department of Maritime Science and Technology, Japan Coast Guard Academy

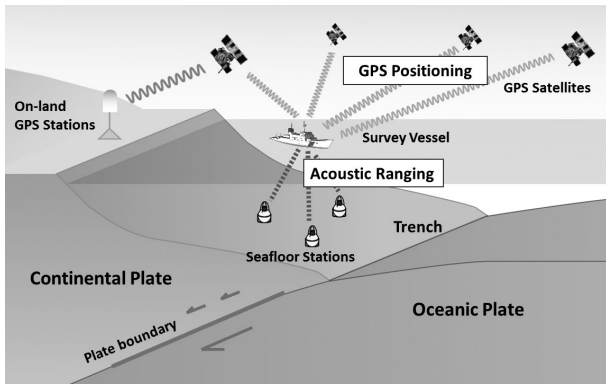


Fig. 2 Schematic picture of seafloor geodetic observation.

各海底基準点には、バッテリー式の海底局を水深と同程度の直径を持つ円周上の東西南北に4局（一部の海底基準点は3局）配置している。海底局のバッテリーの寿命が約10年であることから、海洋情報部ではこれを超えてさらに観測を継続するため、2009年より初期の海底局から順次、更新作業を実施している（石川，2011）。

本稿では、海底局更新時における観測結果の連続性を担保する新しい解析手法について提案・検討する。

2 従来の解析手法

(1) 海底局の位置決定手法

海底地殻変動観測では、刻々と変化する船の位置をGPSで、船の姿勢を動揺計測装置で計測しながら、船に設置した音響トランスデューサを用いて音響測距観測を実施している。

一つの海底基準点における音響測距は、予め複数の海底局上の幾何学的バランスを考慮した測線配置を定め、船でその測線上を走りながら10秒又は12秒間隔で海底局1局ずつ順に行う。1航海（1観測エポック）あたり、この測線観測を4回（4セット）繰り返す。測距データ数は、測線1セットあたり約1,300、4セットで約5,000である。

この音響測距により求めた音波の往復走時と、KGPS解析で求めた船のGPSアンテナの位置、船の動揺データ及び海中の音速度構造を用いて、

ベイジアン最小自乗法に基づくインバージョン法により海底局の位置を推定する（藤田・他，2004）。海底基準点の位置は複数の海底局の平均（重心）位置としている。

この方法は、原理的には各海底局の位置座標を独立の推定パラメータとして求めることができる（以下、「基本解析」という）。しかしながら、音速度推定の誤差等により、基本解析の推定位置にばらつきが大きい場合があり、以下に示すように、妥当な仮定に基づいて特定の位置パラメータを拘束することにより、位置決定精度の向上を図っている。

まず、藤田・他（2005）は、局所的な地殻変動がなければ海底局間の相対位置関係は時間的に不変であると考え、この相対位置関係を異なるエポック間で拘束する手法（以下、「重心推定法」という）により3次元的位置決定精度向上の可能性を示した。

さらに、松本・他（2008）は、「重心推定法」の応用として、同様のパラメータ拘束により複数の観測エポックのデータをまとめて解析し、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。

また、石川・佐藤（2012）では、同一海底基準点の異なるエポックに漂流観測データと航走観測データ（佐藤・他，2009）が混在している場合に、次に示す手順により、基本解析に比べて精度が向上することを示した。①まず、航走観測データのエポックのみに「複数エポック一括局位置解析手法」を適用し、各海底局の相対位置関係を求める。②次に、この値を固定値として、漂流観測時を含めた全ての観測データに、改めて「重心推定法」を適用し、重心の変動量を求める。

現在、地震調査委員会等への報告には、石川・佐藤（2012）の解析手法（上記①，②）による結果を採用している。本稿においては、これ以降、この手法を「重心推定法」と呼ぶこととする。

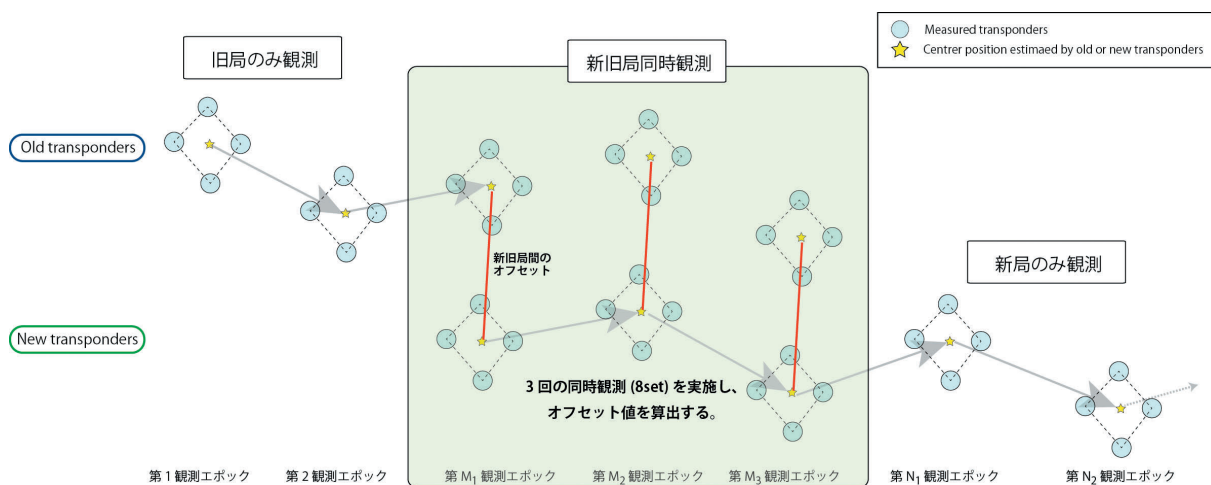


Fig. 3 Diagram demonstrating the principle of the present analysis, using offsets between old and new transponders, for maintaining the observation continuity.

(2) 海底局更新時の解析手法

石川 (2011) では、海底局の更新にあたり、新規投入局 (新局) 及び従来から設置している局 (旧局) の同時観測を実施し、新旧局間の相対位置関係であるオフセット値を求め、このオフセット値を過去の観測エポックの結果座標に足し合わせて更新前後における観測の連続性を保つ手法を示した (Fig. 3)。この際、新旧局同時観測を 3 回実施し、3 回のエポック全ての観測データから海底局の相対位置関係を求め、基本解析における個々の観測エポック解との比較により、オフセット値が ± 1 cm 以内のばらつきで求められることを示した。

この結果に基づき、これまで海底局更新の際には、新局 4 セット分及び旧局 4 セット分の合計 8 セットの新旧局同時観測を 3 回実施してきた。

しかし、新旧局同時観測は、1 回あたり約 48 時間、3 回の観測でほぼ 1 週間を要することから、観測にかかる時間的負担が大きく、同時観測時間の短縮が課題となっている。

3 海底局更新時の重心推定法応用手法の提案

本稿では、海底局更新前後の連続性を保つための方法として、重心推定法を応用した新たな手法を提案する。

具体的には、新旧局同時観測データに加え、そ

の前後のエポック、すなわち旧局のみ、新局のみの観測データも一括して使用して新旧局合わせた全 8 局の相対位置関係を決定し、その全 8 局の重心位置の変位量を求める。なお、本手法の考え方については、松本・他 (2008) における「複数エポック一括局位置解析手法」の提案時にも既にその可能性が言及されている。

模式図を Fig. 4 に示す。

はじめに、更新前後を含む全ての観測エポックのデータを用いた一括解析により、第 1 観測エポック時における全ての海底局の位置座標を推定する。この際、その時点では存在していない新局の位置も見せかけの位置として推定される。これは、新旧局同時観測時の観測データから相対位置関係が決まることによる。

その後、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の下、重心位置の変位量を推定する。

なお、本手法により求めた新局の投入以前のエポックの変位量は旧局のデータのみ使用していることから、旧局データのみで重心推定法を適用した結果と等価となり、新局のみの観測に移行後は新局データのみで重心推定法を適用した結果と等価となる。

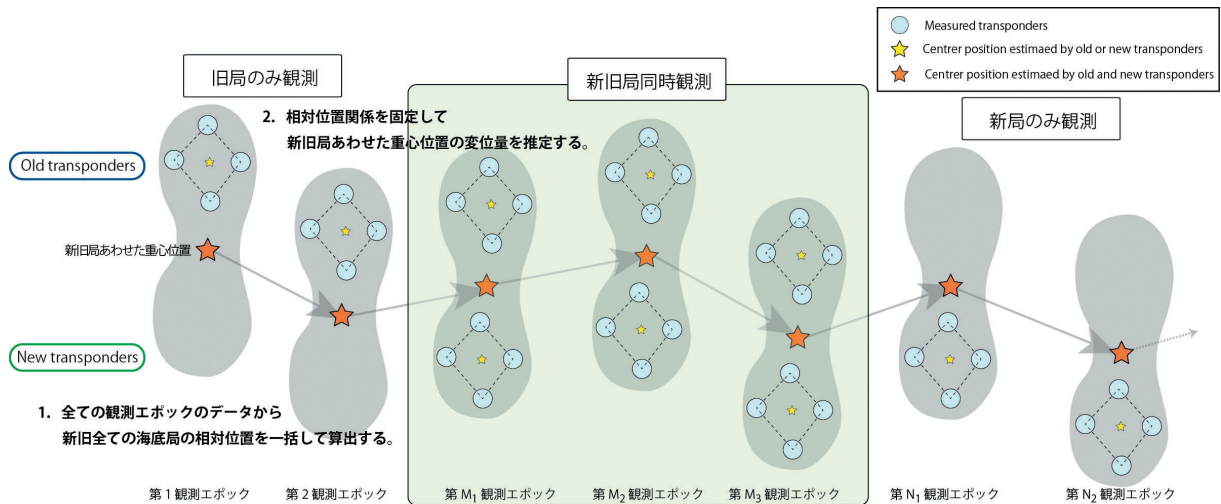


Fig. 4 Diagram demonstrating the principle of the applied array constraint analysis, proposed in this study.

4 重心推定法の評価と考察

石川 (2011) の手法では、3 回の新旧局同時観測データのみから求められた相対位置関係を使用している。これに対して、本稿の手法ではそれ以外の観測データも使用するため、新局、旧局双方のデータ数が増え、それぞれの4局内での相対位置関係の決定精度が石川 (2011) のそれに比べて高くなることが期待される。このことが、新旧局間の相対位置関係の決定精度向上に資すると考えられる。

さらに、本手法の導入により用いるデータ数が増えるため、2 (2) で述べた海底局更新時の課題である同時観測時間の短縮の可能性が期待される。

以上の観点から、本節では、実際の観測データを用いて石川 (2011) の手法との比較により、本手法の精度評価を行うとともに、同時観測データの削減による観測効率化の可能性についても検討する。

(1) 用いた観測データ

石川 (2011) では、新旧局間のオフセット値推定方法を検討するため、「釜石沖2」及び「熊野灘1」海底基準点のデータを用いている。

手法の比較評価のためには、本来、これと同じデータを利用することが望ましいが、「釜石沖2」

については航走観測データが少ないことに加え、特に2011年3月の東北地方太平洋沖地震発生以前に新局のみを使用して観測した回数が少ないことから本手法の検証には適さないため、本稿では「熊野灘1」(位置は、Fig.1参照)のみを使用する。

航走観測を導入した2008年以降に「熊野灘1」海底基準点において実施した観測をTable 1に示す。

「熊野灘1」では2009年10月、2010年1月及び8月の計3回新旧局同時観測を実施しているが、うち2009年10月の観測は、漂流観測である上、台風接近に伴う荒天により取得データ数が少なく、他のエポックの約60%である。また、2010年1月の観測は、観測セット数は4セットであるが、速力を落として1セットあたりのデータ数を増やして観測を行っており、取得データ数は通常

Table 1 Data summary at the seafloor reference point “KUM 1” used in this study.

観測年月	船名・船速	セット数	データ数	
2008/09	明洋・7.0kt	4	4623	旧局のみ
2009/04	明洋・7.0kt	4	5067	
2009/07	明洋・7.0kt	4	5050	
2009/10	明洋・漂流	4	6188	新旧同時
2010/01	明洋・5.0kt	4	9786	
2010/08	明洋・7.0kt	8	10109	
2011/01	明洋・7.0kt	4	5017	新局のみ
2011/06	明洋・7.0kt	4	5060	

の新旧局同時観測と同程度（8セット分）である。なお、「熊野灘1」では、新局は通常の東西南北の4局構成、旧局は西局が抜けた3局構成となっており、合計7台の海底局に対し新旧局同時観測を行った。

(2) 従来の手法との比較による精度評価

本項では、Table 1のデータについて、本稿の手法により新旧海底局の相対位置関係を求め、石川（2011）で求められた新旧海底局のオフセット値との比較を行う。なお、本手法に用いる重心推定法（石川・佐藤，2012）は、本来、航走観測を実施した海底局のみを使用して相対位置関係を決

めるものであるが、「熊野灘1」については、2009年10月の新旧局同時観測が漂流観測で行われたことから、ここではこの漂流観測のデータを含む2008年以降の全データを用いて相対位置関係を求めた。

本手法で求めた新旧海底局間のオフセット値をTable 2に示す。石川（2011）で求められた新旧海底局間のオフセット値と比較すると、mmのオーダーで一致しており、同等の精度が得られていることがわかる。

(3) 新旧局同時観測における効率化の検討

本項では、新旧局同時観測時間をどの程度削減

Table 2 Position offsets between the old and new transponders estimated by the applied array constraint analysis.

ID	旧局	新局	オフセット値			【参考】オフセット値(石川, 2011)		
			東西	南北	上下	東西	南北	上下
北	M04	M11	73.415	-55.017	0.006	73.415	-55.008	0.010
東	M01	M12	82.338	-64.379	-0.071	82.350	-64.369	-0.069
南	M02	M13	71.048	-53.645	-0.025	71.046	-53.658	-0.031
西	-	M14	-	-	-	-	-	-
重心位置			-252.537	-55.017	0.076	-232.541	-55.015	0.080

(単位:m)

Table 3 Number of datasets used for numerical examination for evaluating the possibility that the number of sets and times of parallel observations can be reduced.

		2008/09 明洋・7.0kt	2009/04 明洋・7.0kt	2009/07 明洋・7.0kt	2009/10 明洋・漂流	2010/01 明洋・5.0kt	2010/08 明洋・7.0kt	2011/01 明洋・7.0kt	2011/06 明洋・7.0kt
5セット観測 1回	旧局	4set	4set	4set		1set			
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
6セット観測 1回	旧局	4set	4set	4set		2set			
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
7セット観測 1回	旧局	4set	4set	4set		3set			
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
8セット観測 1回	旧局	4set	4set	4set		4set			
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
5セット観測 2回	旧局	4set	4set	4set		1set	1set		
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
6セット観測 2回	旧局	4set	4set	4set		2set	2set		
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
7セット観測 2回	旧局	4set	4set	4set		3set	3set		
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
8セット観測 2回	旧局	4set	4set	4set		4set	4set		
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
5セット観測 3回	旧局	4set	4set	4set		1set	1set	1set	
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
6セット観測 3回	旧局	4set	4set	4set		2set	2set	2set	
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
7セット観測 3回	旧局	4set	4set	4set		2set	3set	3set	
	新局				2set	4set	4set	4set	4set
8セット観測 3回 (ref.)	旧局	4set	4set	4set		2set	4set	4set	
	新局				2set	4set	4set	4set	4set

(例)3set : 3セット分の音響データを解析に使用

できるかという観点から、同時観測回数・セット数を減らした場合の評価を行う。

セット数の削減にあたっては、新局が座標の結合目的だけではなく、更新後の地殻変動把握のための本データとなること、また、旧局は既に更新前の十分なデータ蓄積によりその相対位置関係が精度よく決定されていることから、ここでは旧局のみを対象とする。

検討対象とした新旧局同時観測回数及びセット数の組合せを示す。まず、同時観測回数は1~3回、旧局のセット数は1~4セットとして、それぞれの組合せに対してオフセット値を推定した。これらをフルセットである8セットの観測を3回実施の場合のオフセット値を基準値として比較した。ただし、2009年10月の同時観測はセット数が他の観測エポック時よりも少ないため、Table 3に示すように他のエポックと異なる設定としている。

Fig. 5 及び Table 4 に、それぞれの組合せに対する新旧局のオフセット値の基準値に対する差を示す。Fig. 5 のエラーバーは、東西南北に配置した各海底局のそれぞれのオフセット値についての基準値からの差の自乗平均値である。図から、同時観測回数が多くなるにつれてエラーバーが小さくなっていることがわかる。

Table 4 から、重心のオフセット値及び各局のばらつきが基準値から 1 cm 以内に収まっている組合せは、6セット以上の同時観測を2回以上実

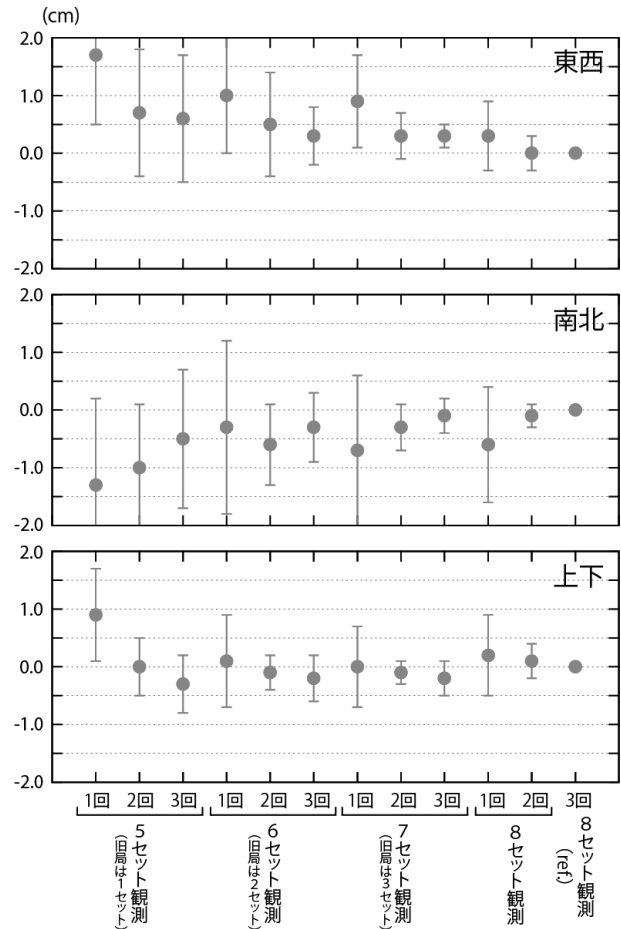


Fig. 5 Estimated position offsets by dataset shown in Table 3.

施した場合であることがわかる。この範囲であれば、ほぼ石川 (2011) と同等の新旧局間相対位置精度は担保されていると言ってよいため、同時観測時間の短縮が可能であると考えられる。

Table 4 Horizontal position offsets in Fig. 5.

単位: cm		5セット観測 (旧局は1セット分)	6セット観測 (旧局は2セット分)	7セット観測 (旧局は3セット分)	8セット観測 (旧局は4セット分)
同時観測回数	1回	東西 1.7 ± 1.2 南北 -1.3 ± 1.5	東西 1.0 ± 1.0 南北 -0.3 ± 1.5	東西 0.9 ± 0.8 南北 -0.7 ± 1.3	東西 0.3 ± 0.6 南北 -0.6 ± 1.0
	2回	東西 0.7 ± 1.1 南北 -1.0 ± 1.1	東西 0.5 ± 0.9 南北 -0.6 ± 0.7	東西 0.3 ± 0.4 南北 -0.3 ± 0.4	東西 0.0 ± 0.3 南北 -0.1 ± 0.2
3回	東西 0.6 ± 1.1 南北 -0.5 ± 1.2	東西 0.3 ± 0.5 南北 -0.3 ± 0.6	東西 0.3 ± 0.2 南北 -0.1 ± 0.3	(ref.)	

※ 数値はオフセット値及び各局のばらつきを示す(本文参照)。

※ 網掛け部分は、オフセット値及び各局のばらつきが1cm以内に収まっているものを示す。

5 おわりに

海底地殻変動観測において使用している海底局はバッテリー駆動であり、更新前後の観測結果の連続性を確保するためには、バッテリーが尽きる前に新規の海底局を投入し、一定期間、新旧局の同時観測をする必要がある。

「熊野灘1」の同時観測の結果を検討したところ、6セット観測を2回の新旧局同時観測でも石川(2011)と同等の新旧局間相対位置精度が担保されることがわかった。

本稿は、「熊野灘1」についてのみ再検討したものであり、今後も今回得られた結果を参考に最適な新旧局同時観測のあり方の更なる連続性の確保の方法の検討を行い、更新作業を進めていくこととしたい。

謝 辞

KGPS解析には、NASA/GSFCのColombo博士開発のソフトウェア「IT」(Colombo, 1998)を用い、KGPS解析の陸上基準点として、国土地理院より電子基準点1秒データを提供いただいている。また、本稿の作成にあたり、藤田雅之国際業務室長に終始適切な助言を賜りました。記して感謝します。

参考文献

- Colombo, O. L (1998), Long-Distance Kinematic GPS, *GPS for Geodesy*, 2nd Edition, pp. 537-567, Springer.
- 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.

- 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.
- 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, 19-22.
- 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, *海洋情報部研究報告*, 48, 26-40.

要 旨

海上保安庁では海底地殻変動観測を継続的に実施しており、観測結果の継続のためにバッテリー式の海底局の更新作業を順次実施している。

海底局更新時に観測結果の連続性を保つ新たな手法として、石川・佐藤(2012)における重心推定法の手法の応用を提案する。また、新旧局同時観測の短縮の可能性について検討を実施した。