

海底地殻変動観測における海底音響基準局の更新

石川直史：航法測地室

Replacement of seafloor stations in seafloor geodetic observation

Tadashi ISHIKAWA : Geodesy and Geophysics Office

Abstract

The Hydrographic and Oceanographic Department of Japan has been carrying out GPS/acoustic seafloor geodetic observation for monitoring crustal movements around offshore plate boundary regions.

A seafloor reference point consists of three or four battery-driven acoustic transponders called "seafloor station". To ensure the continuity of observation, it is necessary to replace transponders before their batteries run out and to connect the observation results before and after the replacement by using the position offsets between old and new transponders.

In 2009, we replaced transponders at reference points KUMA and KAMN and observed new and old transponders simultaneously three times. This report presents the way of replacement and determines the position offsets between the old and new transponders with enough precision.

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（藤田，2006；佐藤・他，2008）。

本観測は、時々刻々と変化する測量船の位置を「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。

海底基準点は、1点につき4局（一部の海底基準点では3局）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配置している。海底局4局の平均（重心）位置を海底基準点の位置として定義し、その年々の変位を求めることで、海底の地殻変動を測定する。

本観測で使用している海底局は、測量船の音響トランスデューサから発信された計測信号を受信し、約1秒後に受信した信号そのものを返信するミラー方式トランスポンダーと呼ばれる物である（浅田・矢吹，2001）。海底局は、耐圧ガラス球の中にリチウム電池のバッテリーと電子回路が納められており、バッテリー寿命は約10年となっている。従って、10年を超えるような長期観測のためには、海底局を順次入れ替えることで観測の継続性を確保する必要があり、そのため、海洋情報部では、2009年度から年に2地点ずつ順次海底局を更新していく計画を立てている。

本稿では、海底局の更新の前後の観測の連続性を確保するための手法を紹介するとともに、実際に

2009年度に更新した海底局の観測データの解析結果について報告を行う。

2 海底局の更新について

海底の地殻変動を把握するという目的のためには、長期間にわたって継続的にデータを取得し続けることが重要である。そのため、海底局の入れ替え前後の観測結果の連続性を保つ必要があり、新旧の海底局の位置座標の差（オフセット値）を正確に決定しなければならない。

海底局の設置は海上からの自由落下によって行われるため、設置位置を精密に制御することは出来ず、設置された海底局の位置座標値は観測データを解析して求めるほかない。

本観測は、GPS電波の伝播経路における大気・電離層の擾乱や海中音波の伝播経路における音速度構造の擾乱などの様々な環境要因によって測位結果に系統的な誤差が生じることがあり、現在の観測における繰り返し測位精度は、条件の良いときで2～3 cm、悪いときで5～10 cmと見積もられている。そのため、既存の海底局のバッテリーが尽きて観測不能になってから新規の海底局を投入した場合、新旧局の位置座標のオフセット値はこの測位精度内でしか求められず、さらに、最後に旧局を観測した時期と新局を投入した時期の違いによる地殻の変動分も加わるため、新旧海底局のデータを一続きとして扱うためには不十分な精度となってしまう。

こうした系統的な誤差を回避し、新旧局の位置座標のオフセット値を正確に求めるためには、旧局の寿命が尽きる前に新局を設置し、新旧局を同一の環境条件のもとで同時に観測することが望ましい。環境要因による系統誤差は新旧の局に同じように影響すると考えられるため、新旧の位置座標の差分を取ることによってその影響が除去されると期待され、その結果として、海底局の絶対的な位置座標の決定精度よりも高い精度で新旧局のオフセット値を求めることが可能となる。

新旧局の同時観測によって十分な精度でオフセット値を求めることができれば、その後は旧局の観測を行わずに、新局のみの観測に移行することにな

る。

なお、更新の際には、1つの海底基準点において8局の海底局を観測することになる。海底局は複数の局を区別するためのM系列による識別信号が設定されているが、既存の海底局では5種類（M01～M05）までしか設定できなかったため、あらたに5種類（M11～M15）を追加し10種類の識別信号を設定できるように海底局を改良した（佐藤，2010）。また、現在使用している局位置解析ソフトSGOBS（藤田・他，2004）では、最大5局までしか解析できないため、最大10局まで解析できるように改良したものをを用いた。

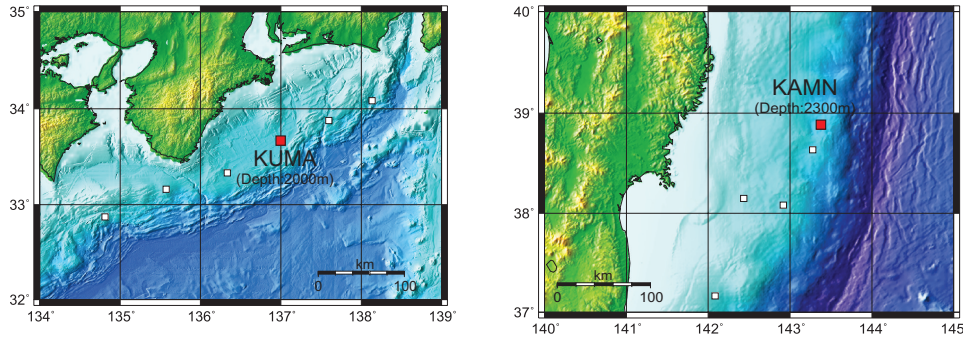
3 熊野灘及び釜石沖2海底基準点の更新

2009年には、2000年の設置以降9年が経過した熊野灘（KUMA）及び釜石沖2（KAMN）の2つの海底基準点について、海底局の更新を行ったので、その結果について報告する。

第1図に両基準点の位置を、第2図に新旧の海底局の位置関係を示す。新規の海底局は基本的に既存海底局とほぼ同一の位置になるように投入を行うが、既に述べたように自由落下による設置のため、100 m前後のずれが生じている。なお、KUMAについては、西側が欠けた3局構成となっていたところ、今回の更新で通常の高底基準点と同様に東西南北の4局構成にした。

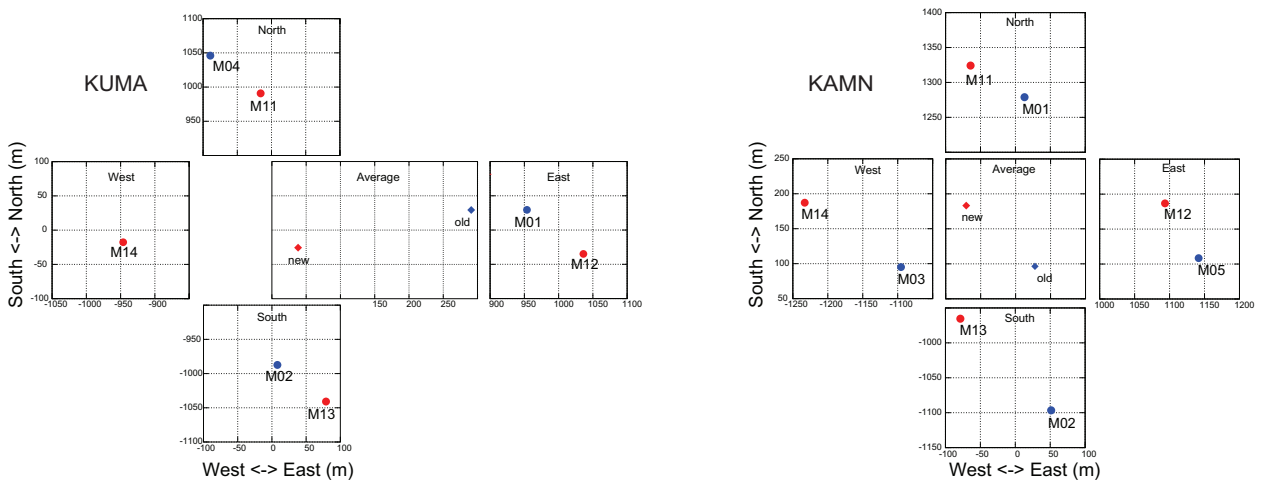
第1表に両海底基準点の観測状況をまとめた。KUMAは2009年10月に、KAMNは2009年12月に新規海底局の投入を行い、投入時を含め2010年8月までに、それぞれ3回の新旧局同時観測を行った。2009年10月のKUMAの観測は支柱式観測システムを用いての漂流観測方式によって行ったが、他の5回の観測は全て船底装備システムによる航走観測方式である（漂流観測と航走観測については、佐藤・他（2009）を参照のこと。）。

本観測では、設定された測線を約4時間で回る観測を1セットとし、1回の観測エポックで4セットの観測を行うことを基本としている。取得する音響測距データは、1セットあたり、海底局1局に対して300～350ショット程度を目安としている。



第 1 図 2009年に海底局の更新を行った熊野灘 (KUMA) 及び釜石沖 2 (KAMN) 海底基準点の位置。

Fig. 1 Locations of seafloor reference points KUMA and KAMN, where the transponders were replaced in 2009.



第 2 図 新旧海底局の投入位置。M 01～M 15の番号は海底局のID番号を表し、青のプロットが既存の海底局、赤のプロットが新規に投入した海底局を表す。new, oldはそれぞれ新局と旧局の平均位置を表す。座標系は局地系座標系 (ENU座標) で、座標原点はそれぞれ、北緯33°40'13.3"東経136°59'43.9" (KUMA)、北緯38°53'10.8"東経143°21'46.8" (KAMN) である。

Fig. 2 Locations of transponders represented by local tangent coordinate system. 'M 01～M 15' stand for ID numbers of each transponder. Blue and red points stand for the old and new transponders, respectively. 'Old' and 'New' stand for the averaged position of the old and new transponders, respectively. The origins of the coordinate system are N 33° 40' 13.3", E 136° 59' 43.9" at KUMA and N 38° 53' 10.8", E 143° 21' 46.8" at KAMN.

第 1 表 今回使用したデータ
Table 1 Data summary used in this study

基準点	観測年月日	船速	セット数	データ数
KUMA	2009年10月29日、30日	漂流	4	6188
	2010年1月15日	5.0kt	4	9543
	2010年8月6日、14日	7.0kt	8	10097
KAMN	2009年12月14日、20日	4.0kt	4	10006
	2010年3月7日	4.5kt	3	7868
	2010年7月11日、14日	7.5kt	8	10885

音響測距観測では、各海底局を1台ずつ順番に観測する方式のため、新旧局を同時に観測する場合、通常よりも倍の観測時間が必要となる。そのため、2009年12月、2010年1月及び3月の観測では、通常よりも半分の船速で観測を行い1セットあたりの時間を通常よりも2倍にすることで必要なデータ数を確保した。しかしながら、低速での観測は測量船の操船の面から好ましくなかったこともあり、2010年7月及び8月の観測では通常と同じ船速で観測を行い、セット数を倍の8セット取得することでデータ数を確保した。

4 結果の評価

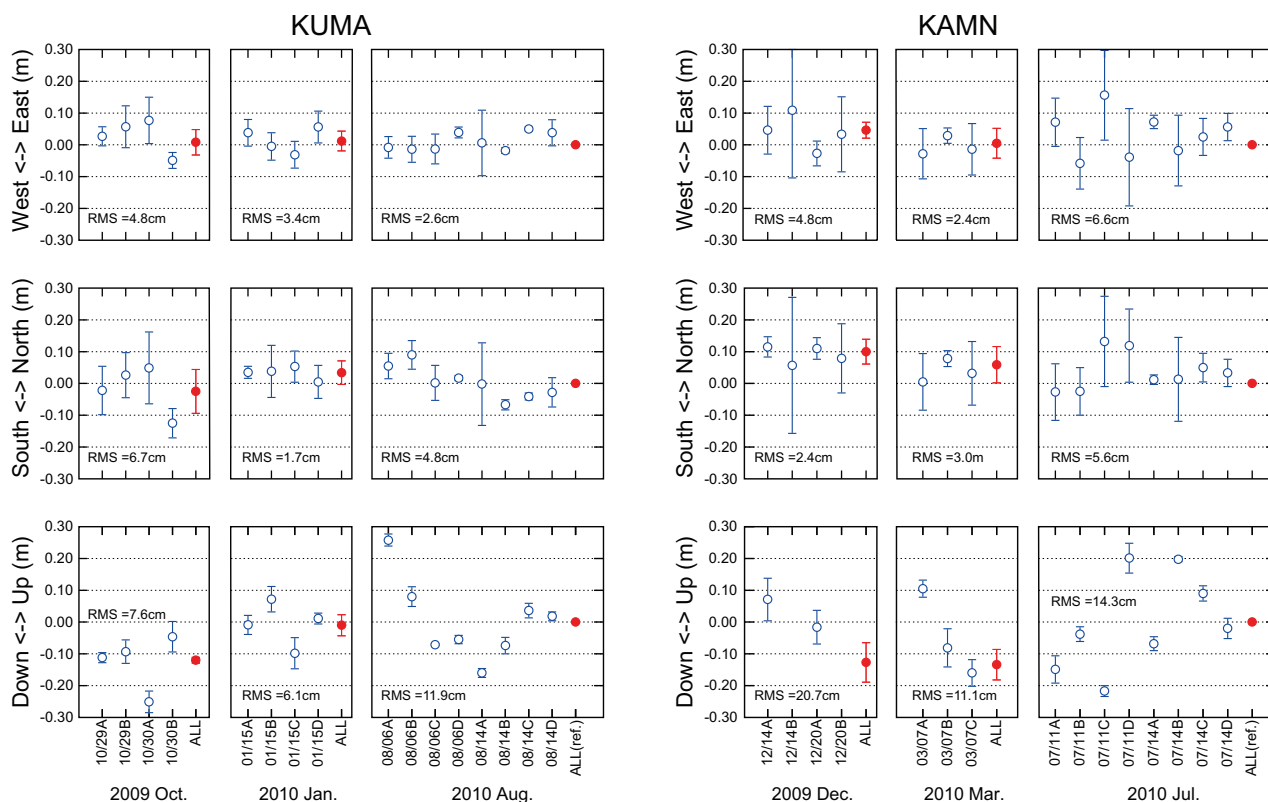
各観測エポックにおける解の精度評価のため、全セット分のデータを使用した解に対する、1セットごとの解（サブセット解）の再現性について評価を行った。なお、上述のように2010年7月及び8月の

観測については、1セットあたりのデータ数が他の航走観測のエポックにくらべ半分となっている。

第3図に、推定された海底局の位置座標の再現性評価の結果を示す。グラフは、海底局の重心位置を、基準値（KUMAは2010年8月の全セット解、KAMNは2010年7月の全セット解）からの差としてプロットしている。エラーバーは、東西南北に配置した各海底局それぞれの位置座標の基準値からの差の自乗平均値であり、海底局間の局所的な相対位置関係のばらつきを表している。

第4図に、新旧局のオフセット値の再現性を示す。グラフは、旧海底局の重心位置と新海底局の重心位置の差を、基準値からの差としてプロットしている。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。

ここで、基準値として用いているのは、松本・他

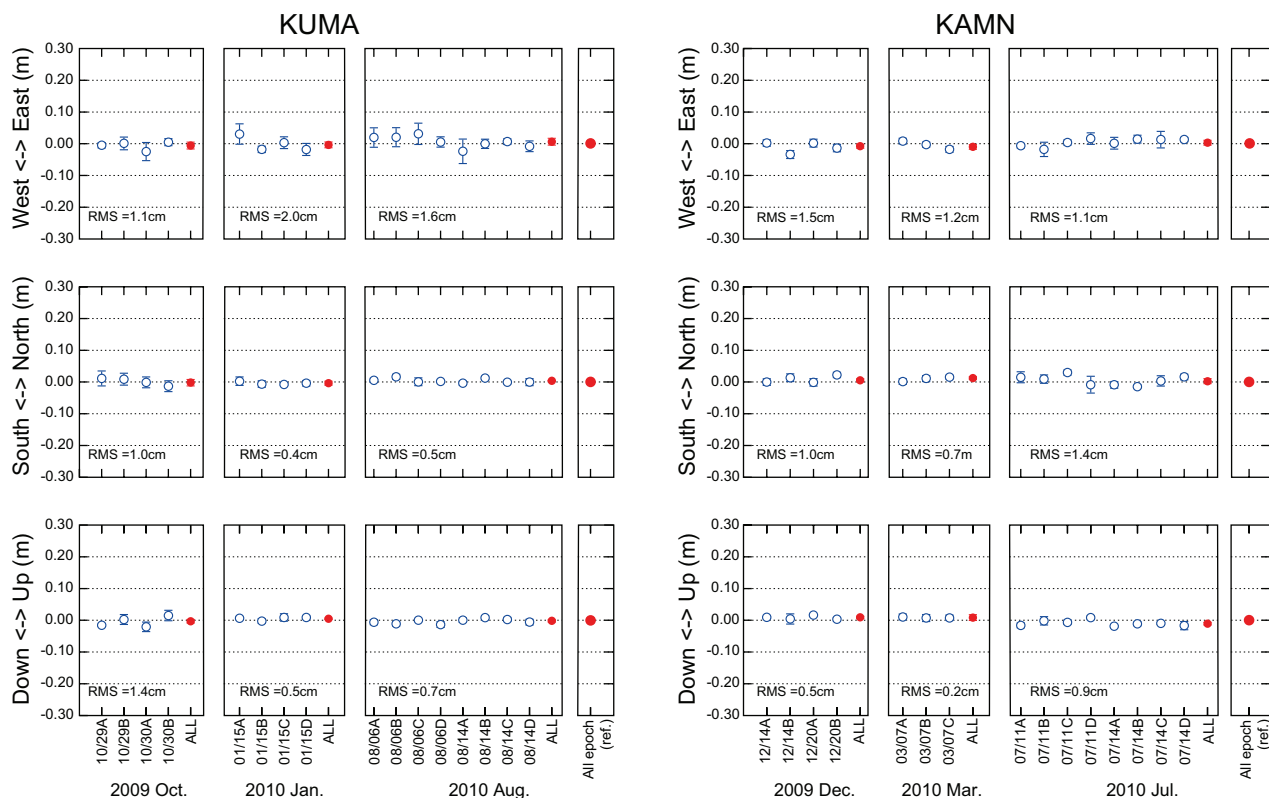


第3図 海底局位置座標のサブセット解の再現性評価の結果。赤丸は各観測エポックにおける全データを使用した全セット解、白抜きの青丸は1セット分のデータのみから求めたサブセット解で、各観測エポック内におけるサブセット解のばらつきのRMSをそれぞれ記載している。

Fig. 3 Subset repeatability of the estimated positions of the transponders. Red and white circles stand for solutions using all set data and one set data, respectively.

(2008) の手法を用いて、3 回のエポック全ての観測データを一括解析して求めた海底局の相対位置関係から求めたオフセット値である。通常の解析では、設置されている 3~4 局の海底局の位置を観測エポックごとに独立に求めている。しかしながら、海底局が設置されている数 km 程度の範囲内では局地的な地殻変動は無いと思われるので、各観測エポックにおいて、各海底局の相対的な位置関係は不変であると考えるのが自然である。松本・他 (2008) の一括解析の手法は、通常、エポックごとに独立に使用しているデータを一括してまとめて解析し、複数エポックにわたる多数のデータを使用した解析を行

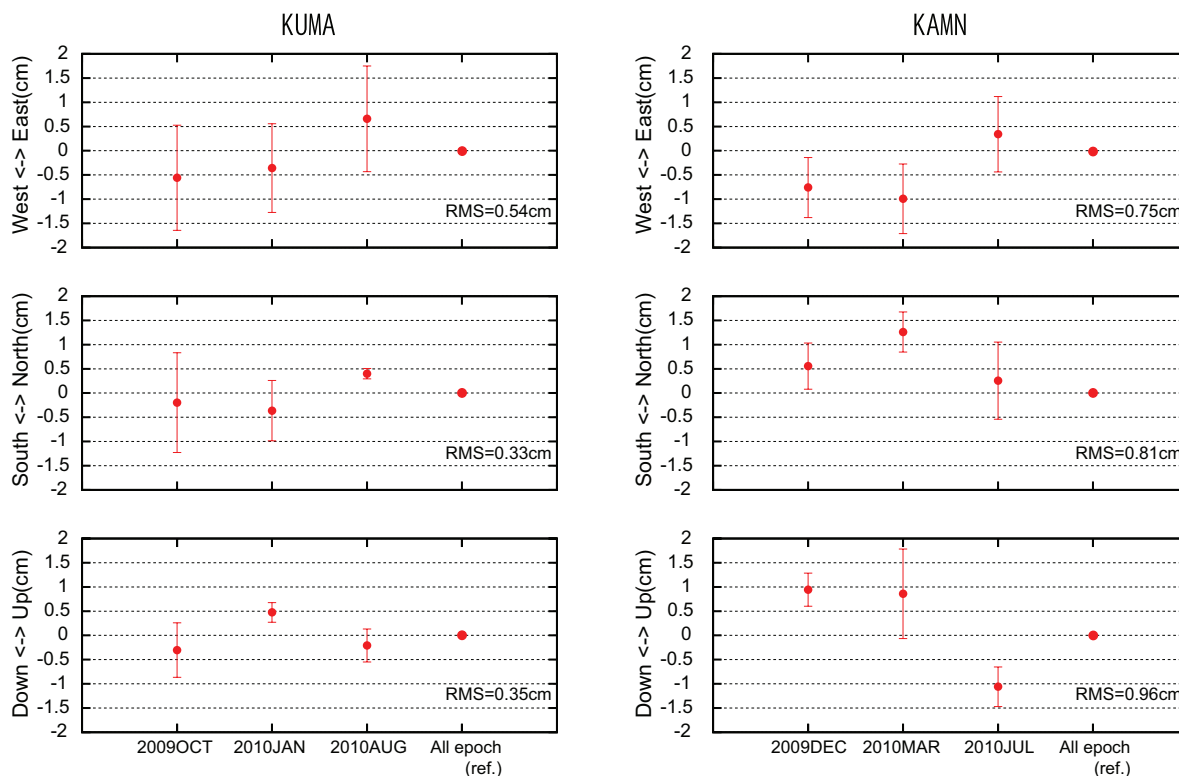
的な地殻変動は無いと思われるので、各観測エポックにおいて、各海底局の相対的な位置関係は不変であると考えるのが自然である。松本・他 (2008) の一括解析の手法は、通常、エポックごとに独立に使用しているデータを一括してまとめて解析し、複数エポックにわたる多数のデータを使用した解析を行



第 4 図 新旧海底局位置のオフセット値のサブセット解の再現性評価の結果。記号の意味は図 3 と同一。
Fig. 4 Subset repeatability of the position offsets. Abbreviations are the same as those in Fig. 3.

第 2 表 新旧局の同時観測で求められた新旧局のオフセット値
Table 2 Position offsets between the old and new transponders obtained in this study

		旧局	新局	位置座標差 (新局 - 旧局 : m)		
		ID		東西	南北	上下
KUMA	北	M04	M11	73.415	-55.008	0.010
	東	M01	M12	82.350	-64.369	-0.069
	南	M02	M13	71.046	-53.658	-0.031
	西	-	M14	-	-	-
	重心位置				-252.541	-55.015
KAMN	北	M01	M11	-77.251	45.178	-0.139
	東	M05	M12	-48.147	78.403	0.289
	南	M02	M13	-130.088	131.325	-0.543
	西	M03	M14	-137.694	92.097	0.103
	重心位置				-98.295	86.751



第5図 3回の観測エポックで得られたオフセット値の再現性評価の結果。基準値（ALL）は全ての観測エポックのデータを一括して解析した結果。

Fig. 5 Repeatability of the position offsets among three observation epochs. The reference value is the result obtained by multi-epoch analysis using all epoch data.

うことで、エポック間で不変な相対位置関係の最確値を推定するものである。従って、一括解析によって求められたオフセット値は取得したデータから得られるもっとも確からしい値となるため、この値を基準値として用いている。具体的な数値を第2表に示す。

第3図、第4図から、位置座標の再現性については、水平方向で10 cm、鉛直方向で20 cm以上のずれを見せる悪い条件のセットがあるのに対し、オフセット値については、1～2 cm以内のばらつきにとどまっていることが分かる。特に海中音速度などの誤差の影響が大きい鉛直方向については、位置座標の再現性は水平方向にくらべて2～3倍悪くなっているものの、オフセット値の再現性は水平方向と同程度となっている。このことは、新旧局の位置座標の差を取ることで、共通の誤差要因が相殺されたためと考えられる。

各エポックの解のばらつきの詳細を見るため、第4図のグラフから各エポックの全セット解（ALL）

及び基準となる一括解析解を抜き出し、縦軸を±2 cmに拡大して描き直したものを第5図に示す。第5図から、3回の観測エポックのオフセット値のばらつきは±1 cm程度に収まっており、新旧のデータの連続性を確保するに十分な精度を持つことが分かる。

5 まとめ

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のため、定期的な更新が必要がある。更新前後の観測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。

今回のKAMNとKUMAの同時観測の結果では、第2表のとおり十分な精度でオフセット値を求めることができた。今後は、旧局の観測は行わず、新局のみの観測に移行することとしている。

また、2010年には、宮城沖1海底基準点及び福島沖海底基準点において更新を行ったほか、2011年以

降も順次更新を行っていく予定となっている。今後、更新を行う海底基準点においても、3回を目安に新旧同時観測を行い、オフセット値を求めていく方針で更新作業を進めていく。

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)を用いた。また、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。記して感謝する。

参 考 文 献

- Colombo, O.L. (1998), Long-Distance Kinematic GPS, in *GPS for Geodesy 2nd Edition*, ed. by P.J.E. Teunissen and A. Kleusberg, pp.537-568, Springer.
- 浅田昭・矢吹哲一朗 (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.
- 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 (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.
- 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・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 (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.