

研究ノート

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

松本良浩*¹, 石川直史*², 藤田雅之*³

Bias estimation of acoustic transducer position for seafloor geodetic observation

Yoshihiro Matsumoto*¹, Tadashi Ishikawa*² and Masayuki Fujita*³

Abstract

Among results of JCG's intensive observation off Miyagi Prefecture, some epochs gave erroneous solutions presumably caused by the bias of acoustic transducer position. We tried simultaneous estimation of the bias of acoustic transducer installation and positions of the seafloor reference points. As a result, we detected significant biases dependent upon difference of used devices i.e. acoustic transducers, observation poles, etc. Correction for these biases gave less scattered time-series of determined positions and reduced residuals of traveltime. This method took effect to improve the accuracy of position estimation of seafloor reference points.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部は、東大生産技術研究所と技術協力を行いつつ、GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発（浅田・矢吹，2001；矢吹，2002）及び海底基準点の展開を行っている。我々の海底基準点は、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（例えば Fujita et. al., 2006 a）。

現在海上保安庁の測量船「明洋」および「海洋」では、海底地殻変動観測の実施の際には船尾ブルワークに全長約 8 m の堅牢な支柱を設置して、上部に GPS アンテナと動揺計測装置、下部に音響トランスデューサを配置している（Fig.1）。GPS アンテナ-音響トランスデューサ間の相対位置関係の定量には、動揺計測の 3 つの計

測軸に一致した直交座標系（前後，左右，上下）に沿って計測した変位量を用いている。動揺計測装置によって計測されるロール・ピッチ・ヘディングの値を用いてこの値を東西・南北・上下の地理座標系に変換し、GPS アンテナの位置座標に加算する（これをポール補正と呼ぶ）ことにより音響トランスデューサの地理座標系による位置が決定される。ここで、相対位置関係の計測誤差や、動揺計測装置の上下の計測軸と実際の観測支柱の軸との不一致は音響トランスデューサの位置決定の誤差要因となり、ひいては海底基準局の位置決定の誤差に波及すると考えられる。

実際、我々が 2005 年に実施した宮城県沖における集中観測の結果を検討したところ、音響トランスデューサ位置のバイアス誤差により局位置解が誤差を持って決定されていると推測される事例

†Received 06 December 2006 ; Accepted 08 February 2007.

*1 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

*2 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

*3 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

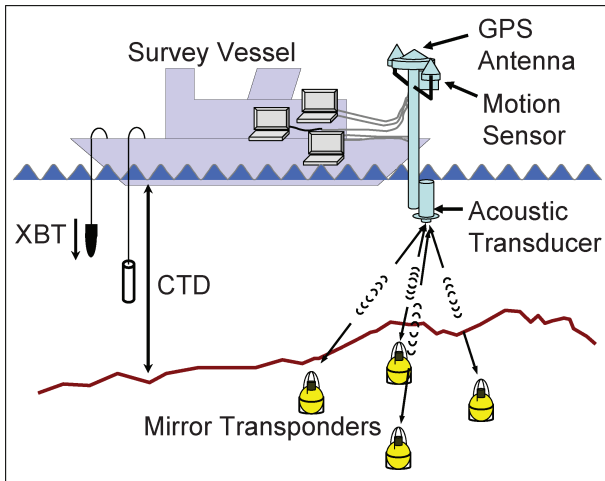


Fig. 1 Schematic picture of the GPS/Acoustic seafloor geodetic observation system.

がいくつかあったことから、局位置解析におけるバイアス誤差の検出とその補正が重要課題となった。

本稿では、海底地殻変動観測において音響測距に用いられる測量船上の音響トランスデューサの据付位置に含まれるバイアス誤差を推定し、これを補正して海底基準局の位置決定の精度向上を図る手法について考察する。

2 宮城沖における集中観測の結果に見る局位置の偏り

2005年4月から10月にかけて、海洋情報部ではFig. 2に示す宮城沖1海底基準点(MYGI)において6エポック(4月, 6月, 7月, 8月, 9月, 10月)の観測を行った。海底地殻変動観測において、同一の観測点に対してこれほど高頻度の観測を行った例はこれまでにはなく、我々の観測手法を検証する上で貴重な検討材料を得ることとなった。Fig. 3に2002年10月から2005年10月までの11エポックの局位置の水平成分の時系列変化を示す。図のプロットは、海底局4局の座標値の平均について、2002年10月の値を基準とした差を表示している。高さ成分は2005年8月の決定値を用いて全エポックについて固定し、水平成分の精度向上を図っている(石川・藤田, 2005)。また、位置の基準は海上保安庁のSLR基準点で

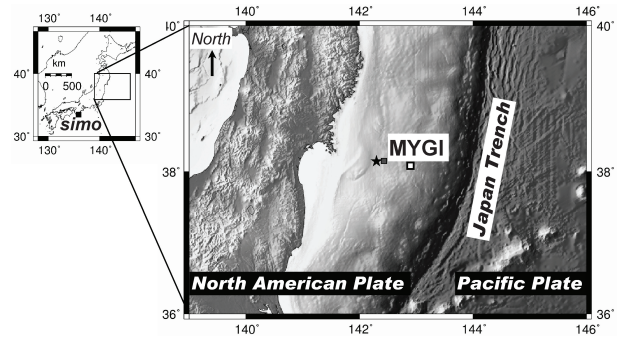


Fig. 2 Location of the seafloor reference point (open square) used in this study shown on the topographic map around northeastern Japan. Also shown is the Shimosato site (a solid square labeled as simo).

ある和歌山県下里(simo)である。この図によると、2005年6月の局位置はそれまでの傾向から10 cm程度北寄りに、また2005年8月の局位置は10 cm弱南寄りに決定されるといった、極端な偏りが起きていた。この偏りはそれまでの解の再現性から大きく外れていたことから、原因追究のため観測データを様々な角度から検討した。その結果、漂流観測における測量船の船首方位に着目するに至った。

我々は観測時には通常、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、クラッチを切り離した状態で波と風まかせの漂流観測を行う(畝見, 2004)。概ね海底局アレイの中心から水深の1~1.2倍程度の円内で観測を行い、潮流によらず移動が必要な際には音響測距を中断して航行する。こうした漂流観測の測線計画と実際の航跡の典型例をFig. 4に示す。Fig. 5に2005年4月, 6月, 7月, 8月の観測エポックにおいて測量船の船首が向いていた方位を測線単位でプロットしたものを示す。実際には船首方位は測線観測中にも潮流や風の影響で時々刻々変化するが、観測開始から約500秒経過後の方位を各測線における代表値として表示している。この海域では通例我々は一つの測線上で10秒間隔・100ショットの音響測距を行っており、例外はあるものの観測開始500秒後はちょうど測線の間中点にあたる。これによると、船首方位は4月, 7月の2エポッ

クでは比較的バランスよく分布していたが、6月には南向きに偏りが、2005年8月には北向きに偏りがあることが見てとれる。これは Fig.5 の中央に示す局位置の時系列に見られる偏りとは正反対に符合している。このことから、音響トランスデューサ位置に船首方向前方へのバイアス誤差を仮定すれば、局位置解の偏りが説明できると推測された。

決定局位置と上記バイアスの関連については定性的には次のように説明されよう。我々が通常の局位置解析に用いているソフトウェア「SGOBS」(藤田・他, 2004)では、Fig.6(a)のような幾何学的原理により、時々刻々 KGPS によって決定された音響トランスデューサの位置を中心として音響測距で得られた距離に相当する円

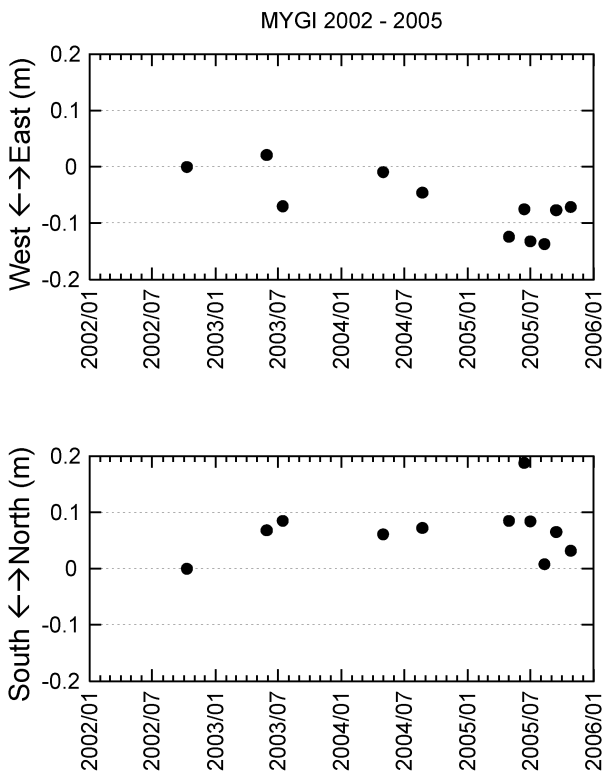


Fig. 3 Time series in the horizontal components obtained at the seafloor reference point MYGI from eleven campaign observations during the period from October, 2002 to October, 2005. The top and bottom panels correspond to the EW and NS components, respectively. The position reference is the Shimosato site, in central Japan. The vertical component is constrained to the height at AUG 2005.

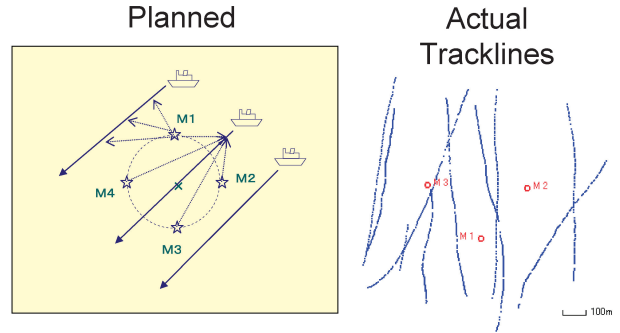


Fig. 4 Typical planned lines and actual tracklines of the drifting observation.

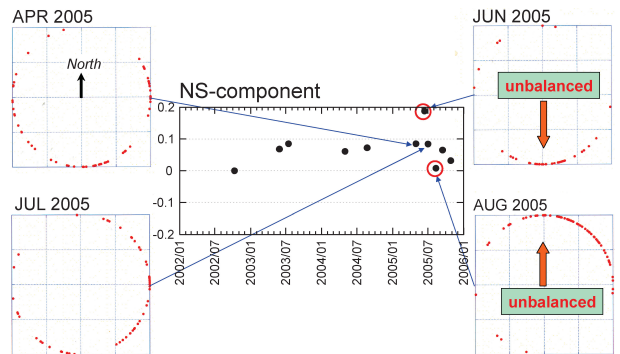


Fig. 5 Relationship between positional error and distribution of heading of the survey vessel. The time series in the center is the NS component of the seafloor reference point MYGI, that is same as Fig. 3. Four scatter charts represent distribution of heading angles of the survey vessel in four observation epochs: each red spot represents the heading angle at each survey line.

弧が多数描かれ、その交点として海底局の位置が最小二乗的に求められる。ここに音響トランスデューサ位置にバイアス誤差があったとしても、観測時の船首の方位が分散していれば Fig. 6(b)のように最小二乗的に誤差は相殺され、本来の局位置と大きく変わらない位置に「虚像」が決定される。一方、観測時の船首の方位が偏っていた場合には相殺効果が働かず、Fig. 6(c)のようにバイアス誤差を反映した「虚像」が決定されることになる。

以上のような考察を基に、次節に述べる手法を用いて、上記バイアスを定量的に求めることを試みた。

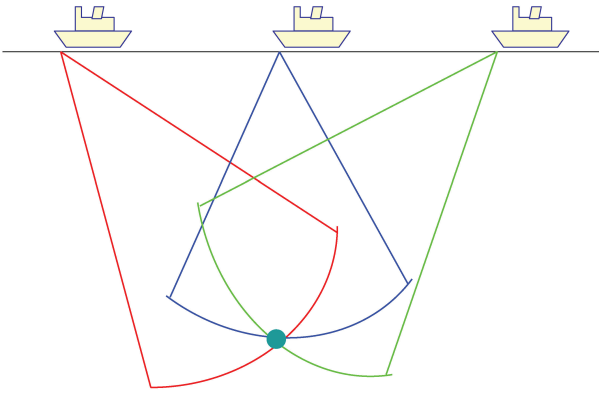


Fig. 6(a) Geometrical principle for positioning of a transponder.

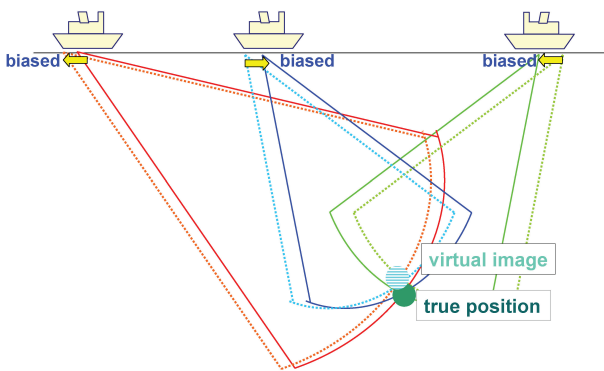


Fig. 6(b) Influence of the bias of the acoustic transducer position upon positioning of a transponder when heading of the survey vessel is well-distributed.

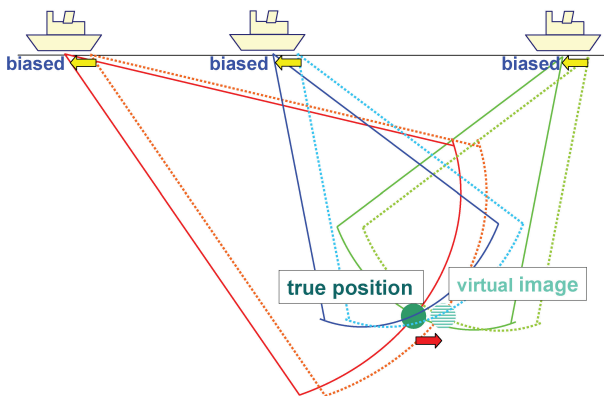


Fig. 6(c) Same as (b) when heading of the survey vessel is unevenly distributed.

3 海底基準局位置と音響トランスデューサ位置のバイアス誤差との同時推定

3.1 局位置解析ソフトウェア「SGOBS」の概要

我々が通常の局位置解析に用いているソフトウェア「SGOBS」(藤田・他, 2004)は, KGPS

解析による GPS アンテナの位置, 音響解析による音波走時, 動揺計測パラメータ (ヘディング, ロール, ピッチ) および海中の音速度構造プロファイルを入力して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 (松浦, 1994) を用いて海底局位置を決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では, 1 点につき原則 4 局の海底局を東西南北に配置している. まずこれら複数局についてそれぞれ同一の音速度構造で局位置解を求めた後, 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. このサイクルを局位置が収束するまで繰り返し, 最終的な局位置解を求める.

なお, 最終成果としては複数の海底局の中心位置 (「仮想基準点」と呼ばれる) を算出する. これは, 「観測データを 3 局又は 4 局の海底局の中心点に対してバランスよく取得することにより, その中心点における海中の音速誤差の水平位置への影響を数 cm 程度に小さくすることができる」 (佐藤・藤田, 2004) ことによる.

3.2 ベイジアンインバージョン法について

この手法は, 正規分布を持つ誤差 e を含む観測データ y^0 とモデルパラメータ x の間に, A を偏微分行列とした線形の観測方程式

$$y^0 = Ax + e \quad (1)$$

が成り立つと仮定し, モデルパラメータの初期値からの誤差分布がアприオリに与えられる場合に, モデルパラメータ解 \hat{x} が次式によって計算されるというものである (松浦, 1994).

$$\hat{x} = x^0 + DA^t (E + ADA^t)^{-1} (y^0 - Ax^0) \quad (2)$$

ここで, x^0 はモデルパラメータ初期値, D はモデルパラメータ海の初期値からのずれを特徴づける共分散行列, E は e の誤差分布を特徴づける共分散行列である.

一般には, 観測データとモデルパラメータの関係は非線形であることがほとんどであるが, その場合でも真値近傍における微小な変化に対しては線形関係が成り立つと仮定し, 与えた初期値

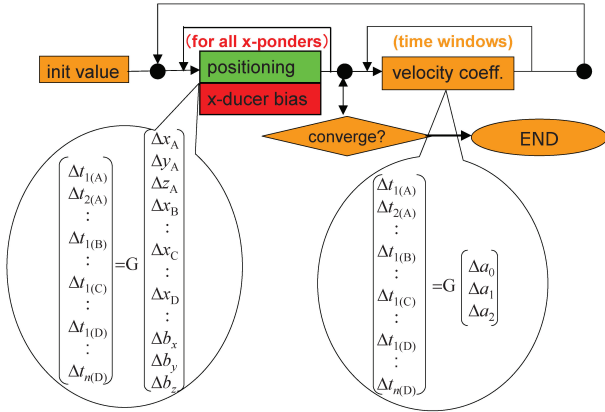


Fig. 7 Algorithm of parameter estimation applied to get the seafloor station position using the round-trip travel time of acoustic waves

と真値との差を解として求める。これは式 (1) および (2) において、 $x^0 = 0$ として y^0 と x をそれぞれ初期値に対する Δ 値と考えることに相当する。そして、実際的非線形の影響については、繰り返し計算により真値に収束させる。

ベイジアン手法、すなわちモデルパラメータの共分散行列 D を導入する意味は、初期値の信頼性に依って拘束をかけられることである。その最も簡単な適用例として、パラメータの固定、推定の選択を D の対角成分により自由に設定できることがある。

3.3 モデルパラメータと観測方程式

観測方程式は局位置解を求める部分と音速度構造を求める部分との2つに分かれている (Fig. 7)。本研究に際し、局位置を求める部分で同時に音響トランスデューサ位置のバイアス誤差を推定するよう、モデルパラメータを変更した。

(a) 海底局位置の推定

式 (1) のモデルパラメータを設定する上で、藤田・他 (2004) とはアルゴリズムを変更した。藤田・他 (2004) では、複数ある海底局の局位置解をそれぞれ同一の音速度構造を用いて個別のインバージョンで局位置解を求めた。今回推定しようとする音響トランスデューサ位置のバイアスは、海底局の区別なく一つの観測エポックに対し

で一組決定されるべきパラメータである。このため、複数局の局位置と音響トランスデューサ位置のバイアスをモデルパラメータとし、一括してインバージョンを行うこととした。

これに従って、式 (1) の観測データ y^0 は、海底局を A~D の4局とすると、以下のように記述される。

$$y^0 = \begin{pmatrix} \Delta t_{1(A)} \\ \Delta t_{1(B)} \\ \Delta t_{1(C)} \\ \Delta t_{1(D)} \\ \vdots \\ \Delta t_{n(D)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

右辺は、KGPS 解析と動揺補正により求められたトランスデューサの位置と各海底局の初期位置座標から音速度構造を用いて計算された往復走時と、観測された往復走時の差の時系列を表している。

また式 (1) のモデルパラメータには、海底局 A~D の位置座標 (ローカル座標系の3成分) と、動揺計測の3つの計測軸に一致した直交座標系 (前後, 左右, 上下) に沿って与えられる3成分のトランスデューサ位置のバイアス (b_x, b_y, b_z) を設定する。実際にはモデルパラメータ x は、それぞれの初期値からの補正量として次のように表現される。

$$x = \begin{pmatrix} \Delta x_A \\ \Delta y_A \\ \Delta z_A \\ \vdots \\ \Delta x_D \\ \vdots \\ \Delta b_x \\ \Delta b_y \\ \Delta b_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

(b) 音速度構造の推定

従来 SGOBS では、音速度構造を推定パラメータとすることにより、誤差の補正を試みている (藤田・他, 2004)。本研究においても、音速度構造の推定を行うプロセスには違いがないため、概

略を述べるにとどめる。

音速度構造を求める部分の観測データ y^0 は海底局を4局 (A~D) とすると、例えばタイムウインドウ

$$[t_k (A), t_k (B), t_k (C), t_k (D), \dots, t_l (D)]$$

について、以下のように記述される。

$$y^0 = \begin{pmatrix} \Delta t_k (A) \\ \Delta t_k (B) \\ \Delta t_k (C) \\ \Delta t_k (D) \\ \vdots \\ \Delta t_l (D) \end{pmatrix} \quad (5)$$

音速度構造推定におけるモデルパラメータは、音速度の時間変化を三次式で表したときの係数としている。推定を行う各タイムウインドウにおいて、平均音速度の時間関数 $V(t)$ を

$$V(t) = V(t_0) + a_0 + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 + a_3(t-t_0)^3 \quad (6)$$

と表すと、モデルパラメータ x はその係数の補正值として次式のように表現される。

$$x = \begin{pmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式 (6) において、 t^0 は各タイムウインドウにおける基準時刻、 $V(t^0)$ は音速度初期値の t^0 における値である。

4 解析の対象

現在の海上保安庁の海底地殻変動観測では、海底局位置の決定精度を維持するため、1 エポックについて4日以上 の観測データを確保することを原則としている。以下の解析においては、現行の観測支柱を用いて4日以上 の観測データが取得されているキャンペーン観測を対象として、各回の全データによる局位置と音響トランスデューサ位置バイアスの同時推定を行うこととした。2002年8月から2006年5月までのキャンペーン観測が解析の対象となった。このうち、①測量船「海洋」と「明洋」では別々の支柱を用いて観測を

行っている、②2003年9月より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、収録データの時刻同期の精度が向上した、③2004年10月より新型音響トランスデューサを導入し、各海域で段階的に使用を開始した、というような観測ハードウェアの差異(成田・他, 2005)に伴い、データの品質に違いがあるため、結果を考察するにはこれらを区別する必要がある。これを考慮し、測量船別(明洋・海洋)および期間別に6グループに分類した。期間の区別は次のとおりである。

第I期: ルビジウム発振器なし・旧型音響トランスデューサ使用

第II期: ルビジウム発振器あり・旧型音響トランスデューサ使用

第III期: ルビジウム発振器あり・新型音響トランスデューサ使用

解析の対象となったキャンペーン観測の概要をTable 1に示す。なお、2節で船首方位の偏りを指摘した2005年6月のエポックは観測日数が3日しかなかったため、解析対象には含まれていない。

なお、音響トランスデューサ位置のバイアスは前後と左右の2成分のみを推定し、上下成分は0として拘束した。これは、バイアスの上下成分、局位置解の鉛直成分および音速度構造の3者の間で推定パラメータの分離が悪く、解が安定しなかったことによる。

なお、音響信号波形から往復走時を決定する音響解析には相関解析を用いたソフトウェア sas ver. 1.2.0 (富山, 2003) を、KGPS 解析には IT ver 3.4 (Colombo 1998) を用いた。

5 結果と考察

5.1 バイアス同時推定の結果

Table 2に観測エポック毎に推定(初期値は0)した音響トランスデューサ位置のバイアス値を示す。前述のような観測ハードウェアの差異を考慮し、測量船別(明洋・海洋)および期間別に6グループに分けてバイアス値の平均と標準偏差

Table 1 List of observed data used for estimation of the bias of acoustic transducer, classified according to used survey vessels and acoustic transducers.

Period	S/V	X-ducer	Rb Oscillator	observation site and epoch	observed date	observed days	# of acoustic ranging	
I	Kaiyo		not used	MYGI 0307	2003. 7. 12-17	6	7084	
				SIOE 0309	2003. 3. 9-12	4	3104	
				SIOW 0308	2003. 8. 24-27	4	3797	
	Meiyo			MYGI 0305	2003. 5. 26-6. 4	6	6430	
				FUKU 0306	2003. 6. 7-10	4	4857	
				TOKW 0208	2002. 8. 8-11	4	4647	
II	Kaiyo	old		MYGI 0404	2004. 4. 24-5. 7	8	9278	
				MYKA 0402	2004. 2. 13-19	4	2959	
				SIOE 0409	2004. 9. 20-25	6	7452	
				SIOW 0406	2004. 6. 6-9	4	5260	
				TOKW 0408	2004. 8. 3-6	4	4869	
	Meiyo			MYGI 0408	2004. 8. 19-27	4	4912	
				SAGA 0401	2004. 1. 10-15	6	7101	
				SIOE 0407	2004. 07. 06-12	4	5477	
				SIOE 0411	2004. 11. 12-15	4	4698	
				TOKW 0407	2004. 7. 1-5	4	5261	
III	Kaiyo	new		MYGI 0504	2005. 4. 22-5. 9	6	7923	
				MYGI 0507	2005. 7. 1-4	4	5321	
				MYGI 0508	2005. 8. 9-14	6	7408	
				MYGI 0509	2005. 9. 9-18	5	5921	
				MYGI 0510	2005. 10. 22-30	6	6314	
				MYGW 0504	2005. 4. 29-5. 3	4	4486	
				MYGW 0506	2005. 6. 3-7	5	5817	
				MYGW 0508	2005. 7. 31-8. 5	6	9091	
				MYGW 0509	2005. 8. 29-9. 2	5	7015	
				MYGW 0510	2005. 10. 10-21	6	7011	
				SAGA 0501	2005. 1. 30-2. 3	4	5224	
				SAGA 0601	2006. 1. 10-16	6	6603	
				Meiyo	MYGW 0602	2006. 2. 19-3. 5	6	5415
					SIOE 0605	2006. 5. 29-6. 3	4	4841

を求めた。

上述した 2005 年 6 月および 8 月の観測エポックはいずれも第 III 期に属し、測量船「海洋」によって行われた。このエポックに対応するバイアス値は概ね船首方向に 9 cm と求められており、2 節におけるバイアスの存在予想と良い一致を示している。

5.2 ルビジウム発振器の有無について

第 II・III 期におけるバイアス値各成分の標準偏差は概ね 2 cm 以内に収まっているのに対して、第 I 期では 3 cm 以上、特に明洋における y

成分のバイアスは標準偏差が 10 cm にも及ぶなど、ルビジウム発振器を導入していなかった第 I 期においては、ルビジウム発振器導入後と比較してバイアス推定の再現性が劣っていると見られる。ルビジウム発振器が無かった時期には、観測データ収録 PC の内蔵時計の発振精度や LAN 接続によるデータ通信の遅延等の要因により、音響測距・動揺計測・GPS 観測の 3 者間の時刻同期精度が低かったため（成田・他，2005）、刻時誤差がバイアス推定値に混入していると考えられる。このことはルビジウム発振器の導入が我々の観測システムの計測精度向上に寄与したことを示

Table 2 Statistics of estimated biases for each epoch according to used survey vessels and acoustic transducers.

period	S/V	X-ducer	Rb Oscillator	observation site and epoch	observed days	biases (m)		mean bx SD bx	mean by SD by		
						bx	by				
I	Kaiyo	old	not used	MYGI 0307	6	0.0284	0.0694	-0.0117	0.0491		
				SIOE 0309	4	-0.0455	0.0577			0.0374	0.0258
				SIOW 0308	4	-0.0180	0.0201				
	Meiyo			MYGI 0305	6	0.0497	0.0528	0.0079	-0.0272		
				FUKU 0306	4	-0.0103	0.0091			0.0363	0.1031
				TOKW 0208	4	-0.0158	-0.1435				
II	Kaiyo	old	used	MYGI 0404	8	0.0442	0.0358	0.0278	0.0380		
				MYKA 0402	5	0.0414	0.0181			0.0197	0.0129
				SIOE 0409	6	0.0087	0.0379				
				SIOW 0406	4	0.0040	0.0521				
				TOKW 0408	4	0.0408	0.0463				
	Meiyo			MYGI 0408	4	-0.0217	-0.0325	-0.0350	-0.0539		
				SAGA 0401	6	-0.0277	-0.0813			0.0189	0.0177
				SIOE 0407	4	-0.0265	-0.0526				
				SIOE 0411	4	-0.0309	-0.0478				
				TOKW 0407	4	-0.0683	-0.0555				
III	Kaiyo	new	used	MYGI 0504	6	-0.0077	0.0983	0.0035	0.0868		
				MYGI 0507	4	-0.0019	0.1434			0.0184	0.0293
				MYGI 0508	6	0.0022	0.1142				
				MYGI 0509	5	-0.0329	0.0515				
				MYGI 0510	6	0.0233	0.0899				
				MYGW 0504	4	0.0137	0.0573				
				MYGW 0506	5	-0.0046	0.0577				
				MYGW 0508	6	0.0276	0.0524				
				MYGW 0509	5	-0.0192	0.0894				
				MYGW 0510	6	0.0262	0.1203				
				SAGA 0501	4	0.0049	0.0899				
				SAGA 0601	6	0.0106	0.0771				
				Meiyo	MYGW 0602	6	-0.0551			-0.0470	-0.0562
	SIOE 0605				4	-0.0573	-0.0367	0.0016	0.0073		

していよう。

5.3 観測支柱と音響トランスデューサの型式の違いについて

第II期と第III期の解析結果からは、バイアス値が有意に存在するとともに、支柱毎にバイアス値が異なるのはもとより、同一の測量船・支柱を用いても音響トランスデューサの形式によってバイアス値が異なっているということが示されている。

そもそも我々は継続的に観測の品質を維持できるように、音響トランスデューサの先端が新旧とも全く同じ位置になるように支柱への取り付け方法を工夫してきた。にもかかわらず今回の解析結果

からは、実際には異なったバイアスを持っていることを示唆している。この要因はいくつか考えられる。

- ①音響トランスデューサの実際の音響中心の正確な位置が異なる。
- ②動揺計測の3軸と支柱の上下・左右・前後の方向にずれがある。
- ③ポール補正には支柱の設計上の値を用いているが、実際には支柱が変形している。
- ④さらに観測時に支柱及び音響トランスデューサが水流から抵抗を受けてしまっている。

①については望月・他(2007)により検討が進められているが、今回のように音響中心が水平方向に偏りを持っているかどうかは現在のところ明

らかになっていない。

②③④については、実際の観測に使用している環境において支柱の形状を精密に実測することが不可能であるため、現状ではこれを検証することが困難である。

特に④については、音響トランスデューサの形状の違いからしなりの大きさ・方向に違いが生じ、推定バイアス値の差につながったとも考えられる。今回の手法によって推定されるバイアス値は観測エポックに対して一組であることから、④の影響に対しては短周期の振動が相殺されたエポック中の平均的なバイアス値を推定していると考えられる。

現段階では残念ながら、解析的に推定されたバイアス値が持つハードウェア上の意味を検証するには至っていない。だが、バイアス値が有意に存在するという事は、我々がこれまでに持たなかった知見であり、これを何らかの方法で補正することが海底局の位置決定精度の向上につながると期待される。

6 バイアス補正とその効果

推定されたバイアスを補正して局位置解の時系列変化が改善されるかどうかを、Fig. 3と同様の宮城沖1海底基準点における2002年10月から2005年10月までの11観測エポックのデータを再解析して検証する。具体的にはTable 2で得られた各期間別、各支柱・測量船別に求められた平均的なバイアス値をポール補正量に加算することでバイアス補正とする。

この際、第I期と第II期では音響トランスデューサ・動揺計測装置・GPSアンテナの据付条件は同じであることから、バイアス補正を第I期の観測データに行う際には、第II期の平均的なバイアス値を遡って適用することが精度面では有利であると考えた。この結果、バイアス補正值の内訳はTable 3のようになった。なお、第III期の「明洋」に対しては、観測エポックが2つしかなく、しかも宮城沖1においては実施されていないことから、Table 3に示すバイアス値は暫定

的なものであると同時に、以下の解析では使用していない。

Fig. 8に2002年10月から2005年10月までの11エポックの再解析で得られた局位置の水平成分の時系列変化を示す。高さ固定を行ったことおよび位置の基準についてはTable 2と同様である。この結果をFig. 3と比較すると、2005年6月および8月の極端な位置の偏りは大きく取り除かれ、その他のエポックについても全般にばらつきが軽減されていることがわかる。

かつてFujita et al. (2006 a)は、この海底基準点における2005年4月までの観測結果から、ユーラシアプレートに対するこの地点の速度ベクトルを西北西(方位角295度)に8.5 cm/年と求めたが、Fujita et al. (2006 b)は、2005年8月までのエポックに対してバイアス補正を適用した上記の再解析結果を用いて速度ベクトルを再計算した。この結果、西北西(方位角300度)に7.3 cm/年という値が得られ、直線回帰の標準誤差は東西成分で0.7 cm/年から0.5 cm/年に、南北成分で0.9 cm/年から0.5 cm/年に改善された。

ところでTable 2で得られたバイアス値は、観測を実施した数年間の平均的なバイアス値を観測機材の組み合わせごとに求めたものといえる。だが、実際には観測機材は取り外しが行われるため、観測エポック毎に観測機材の据付状態が異なるということが考えられる。また、支柱等の形状の経年変化も当然起こり得る。これらの事情を考慮しようとするれば、むしろ上記の平均的なバイアス値による補正をグループ内で一律に適用するのは必ずしも適切とはいえないことになる。

Table 3 Values of bias correction adopted to reanalysis. Corrections for Meiyō in period III are temporary values.

period	S/V	bias correction	
		bx (m)	by (m)
I and II	Kaiyo	0.03	0.04
	Meiyō	-0.04	-0.05
III	Kaiyo	0.00	0.09
	Meiyō	(-0.06)	(-0.04)

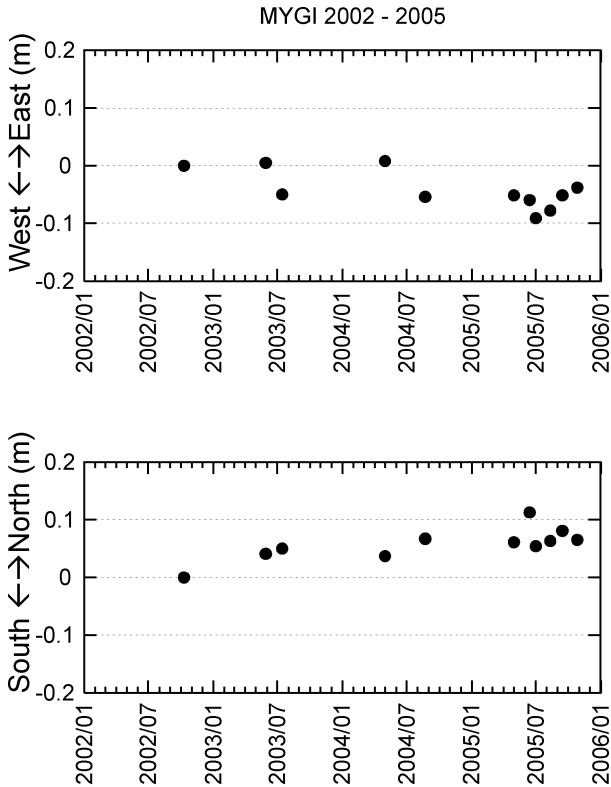


Fig. 8 Same figure as Fig. 3 for the result of reanalysis corrected with mean bias of acoustic transducer position.

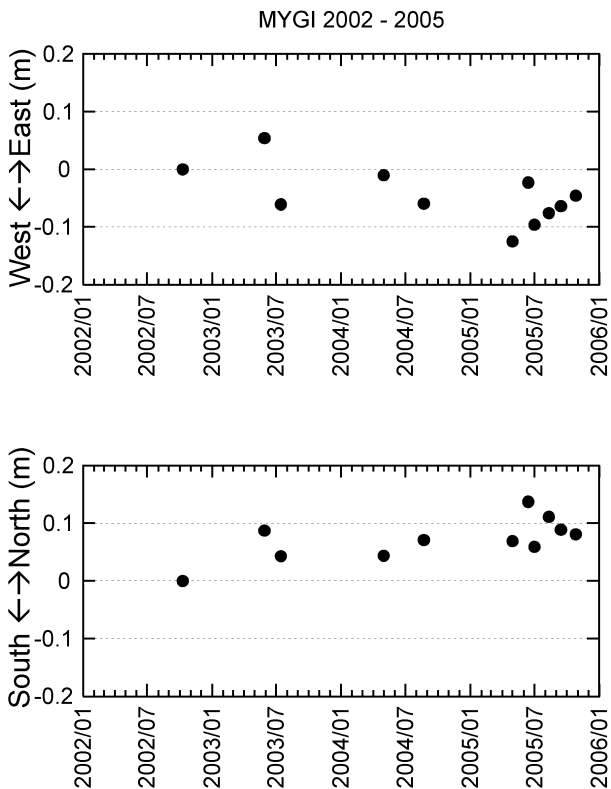


Fig. 9 Same figure as Fig. 3 for the result of simultaneous estimation of station positions and the bias of acoustic transducer position.

そこで比較のために、エポック毎のバイアスとともに同時決定された局位置の水平成分の時系列変化を Fig. 9 に示す。この時系列プロットにおいては、観測日数が4日に満たないエポックに対してもバイアス同時推定を行っている。高さ固定を行ったことおよび位置の基準については Fig. 3 および Fig. 8 と同様である。この結果を見ると、2005年6月および8月の極端な位置の偏りが取り除かれている点は同様であるが、全体のばらつきはバイアス無補正の Fig. 3 と比較してもむしろ大きくなっているように見える。同時推定されたバイアス2成分は、各エポックにおいて必ずしも十分に実態のバイアスを補正しきれてない場合があり、さらには、観測データに含まれる何らかの別の要因をバイアスに押しつけている可能性もある。これらの比較は、むしろ一定の平均的なバイアス値を適用したほうが、実用上は良い補正となっていることを示している。

上記の①バイアス無補正 (Fig. 3), ②平均的なバイアス値による補正 (Fig. 8), ③バイアス同時推定 (Fig. 9) による解析の結果、残差がどのように変化しているかを Table 4 で比較した。③においては全てのエポックで残差が減少した一方で、②においても第I期の2つのエポックを除いて同等に残差が減少している。一般に推定パラメータを増やせば残差を小さくすることは可能であるが、一定とみなしても確からしいパラメータであれば推定しないほうがむしろ解は安定すると考えられ、この意味で平均的なバイアス値による補正を適用する効果は十分にあったと考えられる。

以上のような検討から、現在の我々の局位置解析では、Table 3 に示されたバイアス補正值を使用することとしている。だが、既に考察したとおり、エポック毎の観測機材の据付状態の変化や支柱の形状の経年変化が否定されるものでは決してなく、これに対しては引き続き注意を払っていく必要がある。今後もデータの蓄積に伴って推定されるバイアス値をチェックし、有意な変化があれば補正值の再検討を行う必要があるだろう。また、第

Table 4

period	S/V	X-ducer	Rb Oscillator	observation epoch	observed date	Observed days	residual RMS (msec)				
							①w/o bias correction	②corrected w/ mean bias rate of change	③simultaneous estimation rate of change		
I	Kaiyo	old	not used	MYGI 0210	2002.10.09-10	2	0.0639	0.0694	8.6%	0.0631	-1.3%
	Meiyo			MYGI 0305	2003.5.26-6.4	6	0.0940	0.0953	1.4%	0.0928	-1.3%
	Kaiyo			MYGI 0307	2003.7.12-17	6	0.0766	0.0746	-2.6%	0.0738	-3.7%
II	Kaiyo	new	used	MYGI 0404	2004.4.24-5.7	8	0.0639	0.0620	-3.0%	0.0612	-4.2%
	Meiyo			MYGI 0408	2004.8.19-27	4	0.0642	0.0614	-4.4%	0.0621	-3.3%
III	Kaiyo			MYGI 0504	2005.4.22-5.9	6	0.0770	0.0686	-10.9%	0.0717	-6.9%
				MYGI 0506	2005.6.13-15	3	0.0504	0.0479	-5.0%	0.0474	-6.0%
				MYGI 0507	2005.7.1-4	4	0.0737	0.0690	-6.4%	0.0684	-7.2%
				MYGI 0508	2005.8.9-14	6	0.0476	0.0453	-4.8%	0.0460	-3.4%
				MYGI 0509	2005.9.9-18	5	0.0747	0.0699	-6.4%	0.0733	-1.9%
MYGI 0510	2005.10.22-30	6	0.0863	0.0835	-3.2%	0.0839	-2.8%				

III期の測量船「明洋」に対する暫定バイアス値については、今後データを蓄積して適切な補正值を決定し、再解析する必要がある。

7 まとめ

海上保安庁が2005年に実施した宮城県沖における集中観測の結果を検討したところ、音響トランスデューサ位置のバイアス誤差により局位置解が誤差を持って決定されていると推測される事例がいくつかあったことから、これまでに蓄積された観測データを対象として、局位置と音響トランスデューサ位置バイアスの同時推定を行った。観測ハードウェアの差異を考慮し、測量船別（明洋・海洋）および期間別に6グループに分類してバイアス値を集計した結果、グループ毎に有意なバイアス値が決定された。このグループ毎のバイアス値を補正して「宮城沖1」の観測データの再解析を行った結果、時系列変化のばらつきが改善された。但し、エポック毎の観測機材の据付状態の変化や支柱の形状の経年変化に対しては今後も注意を払い、補正值の再検討を行っていく必要がある。

今回のバイアス推定の結果は、特にルビジウム発振器導入後の我々の観測システムにおいて得ら

れるデータがこのようなバイアスを検出し、分離できるだけの精密な情報を含んでいるということを示しており、システムの信頼性を傍証しているといえよう。

また、今回2節のような考察を基に、漂流観測時には船首の方位を分散させるように注意を払えば、決定局位置に対するバイアスの影響を最小二乗的に低減させることができ、またバイアスを検知する上でも有利であるということが、我々の観測上の指針として新たに付け加えられたことは特記する必要がある。

謝 辞

NASA/GSFCのColombo博士にはKGPS解析のソフトウェア「IT」を提供していただいた。KGPS陸上基準点の一部は、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。海底地殻変動観測は、航法測地室衛星測地担当職員、測量船「明洋」および「海洋」乗組員並びに東京大学生産技術研究所浅田研究室の各氏ほか多くの方々の協力の下に実施されている。記して感謝いたします。

要 旨

海上保安庁が2005年に実施した宮城県沖における集中観測の結果を検討したところ、音響トランスデューサ位置のバイアス誤差により局位置解が誤差を持って決定されていると推測される事例が見つかった。そこで音響トランスデューサ位置のバイアス誤差と海底基準局の位置の同時推定を試みた結果、観測支柱や音響トランスデューサ等の使用機器の違いによってそれぞれ異なるバイアス値が有意に求められた。これらのバイアスを補正することによって海底局位置の時系列のばらつきが改善され、残差も減少した。この手法は局位置決定の精度向上に効果を上げていると考えられる。

参考文献

- 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. (1998), Long-Distance Kinematic GPS, in *GPS for Geodesy 2nd edition*, edited by Teunissen, P. J. G. and Kleusberg, A, pp. 537-568, Springer, Berlin.
- 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. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, 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, 592-603.
- 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.
- 松浦充宏, インバージョン解析法, *現代測地学*, 「現代測地学」編集委員会編, 477-482, 日本測地学会, 東京.
- 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・松本良浩・藤田雅之・浅田 昭 (2007), 海底地殻変動観測用トランスデューサの音響中心, *海洋情報部研究報告*, **43**, 29-36.
- 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.
- 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.
- 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.
- 矢吹哲一郎 (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.