

海底地殻変動観測における局位置決定再現性の評価†

藤田雅之 , 佐藤まりこ

Examination on Repeatability of Precise Seafloor Positioning

Masayuki FUJITA , Mariko SATO

Abstract

Repeatability of the precise GPS/Acoustic seafloor positioning was examined using observation data acquired at the Off-Miyagi reference point with a water depth of 1700m located on the landward slope of the Japan Trench. Using three campaign epochs with comparatively many observation days, estimated coordinates of the seafloor stations from various data subsets within one epoch were compared. Results from two epochs show the subset positioning repeatability of several centimeters in the horizontal components, which satisfies our current target precision. However, one of the epochs gives the difference of several tens of centimeters in the estimated positions between the first and second half of the campaign period. An error source could be attributed to the unstable condition in the underwater sound velocity structure implied by the CTD measurement results. Comparison of the positioning results between different campaign epochs shows that inter-epoch repeatability is within the range of error comparable to the subset repeatability obtained in this study, in consideration of the possible stationary intraplate crustal deformation in this region.

Key words: precise seafloor positioning, Off-Miyagi reference point, repeatability

1. はじめに

海洋情報部では、東京大学生産技術研究所との技術協力の下、GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発(浅田及び矢吹, 2001; 矢吹, 2002)及び海底基準点の展開を行っている。現在までに我々の設置した海底基準点は、主に日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に十数点あり、各点で測量船によるキャンペーン測位観測を繰り返し実施している(海上保安庁海洋情報部及び東京大学

生産技術研究所, 2002; Mochizuki et al., 2003)。

これらの基準点の中には、観測時の天候条件が悪いなどの理由から、まだ精度よく位置決定を行うために十分なデータが取得されていない点も多いが、「宮城県沖」に設置した海底基準点では、同海域における大地震の発生予測確率が高いこと、ならびに海底測地精度を検証する目的からも、何度か強化観測を行っており、相対的に充実したデータ量が確保されている。

本稿では、宮城県沖海底基準点で行われたキャ

† Received December 4, 2003; Accepted February 27, 2004.

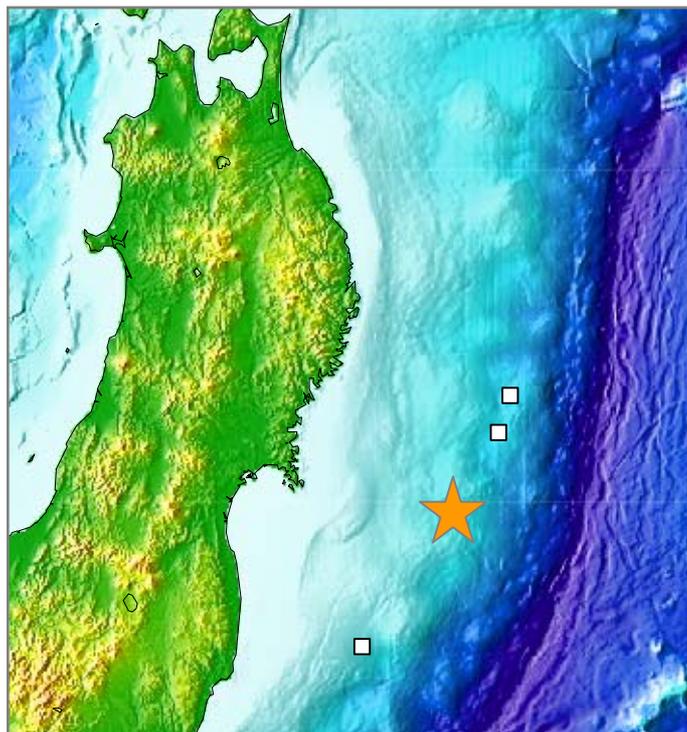


Fig.1 Map showing the location of the Off-Miyagi seafloor reference point with a solid star.

Table 1 Number of data for the Off-Miyagi reference point for the 3 epochs used in this study.

EPOCH	2002/5	2003/5	2003/7
Observation days	4	6	6
Observation lines	47	29	60
Shots	3994	6448	7157

ンペーン測位観測から，特に観測日数の多いキャンペーンエポック（以下エポックと呼ぶ）のデータを用いて，海底局位置決定の再現性評価を行ったので，その結果について報告する．

2．宮城県沖海底基準点における観測データ

宮城県沖海底基準点は，日本海溝の陸側水深約1700mの海底にあり，4台の海底局が東西南北の

正方形に配置されている．正方形の対角線の長さは水深と同程度，すなわち1700mである．

Fig. 1に設置点の地図を示す．

本基準点は2001年に設置し，現在までに6回のキャンペーン測位観測を実施している．今回の評価では，このうち4日間以上のデータが取得されている3回のエポックを用いた．それぞれのエポックにおける観測日数，測線数，音響測距データをTable 1に示す．

Examination on Repeatability of Precise Seafloor Positioning

各観測日には、音響測距観測に加え、キネマティック GPS (KGPS) 観測、観測支柱の動揺計測、及び音速度プロファイルを求めるための CTD、XBT 観測を行った。CTD 観測は、通常 1 日の音響測距観測前後の朝夕 2 回行っているが、2003 年 5 月の観測についてのみ、観測スケジュールの都合により測距観測前の朝 1 回しか実施していない。また、XBT 観測は、測距観測中原則約 1 時間毎に行った。

3. 解析手法

本観測におけるデータ解析は、大きく (1) 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測距解析、(3) これら二つの結果を結合して海底局の位置を求める局位置解析の 3 つの段階に分けられる。

KGPS 解析には、長距離基線の解析のために開発されたソフトウェア IT (Colombo, 1998) を、音響測距解析は相関波形処理による手法 (浅田及び矢吹, 2001) を用いている。

局位置解析には、藤田他 (2004) によるソフトウェア SGOBS V2.5 を用いた。入力として与えた音速度プロファイルは、CTD 及び XBT 観測値から Del Grosso (1974) の改正式で計算したものを基に、時間軸上で、1 日単位の時間ウィンドウ内を二次式で回帰することにより、各測距時の値として求めたものを用いた。XBT 観測による水温プロファイルを用いる場合、塩分濃度プロファイルについては、朝夕の CTD 観測で得られたものを時間的に線形補間したものを与えて計算している。

しかしながら、こうして与えた観測値に基づく音速度プロファイルには、精密な局位置決定にとって無視しえない誤差が含まれている。そのため、SGOBS V2.5 では、入力値を初期値として平均音速度の時間変化係数をパラメータとして推定することによって、誤差の影響の軽減を図っている。具体的な誤差推定の手順としては、まず初期値である 1 日単位の二次回帰式の各係数について補正値を求める。これにより補正された音速度プロフ

ファイルを改めて初期値として、各測線単位の短い時間ウィンドウ内で再度二次回帰するという方法を用いている。この方法により、初期値の違いによる決定局位置の差異はほとんどないことが確認されている (藤田他, 2004)。

4. データサブセットによる再現性の評価

(1) 評価方法及び結果

各観測エポックにおける局位置決定精度を評価するために、エポック毎に、全測距データを、1 日毎、2 日毎等のサブセットデータに分け、それぞれのサブセットから求められた局位置解を比較することにより、そのエポック内再現性を吟味した。

Fig.2~4 に、上記 3 つのエポックについて、全観測日のデータを用いた場合と、サブセットデータを用いた場合の推定局位置を比較した結果を示す。横軸の ALL が全観測日による解、1A 等が 1 日毎、2A 等が 2 日毎のサブセット解を表している。図は、それぞれ東西成分、南北成分について、海底局 4 局の局位置解の平均値を、全日解からの差としてプロットしている。エラーバーは、海底局 4 局それぞれについての全日解からの差の自乗平均値であり、4 局間のローカルな相対位置関係のばらつきを表している。

Fig.2 及び Fig.4 に示されているそれぞれ 2002 年 5 月及び 2003 年 7 月の局位置決定再現性の評価結果を見ると、水平成分については、1 日毎でも 5~10cm、3 日間以上のデータを用いると、ほぼ 5cm 以内の再現性が得られている。またエラーバーにより示される相対位置のばらつきも、2 日以上データを用了場合には 6~7cm 以下である。

これに対して、Fig.3 に示されている 2003 年 5 月の局位置解析結果を見ると、南北成分については 10cm 以内の再現性を示しているといつてよいが、東西成分には、観測期間の前半と後半の局位置解の間に、数十 cm 以上に及ぶ大きな差が認められる。

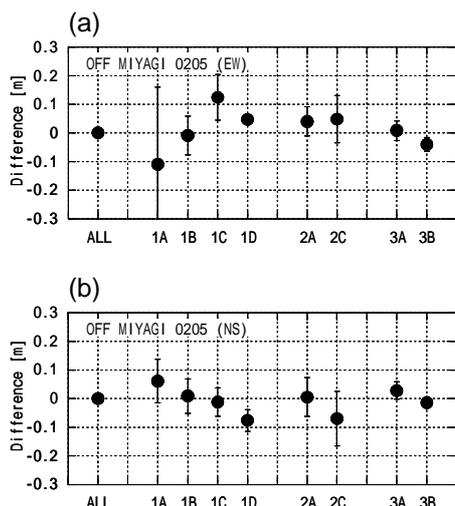


Fig.2 Repeatability of seafloor positioning at the Off-Miyagi reference point in (a) E-W and (b) N-S components at the epoch May 2002. Positioning results are plotted for data subsets from 4-day data in total relative to those using all the data (ALL). The number included in the label on the horizontal axis represents the number of days for the subsets used. The solid circle represents the averaged location over 4 stations and an error bar represents the rms of differences for each station.

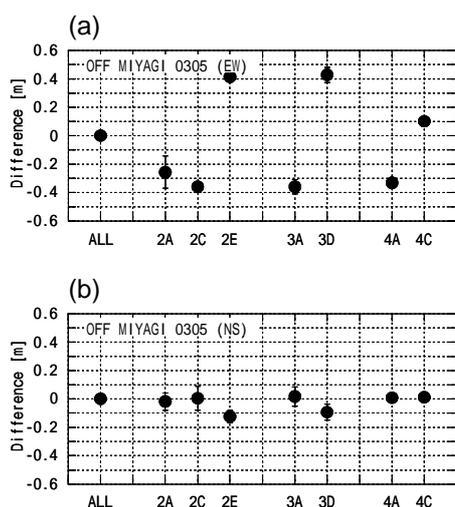


Fig.3 Repeatability of seafloor positioning at the Off-Miyagi reference point in (a) E-W and (b) N-S components at the epoch May 2003. The total number of observation days is 6. See the caption of Fig.2 for the other detail.

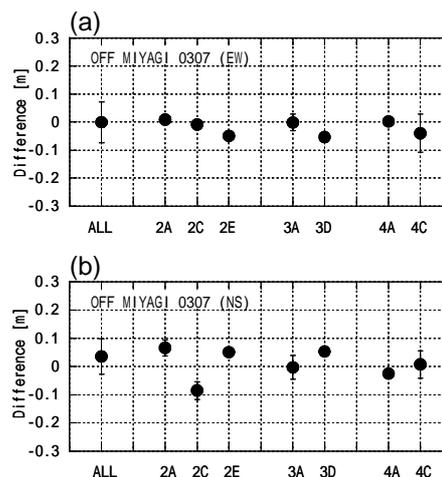


Fig.4 Repeatability of seafloor positioning at the Off-Miyagi reference point in (a) E-W and (b) N-S components at the epoch July 2003. The total number of observation days is 6. See the caption of Fig.2 for the detail except that the reference of comparison is not the result from all the data, but those for one of the 5-day solutions which is not shown.

(2) 考察

宮城県沖海底基準点において実施した複数のキャンペーン測位観測データを用いて、それぞれのエポック内のデータをサブセットに分けて、求められた決定局位置を比較することにより、そのエポック内における局位置決定の再現性を評価した。その結果、2002年5月と2003年7月の2つのエポックについては、3日間以上のサブセットデータを用いた場合、ほぼ5cmレベルのエポック内再現性が得られたのに対して、2003年5月については、3日間のデータを用いた場合の決定局位置の比較においても、東西成分に数十cmもの大きな差が生じた。この差の原因を、この測位技術の大きな誤差要因である音速度構造誤差及びKGPS測位誤差の両面から考察する。

まず海中の音速度構造について検討する。Fig.5に、CTD観測から得られた上記3つのエポック観測期間内の当該海域の音速度変化を示す。図にプロットされている音速度の値は、それぞれ観測日

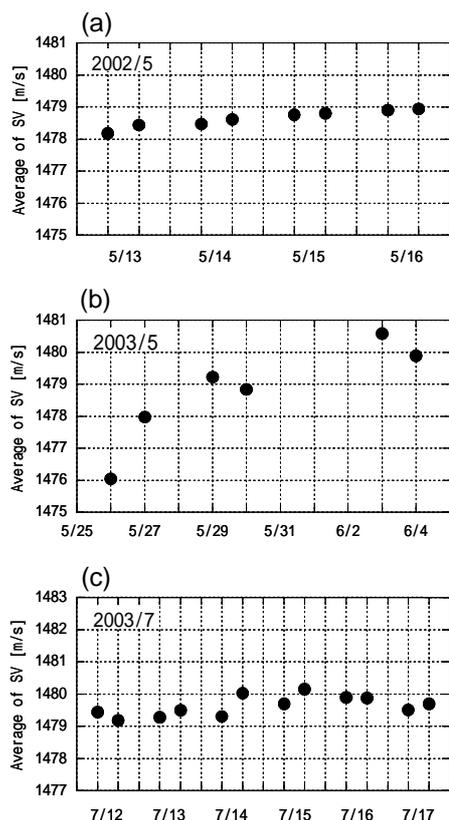


Fig.5 Averaged sound velocity during the observation periods for epochs (a) May 2002, (b) May 2003 and (c) July 2003.

の朝夕（2002年5月は朝のみ）のCTD観測値から計算されたものについて、海面から水深1700mまでの1m毎の観測値を単純平均したものである。なおCTD観測の最深点が1700mに達していないものについては、最深点付近における音速度の深さ方向の勾配により線形外挿して用いている。図から、まず上の評価において局位置決定のエポック内再現性が良かった2つのエポック（2002年5月と2003年7月）については、期間中の音速度変化は小さく、変化量が1m/sec以下であることがわかる。しかしながら、エポック内の前半と後半で局位置解析結果に大きな差の見られた2003年5月については、8日間で5m/secもの音速度変化が認められる。このような急激な変化は、時間的な変化のみならず、空間的な変化、すなわち音速度構造の空間不均質をも暗示している。現行の局位置解析手法は、音速度構造に水平成層を仮定しているため、特にこのような空間不均質には原

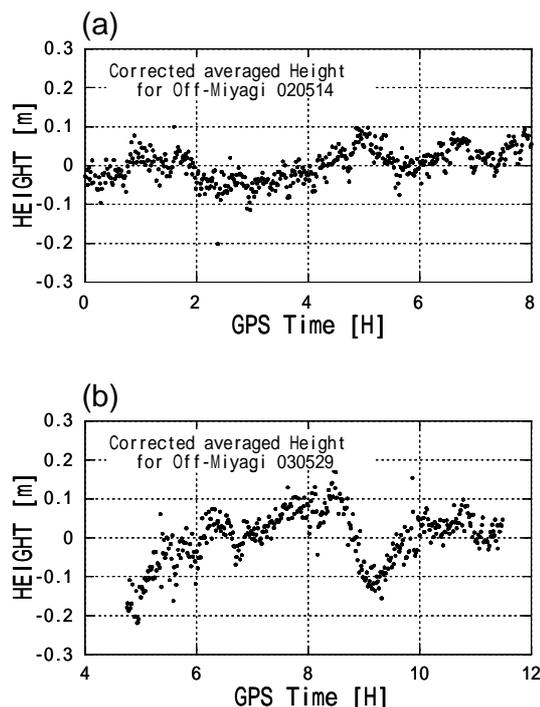


Fig.6 Variations of 1-minute averaged height of kinematic GPS results after making corrections for the geoid, tide and solid earth tide for (a) May 14, 2002 and (b) May 29, 2003.

理的に対応できていない。したがって、まだ定量的な議論には至らないものの、このことが、このエポック内で生じた大きな推定局位置差の原因の一つである可能性が高い。

次に、KGPS測位誤差の観点から検討する。ここでは、藤田及び矢吹（2003）の方法を用いて、今回の局位置解析への入力として用いたKGPS測位結果の評価を行った。この方法は、船上GPSアンテナの高さの長周期変化が海面高変化に連動していることを利用して、測位解として得られた高さ成分の1分平均値にジオイド及び潮汐モデルの補正を行い、その時間変化を評価するものである。なお、全体にわたるバイアス誤差については、補正に用いたモデルの絶対値の精度が不足しているため、十分な信頼性をもって評価することは困難である。

Fig.6は、(a)2002年5月、(b)2003年5月について、それぞれのエポック中の観測日1日の

KGPS 測位解を，上記の方法で補正した評価図である。図を見ると，まず 2002 年 5 月については，1 日の時間変化が 10cm 以内に収まっており，測位誤差は比較的小さいと評価できる。このエポック内の他の観測日についての評価図を見ても，ほぼ同様の傾向を示す。

これに対して，Fig.6 (b)を見ると，測位時間内に 20~30cm 程度の急激な高さのドリフトが見られる。このような急激なドリフトは，このエポックの全観測日の評価図に含まれているわけではないもの，他の 2 つのエポックと比較して，このエポックの KGPS 測位結果に含まれる測位誤差は，相対的にやや大きいと考えられる。

Fig.6(b)に暗示される KGPS 測位のドリフト誤差も，局位置決定誤差の一因となることは間違いない。しかし，そのドリフト量や発生頻度に鑑みると，KGPS 測位誤差は Fig.3 に見られる数十 cm の差の単独要因ではないと考えられる。したがって現段階では，主因は前述の音速度構造の不均質の影響であるか，あるいは二つの悪条件が重なったことによると推測される。ただし，もし KGPS 測位結果に大きなバイアス誤差が含まれているとすれば，それが Fig.3 の主因となっている可能性を排除することはできない。

4. エポック間の再現性について

Fig.7 に，上記 3 つのエポックについて，それぞれ全観測日のデータを用いて求めた局位置を，エポック間で比較した結果を示す。図のプロットは，2002 年 5 月の座標値を基準として，それぞれのエポックとの相対値をプロットしている。ただし，これらの座標値は，和歌山県下里の海洋測地基準点を基準とした相対値であることに留意されたい。下里は，ユーラシア大陸の安定域に対して西北西に約 3cm/year でプレート内変形していることがわかっている（例えば Sengoku, 1998）。

サブセット再現性のよかった 2 つのエポック（2002 年 5 月と 2003 年 7 月）の値を比べると，

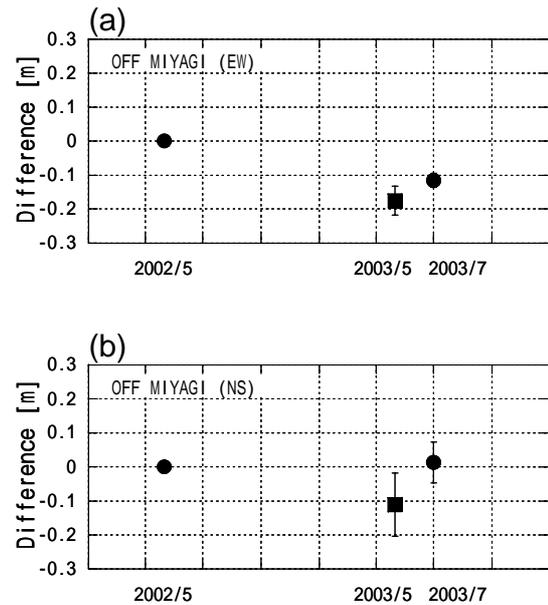


Fig.7 Comparison of the positioning results from the different epochs used in this study as time series.

東西成分は 10cm 程度，南北成分は 1cm 程度の差となっている。これに対して 2003 年 5 月については，東西成分は，2003 年 7 月よりさらに西に数 cm，南北成分は両エポックに比べ，10cm 程度南に決まっている。

2002 年 5 月と 2003 年 7 月の東西成分の差は，それぞれのサブセット間再現性に比べると若干大きい，この地域で予測される大陸安定域に対する西向き地殻変動を考慮すると，矛盾しない範囲に入っているといつてよい。

まだこれらの結果から定量的な地殻変動の議論はできないが，再現性評価という観点からは，2002 年 5 月と 2003 年 7 月について，エポック間においてもサブセット間再現性とほぼ同レベルの結果が確認されたといえる。

5. まとめ

海底地殻変動観測における局位置解析精度を検証するため，宮城県沖海底基準点において実施した複数のキャンペーン測位観測について，それぞれのエポック内の全データをサブセットに分けて

Examination on Repeatability of Precise Seafloor Positioning

決定局位置を比較することにより，そのエポック内における局位置解析結果の再現性を評価した．その結果，2つのエポックで，3日間以上のデータを用いることにより，水平成分で5cmレベルの再現性が得られることがわかった．しかしながら，1つのエポックでは，異なるサブセットからの決定局位置間に大きな差異が生じた．この原因について考察したところ，観測期間中に海中の急激な音速度変化が観測されており，このことが暗示する音速度構造の時間空間変化に現行の解析手法が十分に対処できていないことが大きな要因ではないかと推察される．

さらにエポック間の局位置解析結果の比較においても，サブセット間再現性と矛盾しない結果が得られた．今後，さらに事例を積み重ねることによって，現行の手法による局位置決定精度をさらに検証すると共に，今回局位置のサブセット再現性の悪かったエポックのデータ等を材料に，誤差の影響をミクロに検討することにより，解析手法のさらなる高度化を目指したい．

謝 辞

本研究は，海上保安庁の海底地殻変動観測プロジェクトに携わっている航法測地室衛星測地担当職員，海洋研究室の矢吹哲一朗，富山新一，片山真人の各氏，測量船「明洋」「海洋」乗組員，東京大学生産技術研究所の浅田昭，望月将志，吉田善吾の各氏ら多くの方々との協力の下に行われた．記して感謝する．

要 旨

宮城県沖海底基準点において取得されたデータを用いて，海底地殻変動観測の局位置決定再現性に関する検討を行った．そのため，まず観測日数が比較的多い3つのエポックのデータを様々な日数のサブセットに分け，求められた局位置を比較した．その結果，2つのエポックで，水平成分について約5cmレベルの再現性が得られた．しかしながら1つのエポックでは，東西成分について，エポックの前半と後半に数10cmの差が生じた．

この期間のCTD観測結果を吟味したところ，海中音速度の急激な変化が認められ，現行の解析手法がこれに暗示される海中の不安定性に対処できていないことが一因として示唆される．一方エポック間の再現性については，この海域で予測される定常プレート内変形速度を考慮すると，サブセット再現性とほぼ同レベルの結果が得られた．

参 考 文 献

- 浅田昭，矢吹哲一朗：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, (2001) .
- Colombo, O.L.: Long-Distance Kinematic GPS, in "GPS for Geodesy 2nd Edition", *Springer*, 537-568, (1998).
- Del Grosso, V.A.: New Equation for the Speed of Sound in Natural Water (with Comparison to other Equations), *The Journal of the Acoustical Society of America*, **56**, No.4, 1084-1091, (1974).
- 藤田雅之，佐藤まりこ，矢吹哲一朗：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**, 42-49, (2004) .
- 海上保安庁海洋情報部，東京大学生産技術研究所：海上保安庁海洋情報部の海底地殻変動観測，地震予知連絡会会報，**68**, 557-565 (2002) .
- Mochizuki, M., M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida and A. Asada: Construction of Seafloor Geodetic Observation network Around Japan, Recent Advances in Marine Science and Technology, 2002, 591-600, (2003).
- Sengoku, A, A plate motion study using Ajisai SLR data, *Earth Planets and Space*, **50**, 611-627, (1998).
- 矢吹哲一朗：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 (2002) .

Masayuki Fujita, Mariko Sato