

海底地殻変動観測の KGPS 解析における速報暦の有効性について

齋藤宏彰^{*1}, 関由貴子^{*1}, 梅原直人^{*1}, 浅倉宜矢^{*2}, 佐藤まりこ^{*3}

Effectiveness of rapid orbit in KGPS analysis of seafloor geodetic observation

Hiroaki SAITO^{*1}, Yukiko SEKI^{*1}, Naoto UMEHARA^{*1}, Takaya ASAKURA^{*2}, Mariko SATO^{*3}

Abstract

We evaluated the effectiveness of using the rapid orbit in KGPS analysis in seafloor geodetic observation by comparing the positions of the seafloor reference points obtained with rapid orbit against the ones obtained with final orbit. Results show that the root-mean-square of the horizontal distances between the two positions was 3 mm, which is within the precision of seafloor positioning using final orbit. Therefore, seafloor positioning results utilizing rapid orbit in KGPS analysis can be used as quick solution for seafloor geodetic observation.

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との技術協力の下、キネマティック GPS (以下, KGPS) と音響測距の組み合わせ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約 100 km 間隔で設置しており (Fig. 1), 測量船による観測を繰り返し実施している (Mochizuki et al., 2003; 藤田, 2006; 佐藤・他, 2008)。

海底地殻変動観測のデータ解析は、船上の GPS アンテナの位置座標を決定する長基線 KGPS 解析 (Colombo, 1998), 船に設置した音響トランスデューサと海底基準点 (海底局) 間の音波走時を求める音響解析 (浅田・矢吹, 2001; 富山, 2003), そして、これら 2 つの結果を結合して海底に設置した 3~4 台の海底局の位置を求める局

位置解析 (藤田・他, 2004; Fujita et al., 2006) から成る (Fig. 2)。最終的にはそれら複数の海底局の重心位置 (平均位置) を海底基準点の局位置解とする。

観測時における測量船の位置を算出するために行う KGPS 解析では、衛星の軌道情報として, IGS (International GNSS Service; 国際 GNSS 事業) から提供される精密暦を通常使用している。精密暦は観測の約 3 週間後に提供されるため, KGPS 解析を行い, その後局位置解析を終えるまでには少なくとも 1 ヶ月程度の時間が必要である。しかしながら, この場合, 地震発生時等において海底地殻変動についての迅速な情報提供ができないという欠点がある。

一方, 観測の 17 時間後に IGS から提供される速報暦を使用した場合, 観測からの帰港後, 直ちに解析することによって, 観測から数日後には暫定結果を得ることが可能である (Fig. 3)。

*1 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

*2 測量船「明洋」Survey Vessel "Meiyo"

*3 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

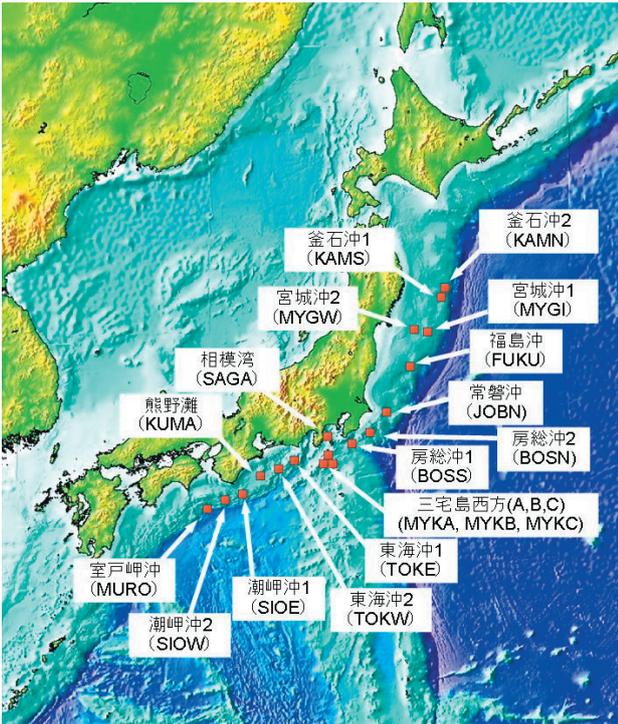


Fig. 1 Distribution of seafloor reference points.

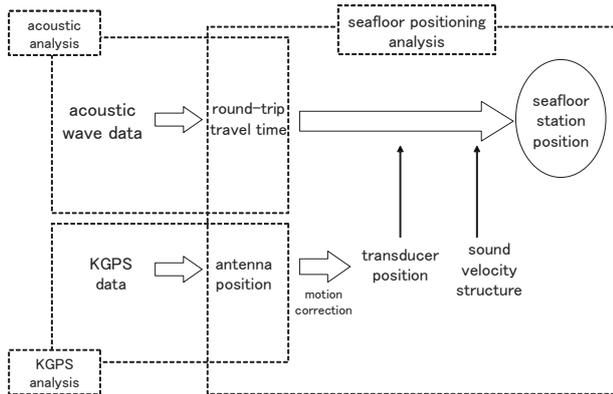


Fig. 2 Flowchart of analysis for seafloor positioning.

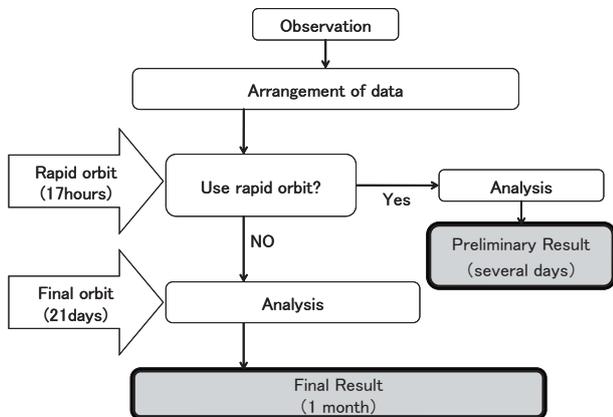


Fig. 3 Flowchart to obtain the two results due to the difference of the two time periods of GPS orbit to be provided.

他方で、速報暦以外に、観測の6時間後に提供される超速報暦やリアルタイムの衛星の軌道情報として放送暦を取得することも可能である。しかしながら、測量船を使用する現行の観測システムにおいては、観測終了後、船が帰港するまでの回航に最低でも一日程度要することを考慮すると、陸上で解析作業を行う時点で放送暦や超速報暦よりも精度の良い速報暦が利用可能となる。

そこで、本稿では地震時等における海底地殻変動についての迅速な情報提供を行うための取組みの一環として、速報暦の使用によるKGPS解析への影響について評価を行った。

2 KGPS 解析の概要と衛星軌道暦

2.1 KGPS 解析の概要

KGPS 解析では、陸上基準局のデータ、測量船で取得した船上データ、および IGS から提供される衛星軌道暦を使用し、沿岸から 100 km 程度離れた測量船のマスト部に設置されている GPS アンテナ（以下、船上局）の 0.5 秒毎の位置を求めている。陸上基準局には、当庁の GPS 観測点及び国土地理院の電子基準点を使用しており、船上局との基線長は概ね 100~300 km である。KGPS 解析に必要な陸上基準局の位置の算出には、Bern 大学が開発した精密基線解析ソフトウェア「Bernese Ver 4.2」を使用し、船上局の位置の算出には NASA/GSFC の Colombo 博士が長距離基線解析用に開発したソフトウェア「IT」(for Interferometric Translocation: Colombo and Evans, 1998; Colombo et al., 2000) を使用している。

KGPS 解析においては、これまでに観測精度向上のための取組みとして、船での GPS アンテナの設置位置を、マスト上と船体後部とで変えた場合の測位結果の比較 (河合・他, 2005 a), 陸上基準局の GPS アンテナの機種の違いによる測位結果の比較 (河合・他, 2005 b), 基線長の異なる陸上基準局データによる測位結果の比較 (河合・他, 2006), および複数の KGPS ソフトウェアを使用した測位結果の評価 (杉本・他, 2009)

Table 1 GPS Satellite Ephemerides distributed by the International GNSS Service (IGS) and specification of them.

衛星軌道暦 (GPS Satellite Orbit)		精度(Accuracy) 軌道(orbits)/時刻(Sat.&Stn.clocks)	提供までの時間 (Updates)
精密暦 (Final orbit)		~2.5cm / ~0.075ns(RMS) ~0.020ns(SD)	21 days
速報暦 (Rapid orbit)		~2.5cm / ~0.075ns(RMS) ~0.025ns(SD)	17 hours
超速報暦 (Ultra Rapid orbit)	予報値 (predicted)	~5cm / ~3.0ns(RMS) ~1.5ns(SD)	6 hours
	観測値 (observed)	~3cm / ~0.15ns(RMS) ~0.05ns(SD)	

等が行われている。また、観測手法の高度化及び迅速化のための研究としては、リアルタイムKGPS観測について、精度検証(木元・他, 2008)や津波観測への適用(Kato et al., 2005)などが行われている。

2.2 衛星軌道暦

IGSから提供される衛星軌道暦には、精密暦(Final orbit: 3週間遅れで提供)、速報暦(Rapid orbit: 17時間遅れで提供)、超速報暦(Ultra rapid orbit: 6時間遅れで提供、予報値を含む)がある。Table 1に、これらの衛星軌道暦についての諸元(2009年11月現在)を示す。これらの衛星軌道暦は世界の観測局網から得られたデータを使用し、後処理の精密解析を行うことによって計算され、特に使用データ数の多い精密暦の精度が最も良いとされている。ただし、近年衛星軌道暦の精度が向上してきており、Table 1に示されるように、速報暦と精密暦については時計の精度についてSD(標準偏差)がわずかに異なるものの、ほぼ同精度の値となっている。

3 検討方法と使用データ

速報暦を使用した場合と精密暦を使用した場合とで、KGPS解析から得られる船上局の位置は異なる値を取ることが予想される。本稿では、速報暦を使用した場合と精密暦を使用した場合とにつ

Table 2 List of sites and dates of campaign observations whose data were used in this study.

海底基準点 Seafloor reference points	観測時期(年/月) Epoch (year/month)
釜石沖2 (KAMN)	2009/6
釜石沖1 (KAMS)	2009/3, 2009/6
宮城沖2 (MYGW)	2009/3
宮城沖1 (MYGI)	2009/3
福島沖 (FUKU)	2009/3
常磐沖 (JOBN)	2009/6
房総沖2 (BOSN)	2008/9, 2009/4
房総沖1 (BOSS)	2008/9, 2009/4
相模湾 (SAGA)	2008/7
三宅島A (MYKA)	2008/9, 2009/4
三宅島B (MYKB)	2008/9
三宅島C (MYKC)	2008/9, 2009/4
東海沖1 (TOKE)	2008/7, 2009/5
東海沖2 (TOKW)	2008/7, 2009/2
熊野灘 (KUMA)	2008/9, 2009/5
潮岬沖1 (SIOE)	2009/2, 2009/5
潮岬沖2 (SIOW)	2009/4
室戸岬沖 (MURO)	2009/5

いて陸上基準局の位置の算出とKGPS解析を行い、得られた各々の場合の船上局の位置について比較を行った。

検討に使用したデータは2008年7月~2009年6月に取得した航走観測によるデータ(Table 2)である。本期間では当庁の全ての海底基準点において、網羅的に各1~2回ずつ観測を実施している。

4 結果および考察

4.1 KGPS解析結果

速報暦を使用した場合のKGPS解析結果を東西、南北、上下の成分別にプロットした例をFig.4, Fig.5に示す。Fig.4, Fig.5のプロットは、精密暦によるKGPS解を基準(ゼロ)として表示している。また、Fig.4は「東海沖1」海底基準点における2008年7月の観測、Fig.5は「熊野灘」海底基準点における2008年9月の観測についての図である。

Fig.4に示すように、「東海沖1」海底基準点における2008年7月の観測では、速報暦と精密暦によるKGPS解の乖離はほとんど見られず、東

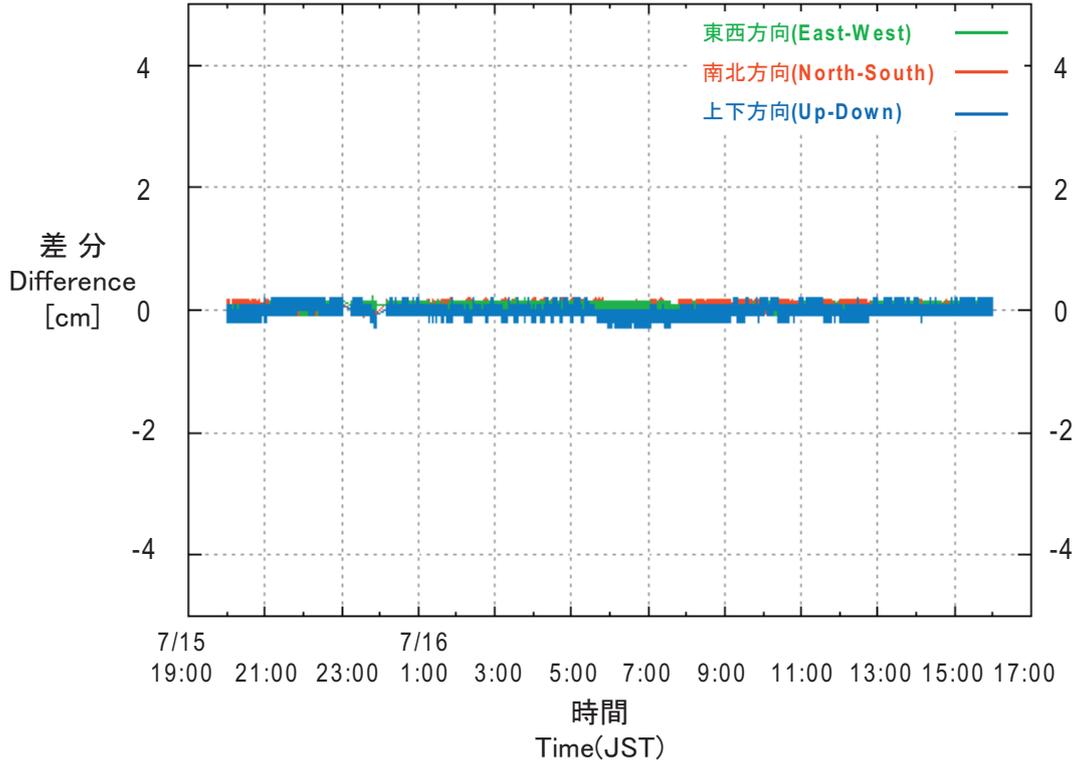


Fig. 4 Time series of the difference of the ship positions obtained with rapid orbit and final orbit. (green : EW components, red : NS components, blue : UD components ; observation on July 15 – 16, 2008 at the seafloor reference point off Tokai 1)

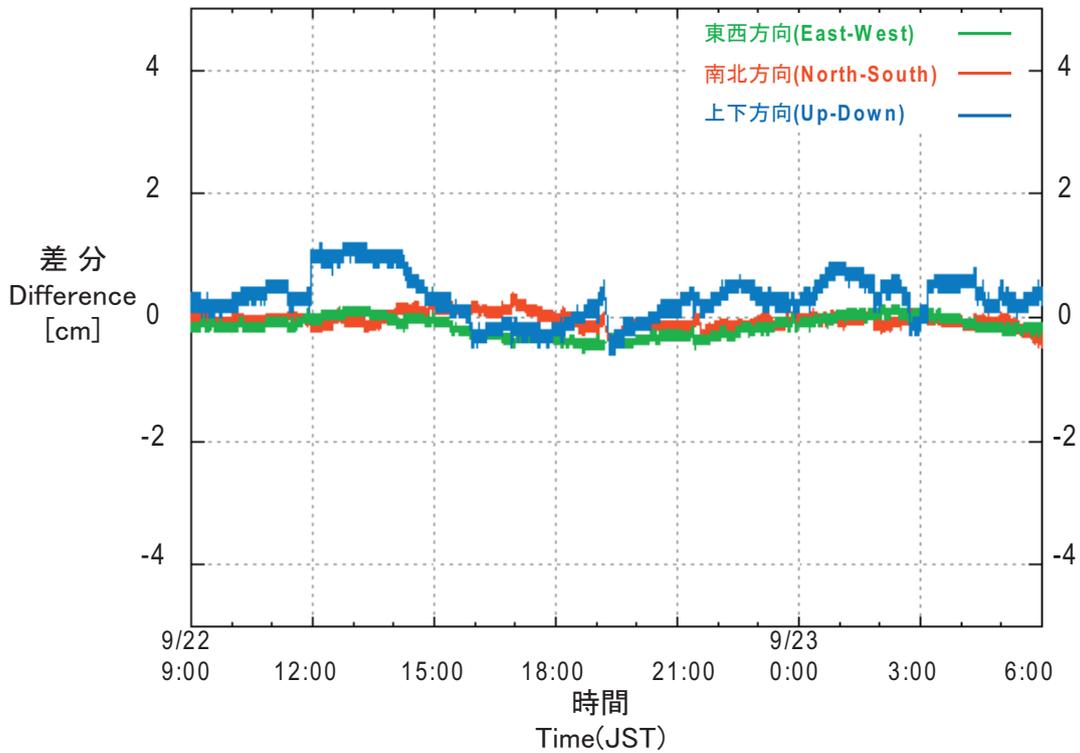


Fig. 5 Time series of the difference of the ship positions obtained with rapid orbit and final orbit. (green : EW components, red : NS components, blue : UD components ; observation on September 22 – 23, 2008 at the seafloor reference point at Kumano-Nada)

Table 3 RMS of the difference of the ship positions obtained with rapid orbit and final orbit while acoustic ranging was made in each campaign observation.

観測データ Data	東西 EW [cm]	南北 NS [cm]	上下 UD [cm]	観測データ Data	東西 EW [cm]	南北 NS [cm]	上下 UD [cm]
釜石沖2(KAMN) 2009/6	0.08	0.06	0.11	三宅島B(MYKB) 2008/9	0.09	0.15	0.10
釜石沖1(KAMS) 2009/3	0.19	0.28	0.48	三宅島C(MYKC) 2008/9	0.10	0.12	0.09
釜石沖1(KAMS) 2009/6	0.10	0.06	0.11	三宅島C(MYKC) 2009/4	0.07	0.10	0.13
宮城沖2(MYGW) 2009/3	0.06	0.30	0.47	東海沖1(TOKE) 2008/7	0.07	0.07	0.08
宮城沖1(MYGI) 2009/3	0.07	0.27	0.49	東海沖1(TOKE) 2009/5	0.05	0.05	0.10
福島沖(FUKU) 2009/3	0.48	0.51	1.06	東海沖2(TOKW) 2008/7	0.20	0.09	1.08
常磐沖(JOBN) 2009/6	0.07	0.09	0.16	東海沖2(TOKW) 2009/2	0.03	0.06	0.13
房総沖2(BOSN) 2008/9	0.23	0.61	0.77	熊野灘(KUMA) 2008/9	0.21	0.11	0.53
房総沖2(BOSN) 2009/4	0.10	0.15	0.21	熊野灘(KUMA) 2009/5	0.05	0.06	0.26
房総沖1(BOSS) 2008/9	0.09	0.07	0.48	潮岬沖1(SIOE) 2009/2	0.05	0.05	0.09
房総沖1(BOSS) 2009/4	0.10	0.08	0.15	潮岬沖1(SIOE) 2009/5	0.24	0.14	0.42
相模湾(SAGA) 2008/7	0.06	0.05	0.16	潮岬沖2(SIOW) 2009/4	0.06	0.04	0.09
三宅島A(MYKA) 2008/9	0.11	0.12	0.09	室戸岬沖(MURO) 2009/5	0.11	0.04	0.10
三宅島A(MYKA) 2009/4	0.06	0.08	0.11				

西, 南北, 上下成分共に1~2 mmの差であった。一方, Fig.5に示される「熊野灘」海底基準点における結果では, 速報暦と精密暦のKGPS解の乖離は東西および南北成分では2~3 mm, 上下成分では最大で1 cm程度であった。この結果は, Fig.4に示した「東海沖1」の結果よりも比較的大きな値であるものの, KGPS解析の精度(数cm)よりも小さく, 速報暦と精密暦の結果に有意な差は見られない。

次に, 解析の対象としたTable 2に示すデータにおける速報暦と精密暦のKGPS解の差について, 東西, 南北, 上下の成分別に, 音響測距を行った時間帯でのRMSを計算したものをTable 3に示す。Table 3より, 音響測距時における速報暦と精密暦のKGPS解の差のRMSは, 東西, 南北, 上下成分ともに最大でも1 cm程度であり, KGPS解析における速報暦と精密暦の結果に有意な差は見られなかった。

4.2 考察

ここで, 今回求められたKGPS解析結果を基に局位置解析によって得られた海底局の水平位置プロットをFig.6に示す。Fig.6では精密暦による局位置解を基準(原点)としてプロットしている。

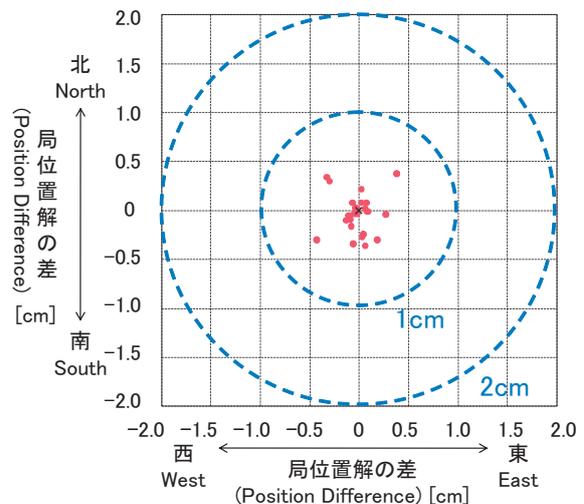


Fig. 6 Difference of horizontal positions of seafloor reference points obtained with rapid orbit and final orbit.

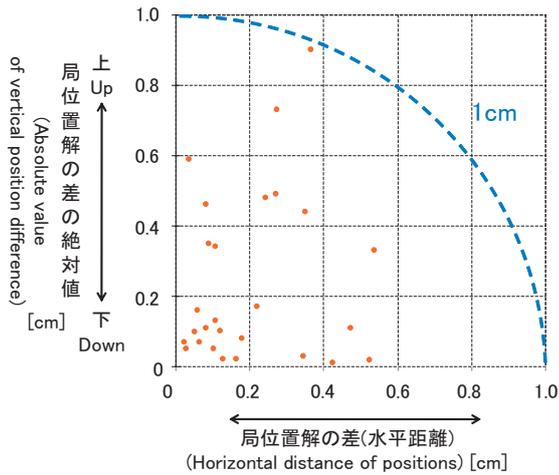


Fig. 7 Absolute value of the difference of vertical positions of seafloor reference points obtained with rapid orbit and final orbit.

る。

Fig. 6 に示されるように、速報暦による局位置解と精密暦による局位置解の差は水平距離で 0~5 mm の範囲であり、それらの RMS は約 3 mm であった。これらの値は精密暦を使用した場合の現行の観測精度（水平成分で約 2~3 cm）に比べて十分小さく、速報暦を使用した場合でも精密暦を使用した場合と比較して遜色ない結果が得られたことを示している。

次に、上下成分について速報暦による局位置解をプロットした図を Fig. 7 に示す。Fig. 7 では、横軸を速報暦と精密暦による局位置水平成分の差（水平距離）、縦軸を上下成分の差の絶対値とし、Fig. 6 と同様に精密暦による局位置解を基準（ゼロ）としている。

Fig. 7 に示されるように、速報暦と精密暦による局位置上下成分の差の絶対値は最大でも 9 mm 程度であり、それらの RMS は約 3 mm であった。上下成分については海中の音速構造の誤差の影響を受けるため、これまで海底地殻変動の検出には至っていないが、Fig. 6 の水平位置と同程度の結果が得られた。

今回解析対象としたデータは、基線長が最長で 270 km 程度であったが、いずれのデータについても速報暦と精密暦による局位置水平成分の差は

観測精度に比べて十分小さく、有意な差は見られなかった。これらのことから、今後、例えば海溝軸の海側など、さらに基線長の長い KGPS を必要とする観測を実施する場合には留意する必要があるが、現行の観測点において地震時等に迅速な情報提供を必要とする場合には、速報暦は有効であると考えられる。

5 まとめ

今回、2008 年 7 月~2009 年 6 月に取得した航走観測によるデータを使用し、海底地殻変動観測の KGPS 解析において速報暦を使用した場合の影響について評価を行った。その結果、観測時における速報暦と精密暦の KGPS 解の差の RMS は、東西、南北、上下の 3 成分ともに最大でも 1 cm 程度の値であった。さらに、最終成果となる局位置解の比較では、速報暦と精密暦による局位置解の差は、水平距離の RMS で約 3 mm と、現行の観測精度に比べて十分小さく、有意な差は見られなかった。また、上下成分についても水平成分と同程度の結果が得られた。これらのことから、速報暦は地震時等における速報値として有効であると考えられる。

謝 辞

本研究は、海底地殻変動観測に関わっている航法測地室職員、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方々、KGPS 解析のソフトウェア IT を提供して頂いた NASA/GSFC の Colombo 氏ほか、多くの方々の協力の下に行われました。KGPS 陸上基準点の一部は、国土地理院より電子基準点 1 秒データを提供頂いています。また、本稿の改訂にあたっては、本論文の査読者から多くの大変有益なコメントをいただきました。記して感謝いたします。

要 旨

当庁の海底地殻変動観測における KGPS 解析において速報暦を使用した場合の影響について評

価を行った。その結果、速報暦と精密暦の各々から得られる局位置解の差は、水平距離のRMSで約3mmと現行の観測精度の範囲内であった。速報暦による結果は地震時等における速報値として有効であると考えられる。

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.
- Colombo, O. L., and A. G. Evans (1998), Precise, decimeter-level differential GPS over great distances at Sea and on Land, *Proc. ION GPS-98*, Nashville, Tennessee.
- Colombo, O. L., A. G. Evans, M. I. Vigo-Aguiar, J. M. Ferrandiz, and J. J. Benjamin (2000), Long-baseline (>1000 km), sub-decimeter kinematic positioning of buoys at sea, with potential application to deep sea studies, *Proc. ION GPS 2000*, Salt Lake City, U.S.A.
- 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.
- 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), GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, **58**, 265-275.
- Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura and T. Nagai (2005), Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, *Earth Planets Space*, **57**, 297-301.
- 河合晃司, 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志 (2005 a), 長距離 KGPS の精度評価について, *海洋調査技術学会第17回研究成果発表会講演要旨集*, 31-32.
- 河合晃司, 成田誉孝, 藤田雅之, 石川直史, 淵之上絃和, 長岡継 (2005 b), 長基線 KGPS 測位精度の機種 (アンテナ) 依存性について, *海洋情報部技報*, **23**, 66-72.
- 河合晃司, 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志 (2006), 長基線 KGPS の精度評価について, *海洋情報部技報*, **24**, 80-88.
- 木元章典, 渡部豪, 杉本慎吾, 奥田隆, 田所敬一, 武藤大介 (2008), 海底地殻変動観測における長基線リアルタイムキネマティック GPS の精度検証, *日本地球惑星科学連合 2008 年大会予稿集*, **J 164-P 002**.
- Mochizuki, M., M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida and A. Asada (2003), Construction of Seafloor Geodetic Observation Network Around Japan, *Recent Advances in Marine Science and Technology*, **2002**, 591-600.
- 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** (3), 113-125.
- 杉本慎吾, 長田幸仁, 石川直史, 浅倉宜矢, 田所敬一, 渡部豪, 奥田隆, 高谷和典, 生田領野, 安藤雅孝 (2009), 基線長別移動体測位実験によるキネマティック GPS ソフトウェアの評価, *測地学会誌*, **55** (1), 65-85.
- 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.
- 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.