

海底地殻変動観測におけるKGPS解析の現状について

河合晃司, 石川直史, 松本良浩: 海洋情報部

望月将志: 東京大学生産技術研究所

Status of KGPS analysis of Seafloor Geodetic Observation

Koji KAWAI, Tadashi ISHIKAWA Yoshihiro MATSUMOTO: Hydrographic and Oceanographic Division.
Masashi MOCHIZUKI: Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo.

1 はじめに

海洋情報部ではGPS衛星を用いた長基線キネマティック測位（以下KGPS）技術と音響測距技術を組み合わせた海底地殻変動観測を行っている（藤田, 2006）。観測開始当初の2001年より海底地殻変動解析の柱の一つであるKGPS解析においては、NASA/GSFCのColombo博士の作成したIT（Colombo, 1998）を使用してきたおり、現在、安定したKGPS解析が可能となっている。本報告では、ITを使用したKGPS解析の現状と今後の展望について報告する。

2 ITについて

海洋情報部では2001年よりITを使用したKGPS解析に取り組んできた。当初のITのVersionは2.0である。ITはFORTRANにより開発されており、またGNUのライセンスにより提供されているため、ソースコードはオープンであり、また改変等もGNUライセンスの範囲内において自由である。ITは最初UNIX OS上で使用を開始したが、FORTRANコンパイラがあるプラットフォームであれば基本的に移植可能であるので、2002年にはWindowsへ移行した。また、2002～2003年にかけて、perlやgnuplotなどを使用した前処理、後処理及びユーティリティプログラムが海洋情報部において開発された。またこれらの周辺プログラム群は現在においても開発、修正が続けられている。同時期にIT解析結果の精度

評価について、解析結果の1分平均に潮汐やジオイド等の補正を行い、平均海面と比較する手法を採用している（藤田他, 2003）。2003年4月よりITのVersionは3.1となった。このバージョンアップにより解析精度の大きな改善が見られた。2004年4月にVersion 3.2となり、また2004年5月よりVersion 3.2.1となった。このバージョンアップにより、解析精度はほぼそのままでありながら解析時間が格段に短縮した。2004年11月のColombo博士来日時にVersion 3.3となり、最新のGPSに関する研究成果に基づく新たな機能が数多く盛り込まれた。また、ITの運用面において、これまで基準となる衛星の選択を手動で行ってきたが、Colombo博士の指摘により、これを自動選択に切り替えることとした。2006年5月のColombo博士再来日時にITのVersionは3.4 preliminary（以下3.4pr）となった。ITは2007年1月にVersion 3.4となり現在に至っている。Version 3.4では2Hz収録の移動点データ、1Hz収録の基準点データ3点を用い、6～7時間の観測データを解析した場合の処理時間は概ね2～3分である。また、ITは新世代GPS衛星のL2コードの利用など、今後も様々な更新が予定されている。ITのバージョンアップの主な内容についてプログラムの説明書やColombo博士の講演資料などをもとに以下のとおりまとめた。

Ver.2.0 → Ver.3.1

・プログラムの本数が統合され少なくなった

- ・受信機の種類に起因するデータ補正を行うようになった。
- ・データの削除基準の変更。
- ・解析精度の改善。

Ver.3.1 → Ver.3.2 → Ver.3.2.1

- ・入出力ファイルの整理
- ・パラメータ群の整理
- ・解析手順の変更による解析時間の短縮

Ver.3.2.1 → Ver.3.3

- ・プリプロセッサプログラムの更新（新旧受信機が混在した場合の補正のためc1-p1バイアスの導入など）
- ・プロセッサプログラムの更新（平均水面を常数とし高速化，電離層モデルを使用し短時間のデータにおいてもアンビギュイティの決定，地球潮汐の導入など数多くの更新）
- ・精密単独測位（PPP）の搭載
- ・PCVを使用したアンテナ位相補正（PCVに関しては後述する）
- ・プレート運動モデル（NNR-NUVEL1）の導入

Ver.3.3 → Ver.3.4pr → Ver.3.4

- ・20Hzから0.033Hz（30秒）までのデータに対応した。
- ・IGS提供の新しい暦フォーマット（sp3cフォーマット）へ対応した。

3 ITに関する検討について

ITではバージョンアップにともない，様々な機能が追加されている．ここでは，追加された新しい機能等について，海底地殻変動観測あるいは一般のGPS測量への適用を検討した。

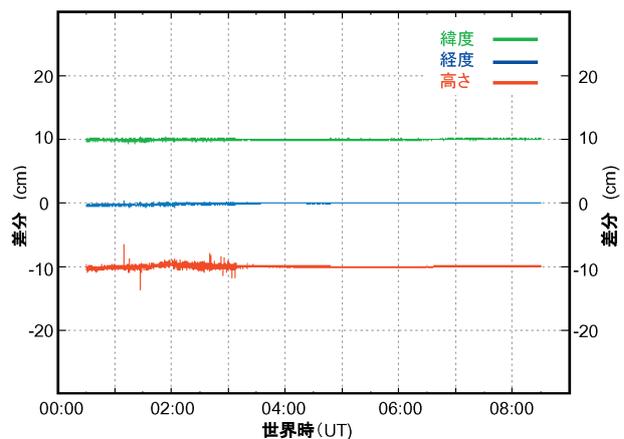
(1) 基準局における30秒サンプリングデータの使用について

現在，移動局データは2Hz，基準局データは1Hzでの収録データにて解析を実施している．ITはVer.3.4prより静止測量としては一般的なデータ収録間隔である30秒の基準点データが使用可能となった．しかしながら30秒データでの解析結果は，通常の1Hz収録データを使用した解析結果と比べて，数cm

の差で解が得られている時間帯もあるが，大きく外れている時間帯もあり，安定した解が得られるとは言い難い．海底地殻変動観測では，一般で流通している30秒収録ではなく，より収録間隔の短い基準局データ（1Hzのデータ）が必須であることが改めて示される結果となった。

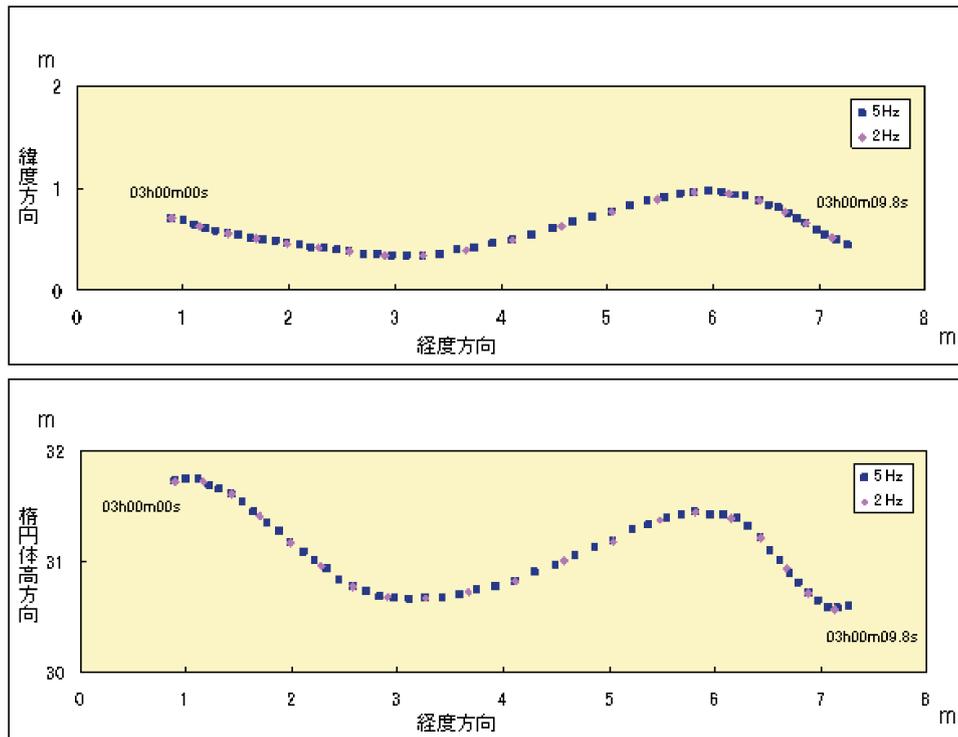
(2) 移動局における5Hzサンプリング

海底地殻変動観測においてKGPSのアンテナは，例えば2ktで船が流された場合は1秒間にほぼ1m動く．海況が悪い場合はさらに大きく（速く）動いている．海底地殻変動観測の精度は現在数cm程度であり，このため，2Hzでデータを収録した場合においてもKGPS結果は時間的に十分に密であるとは言えない．Ver.3.4prより20Hzまでの解析が可能となったため，5Hzにて収録したデータを解析し，2Hzの結果と比較してみた．第1図は2006年8月19日の東海沖海底地殻変動観測における2Hzの解析結果と5Hzの解析結果の差である．緯度経度高さの重なりを避けるため，緯度に+10cm，楕円体高に-10cmのゲタを持たせて表示した．この結果を見ると，解析開始からほぼ2時間30分間，各成分ともわずかに差のばらつきがあるが，その後はほぼ収束して差がなくなっている．このことから2Hzと5Hzでの収録の仕方に差があることが予想される．ま



第1図 2Hz収録と5Hz収録の結果の緯度，経度，楕円体高の差

Fig. 1 The difference of latitude, longitude and ellipsoidal height of result between 2Hz collecting and 5Hz collecting.



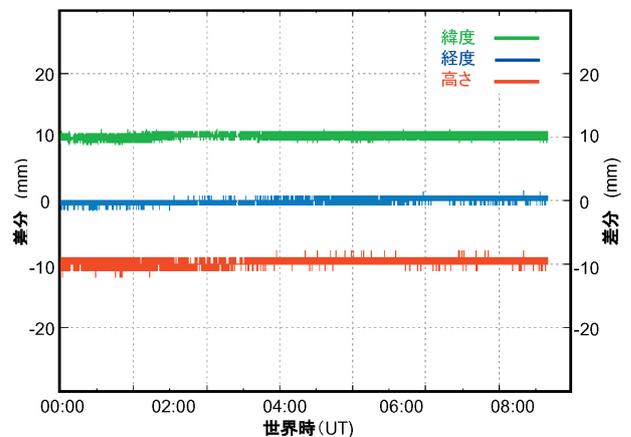
第2図 2Hzと5Hzの航跡のプロット
Fig. 2 Plot of track of 2Hz and 5Hz

た、第2図に2Hzの解析結果と5Hzの解析結果をプロットした図を示す。青色は5Hz、桃色は2Hzの解析結果を示している。現在は2HzのKGPS結果から、補間により音響信号発出時刻の位置を算出しているが、空間的により密となる5Hzの結果の使用についても検討し、海底地殻変動における適切なKGPSデータの収録間隔について検討していきたい。

較した。第3図は精密暦と速報暦をそれぞれ使用した結果の差をプロットしたものである。縦軸は1目盛り10mmであり、緯度に+10mm、楕円体高に-10mmのゲタを加えて表示した。精密暦と速報暦では東西及び南北方向ではこれらの差は概ね1mm以内に収まっており、楕円体高においても2mm以内とわずかな差しか見られない。また、精密暦と速報

(3) GPS暦について (速報暦と精密暦の使用)

ITの解析にはGPS放送暦の他にIGS (International GNSS Service) の提供している暦が必要である。現在使用している暦はIGS-Final (以下精密暦) 及びIGS-Rapid (以下速報暦) である。これらの2種の暦は、軌道の精度はともに、 $< 5\text{ cm}$ であるが、時計情報の精度において速報暦が 0.1 ns であるのに対し、精密暦は $< 0.1\text{ ns}$ である。また、提供のタイミングは速報暦が17時間後であるのに対し、精密暦は ~ 13 日である (実際には3週間遅れの日曜日に1週間分まとめて提供される)。今回、精密暦と速報暦以外は全て同じ条件を使用したITの結果を比



第3図 精密暦と速報暦を使用した解析結果の差
Fig. 3 Difference of result between IGS Final Orbit and IGS Rapid Orbit.

暦を使用して得られたKGPS結果をそれぞれ用いて海底基準点の局位置解析を行った結果においても殆ど差はみられない。速報暦を使用した例は十数例あるが、これら全てから同様の結果が得られている。これらのことから、速報暦も十分に解析に耐える精度を持っていると考えられる。ただし実際の運用としては、速報暦を使用し海底地殻変動観測の速報解を求めた場合においても、より確からしい精密暦にて再解析すべきであろう。速報暦での解析は速報性が必要な場合にたいへん有用である。

(4) 静止測量の解析

ITはKGPSのみならず、スタティック解析を実施することも可能である。しかし、その繰り返し精度は現在海洋情報部で使用しているBernese 4.2 (淵之上他, 2005) に比べて数倍悪いという結果となった。ITは静止測量用途にも使用出来るがBerneseに取って代わるものではない。

(5) PCV (Phase Center Variations) の採用

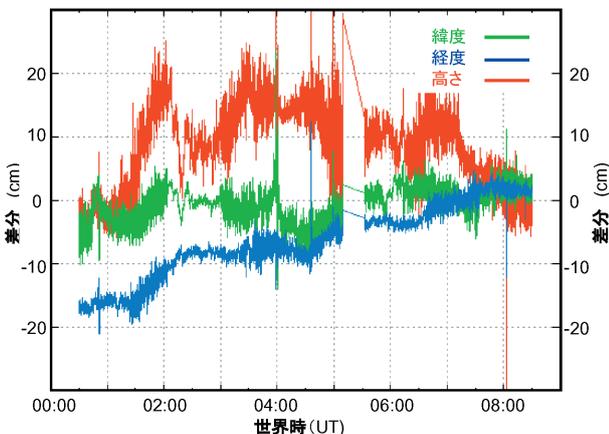
GPSアンテナは、アンテナへの電波の入射角によりアンテナの仮想的な位相中心が変動することが知られており、このため、複数の種類のアンテナが混在する一般的なGPS測量においてはアンテナ高に関してアンテナ定数による補正に変わってPCV補正が使用されるようになってきている (田中他, 2003)。これまでITの解析では、アンテナ高に

対してアンテナ定数による補正を実施してきた。ITはVer.3.3よりアンテナ高に対してアンテナ定数による補正とPCV補正が選択出来るようになった。今回、同じデータを用いアンテナ定数による補正とPCV補正をそれぞれ行い、その差を比較してみた。

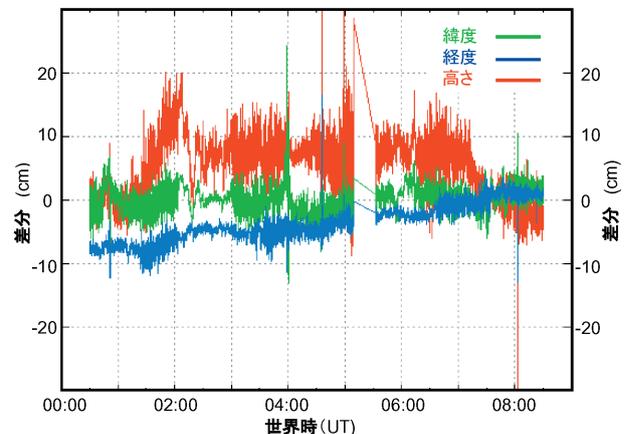
旧タイプアンテナ (TRM 22020.00+GP) を使用した解析結果において、アンテナ定数による補正を使用した場合と、PCV補正を使用した場合それぞれと、新タイプのアンテナにより計算した結果との差を第4図及び第5図に示す。便宜的に新タイプで計算した結果を正しいとすると、PCV補正を使用した場合の方が結果のドリフトが小さくなっており、精度が向上しているものと思われる。他の結果も概ね同じ傾向にあるが、ほとんど精度の向上が見られない場合もある。また、アンテナは異機種であっても新タイプ同士の場合は、アンテナ定数による補正とPCV補正でほとんど差は見られない。PCV補正方式ではアンテナ底面を基準面として算出するため、アンテナ定数を利用し移動局のアンテナの仮想的な位相中心を直接求めようとする現在の手法にそのまま導入することは出来ないが、旧アンテナを使用した場合は、精度の向上が見込めるため、利用方法とその評価法について今後検討していきたい。

4 まとめ

上述のとおり海底地殻変動観測におけるITを使用したKGPS解析では、安定した結果を短時間で得



第4図 アンテナ高を使用した解析結果
Fig. 4 Result of using antenna height.



第5図 PCVsを使用した解析結果
Fig. 5 Result of using PCVs.

ることが可能となってきた。しかし、海底地殻変動観測の精度向上のためにはKGPS解析のさらなる精度向上と安定性が必要でもある。今回はITの機能にのみ絞って話を進めたが、ここ数年のITの使用により、良い結果を得るためのITの運用法に関する様々な知見も多々得てきている。また、GPS自体の機能向上も無視出来ない事実である。今後もハードウェア、ソフトウェア両面を整備するとともに、それらに対する知見を蓄積していくことにより、KGPS解析の精度向上を図っていく必要がある。

5 謝辞

KGPS解析ソフトウェア“IT”を提供いただいたNASA/GSFCのColombo博士，“IT”を使用したKGPS解析の初期段階に携わり、精度評価のための図化ソフトウェア等を作成した国立天文台の片山真人氏、解析の基準点データとして電子基準点の1秒データを提供いただいた国土地理院に感謝いたします。

参 考 文 献

- Colombo, O. L.: Long-Distance Kinematic GPS, in “GPS for Geodesy 2nd Edition”, edited by P. J. E. Teunissen and A. Kleusberg, Springer, 537-568, (1998)
- 藤田雅之：GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測，海洋情報部研究報告，**42**，1-14，(2006)
- 藤田雅之，矢吹哲一郎：海底地殻変動観測におけるK-GPS解析結果の評価手法について，海洋情報部技報，**21**，62-66，(2003)
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo: GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets and Space*, **58**, 1-11, (2005)
- 石川直史，藤田雅之：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，(2005)

淵之上紘和，河合晃司，藤田雅之：海上保安庁のGPS連続観測～データ収録・解析システムの更新とその評価～，海洋情報部技報，**23**，50-56，(2005)

田中愛幸，加川亮，川原敏雄，辻宏道：GPSアンテナ位相特性の検定とその課題，国土地理院時報，**102**，63-69，(2003)