

## 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

藤田 雅之：航法測地室

矢吹 哲一朗：海洋研究室

### A Way of Accuracy Estimation of K-GPS Results in the Seafloor Geodetic Measurement.

Masayuki FUJITA : Geodesy and Geophysics Office

Tetsuichiro YABUKI : Ocean Research Laboratory

#### 1 はじめに

海洋情報部では、GPS 衛星を用いたキネマティック測位（以下 K-GPS）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おり（海上保安庁海洋情報部・東京大学生産技術研究所，2002），海底に設置した基準局の位置を，センチメートルレベルで決定することを目標として技術開発を続けている（矢吹，2002）。

このうち、K-GPS 技術は、位置が正確にわかっている陸上基準点から船上 GPS アンテナの刻々の位置を精密に決定するものである。ここに生じた誤差は、その後の音響測距データ解析結果と組み合わせた最終的な海底局位置決定精度に直接影響するため、できる限り高精度かつ安定した測位結果を得る必要がある。

しかしながら、現在我々の海底地殻変動観測において取得されたデータによる K-GPS 解析では、要求精度を超えた誤差を生じ、安定した結果が得られないことがある。

この原因を追求し、少しでも安定した結果を得るための観測・解析手法の検討が必要であることは言うまでもないが、他方で、得られた結果の信頼性を客観的に評価することも重要である。これができれば、後の局位置解析において、測位解の信頼性が低い時間帯のデータを避ける、あるいは重みを下げる等の対処も可能である。

ここではこのような観点から、K-GPS データ解析結果に対する評価手法として、測位解としての高さ

を平均海面と比較する手法を示し、現在までに実際の海底地殻変動観測データから得られた測位解について適用した結果について報告する。

#### 2 K-GPS 解析について

K-GPS 解析は、GPS 衛星から受けた位相データを用いて、移動するアンテナ位置を刻々と求めるものである（例えば土屋・辻，1995；矢吹，1995）。基本的な原理は静的測位と同じであるが、静的測位では位置が動かないことを前提に多くのデータを統計処理できるのに対して、K-GPS 解析では 1 つの時刻毎に位置を決定しなくてはならないため、高精度の結果を得ることはより難しい。

一般に、基準点から移動点までの基線距離が 10km 以下の場合には、解析の主要な誤差要因である電離層や大気の影響が、それぞれの観測点データの差分によって十分に相殺されるため、比較的安定した結果が得られる。しかしながら、基線距離が長くなると、これらの空間不均質の影響が上記の差分だけでは取り除けなくなる。我々の海底地殻変動観測では、近傍に基準点を設けることができない場合がほとんどであることから、長距離基線解析を精度良く行うことが必須であり、これまでもそのための検討を行ってきた（藤田他，1999）。

現在、我々が用いている K-GPS 解析のソフトウェアは、NASA/GSFC で開発された“IT”（Colombo,1998）である。このソフトウェアは長距離基線測位のために研究開発されたものであり、電離層補正のための線形結合データである L3 を用い

ているほか、大気遅延量を推定するなど、長距離で顕在化する誤差要因を除去するための技術を取り入れている。また、複数の陸上基準点を同時に用いて移動局の位置を求める機能も付加されている。

ITは、さまざまな長距離測位実験によって、その有効性が示されているが (Colombo *et al.*, 2000), K-GPS 測位はデータの質に大きく影響を受けるため、現在のところ、我々の測位条件の下では必ずしも安定した結果が得られているとは言えない。

### 3 評価手法

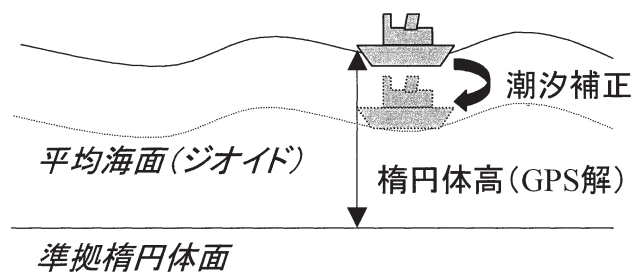
測位解の評価という観点で見た場合、まず形式的には解と共に出力される共分散行列あるいはその対角成分の平方根である標準偏差が一つの情報である。しかしながらこれらの情報は、観測方程式の微係数行列とアприオリな誤差情報から求められる量であり、数学的に有意な解であるかどうかという指標にはなっても、実際のデータの質や確度の情報を与えるものではない。

また、K-GPS 測位解は時々刻々一回限りの値であるため、静的測位のように再現性という概念を用いることができない。特に水平成分は、元々予測できない動きを観測しており、センチメートルレベルの測位誤差を評価するための客観的な比較対象がない。

しかしながら、高さについては、同じく動いているものの、一義的には海面に拘束されているという条件をもつ。そこでこれを利用して、得られた測位解を、平均海面の高さと比較することで結果を評価する方法について検討した。

この比較を行う前に、測位解に含まれているその他の変動要因を取り除く必要がある。まず大きなものとして、波浪による短周期変動と潮汐の時間変化がある。前者については、測位解の1分間の平均値をとることでその主要な変動を取り除く。また後者については、潮汐モデルを用いて補正することとする。

なお、比較のための平均海面としては、日本周辺のジオイドモデルを用いる。以上の補正及び比較の概念図を第1図に示す。



第1図 評価手法の概念図。

Fig. 1 Schematic concept of methodology.

この他にも高さに影響を与える要因として、黒潮等流れの影響や水温の時間変化による体積変化の影響等があり、必ずしも無視し得ない場合があると思われるが、これらを合理的に補正するための客観的な情報を得ることは困難であるため、ここでは考慮していない。

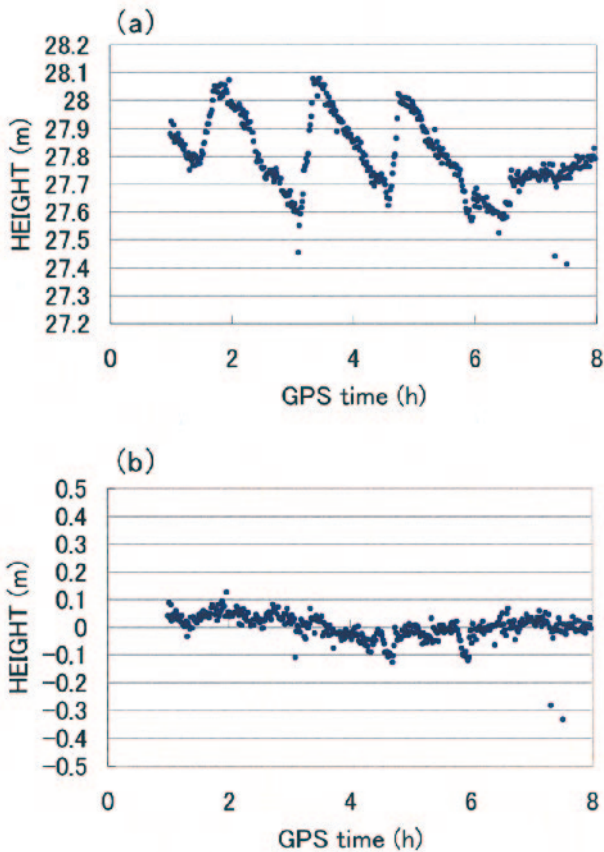
比較に用いたジオイドモデルは Fukuda (1990)、海洋潮汐モデルは、国立天文台の Nao.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000) である。

この手法では、測位解3成分のうち高さのみの評価しかできないが、一般にGPS測位においては高さの精度が最も悪いことを考えると、これによって測位解全成分の評価と考えるとよいと思われる。

第2図に、以上の手法を適用した例を示す。なお、次節も含め本稿において例示している測位解は、我々の実際の海底地殻変動観測 (海上保安庁海洋情報部・東京大学生産技術研究所, 2002) におけるK-GPSデータ解析から得られたものであり、元のデータのサンプリング間隔は0.5秒である。ここでは評価手法の有効性の議論を目的としているため、それぞれの観測の詳細については割愛する。

第2図(a)は2001年7月15日釜石沖の観測において得られた測位解の高さの1分平均値、(b)はこれに潮汐補正を施し、ジオイド高との差をとったものである。ただし(b)については、ジオイド高の絶対値自体が要求精度内で平均海面を表すものではないため、ここでは差の変化のみを評価対象とし、図の縦軸は解析時間帯の平均値を0としている。

図から、まず(a)で短周期の波浪成分が十分除かれていることがわかる。さらに(b)では、潮汐とジオイド高変化の影響が除かれ、その差は数cmのばらつき



第2図 釜石沖（2001年7月15日）測位解の高さ；  
 (a)一分平均値、(b)潮汐補正後のジオイド高との差。  
 Fig. 2 Example of accuracy estimation of K-GPS height solution in the case of the Off-Kamaishi area on July 15, 2001 ; (a) 1minute average, (b) difference from the geoidal height after the tide correction.

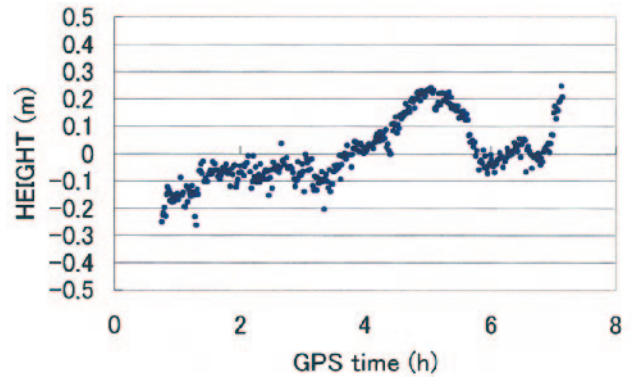
に取まっている。これは、測位解が安定しかつ信頼性が高いと考えられる適用例である。

4 手法の有効性

次に、この評価手法の有効性を考察する目的で、これまでに得られている測位結果の中から例を挙げて検証する。

明らかに測位誤差と判断される例

第3図は2001年2月13日の三宅島西方における測位解である。これを見ると、4時前頃から1時間程で約30cm程度のドリフトを起し、その後も安定しないことがわかる。三宅島周辺海域では黒潮の影響等、この方法で取り除くことのできない変動を見ている可能性もまったく否定できないが、船の軌跡か



第3図 三宅島西方（2001年2月13日）測位解の高さ評価。  
 Fig. 3 Accuracy estimation of the height solution in the West-off-Miyake-jima area on February 14, 2001.

ら考えてこのようなパターンの変動が起こることは考えにくく、恐らくはなんらかの原因による測位誤差であると判断することが妥当である。

逆に、1時半頃から3時前までの1時間程は、安定した結果であると評価できる。

複数の基準局による改善例

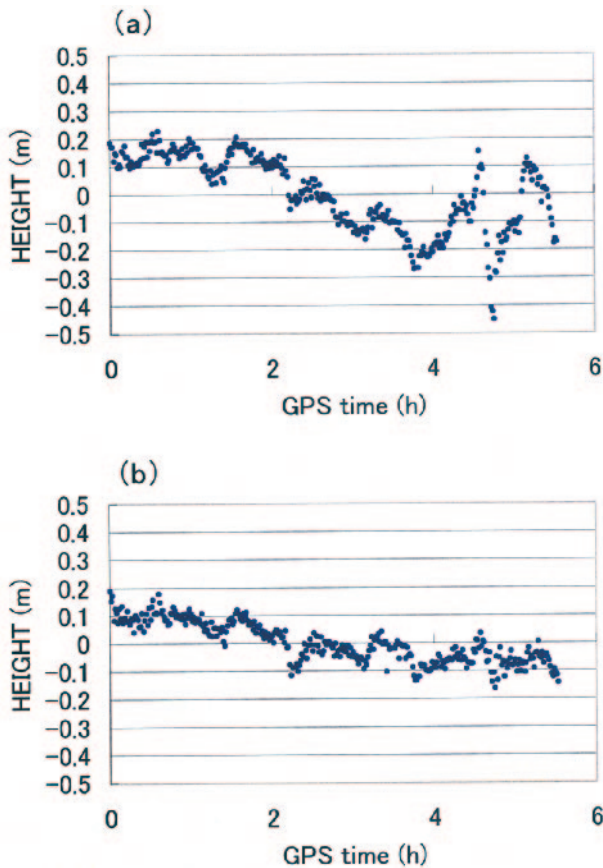
次に、複数の陸上基準局を用いることで結果が改善したと考えられる場合について例示する。第4図は、同じく釜石沖の2001年7月16日の測位解について同様の図を示したものである。それぞれ陸上基準点として(a)は釜石1局を、(b)はこれに加えて DGPS 局の尻屋崎、金華山の3局を用いたものである。(b)のプロットでは、特に後半(a)に見られる大きな不規則変動が滑らかになっており、DGPS 局を加えることで測位解が改善されたという判断をすることができる。

ただし改善後の(b)にもまだ、時間的に緩やかな負のトレンドが残っており、解析時間の初めと終わりとは15~20cm程度変動している。これが解析誤差によるドリフトなのかどうかは、これだけでは厳密には判断できない。こういった緩やかな変化については、例えば潮汐モデルの誤差による可能性が考えられるが、これについては後で触れる。

5 問題点

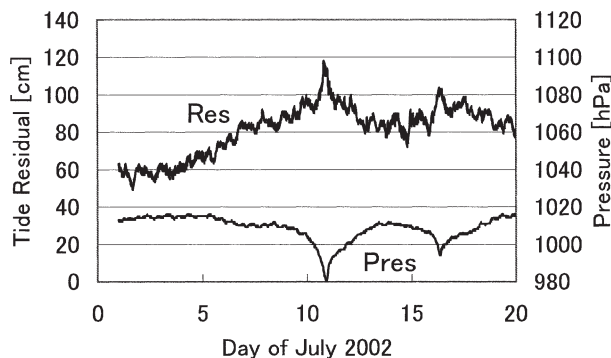
既に述べたように、この比較手法はまだ不確定要因を残しており、例えば第2図~第4図に見られる





第4図 釜石沖（2001年7月16日）測位解の高さ評価；陸上基準局として(a)釜石1局，(b)釜石，尻屋崎，金華山の3局，を用いている。

Fig. 4 Accuracy estimation of the height solution in the Off-Kamaishi area on July 16, 2001 ; Following stations are used as references on land: (a) Kamaishi (1 station), (b) Kamaishi, Shiryazaki and Kinkazan (3 stations).



第5図 八丈島験潮所における潮位の海洋情報部予測値と観測値の差及び気圧変化（2002年7月1日～20日）。

Fig. 5 Difference between JHOD-predicted and observed tide at the Hachijo-jima tidal station and atmospheric pressure variation during July 1-20, 2002.

ゼロ線からの逸脱が，そのまま測位誤差であると断ずることはできない。

まず，モデルの誤差によりみかけの変動が生ずる．これを潮汐モデルについて検討する．第5図は，2002年7月1日から20日間の八丈島験潮所における海洋情報部予測値と観測潮位の差の時間変化を示したものである．この比較に用いた予測値は，厳密に Nao.99Jb と同一ではないが，ここでの議論にとって本質的な差はない．図から，この差の変化は，長周期の変動に，主に日周変化が重畳していることがわかる．

まず，長周期変動については，その振幅と本手法により評価する時間がせいぜい6～10時間であることから考えると，あまり問題にならない．しかし，日周変化を詳しく見ると，大部分の日については，ほぼ10cm以内に収まっているが，11日と16日頃に，短時間で20cm以上の大きな変化が認められる．この原因として，同図に共に示されている気圧変化と比較すると，該当日に大規模な低気圧（台風を含む）による大きな変化が観測されており，モデルと観測潮位の差に見られる大きな変化は，明らかにこの影響であると考えられる．通常大規模な低気圧の際に観測を行うことはほとんどないが，こういった気圧変化に対する潮汐モデル誤差は念頭においておく必要がある．また，第4図(b)に見られたようなレベルの漸次的な変動は，潮汐モデルの誤差を見ている可能性が十分にある．

ジオイドモデルの誤差については，観測海域における水平方向の差の誤差のみが反映する上，航跡との相関等が現れると考えられるため，潮汐ほどの影響はないと思われる．

ただし，いずれのモデルの場合も，海域によって，モデル誤差やその水平方向の変化の様相が異なると考えられるので，この点についても留意する必要がある．

さらに，現在のところ手法の中に考慮されていない要因として，既に述べたように，流れの影響や水温の時間変化による体積変化の影響等があり，これらを評価することが今後の課題である．

以上のことから，本稿に示した手法は，これらの誤差要因を測位解の誤差だと判断してしまう危険を

有しており、比較図がゼロ線近傍に安定しているか、という点だけで測位結果を評価することは厳密にはできない。しかしながら、上記の例から見ても、海域や気象条件、航跡等と照らし合わせることも含めて、一つの有力な指標となることは間違いない。

## 6 おわりに

本稿では、我々の取り組んでいる海底地殻変動観測における K-GPS 測位解を客観的に評価する試みとして、簡易な一手法を示し、その適用例と有効性及び問題点について述べた。

これ以外の評価情報として、観測された衛星数、衛星配置 (DOP) 等は、測位解そのものではないにしろ基本的なものである。また、例えば複数の陸上基準点それぞれから独立に得られた解を比較することも一つの指標となる。次のステップとして、これらの情報を総合しつつ、後の局位置解析の再現性などとも関連付けて議論することが必要である。また実用にあたっては、評価結果の定量化や判断基準の確立を行うことも必要である。

## 謝辞

八丈島験潮所データ及び潮位予測値は、環境調査課より提供いただいた。

## 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).
- Colombo, O. L., A. G. Evans, M. I. Vigo-Aguiar, J. M. Ferrandiz, J. J. Benjamin: Long-Baseline (>1000km), Sub-Decimeter Kinematic Positioning of Buoys at Sea, with Potential Application to Deep-Sea Studies, *Proceedings ION GPS 2000, Salt Lake City*, (2000)
- 藤田雅之・浅田昭・富山新一：相模湾における長距離キネマティック GPS 測位試験，水路部技報，**17**，44-50，(1999)。
- Fukuda, Y.: Precise Determination of Local Gravity Field both the Satellite Altimeter Data and the Surface Gravity Data, *Bull. Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo*, 133pp, (1990).
- 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)。
- Matsumoto, K.: Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, *J. Oceanogr.*, **56**，567-581, (2000).
- 土屋淳・辻宏道：GPS 測量の基礎，日本測量協会，274pp, (1995)。
- 矢吹哲一郎：GPS を用いた海上移動体の測位技術の開発と応用，*海洋調査技術*，**7**(1)，47-54，(1995)。
- 矢吹哲一郎：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)。