

## 海底地殻変動観測におけるGPSマスト局アンテナの利用

松本良浩, 藤田雅之, 河合晃司, 石川直史: 航法測地室

矢吹哲一郎: 海洋調査課

望月将志, 浅田昭: 東京大学生産技術研究所

### Utilization of GPS antenna on the mast for seafloor geodetic observation

Yoshihiro MATSUMOTO, Masayuki FUJITA, Koji KAWAI,

Tadashi ISHIKAWA: Geodesy and Geophysics Office

Tetsuichiro YABUKI: Hydrographic Surveys Division

Masashi MOCHIZUKI, Akira ASADA: Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

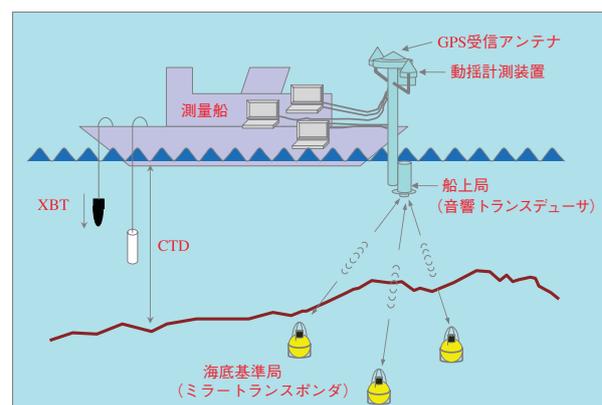
#### 1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では、東大生産技術研究所との技術協力の下、キネマティックGPS (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及び海底基準点の展開を行っている (浅田・矢吹, 2001)。

本稿では海底基準点「宮城沖1」および「宮城沖2」において実施された観測データを用いて、測量船のマストに設置したGPSアンテナ (マスト局) を用いて海底基準点の位置決定を行った場合の局位置解への影響について考察する。

#### 2 船上局アンテナとマスト局アンテナの特徴

現在海上保安庁の測量船「明洋」および「海洋」では、海底地殻観測の実施の際には船尾ブルワークに全長約8mの堅牢な支柱を設置して、上部にGPSアンテナ (船上局アンテナ)、下部に音響トランスデューサを配置している (第1図)。KGPS解析により決定された船上局アンテナの地理座標値を基に音響トランスデューサまでの位置を決定するためには、支柱によって結ばれる相対位置関係に慣性GPSジャイロによって得られた動揺計測値を加味して補正を行う必要がある。現在の支柱を用いた設置方法は、音響トランスデューサとGPSアンテナとの間が



第1図 海底地殻変動観測システム

Fig. 1 Schematic image of the seafloor geodetic observation system.

短距離でかつほぼ同一鉛直線上にあるため、この相対位置関係の定量が容易であるほか、動揺計測値の誤差が補正量に及ぼす影響が比較的小さくすむ。このことから音響トランスデューサの位置決定精度、ひいては海底基準点の位置決定精度の向上に有利である。

一方、船上局アンテナは、測量船上の船橋をはじめとする構造物に衛星が遮られる方位が生じたり、ギャロスを用いてCTD観測を実施する際には衛星受信が途切れたりというように、視界条件の面で不利である。これを回避するには支柱を長くしてGPSアンテナをより高いところに設置するという選択も

あるが、支柱の振動、しなり等の増大による精度劣化や設置の安全性などが問題になると予想される。

対処の一つとして、測量船「海洋」においては、船上局アンテナとは別に上部船橋甲板に立てられたマストの上部にGPSアンテナ（マスト局アンテナ）を設置してデータ収録を行っている。このアンテナは船上局アンテナより約15m高い位置にあるため、周囲に遮蔽物がほとんどなく、視界条件の面で大変有利である。ただし音響トランスデューサからみて斜距離約40mにおよぶ離心となるが、このことが海底基準点の位置決定精度に及ぼす影響はこれまで検討されていない。

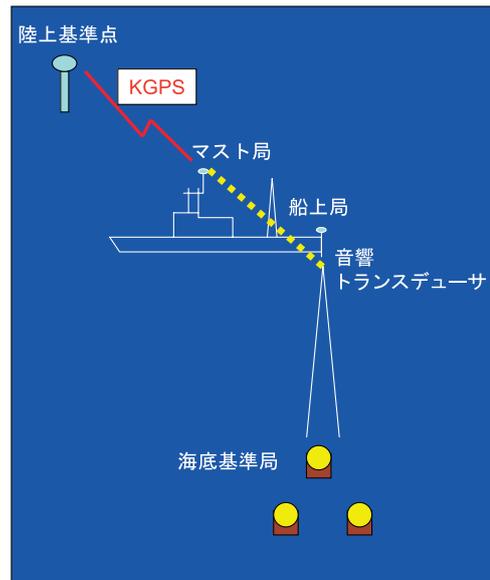
マスト局アンテナの利用可能性を検討することには2つの目的がある。第一には、船上局アンテナのデータ取得状況が芳しくなかった場合に、マスト局アンテナによって取得されたデータによってこれを補完することができるかを確認しておくことである。第二には、将来音響トランスデューサが船底装備された場合、必然的にGPSアンテナは離心されることとなるが、その際のGPSアンテナの設置条件や位置決定精度への影響といった問題点を抽出しておくことである。

### 3 マスト局アンテナを利用した局位置解析の方法

#### 3.1 マスト局直結

もっとも単純な方法は、陸上基準点-マスト局アンテナ間でKGPS解析を行い、マスト局アンテナ-音響トランスデューサ間の相対位置関係を直接結合するというものである（第2図）。この方法は、GPSアンテナ-音響トランスデューサ間の相対位置関係の値が異なるほかは、データ解析上従来の方法と全く同じである。この方法の欠点としては、機器を据えつけた船体やその他の構造物の振動やねじれなどによる相対位置関係の不安定性が海底基準点の位置決定精度に悪影響を及ぼす可能性が挙げられる。

この方法による局位置解析を試行するにあたり、マスト局アンテナ-音響トランスデューサ間の相対位置関係を決定する必要があることから、2005年8月6日12時15分～8日12時57分にかけて塩竈港に停泊中の測量船「海洋」のマスト局と船上局において



第2図 マスト局直結による局位置の決定。  
Fig. 2 Determination of station positions by way of direct positioning of the GPS antenna on the mast.

GPSデータを収録し、同時に慣性GPSジャイロによる動揺データを収録した。毎正時にデータを分割し、Trimble Geomatics Office (TGO) を用いてスタティック解析を行った。この結果49エポックの基線解析が行われ、そのうちTGOにより合格と判定されたものは12エポックであった。船上の基線はもとより潮汐や波浪の影響を受けて常時動揺しているため、動揺の小さい時間帯の解のみが合格したものと考えられる。

マスト局・船上局間の相対位置関係は、船体に固定された前後・左右・上下の座標系で定義される。このため、各エポックにおける動揺データの平均値を用いて基線ベクトルの換算を行い、既に実測されている船上局-音響トランスデューサ間のベクトルを足しあわせて、マスト局アンテナ-音響トランスデューサ間を求めた。結果は第1表に示される通りである。この相対位置関係は数cmの精度を持つと考えられる。

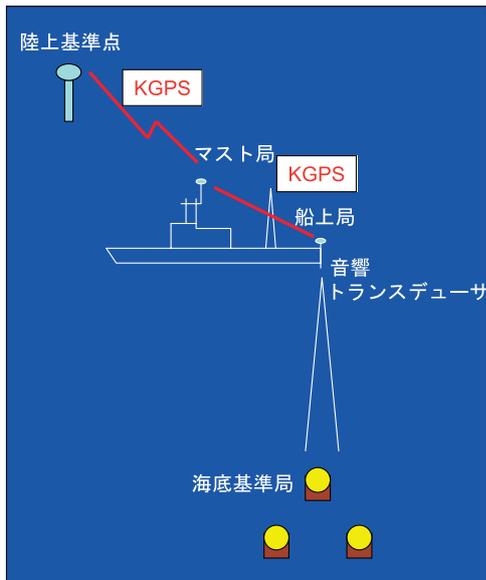
#### 3.2 船上局・マスト局KGPS結合

3.1とは異なり従来の船上局アンテナを併用することとなるが、陸上基準点-マスト局アンテナおよびマスト局アンテナ-船上局アンテナの2つの基線

第1表 マスト局アンテナ・音響トランスデューサ間の相対位置関係の計測結果。

Table 1 Measurement of positional difference between the GPS antennas on the mast and the acoustic transducer.

観測時間(JST)	右舷方向(m)	船首方向(m)	下方向(m)
8月6日 09:00-10:00	-0.636	-32.284	23.698
11:00-12:00	-0.626	-32.282	23.690
12:00-13:00	-0.593	-32.280	23.698
18:00-19:00	-0.611	-32.273	23.708
8月7日 09:00-10:00	-0.653	-32.292	23.686
10:00-11:00	-0.610	-32.287	23.692
12:00-13:00	-0.618	-32.285	23.692
13:00-14:00	-0.653	-32.281	23.696
14:00-15:00	-0.704	-32.280	23.695
15:00-16:00	-0.674	-32.283	23.709
16:00-17:00	-0.613	-32.281	23.700
17:00-18:00	-0.624	-32.279	23.703
平均	-0.635	-32.282	23.697
標準偏差	0.030	0.004	0.007



第3図 船上局・マスト局KGPS結合による局位置の決定。

Fig.3 Determination of station positions connected by roving KGPS baseline between GPS antennas on the pole and the mast.

を連結してKGPS解析し、船上局アンテナ-音響トランスデューサ間の相対位置関係を結合する方法が考えられる(第3図)。船上局アンテナを介することにより、マスト局-船上局間の相対位置関係の変動(マスト局アンテナの振動や船体の伸縮、ねじれなどが考えられる)がある場合にも、KGPS解析の精度の範囲内で補償されるという点で3.1の方法よ

りも有利である。但し、元々船上局アンテナのデータ取得状況が優れているときには、基線を連結することにより、かえって短基線の場合よりも位置決定の誤差が累積される可能性もある。半面、船上局の視界条件がマスト局より劣っていることが原因で船上局アンテナで得られるGPSデータの品質が長基線KGPS解析に適さない場合には、マスト局を介して基線を連結することによって、トランスデューサの位置決定精度がある程度改善されることが期待できる。

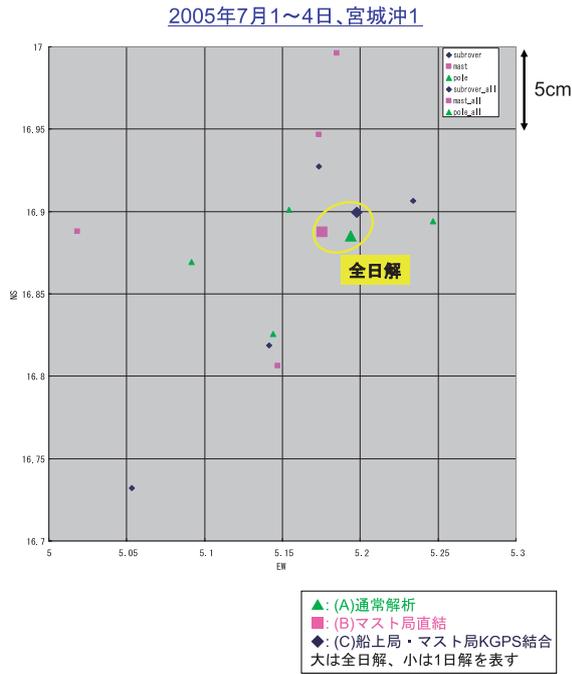
ともに移動局であるマスト局アンテナと船上局アンテナを結ぶKGPS解析には、通常の間長基線KGPS解析にも使用している「IT」(Colombo, 1998)をこの目的に合わせて矢吹が変更したソフトウェアを使用した。

#### 4 結果の比較と検討

船上局アンテナを使用した従来の局位置解析(A)に加えて、マスト局直結(B)および船上局・マスト局KGPS結合(C)による解析を試行し、解の比較を行った。局位置解析には藤田ほか(2004)によるソフトウェア「SGOBS V2.10」を用いた。

「宮城沖1」海底基準点における2005年7月1日から4日までの観測データを用いた解析結果をプロットしたものを第4図に示す。この図において、4日間データ全てを用いた解(全日解)を大きいシンボルで、1日毎のサブセットを用いて解析した解(1日解)を小さいシンボルで表示している。この結果を比較すると、1日解ではばらつきがやや見られるものの、全日解は3つの解析方法の間で2cm程度の範囲に収まっている。これは、通常の解析における解がこれまでの実績から数cmの再現性を示していることを考慮すると、通常のばらつきの範囲内といえる。観測データ数と各解析における走時残差は第2表のとおりであるが、3つの解析方法の間で走時残差は同水準にあるといえる。

一方、「宮城沖2」海底基準点における2005年6月3日から7日までの観測データを用いた同様の解析結果のプロットを第5図に示す。この結果によると、(A)と(C)の全日解の差は2cm程度に収ま



第4図 3種類の解析方法 (A), (B), (C) により決定された局位置の比較. 宮城沖1における7月1日~4日の観測の例.

Fig. 4 Comparison of determined station positions by three ways of analysis, (A), (B), (C), in the case of observation at the site 'off Miyagi' in July 1-4, 2005.

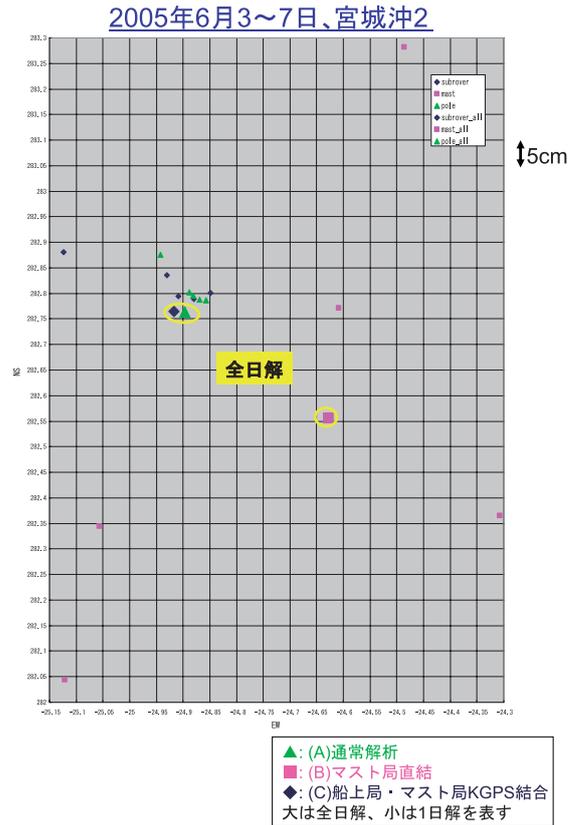
第2表 観測データ数と3つの解析方法による局位置決定後の走時残差の比較. 宮城沖1における7月1日~4日の観測の例.

Table 2 Numbers of observed data and comparison of travel time residuals after determination of station positions by three ways of analysis, in the case of observation at the site 'off Miyagi' in July 1-4, 2005.

		1日解				
		全日解	7月1日	7月2日	7月3日	7月4日
観測データ数		5321	1302	1320	1300	1399
走時残差のRMS(ms)	(A)	0.0857	0.0810	0.0755	0.0672	0.0788
	(B)	0.0824	0.0804	0.0751	0.0705	0.0781
	(C)	0.0857	0.0809	0.0759	0.0591	0.0789

ている半面, (B) による解は35cm程度と大幅に外れた解が求められた.

(B) による例のうち片方で局位置解が大きく外れた原因は, 支柱の船尾への設置方法にあると推測される. 現在の我々の観測方法では, 音響トランスデューサと動揺センサーが取り付けられた支柱を船尾のブルワークに固定する際に, 船首・船尾方向に



第5図 第4図と同様の比較. 宮城沖2における6月3日~7日の観測データの場合.

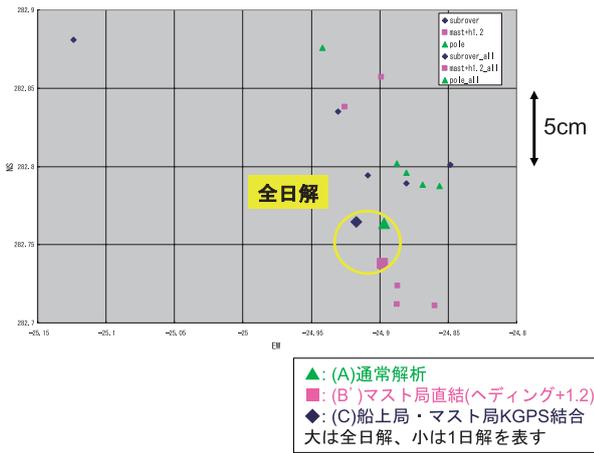
Fig. 5 The same comparison as that of Fig. 4, in the case of observation at the site 'off Miyagi West' in June 3 to 7, 2005.

対する直交性に対して特に注意を払っていない. これは, 船上局アンテナを用いた通常解析においてはGPSアンテナ・慣性GPSジャイロ・音響トランスデューサの位置関係は支柱によって結ばれた閉じた系となっており, 支柱自体の変形(しなり等)が無視できる水準であれば, 得られる局位置解は支柱の設置状況に依存しないからである.

少々乱暴な仮定ではあるが, 試みに(B')として, ヘディングの計測値に1.2度のバイアスを与えて(B)と同じ解析を行うと第6図のような結果となり, (A) および (C) の解との差は約3cm以内と十分に近い結果が得られる.

観測データ数と各解析における走時残差は第3表のとおりである. (A) と (C) の走時残差は同水準にある一方で (B) の走時残差は極端に大きい, ヘディング計測値にバイアスを仮定した (B') では (A) および (C) の水準に大幅に近づいている. 何ら

2005年6月3～7日、宮城沖2



第6図 第5図の(B)に代えてヘディングに1.2度のバイアスを与えて解析した結果(B')の比較。

Fig. 6 The same comparison as that of Fig. 5 but adopting 1.2 deg of heading bias to the analysis (B), labeled as (B').

第3表 観測データ数と4つの解析方法(A), (B), (B'), (C)による局位置決定後の走時残差の比較。宮城沖2における6月3日～7日の観測の例。

Table 3 Amount of observed data and comparison of travel time residuals after determination of station positions by four ways of analysis, (A), (B), (B'), (C), in the case of observation at the site 'off Miyagi West' in June 3-7, 2005.

	全日解	1日解				
		6月3日	6月4日	6月5日	6月6日	6月7日
測距データ数	5817	1192	981	1050	1382	1212
走時残差のRMS(ms)	(A) 0.0762	0.0600	0.0698	0.0775	0.0835	0.0655
(B) 0.2268	0.0814	0.1177	0.0729	0.0925	0.2142	
(B') 0.0795	0.0609	0.0681	0.0735	0.0856	0.0746	
(C) 0.0733	0.0584	0.0685	0.0817	0.0838	0.0657	

かの方法でロール・ピッチ成分にも同様のバイアスを推定すれば、さらに改善される可能性があろう。

今回考慮した支柱の船尾への据え付けに伴うバイアスは観測装置の艤装の都度変化するのが自然であり、第4図の事例(7月・宮城沖1)はバイアスがたまたま0に近かったケースであったと考えられる。

堅牢な支柱による「閉じた系」を構築する現行の観測と解析方法(A)は上記のような問題点に対しては有利に働くことを示しているが、将来音響トランスデューサの船底装備が実現した場合には、慣性

GPSジャイロの据え付けに十分な精度を確保する、もしくは動揺計測値に与えるバイアスを精度よく決定するなどの対処が必要となろう。

本稿の検討では、マストや船体の1日に満たない短周期の影響を評価することはできないため、今後さらなる検討が必要であるが、これまでに見た局位置解や残差の値から判断する限りにおいては重大な影響はなかったと見られる。

## 5 まとめ

船上局・マスト局KGPS結合(C)による局位置解は、通常解析と比較して大変近い挙動を示す。船上局における通常のKGPS測位を補完するものとして使用できる可能性が高い。

一方、マスト局直結(B)による局位置解は、現状の観測システムでは支柱の据え付け精度に大きく影響を受けるが、据え付け精度を確保する、あるいは動揺計測値のバイアスを決定することができれば通常解析と比較して遜色のない局位置解を得られる可能性がある。

謝辞：KGPS解析にはNASA/GSFC Colombo博士開発のソフトウェアITを用いた。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。記して感謝します。

## 参考文献

- 浅田昭, 矢吹哲一郎：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).
- 藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一郎：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).