

# 相模湾における長距離キネマティック GPS 測位試験

藤田雅之, 浅田昭, 富山新一: 海洋研究室

## Experiment on Long Range Kinematic GPS in the Sagami Bay area

Masayuki Fujita, Akira Asada, Shin-ichi Toyama: Ocean Research Laboratory

### 1. はじめに

移動する物体の位置を高精度で決定するために、GPS 衛星からの搬送波を利用するキネマティック GPS の手法が普及しており、位置が既知である基準点から約10km以内では、すでに数cmの測位精度が実現、実用化されている。しかしながら、基準点からの距離が大きくなるにつれ、大気、電離層等の空間不均質の影響により、測位精度が大きく低下する。これらの問題を克服し、精密キネマティック GPS 測位法を長距離基線に応用するための研究が、例えば Colombo and Evans (1997) 等によって進められつつある。

水路部では現在、GPS によるキネマティック測位法と海中の音響測距法を組み合わせることにより、海底地殻変動を観測する手法の研究開発に取り組んでいる。この目的のためには、海上の移動体（測量船やブイ）の位置を、数cmレベルで正確に決定する必要があるが、海上では近傍に基準点を設けることが困難である場合が多いため、上述の長距離基線における移動体の高精度位置決定が重要な課題となる。

ここでは、長距離基線の海上移動体測位試験として、陸から近距離にある相模湾内で、測量船「海洋」により GPS の 2 周波搬送波データを取得すると共に、観測海域から約10kmと100km付近に陸上基準点を設けて同時観測を行い、それぞれからの測位結果を比較することによって、100km基線のキネマティック測位精度を評価した。

### 2. 観測

平成9年10月25日～27日の間、相模湾域において、測量船「海洋」による GPS2周波位相観測を実施した。用いた GPS 受信機は、Trimble 4000SSi である。

GPS アンテナは、「海洋」上部欄干にポールで固定した。アンテナからの視界は良好であった。

観測は、1時間から1時間半程度を1セッションとして、全部で8セッション行った。サンプリング周期は、1秒ないし0.5秒である。それぞれのセッションの詳細を第1表に示す。

期間中の天候は、洋上ではおおむね晴れ、海上も穏やかであった。ただし、セッション300gについてのみ、若干波が高かった。

陸上基準点として、真鶴 (MAN) 及び春日部 (KAS) で、同時観測を行った。MAN は、洋上観測域から、数km～十数km程度、KAS は、約100km離れている。ただし、最後の2セッション(300gと300h)は、東京湾への帰路に取得したデータであり、MAN からの距離は、上記の範囲より大きい。これらの基準点は、今回の観測期間中臨時に設置したものである。

第1表 観測セッション (1997年10月25日～27日)

session	day	observation time (hh:mm, JST)	sampl. interval (sec)
298a	Oct. 25	09:00 - 10:00	1.0
298b	Oct. 25	10:15 - 11:45	1.0
298c	Oct. 25	12:15 - 13:50	0.5
298d	Oct. 25	14:50 - 16:10	0.5
298e	Oct. 26	08:00 - 09:25	0.5
299f	Oct. 26	09:45 - 11:10	0.5
300g	Oct. 27	12:00 - 13:40	0.5
300h	Oct. 27	14:00 - 14:30	0.5

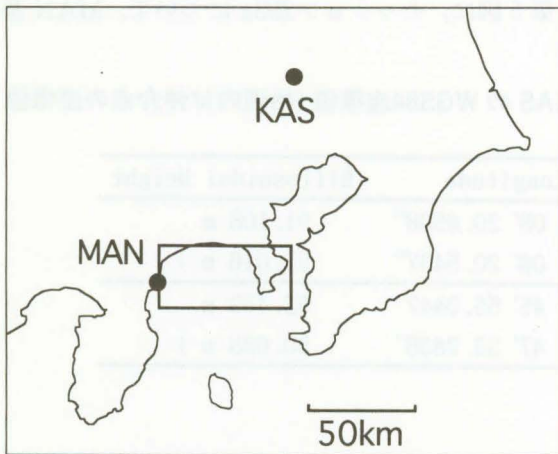
観測海域及び陸上基準点の位置を第1図に、またこの図の長方形部分を拡大して描いた観測セッション中の航跡を第2図に示す。

3. 解析方法

3.1 陸上基準点座標の決定

異なる陸上基準点からの移動体測位結果を比較するためには、それぞれの基準座標値を精密に決定する必要があるが、特にその基準点間の相対的位置関係が正確であることが本質的に重要である。

陸上基準点 MAN および KAS の基準座標値は、水路部の GPS 連続観測点下里 (和歌山県) の座標値と結合することによって決定した。ただし、今回の陸上基準点では、上記の短時間セッションデータしか取得していないため、長距離解析を精度よく行うことができない。そのため、それぞれ近傍の24時間連続観測点を介することによって、基準座標値を導出した。

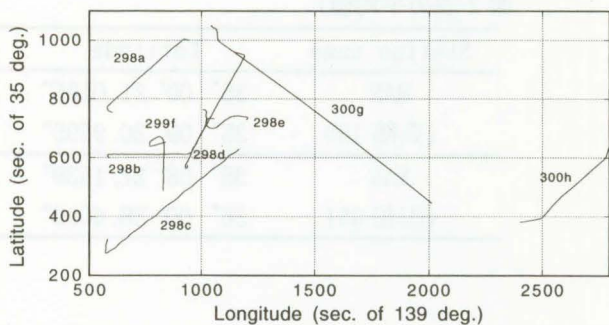


第1図 相模湾観測海域と陸上基準点の位置。MANは真鶴点、KASは春日部点を示す。

MANについては、同じ敷地内で約2m程離れた位置に設置されている水路部ネットワークの観測点(真鶴JHD点)を介した。また、KASについては、最も近い国土地理院の電子基準点(庄和町:庄和GSI点)を利用した。KASと庄和GSI点間の基線距離は、約5kmである。

下里と上記仲介点2点の24時間解析には、Bernese4.0 (Rothacher and Marvert, 1996) を用い、これら3観測点以外に、他の水路部定常観測点データも含めたネットワーク解析により結果を導出した。その際、用いた下里の基準座標値は、水路部海洋測地成果(辰野・藤田, 1994)に基づいている。結果の再現性を見るため、第2表に、今回の観測期間3日間について求めた仲介点それぞれの座標値を示す。水平成分で1/1000秒(数mm)程度、高さで1~2cm程度のばらつきしかなく、非常に安定している。これらの平均値を仲介点の座標値として採用した。

仲介点と陸上基準点との解析は、TrimbleのソフトウェアGPSurvey Ver.2.2の静止測量モードを用いた。解析は、全8セッションについて行い、一部



第2図 第1図の長方形部分を拡大して描いた「海洋」の航跡図。

第2表 下里との24時間解析によって求められた仲介点のWGS84座標値

Station name	Day	Latitude	Longitude	Ellipsoidal Height
真鶴 JHD	298	35° 09' 20.9595"	139° 08' 20.5436"	91.034 m
	299	35° 09' 20.9594"	139° 08' 20.5438"	91.010 m
	300	35° 09' 20.9595"	139° 08' 20.5439"	91.006 m
庄和 GSI	298	36° 00' 38.6089"	139° 47' 53.2838"	50.636 m
	299	36° 00' 38.6090"	139° 47' 53.2838"	50.635 m
	300	36° 00' 38.6090"	139° 47' 53.2838"	50.644 m

のやや不良なセッションを除いた結果の平均値を採用した。セッション毎のばらつきは、水平成分で1 cm程度、高さでこれよりもやや大きい程度である。

求められた陸上基準点および仲介点のアンテナ位相中心の採用座標値を、第3表にまとめて示す。この方法による、陸上基準点2点間の相対位置関係の精度は、水平成分においては1~2 cmを越えないと思われる。

3.2 キネマティック解析

陸上基準点から「海洋」の航跡を求めるキネマティック解析は、GPSurvey Ver.2.2の連続キネマティック On The Fly モードを用いて行った。このソフトウェアでは、L1の一周波による解を求めている。(ただし、GPSurveyは商用ソフトウェアであるため、まだ中身については不明な点もある。)

陸上基準点2点の座標値を、第3表の値に固定し、それぞれ独立の解析によって、各時刻における移動点座標値を求めた。衛星位置情報には、IGS (International GPS Service) の精密暦を用いた。

第3表 キネマティック解析に用いられた基準点 MAN, KAS の WGS84座標値 (括弧内は仲介点の座標値：第2表の平均値)

Station name	Latitude	Longitude	Ellipsoidal Height
MAN	35° 09' 21.0195"	139° 08' 20.6508"	91.108 m
(真鶴 JHD	35° 09' 20.9595"	139° 08' 20.5437"	91.016 m )
KAS	35° 58' 27.1539"	139° 45' 55.0447"	52.469 m
(庄和 GSI	36° 00' 38.6090"	139° 47' 53.2838"	50.638 m )

4. 結果

4.1 楕円体高

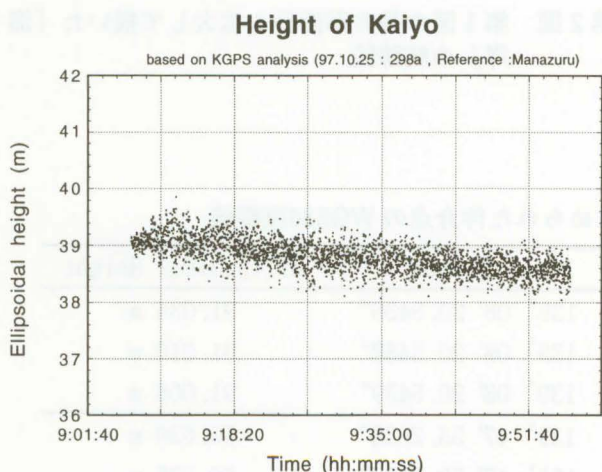
第3図に、セッション298aから求められた楕円体高の変化を示す。これは、近距離の陸上基準点 MAN から求めたものである。楕円体高は、全体に緩やかに傾斜しており、その回りに数10cmのばらつきが見られる。この傾斜は、進行方向のジオイド高変化を表すと考えると、方向としては、この周辺のモデル (例えば、Fukuda, 1990) と整合的である。

第3図の時間軸を拡大したものを、第4図に示す。図から、短周期のばらつきは、約10秒周期であることがわかる。これは、主として船体の動揺によるものと思われる。

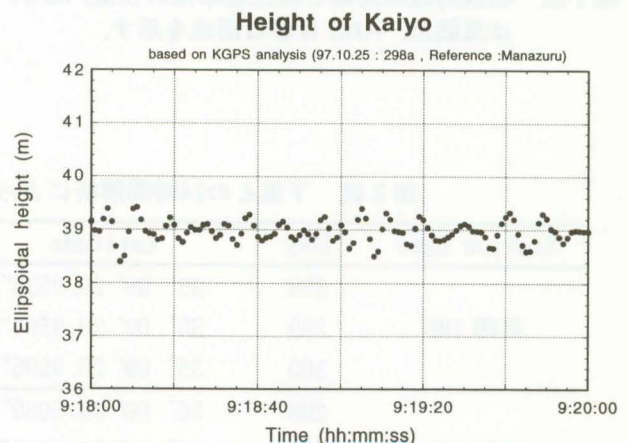
4.2 放送暦と精密暦による測位結果の差異

本解析では、IGSの精密暦を用いたが、ここでは参考のため、両基準点について、放送暦を使用した場合と比較した結果について示す。

第5図に、セッション298aについて、MAN基準



第3図 セッション298aについて求められた「海洋」の楕円体高変化 (MAN基準)。



第4図 第3図の一部を時間軸を拡大して描いたもの。

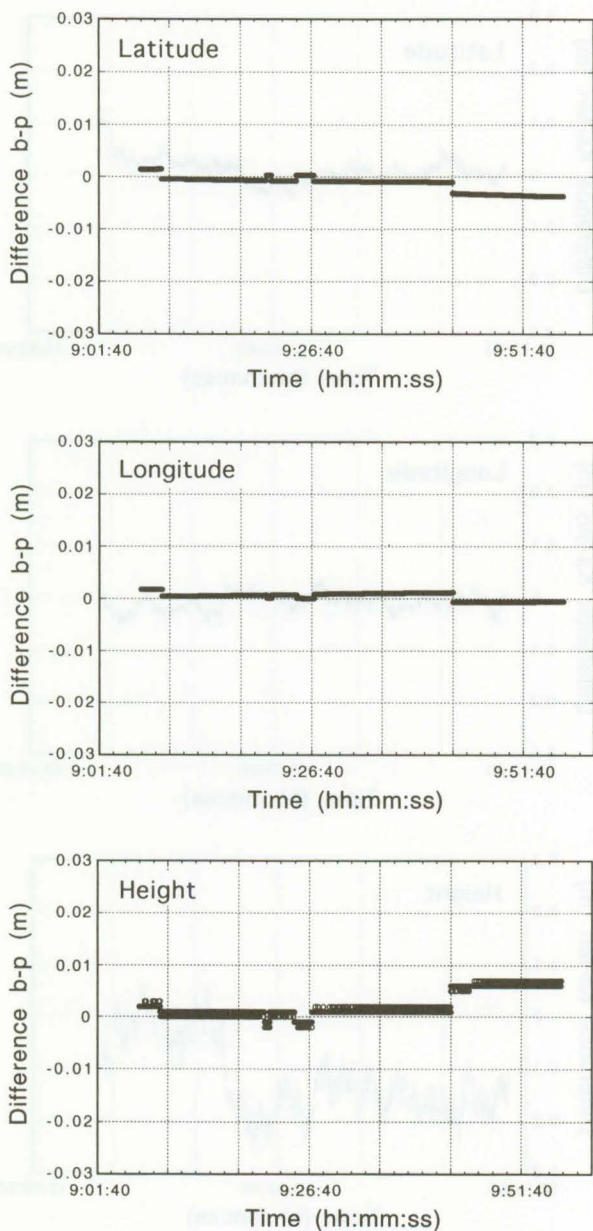
で精密暦と放送暦から求めた座標値の差を、時間軸に対してプロットしたものを示す。図には、時折不連続な飛びが見られるが、これは、観測される衛星の組み合わせの変化に伴うものと考えられる。全体的に差は数mm程度であり、非常に小さい。

第6図に、KAS基準について同様の差を示す。MAN基準と比較すると、その差は明らかに大きく、長距離基線で軌道誤差の影響が大きくなることを示している。それでも、水平成分で1cm以内、高さ方向でも、不連続に突出している部分で最大3cm程度、それ以外では1cm程度である。

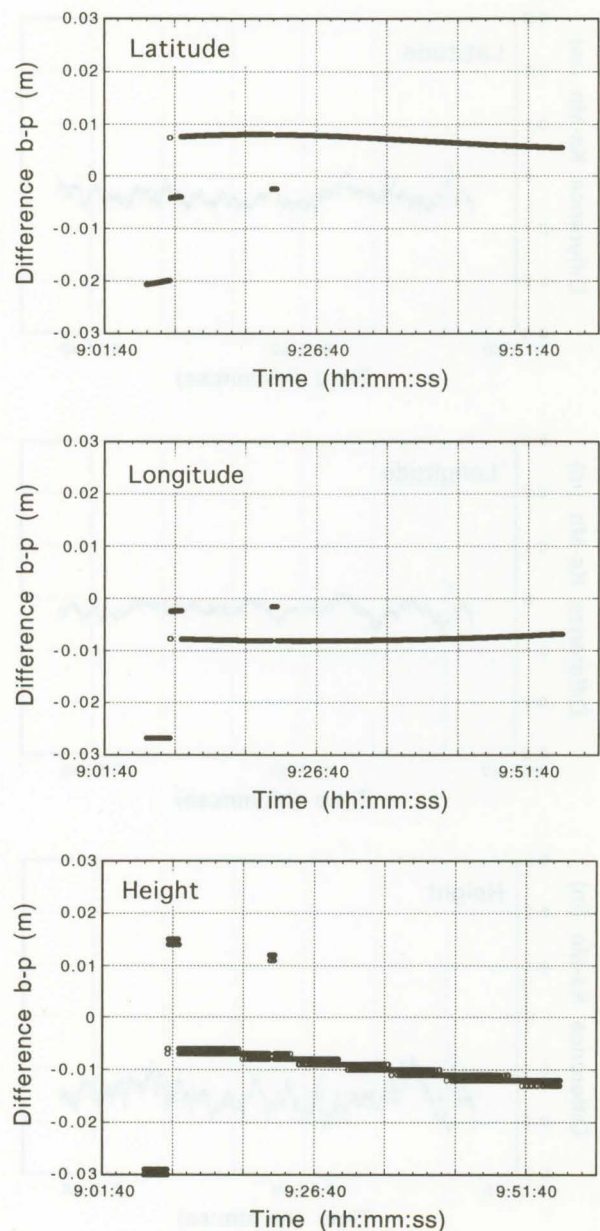
他のセッションについても、ほぼ同様の傾向を示している。これらのことから、少なくとも本観測期間中については、放送暦を用いることによる誤差は、基線長100kmでも、十分に小さいことがわかった。

### 5. 長距離基線の測位評価

MANとKASの両陸上基準点から独立に求めた「海洋」の測位結果を比較することによって、約100km程度の長距離基線測位の評価を試みた。ここでは、MANからの測位成果を数cmの精度で真値に近いと仮定して議論する。この仮定は、常に成り立つ



第5図 セッション298aについて精密暦(p)と放送暦(b)から求められた座標値の差(MAN基準).



第6図 セッション298aについて精密暦(p)と放送暦(b)から求められた座標値の差(KAS基準).

ているとは断定できないが、KASからの測位結果と比較する場合には、便宜的に有意なものと判断できる。

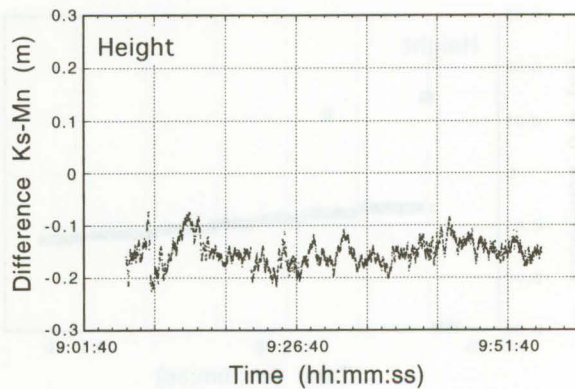
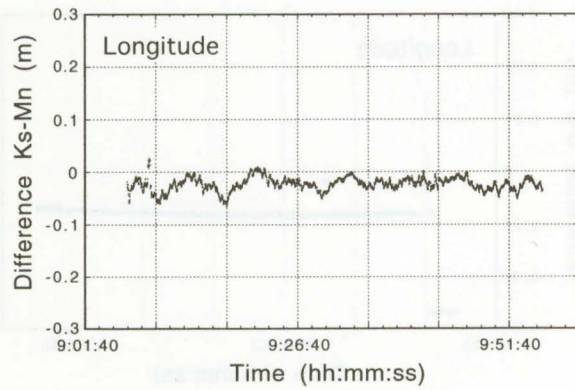
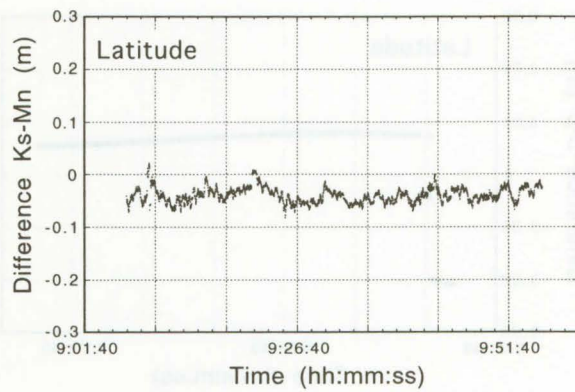
まず、第7図に、セッション298aにおける両座標値の差を、成分毎にプロットしたものを示す。これを見ると、まず経緯度成分については、それぞれ数cmレベルのバイアスがあり、これを中心としてばらついている。ばらつきは短周期、長周期のものが重なっており、短周期のばらつきは、1cm以下のレベル、長周期のばらつきは、1-3cmレベルである。

一方、高さ成分の差については、バイアスは約15

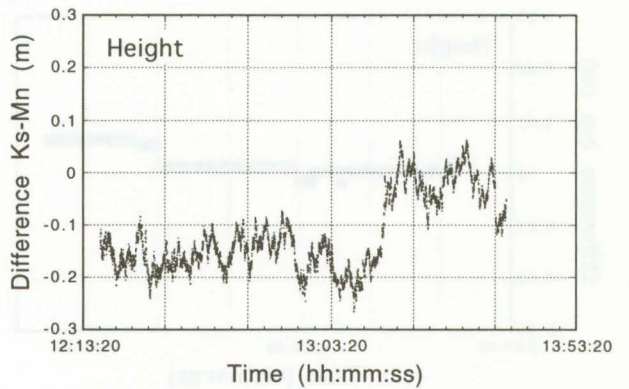
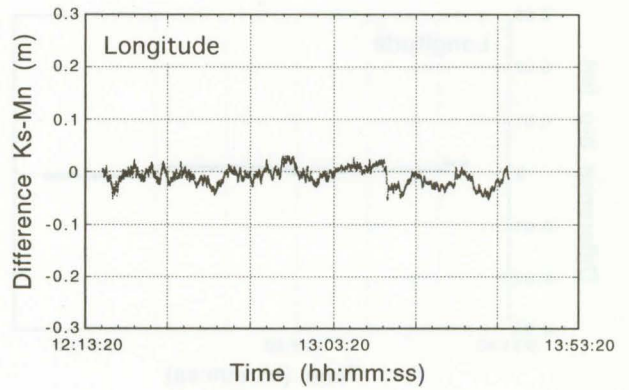
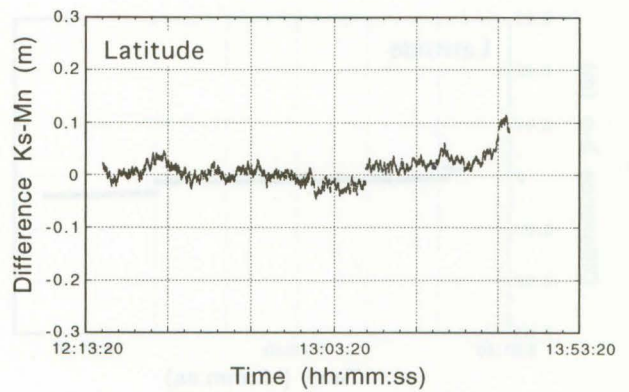
cm程度、長周期のばらつきは3-5cm程度と、共に水平成分よりもやや大きい。

もう一例、セッション298cの差の時間変化を、第8図に示す。このセッションでは、後半3分の1ぐらいの時刻に、各成分とも不連続の飛びが見られる。飛びの量は、水平成分で数cm、高さで10cm以上である。このような不連続は、衛星の入れ替わりに伴う、搬送波のバイアス決定値の誤りによると考えられる。

最後に、他のセッションに比べて突出して差の大きい例として、セッション298bの比較結果を第9図



第7図 MANとKASから求められた座標値の差(298a).



第8図 MANとKASから求められた座標値の差(298c).

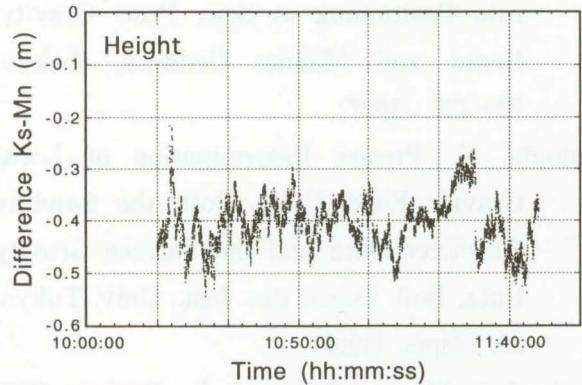
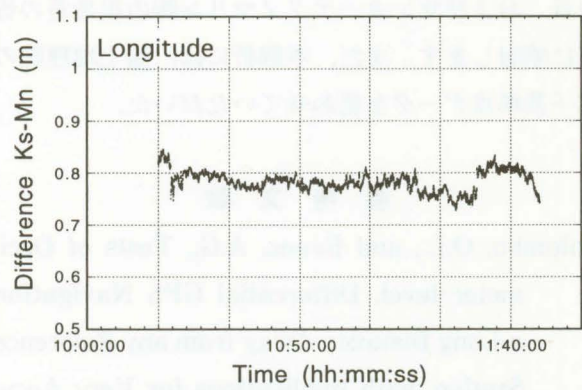
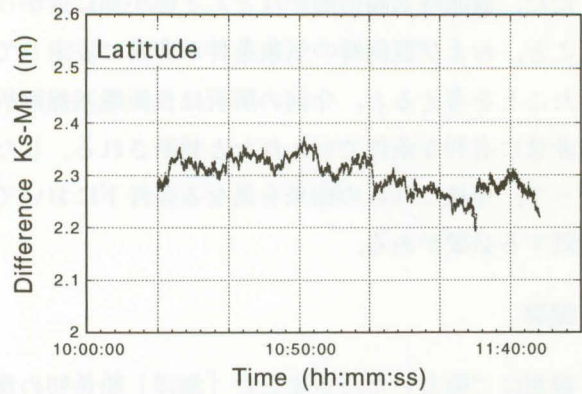
に示す。図からわかるように、このセッションでは、ばらつき具合は一見298cと同程度であるが、詳しく見ると水平成分に1~2m、高さ成分にもやや大きなバイアスがある。この原因は現在のところ不明であるが、その性質からみて、本質的に議論すべき測位誤差と判断するよりは、ソフトウェアのアルゴリズムに起因する偶発的な誤りであると思われる。

第4表に、全てのセッションについて、両基準点から求めた座標値の差の時間平均(バイアス)とばらつきのrmsのみを一覧にして示す。バイアスについては、複数のセッションを通じての系統性はあまり見られず、基準点座標値の誤差に帰することはできない。

以上の比較結果は、KASを基準とした長距離測位で、一部の悪いセッションを除き、水平成分で数cm、鉛直成分でも相対変化については、10cm以下の精度が得られたことを示している。これは、ほぼMANからの測位に期待される精度に匹敵している。ただし、MAN、KAS両方からの測位結果に、例えば船上データに起因する共通の大きな系統誤差がある場合があり得るが、これは長距離測位とは別の問題として扱わなければならない。

6. まとめ

測量船「海洋」により、相模湾でのキネマティックGPS観測を行い、距離の異なる2点の陸上基準点データを用いて、長距離基線の測位精度を評価した。その結果、Trimble GPSurveyを用いて、基線距離約100kmで、水平成分で数cm、鉛直成分でも相対変化であれば、10cm以下の精度が得られた。



第9図 MANとKASから求められた座標値の差(298b).

第4表 MANとKASから求められた座標差の時間平均とそのまわりのばらつきのrms

session	latitude (m)	longitude (m)	height (m)
298a	-0.040 ± 0.014	-0.024 ± 0.013	-0.153 ± 0.025
298b	2.300 ± 0.033	0.783 ± 0.019	-0.406 ± 0.049
298c	0.010 ± 0.024	-0.010 ± 0.016	-0.120 ± 0.073
298d	-0.010 ± 0.012	-0.034 ± 0.014	-0.155 ± 0.063
298e	0.034 ± 0.061	0.008 ± 0.028	0.000 ± 0.065
299f	-0.017 ± 0.018	-0.001 ± 0.015	0.063 ± 0.052
300g	0.017 ± 0.015	-0.004 ± 0.016	-0.047 ± 0.054
300h	-0.024 ± 0.013	-0.009 ± 0.009	-0.013 ± 0.023

ただ、観測時太陽活動がほとんど極小期に近かったこと、および観測時の気象条件が非常に安定していたことを考えると、今回の解析は長距離基線解析に非常に有利な条件で行われたと判断される。したがって、今後これらの結果を異なる条件下において検証する必要がある。

謝辞

観測にご協力いただきました「海洋」船長初め乗組員、およびサンヨーテクノマリン(株)の担当者の方々に感謝します。また、本解析には、国土地理院の電子基準点データを使わせていただいた。

参 考 文 献

Colombo, O.L., and Evans, A.G., Tests of Decimeter-level, Differential GPS Navigation a Long Distance Away from any Reference Station, with Implications for Very Accurate Positioning at Sea., Proc. Gravity, Geoid and Marine Geodesy, Tokyo, 720-727, (1997).

Fukuda, Y., Precise Determination of Local Gravity Field Using Both the Satellite Altimeter Data and the Surface Gravity Data, Bull. Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo, 28, 133pp., (1990).

Rothacher, M., and Mervart, L., Bernese GPS Software Version 4.0, Astronomical Institute, University of Berne, 418pp., (1996).

辰野忠夫・藤田雅之, 海洋測地網本土基準点の位置決定, 水路部観測報告衛星測地編, 7, 102-106, (1994)

観測点番号	緯度 (度)	経度 (度)	標高 (m)
001	35.00	140.00	100.0
002	35.00	140.00	100.0
003	35.00	140.00	100.0
004	35.00	140.00	100.0
005	35.00	140.00	100.0
006	35.00	140.00	100.0
007	35.00	140.00	100.0
008	35.00	140.00	100.0
009	35.00	140.00	100.0
010	35.00	140.00	100.0