

後処理ディファレンシャル GPS 手法を用いた測量船の測位

矢吹 哲一朗：海洋研究室

打田 明雄：第六管区海上保安本部水路部

Positioning of Survey Vessel by the post-processing of differential GPS data

Tetsuichiro Yabuki : Ocean Research Laboratory

Akio Uchida : Hydro. Dept., 6th R.M.S. Hdqrs.

1. はじめに

海洋調査にとって基本的な情報である海上測位について、最近、GPS をさらに精度向上をさせた、ディファレンシャル GPS システムが一般に利用されるようになってきている。ディファレンシャル GPS の技術は、2つの視点から、4種類の手法に分けられる(表1)。それぞれについて、利点欠点があるが、海洋調査への利用者としての立場にたてば、実時間性は享受できなくとも妥協できるであろう。それよりも、たとえ後処理方式であっても広範囲の海域で利用できることの利点大きい。このような、GPS の海洋調査での応用については、例えば、矢吹(1995)、木津・花輪(1995)のレポートがある。また、水路部では、これまで、ディファレンシャル GPS の技法を海上での調査活動に応用するため、その技法の評価を行ってきている(打田, 1995; 1996)。

ここでは、長距離の基線(数十~数百キロメートル)での後処理方式のディファレンシャル GPS について、船舶に GPS 受信機を設置し実データを取った。その結果から、コード疑似距離測定方式と

搬送波位相積分方式を比較したので報告する。

2. 測定の概要

測定は、1996年2月9日~10日に、およそ、34時間にわたって、水路部測量船「海洋」で行った。測量船「海洋」のこの時の航跡を図1に示す。東京港13号地(その1)埋立地埠頭を出港し名古屋港に向かったが、御前崎の沖で海難が発生したために捜索活動を行った後、名古屋港に入港した。

測定はいくつかの GPS 受信機を用いて行った。その概要を表2に示す。

ディファレンシャル GPS のための陸上基準点は、東京都立川市にある海上保安試験研究センターに、3種類の機種それぞれに対応して設けた。東京港までの基線距離はおよそ30キロメートル、伊良湖水道付近では、基線距離はおよそ280キロメートル(最長)になる。図2は、測量船「海洋」船上でのアンテナの設置の位置関係を示す。また、アンテナの海面(喫水)からの高さも、図2に示す。写真1

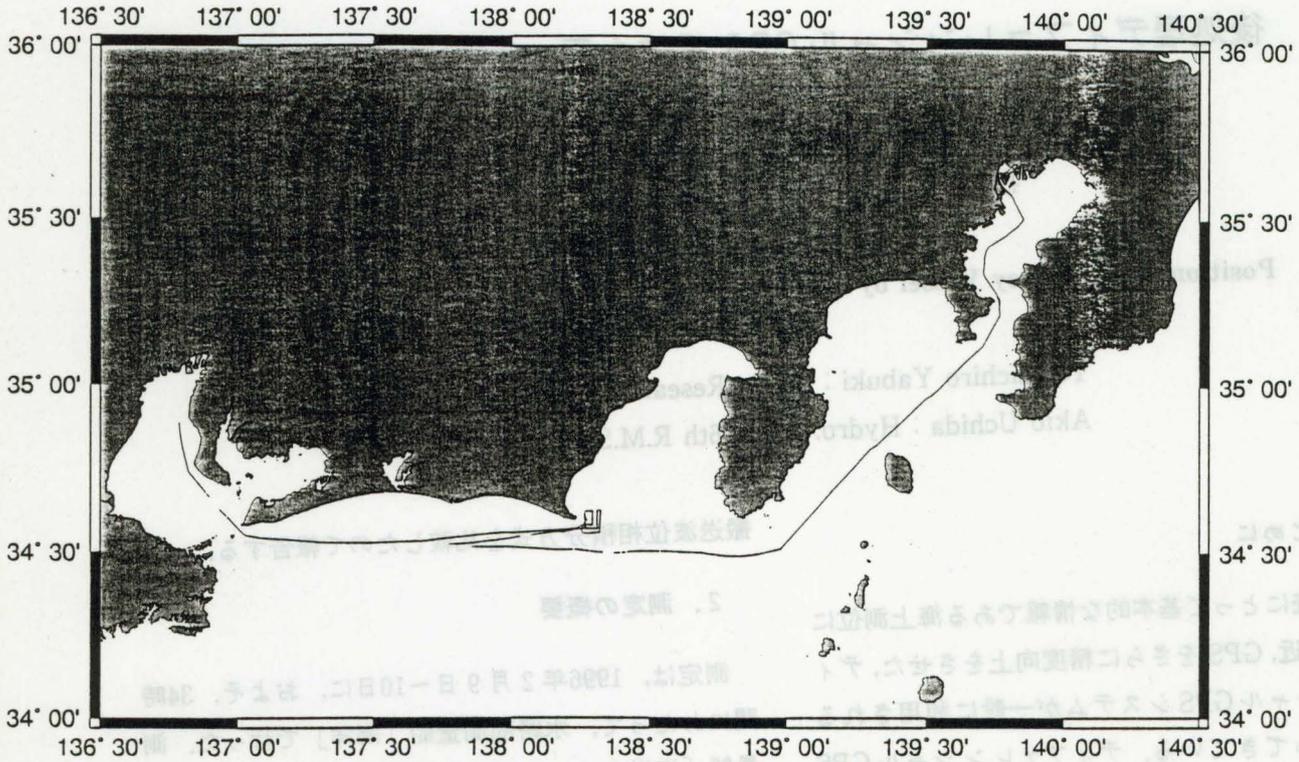
表1 ディファレンシャル GPS の分類

	測定情報	実時間性	方式名称	本文中の略称
ディファレンシャル GPS 測位	C/A コード 疑似距離測定	実時間	リアルタイムディファレンシャル GPS	RDGPS
		後処理	後処理ディファレンシャル GPS	NRDGPS
	C/A コード 疑似距離測定 + 搬送波位相積分 (連続追跡)	実時間	リアルタイムキネマティック オンザフライ	RTK OTF
		後処理	後処理キネマティック GPS	KGPS

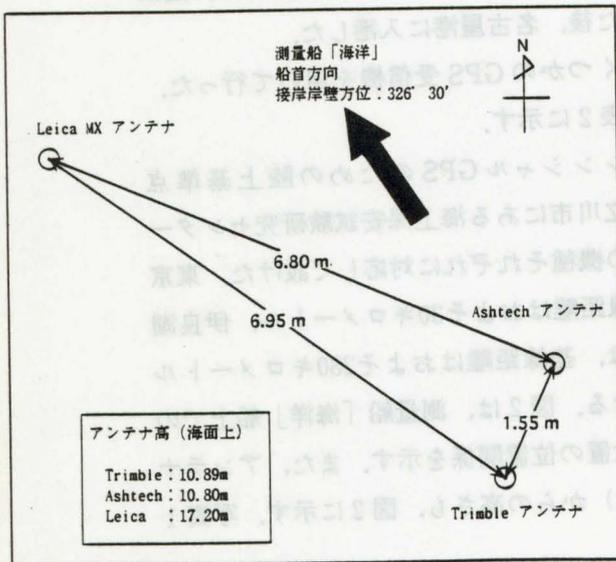
表2 今回の実験で用いた GPS 受信機の種類とデータの処理方法

機種	Leica MX9212		Trimble 1000Si	Ashtech Z-12 ¹⁾
	測位モード	後処理ディファレンシャル GPS	後処理キネマティック GPS	後処理キネマティック GPS
実時間性	実時間測位	後処理	後処理	後処理
ディファレンシャル陸上基準点	-	立川 ²⁾	立川 ²⁾	立川 ²⁾
データ書き込み 間隔	1秒	1秒	5秒	1秒
ディファレンシャル処理ソフト	-	NAVREF	GPSurvey	PNAV

1) 取得データは、測量船「海洋」が東京港に停泊していた、およそ2時間のデータ
2) 東京都立川市の海上保安試験研究センター



第1図 1996年2月9-10日の測量船「海洋」の航跡。
東京港を出港し、名古屋港に向かう。



第2図 測量船「海洋」の上に設置したGPSアンテナの相対位置関係。海面からのアンテナ高も同時に示した。

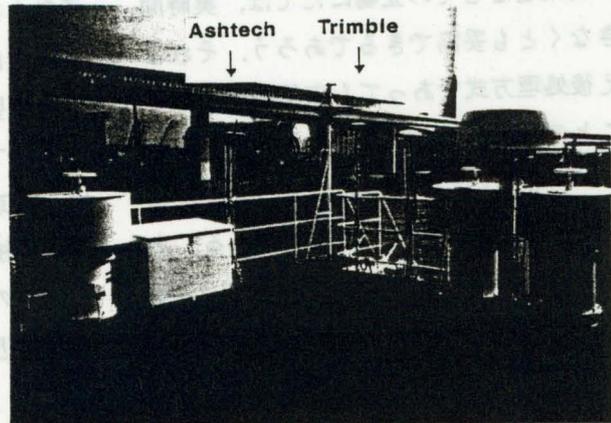


写真1 測量船「海洋」に臨時に取り付けた Trimble と Ashtech の GPS アンテナ。

は、臨時に取り付けたアンテナを東京港で撮影したものである。

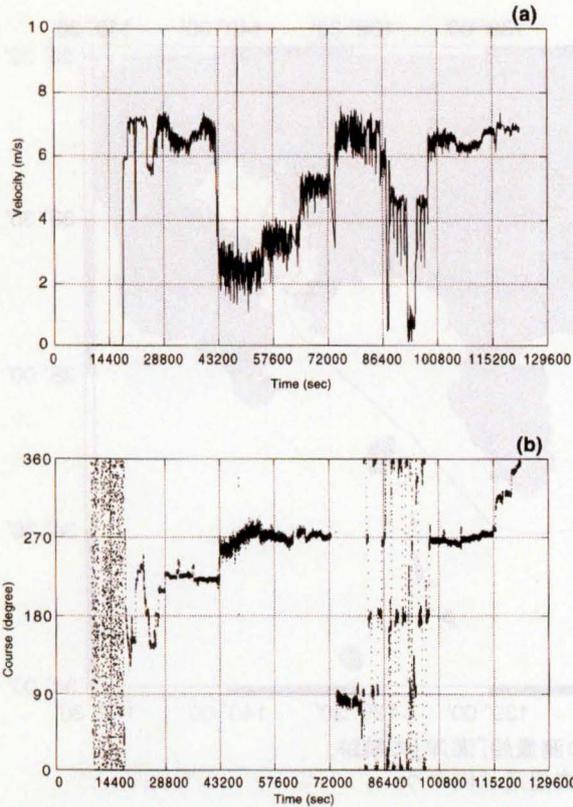
図3は、この航海での「海洋」の移動速度と移動方向を、測位の結果から計算した結果を示す。これは、Trimble KGPSの位置測定毎5秒値から移動距離と方向を求めて推定した結果である。また、「海

洋」の行動の概要を表3に示す。今回のデータは、東京港に停泊中のおよそ2時間半のデータを含め、東京港から伊勢湾内までのおよそ34時間に及ぶ。

3. 結果

3.1 東京港停泊中の結果

図4は、東京港に停泊中の各測位手法による高さ(楕円体高)の測位の結果である。時間幅は、およそ5時間である。これらを、短期的なばらつきと系



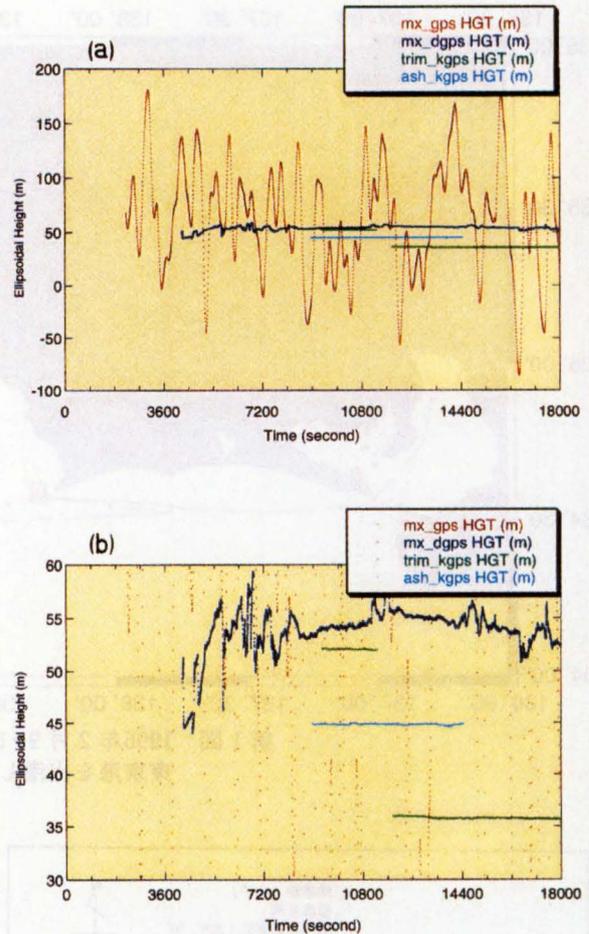
第3図 GPSによる測位結果から求めた、「海洋」移動速度の推定値(a)と「海洋」の移動方向(コース)の推定値(b)。コースは、北を0 degreeとし、東を90degreeとして示した。時刻原点は、日本時間の1996年2月9日、午前9時(UTC 1996/2/9 00:00:00)。

表3 測量船「海洋」の行動の概要

時刻(秒)	日本時間	測量船「海洋」記事
0	1996/2/9 09:00	東京港停泊中
2100	09:35	GPSデータ収録の開始(Leica 標準測位)
4200	10:10	GPSデータ収録の開始(Leica NRDGPS)
9000	11:30	GPSデータ収録の開始(Trimble, Ashtech)
14400	13:00	Ashtech受信機、GPSデータ収録の停止
18000	14:00	東京港出港
43200	21:00	石廊崎南東海上で西に針路を取る
72180	1996/2/10 05:30	東経137度45分付近で反転、御前崎沖に向かう
81000	07:30	御前崎沖に到着
98100	12:15	御前崎沖を離れ、名古屋港に向かう
115200	17:00	伊良湖沖通過
122400	19:00	位置データ収録の停止(伊勢湾内)

統的なズレとに分けて考える。

図4(a)から、標準測位のばらつきの大きさと、そのばらつきが構造を持っていること、さらに、そのような大きなばらつきを小さくするディファレンシャルの効果が見える。図4(b)をよく見ると、ばらつきは、LeicaのNRDGPSに比べて、Trimbleと



第4図 (a, b): 東京港停泊時の「海洋」測位結果の高さのばらつき具合。(b)は(a)の上下方向(縦軸)を拡大した図。

Ashtechの結果が比較的小さい。ただし、Trimbleの結果では、時刻11700秒付近に、20メートル近い飛びがある。後に述べるように、この同じ時刻に、水平方向の飛びも存在する。明らかに、ここで、いわゆる搬送波位相の追跡の連続性が途切れているものと思われる。一方、Ashtechの結果は、そのような飛びはない。ただし、Ashtechは1秒間隔で、また、Trimbleは5秒間隔でデータを取得したので、単純にAshtechとTrimbleの結果の精度を比較することはできない。

また、各手法の間で明らかにずれがある。このうち、Ashtechの結果とLeica MXの結果の間のズレは、アンテナ高の差にほぼ一致する。しかし、AshtechとTrimbleの結果のズレは、アンテナ高の差

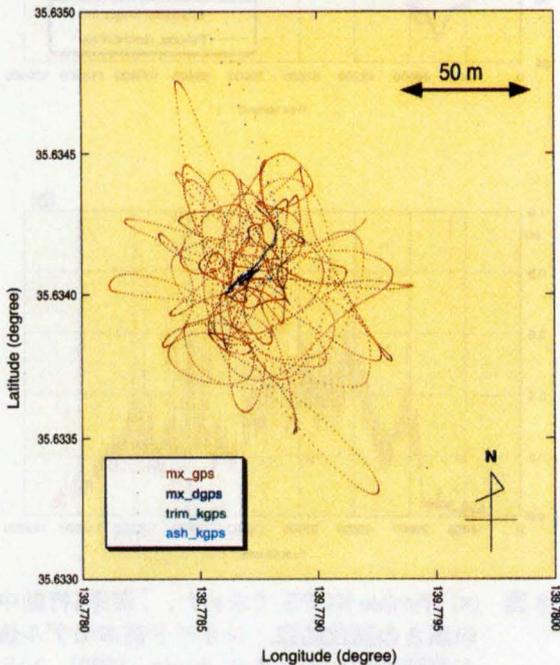
では説明できないものである。基準点の座標設定にミスがあったものと思われる。これについては後に詳述する。

このように、測定結果の確度（絶対値の正しさ）には、疑問があるものの、測定のばらつきは Ash-tech と Trimble はともに小さい（10cm 程度である）。Leica MX NRDGPS では、これに対し数メートルのばらつきがある。

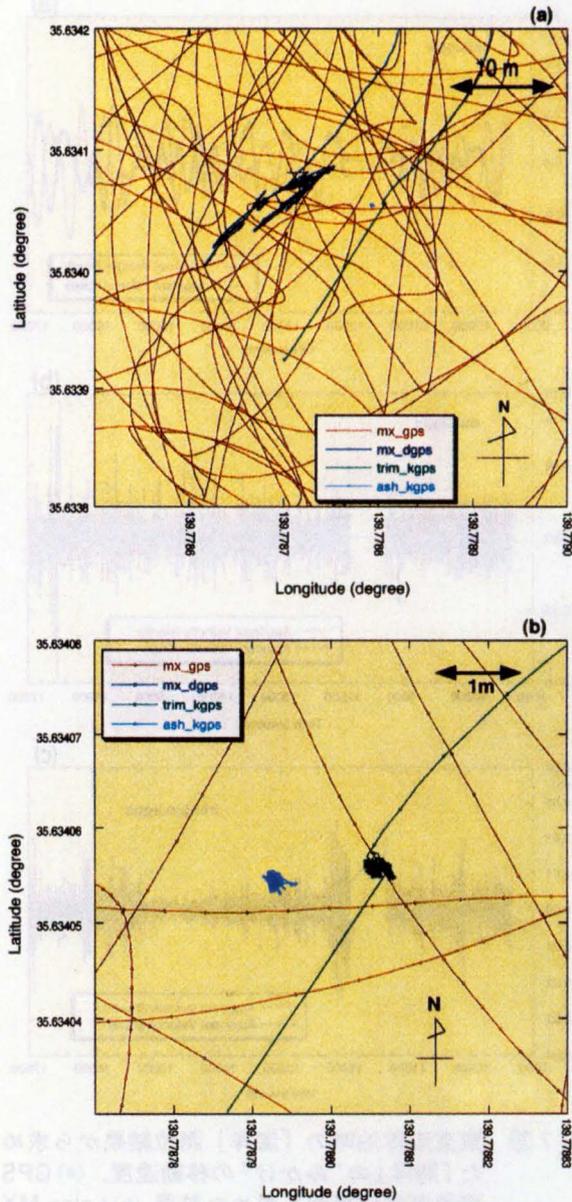
図5は、同じく東京港停泊中の各手法での測位結果の平面的なばらつきである。この図から、標準測位のばらつきの大きさが分かる。また、ディファレンシャルの手法の結果は、ばらつきが非常に小さくなっていることも分かる。その詳細を見るために、図5を拡大したものが図6になる。

図6(a)から、Leica MX NRDGPS では、数メートル程度のばらつきを持っていること、それも、北東-南西方向にばらつくことが分かる。この方向性については原因はよくわからないが、マルチパス等の影響が予想され、停船中の周囲の環境が関係しているものと考えられる。

Trimble と Ashtech KGPS では、ばらつきは小



第5図 東京港停泊時の「海洋」測位結果の水平成分のばらつき。

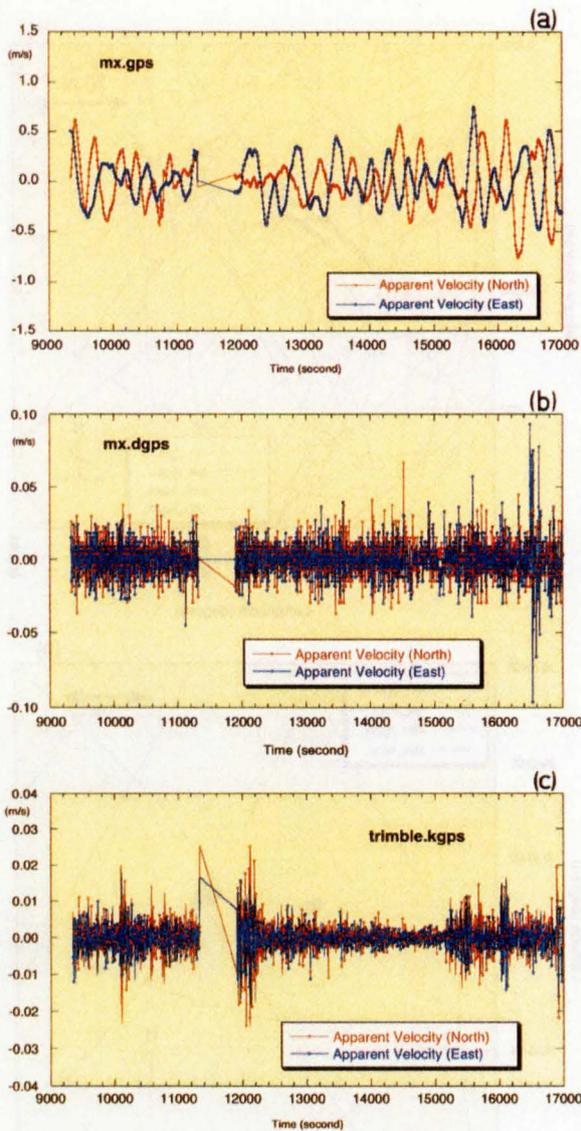


第6図 (a, b) : 東京港停泊時の「海洋」測位結果の水平成分のばらつき。図5を拡大したものの。

さくなる。ただし、先に上下方向の結果の考察でも述べたように、Trimble ではある時刻に場所が飛んでいる。その飛びは、南西から北東の方向に20メートル程度になり、上下方向の飛びの大きさとはほぼ同じ量である。

短期的なばらつきは、Trimble と Ashtech のどちらも数十センチメートルである。若干、Ashtech の方が小さい。

次に、図7に、Ashtech を除く残りの機種の結果



第7図 東京港停泊時の「海洋」測位結果から求めた「海洋」の「みかけ」の移動速度。(a) GPS標準測位結果から求めた結果。(b) Leica MX DGPSから求めた結果。(c) Trimble KGPSから求めた結果。

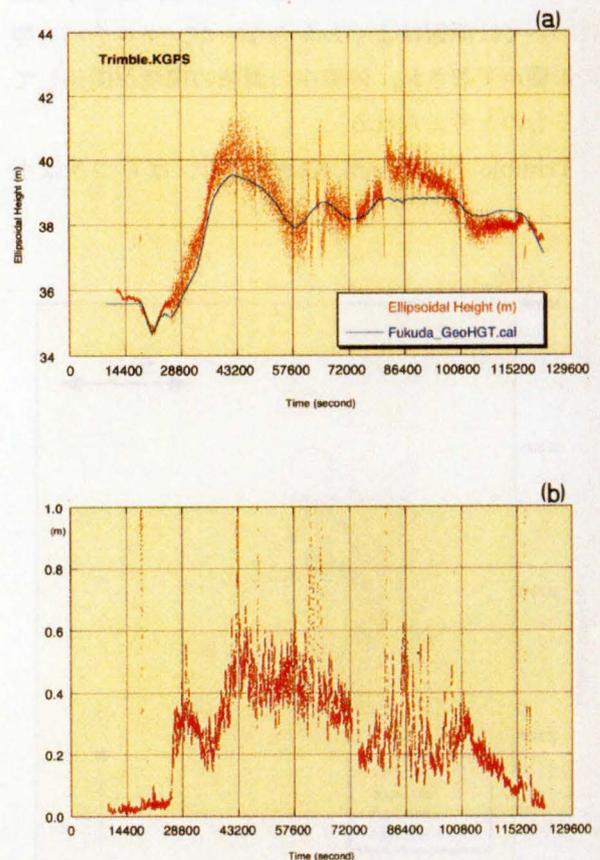
について、測位結果から推定した移動速度を示した。もちろん、この間は停止していたので、これは測定誤差に起因するみかけの移動速度である。この結果によれば、標準測位サービスでは速度が50cm/sを越えることもある。また明らかに、数分の時定数を持った変動である（このことは、高さのばらつきを示した図4からも明らかである）。これは、S/Aに起因する人工的なノイズ構造を反映している。

ディファレンシャルの手法を用いると、みかけ速

度のばらつきは小さくなり構造的は見えなくなる。Leica MX NRDGPSでは2~3cm/s, Trimbleではさらに小さく1cm/s以下の見かけ速度になる。

3.2 Trimble KGPSの高さ結果

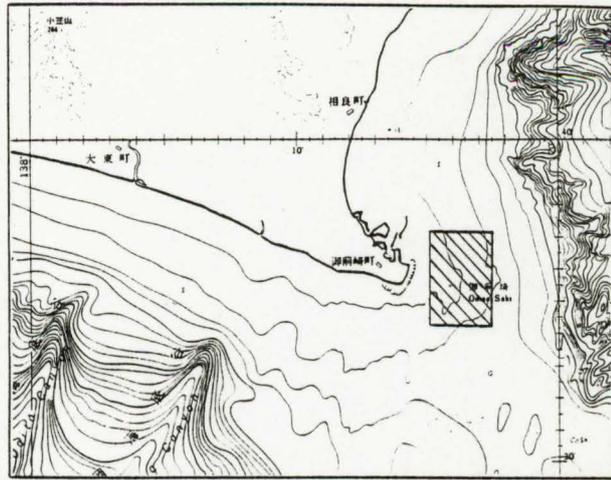
図8(a)は、Trimble KGPSで得られた東京港から伊勢湾までの高さ（楕円体高）の変動（毎5秒データ）である。同時に、ジオイドの高さ（Fukuda, 1990）を示す。変動の長期的な成分の大部分は、ジオイド高の地域的な変化に対応することが分かる。一致しない部分もあるが、これは、ジオイドモデルの問題とGPSの後処理の問題の両方が考えられる。また、海洋潮汐の補正も今後の課題である。なお、高さの変動には、ところどころにあきらかな間違いのスパイクノイズが入っている。



第8図 (a) Trimble KGPSで求めた、「海洋」行動中の高さの測位結果。ジオイド高のモデル値も同時に示してある（Fukuda, 1990）。(b) 5秒ごとの36個のデータから求めた移動平均からのズレの二乗平均の平方根（RMS）の

そのほか、高さには短周期のばらつきがあるが、この大部分は船の動揺と考えられる。これを検証するために、この高さの移動平均（5秒おきの36個のデータ、したがって180秒の高さの平均）をとり、それからのズレの2乗和の平方根（RMS）を計算したものを、図8(b)に示す。高さのばらつきは、0.2メートルから、大きいときで0.6メートル以上ある。もちろん、最初に東京港に止まっている間はばらつきは小さく、5センチメートル以下である。上下のばらつきのもっとも大きい43200秒から57600秒にかけては、石廊崎の沖を西進していた時間帯で、海況がかなり悪かったことが推察できる。このように、上下のばらつきは、大部分が船の動揺の結果であると考えられる。

このことを、別の観点から考察してみる。図9は、時刻にして88505秒から92510秒までのおよそ4000秒（約67分間）の船の航跡である。この間は御前崎沖で海難捜索中で、「海洋」は南北にいったりきたりしている（図10）。この時間帯の高さ変動を図11(a)に示す。また、移動平均からのばらつき（図8(b)と同じもの）を図11(b)に示す。このばらつき分布は「海洋」



第10図 御前崎沖の「海洋」の行動海域。図の斜線区域が、図9の表示領域に対応。

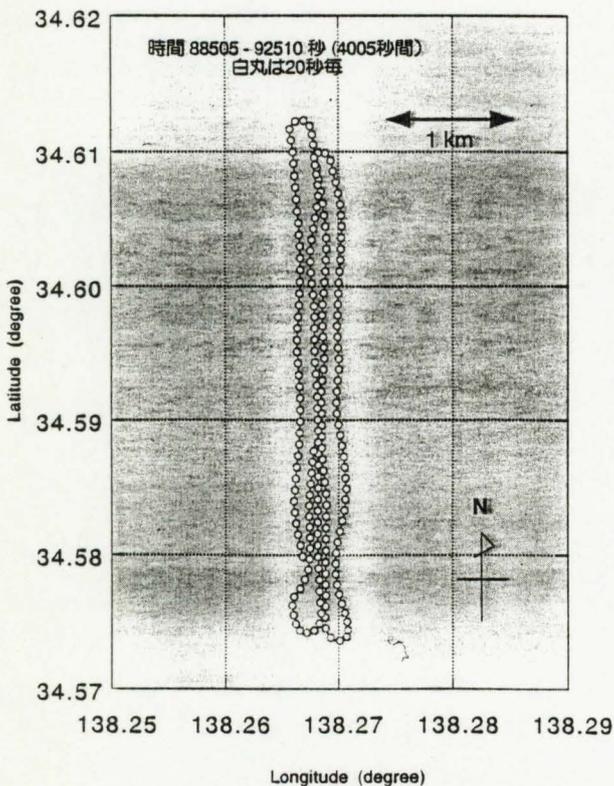
がいる位置に対応している。先に述べたように、海洋はこの時間は南北測線を往復していたが、船の位置の緯度と高さのばらつきの関係を図示すると、図11(c)のようになる。明らかに、航跡の南の端でばらつきが大きい。これは、当日のこの海域（御前崎沖）の海況に関係していると考えられる。

3.3 Trimble KGPS と他の機種の結果の比較

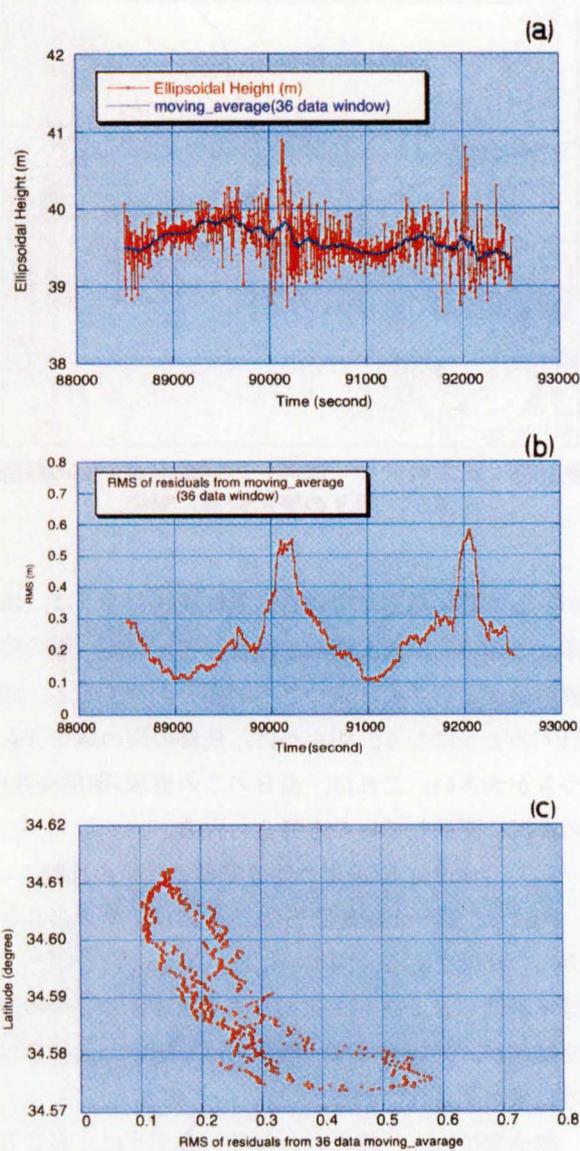
図12は、Trimble KGPS と他の測位の結果の高さ方向の比較である。図12(a)には、Trimble KGPS、標準測位、および Leica MX NRDGPS の3つの測位結果が、図12(b)では、標準測位を除いた残り2つの結果が示されている。

標準測位は、一般にいわれているように、高さ方向で、150メートル以上の誤差を示すことがある。MX NRDGPS では、誤差の大きさはずっと小さくなる。ただし、ときどきステップ状のズレを示すようである。また、Trimble KGPS には、スパイク状のノイズがある。図12(c)は、Leica MX NRDGPS の結果から、Trimble KGPS の結果を引き算したその差のプロットである。MX NRDGPS には、30分程度の間隔で1~2メートルの飛びが生じている。この原因としては、用いるGPS衛星の切りかわりが考えられる。一般に、衛星が水平線から昇って、再び沈むまでの平均時間を4時間、一度に観測する衛星数を8個とすると、30分に一回の頻度で衛星が切りかわっていると考えられる。

次に、水平方向の位置の比較を試みる。図13(a)は、

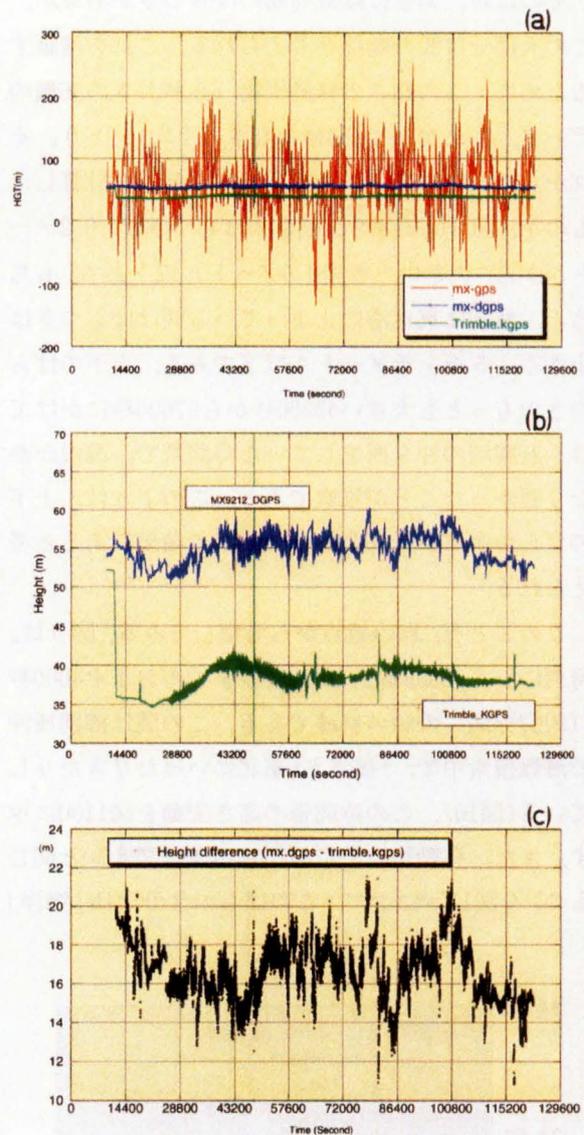


第9図 御前崎沖の「海洋」の航跡の一部。



第11図 Trimble KGPS で求めた御前崎沖での「海洋」の測位結果の高さデータ。(a)高さの変動と、その移動平均(毎5秒の36データから求めた結果)。(b)移動平均からの差のRMS(図8(b)に同じ)の時間変化。(c)同じく、移動平均からのズレのRMSを緯度を横軸にしてプロットした結果。

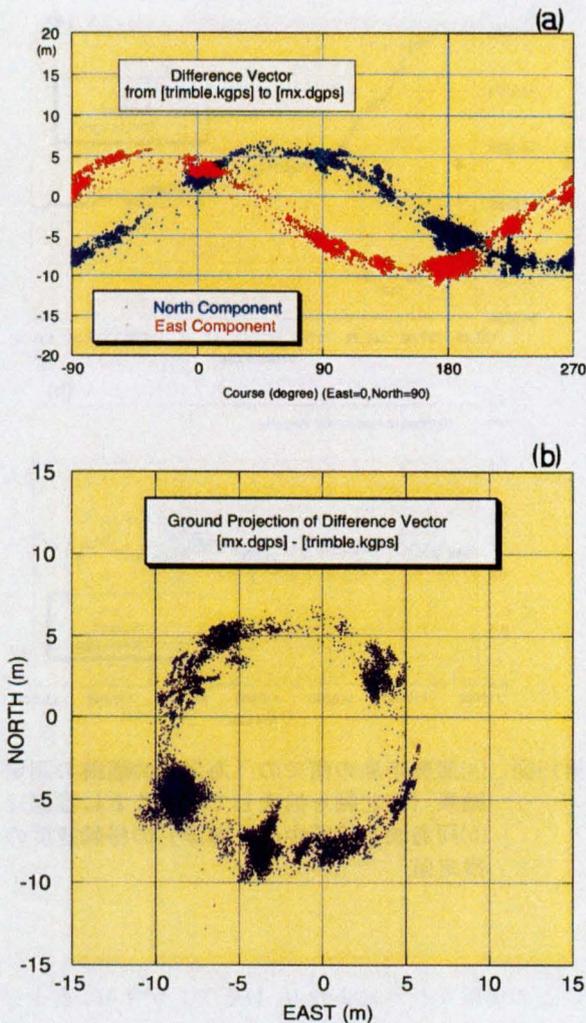
Trimble KGPSの結果(水平位置)からLeica MX NRDGPSの結果(水平位置)までの差ベクトルを求め、東方向成分と北方向成分それぞれを船のコース(東を0度、北を90度としてあります)を横軸としてプロットしたものである。明らかに、この差ベクトルが、「海洋」船上のTrimbleとLeica MX NRDGPSのアンテナ位置のずれに対応している。コースが変化すると、それに合わせて差ベクトルの



第12図 「海洋」行動期間中の測位結果の高さデータの比較。(a) GPS標準測位, Leica MX DGPS, Trimble KGPSの結果。(b) Leica MX DGPSとTrimble KGPSの結果を拡大したもの。(c) Leica MX DGPSとTrimble KGPSの結果の差。

地理的な向きも変化している。

図13(b)は、この差ベクトルの水平面投影である。円周上に分布するのは、TrimbleのGPSアンテナの位置を中心として、ぐるっと「海洋」を回転させた時の、Leica GPSアンテナの軌跡に対応する。正確な測位であれば、ほぼ円周上(船のローリングとピッチングがあるから、完全な円にならない)に分



第13図 「海洋」行動期間中の水平位置の測位結果について、Leica MX DGPSとTrimble KGPSの結果の差ベクトル。(a)横軸を「海洋」のコース(東方向を0度、北を90度にしてあるので注意)にし、差ベクトルの北方向成分と東方向成分をプロットした結果。(b)差ベクトルの水平面投影。

布するはずである。円周からのズレは、Trimble KGPSとLeica MX NRDGPSの誤差の和であるが、その大きさは2~3メートルという所である。上下方向の誤差の大きさとほぼ同じと見てよい。

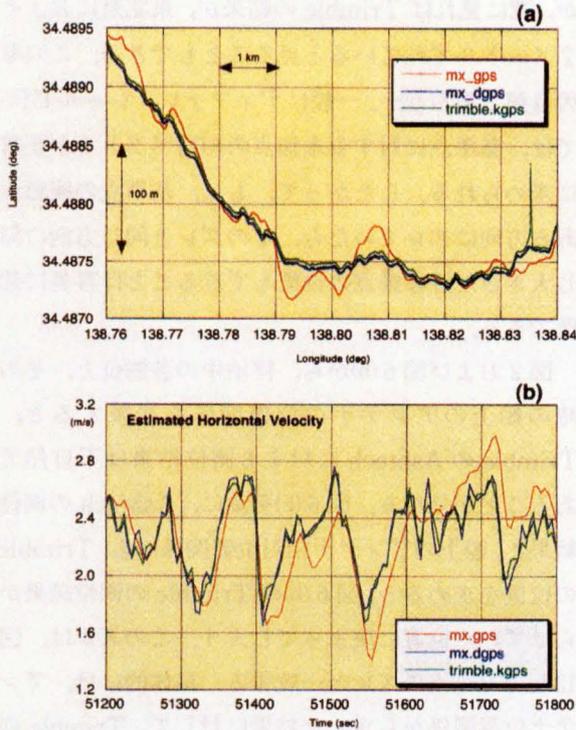
図13(b)で、すぐに気がつく特徴は、円の中心がゼロ点にないことである。西におよそ2メートル、南におよそ1.5メートルずれている。Leica MX NRDGPSで求めた、水平位置は、全体として西南西におよそ2メートルずれていると見る事ができる

が、逆に見ればTrimbleの結果が、東北東におよそ2メートルずれていると見ることもできる。この原因は何であろうか。一般にディファレンシャルGPSでは、基準点に対する未知点の相対ベクトルが正確に求められる。したがって、もし、基準点の座標がある方向にズレていたなら、そのズレと同じ方向に同じ大きさだけ移動点の位置もずれることは容易に想像できる。

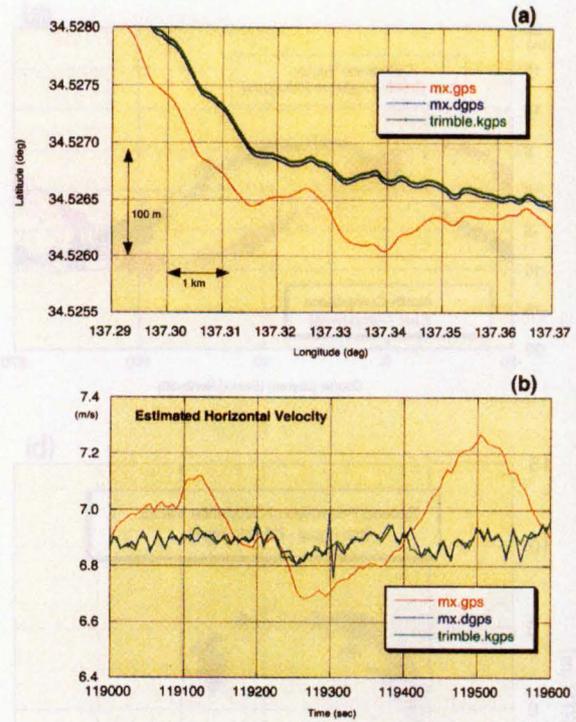
図2および図6(b)から、停泊中の各測位と、その時の船上のアンテナの位置関係を検証すると、TrimbleのAshtechに対する測位結果は不自然であることが分かる。図6(b)を基に、Ashtechの測位結果と、船上のアンテナ相対位置関係から、Trimbleの位置を求めると、図6(b)のTrimbleの測位結果からはずれた位置に決まってしまう。このズレは、図13(b)のゼロ点のズレと一致する。具体的には、アンテナ位置関係から求めた結果に対して、Trimbleの測位結果が、東北東へおよそ2メートルずれる。これらのことから、Trimbleの後処理KGPSに使用した基準点座標が間違っていたと考えられる。

この結果から、今後このようなディファレンシャルGPSのデータ解析を行うときには、基準点の位置を正確にすることが正しい測位結果を得るために重要である。

図14(a)は、石廊崎の南西の沖を「海洋」が西進しているときの、航跡の比較である。南北方向に大きく拡大してあることに注意。錯覚しやすいが、実際には、ほとんど真西に進んでいる。また、同じ場所で、各手法で求めた「海洋」の移動速度(5秒間隔の測位から求めたもの)の大きさを図14(b)に示す。同様の結果を、ディファレンシャルGPSの基準点(立川)からさらに距離が離れた愛知県の渥美半島の南岸で、やはり、「海洋」が西進している時間帯について示した結果を図15に示す。予想されるとおり、標準測位の結果は、数十メートルずれている(図14(a)と図15(a)のプロットでは、南北方向しか分からないが)。Leica MX NRDGPSとTrimble KGPSの差は、船上でのアンテナの位置の差に対応したものである。推定された移動速度を見ても、標準測位の結果は、0.2m/sあるいはそれ以上の差があるのに



第14図 (a)石廊埼の南西沖での「海洋」の航跡の測定結果 (南北軸を拡大してあることに注意)。(b)同海域を航行中の、「海洋」の移動速度の推定値。



第15図 (a)渥美半島の南での「海洋」の航跡の測定結果 (南北軸を拡大してあることに注意)。(b)同海域を航行中の「海洋」の移動速度の推定値。

対し、Leica MX NRDGPS と Trimble KGPS は、数cm/s 以内で一致していることがわかる。これは、基準点 (立川) から「海洋」までの距離 (石廊埼でおよそ160キロメートル、渥美半島南岸でおよそ230キロメートル) にはあまり関係しないらしい。

4. まとめ

以上の結果から、後処理のキネマティック GPS については、基線が数百キロメートルになっても、1メートル以下の誤差で測位ができる可能性があることがわかった。ただし、所々でデータに不連続があったりする。一方、C/A コードを用いた DGPS の場合は、3メートル程度の誤差になる。いずれも、測位の確度は、基準点の座標の正確さも関係する。これら、測位の確度の検証と、その確度を高めることは、今後、このような精度の高い測位結果を海洋調査に応用していく場合に解決するべき問題である。

この実験を行うにあたり、DX アンテナ(株)、富士ビジョン(株)、トリンプルジャパン(株)、セナー(株)の方々には、機材の提供、データの処理等の面でたいへんにお世話になりました。記して感謝します。また、測量船「海洋」の村瀬佳宏船長および乗組員の方々にも、お世話になりました。

引用文献

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, Vol.28, 133pp. (1990).
 木津昭一・花輪公雄: 搬送波位相測定に基づく差動GPS (干渉測位) とその海洋研究における利用について, 日本航海学会誌, 126号, p21-28, (1995)
 打田明雄: ディファレンシャルGPS処理プログラ

ムの評価, 水路部研究報告, 第13号, p91-97,
(1995)

打田明雄: ディファレンシャルGPS処理プログラ
ムの評価(その2), 水路部研究報告, 第14号,
p159-165, (1996)

矢吹哲一朗: 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巻1号,
p47-54, (1995)