



ターをかけ解析データを滑らかにしている（スムージング；カルマンフィルターのパラメータは最後に処理したものが最適となるため）。これらフィルタリングとスムージングを繰り返し、各解析結果の差を一定値以下に収束させ、対流圏遅延量などの各パラメータをより精度良く推定している。ITは相対測位法であるため陸上基準局が必要となり、理想的には移動局の周囲に複数かつ均等に配置されていることが望ましく、それはその配置や基線の長さによって測位精度に影響を与えるからである。得られる結果の座標値については基準局からの相対位置であり、ITRF (International Terrestrial Reference Frame) などの座標値を直接求めることができない。しかし、相対測位法では一重差（同一衛星の基準局と移動局の位相差）、二重差（異なった衛星による一重差の差）などを解析に使用できるため、電離層遅延や衛星・受信機時計などの誤差を相殺できる利点がある。なお、ITによる解析の測位精度については、河合・他（2007；2006）において基線長の距離による影響などが報告されている。

## (2) MSAS

MSASは運輸多目的衛星用衛星航法補強システムであり、GPSを使用して航行する航空機（移動体）に補強情報（ディファレンシャル・レンジング・インテグリティの各機能に関するもの）をMTSATから提供するものである。システムは宇宙部のMTSAT（静止衛星、2基運用中）と陸上部の航法統制局（神戸・常陸太田）、監視局（東京・札幌・福岡・那覇）、標定局（ハワイ・オーストラリア）から構成されている。監視局ではGPS電波を受信し、そのデータは航法統制局に送る。航法統制局では監視局からのデータにより補強情報を作成しMTSATへ送信する。MTSATから各移動体に補強情報が送られ、その補強情報の一つである補正情報（衛星軌道・時計、電離層遅延量に関するもので対流圏遅延量はモデルを使用；坂井・他、2006 a）によって移動体受信機の測位値を補正し精度を向上させる（ディファレンシャル機能）。標定局ではMTSATの軌道を監視するとともに監視局としての役割も果たしている。他の補強信号にはGPSと同様の信号（L1, C/Aコ

ード）を送信し、25番目のGPS衛星として測距させるもの（レンジング機能）、GPS衛星の不具合情報を提供するもの（インテグリティ機能）がある（国土交通省大阪航空局神戸航空衛星センター、2008）。

MSASはリアルタイムで測位精度を向上させることができるシステムであるが、補強情報を受信するためにはGPS受信機の改造・新規購入等が必要である。また、1周波の擬似距離のみの補正であるため、2周波の搬送波を用いた相対測位法より精度が良くないと考えられる。

なお、静止観測点の精度については、坂井・他（2006 b）の補強情報の評価によれば、30秒サンプリング2日間の観測（男鹿）で、 $1\sigma$  0.381 m（水平成分）、0.631 m（垂直成分）となっている。

## (3) PPP

本稿では高須・笠井（2005 b）が開発したGPS精密解析ソフトGpsTools ver. 0.6.3によりPPP法を行った。解析に関わるパラメータはITと同様であるが、衛星時計についてはIGSによる時計データは最短5分サンプリングであるため、IGS siteのhigh-Rate観測点データ（1秒サンプリング、本稿では臼田を使用）とIGSの衛星時計・衛星軌道データから1秒サンプリング時計データを推定した。推定された1秒サンプリング衛星時計データとIGSの衛星軌道データを用いて、電離層遅延を電離層フリー線形結合で除去し、観測点（受信機）位置と受信機時計を推定した（対流圏遅延についてはモデルを使用）。1秒サンプリング時計データのように静止観測点（観測点位置が既知）であれば逆に衛星軌道・衛星時計について推定でき、既知と未知のパラメータを適宜選択することができる。PPPでは基準点なしに移動体のGPSデータのみで測位可能であり、直接的に世界測地基準座標系（ITRF）に従った座標値を得ることができる。

なお、静止観測点における精度評価については、高須・笠井（2005 a）によれば、IGS基準座標局78局の観測期間7日間のデータで解析したところ、 $1\sigma$  で3.9 mm（東西成分）、3.3 mm（南北成分）、17.2 mm（垂直成分）という結果が報告されている。

GPS Tools ver.0.6.3の動作環境はWindows 2000ま

たはWindows XP, MATLAB ver.6.5.1または7.01以上が必要であり, 現バージョンでは1秒サンプリングデータまでの対応であるが, 次回バージョンから10 Hz (0.1秒サンプリング) ぐらいまで対応予定である(高須・私信).

#### (4) DGPS

DGPSは, 海上保安庁交通部が所管する中波ビーコン局から補正情報(既知であるビーコン局の位置とGPS観測値の差に基づく擬似距離の補正值)を航行船舶へ送信し, 船舶のGPS観測値の補正を行うものである. 1995年12月に実験局(2局)が開設され, 1999年4月に全国27のDGPS局が整備された. MSASと同様にDGPSはリアルタイムで測位精度を向上させることができるシステムであるが, 補正情報を受信するために受信機の改造・新規購入等が必要となり, 利用可能範囲はDGPS局から200 km以内に限られる. DGPSの精度についてはSA (Selective Availability: 選択利用性) 下(2000年5月2日以前)での実験ではあるが, 梶原・他(2000)によれば1時間の静止観測で0.59~0.78 m (水平成分 $2\sigma$ ) という結果が得られている.

### 3 解析データ

2008年10月26日及び7月10日に観測し, 解析に使用したデータの緒元は以下のとおり.

#### (1) 2008年10月26日

移動局の航跡, 固定局の位置については第1図に示した.

##### (イ) 移動局

- ・使用船舶 測量船「昭洋」

第3図にGPSアンテナの設置状況, 第4図に設置位置を示した.

##### (i) ITとPPP(2周波L1/L2, 搬送波位相)

ITとPPPは同じ受信機のデータを使用した.

- ・GPS受信機 Trimble R7
- ・GPSアンテナ Zephyr (TRM 39105.00)
- ・データ収録間隔 1秒

##### (ii) MSASとDGPS(1周波L1, C/Aコード)

MSASとDGPSに対応した同じ型式の受信機を別々に2台使用.

- ・GPS受信機 Trimble AgGPS 132
- ・GPSアンテナ GPSビーコン一体型
- ・データ収録間隔 5秒

##### (ロ) 固定局

##### (i) 電子基準点

城辺(950498), 与那国(950499), 粟国(960739), 具志川(960743), 石垣2(960750)

- ・GPS受信機 Trimble 5700
- ・GPSアンテナ Trimble L1/L2 Dorne Margolin element with chokerings (TRM 29659.00)
- ・データ収録間隔 1秒

##### (ii) DGPS局

宮古島, 慶佐次

- ・GPS受信機 Trimble 4000 SSE
- ・GPSアンテナ Micro centered L1/L2+GP (TRM 33429.20)

#### (2) 2008年7月10日

##### (イ) 移動局

- ・使用船舶 測量船「明洋」

KGPS観測のみ行い, ITとPPPは同じ受信機のデータを利用した.

第5図にGPSアンテナの設置状況及び設置位置を示した.

- ・GPS受信機 Trimble NetRS
- ・GPSアンテナ Zephyr Geodetic (TRM 41249.00)
- ・データ収録間隔 2 Hz

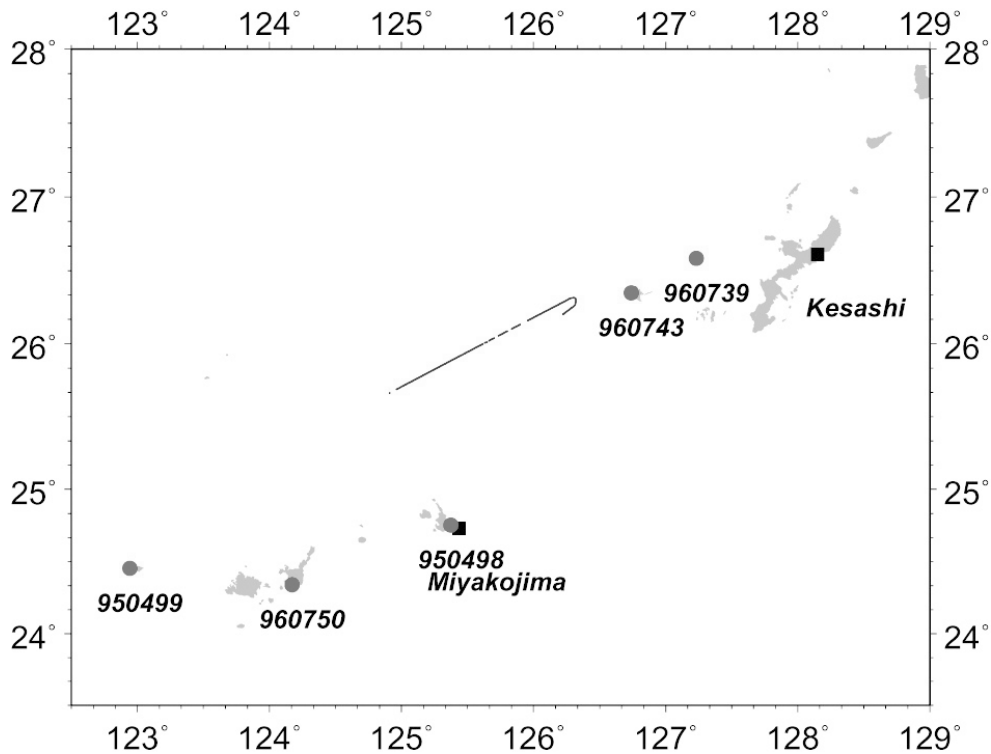
##### (ロ) 固定局

館山(93047), 小室山(93048), 大島1(93051)の電子基準点

- ・GPS受信機 Trimble 5700 (小室山, 大島1), NetRS (館山)
- ・GPSアンテナ Trimble L1/L2 Dorne Margolin element with chokerings (TRM 29659.00)
- ・データ収録間隔 1秒

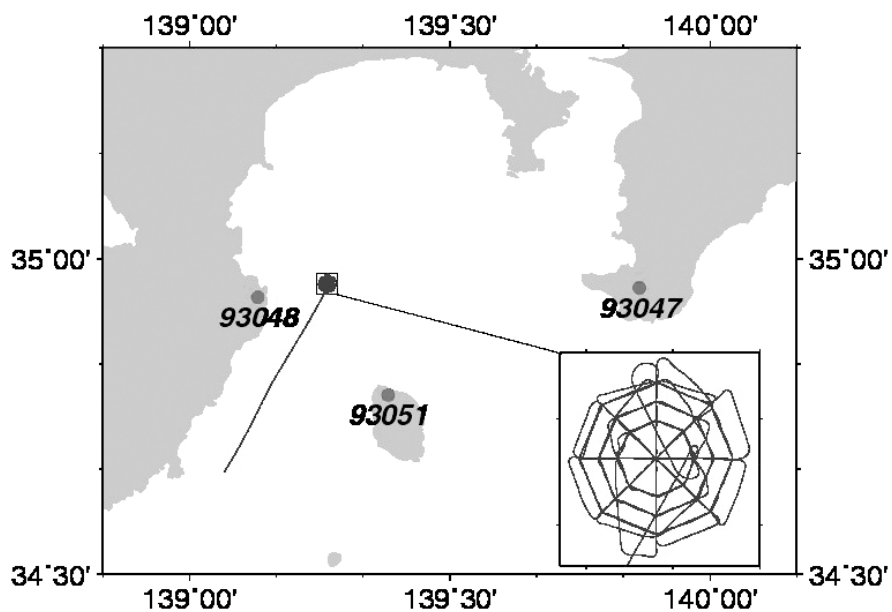
### 4 解析結果及び比較

第3図の測量船「昭洋」における各GPSアンテナの設置状況によると, ITとPPP, MSAS, PPPと3種類, 別々のものとなっている. このため, 最も精度が高いと考えられるITの解析結果を基準値として,



第1図 2008年10月26日の移動局（測量船「昭洋」）の航跡と固定局（電子基準点・DGPS）の配置. 丸印は電子基準点, 正方形の印はDGPS局を示している.

Fig. 1 Tracks of the rover (survey vessel "Shoyo") and the location of fixed station (GEONET, DGPS) on Oct. 26, 2008. Circles show GEONET on-land GPS stations. Squares show DGPS stations.



第2図 2008年07月10日の移動局（測量船「明洋」）の航跡と固定局（電子基準点）の配置. 丸印は電子基準点を示している.

Fig. 2 Tracks of the rover (survey vessel "Meiyo") and the location of fixed station (GEONET) on Jul. 10, 2008. Circles show GEONET on-land GPS stations.

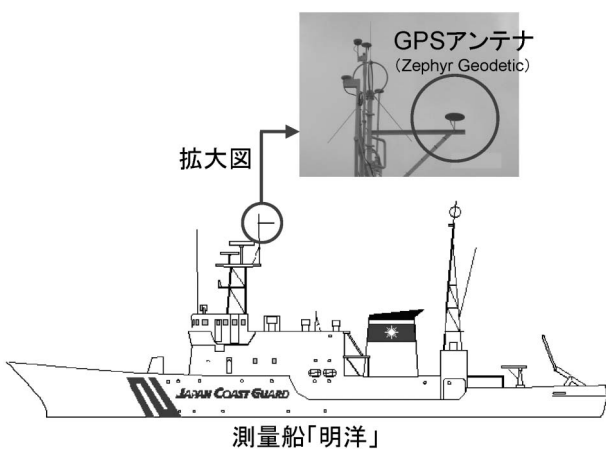


第3図 測量船「昭洋」のGPSアンテナ設置状況 (右からKGPS, MSAS, DGPS)  
 Fig. 3 Arrangement of installation of GPS antennas on survey vessel "Shoyo" (for KGPS, MSAS, DGPS from the right).



測量船「昭洋」

第4図 測量船「昭洋」のGPSアンテナ位置  
 Fig. 4 Location of GPS antenna on survey vessel "Shoyo".



測量船「明洋」

第5図 測量船「明洋」のGPSアンテナ設置状況  
 Fig. 5 Arrangement of installation of GPS antenna on survey vessel "Meiyo".

他のGPS測位手法の結果と差をとり検証した。

なお、図等に用いられている時間はUTCである。

(1) 2008年10月26日

(イ) IT

GPS受信機 (R7) 内のコンパクトフラッシュメモリカードに書き込まれたT01フォーマットデータ (Trimbleオリジナルフォーマット) をTrimble Data Transfer ver.1.43.0.1 (R7にはver.1.36以上が対応) によりDATフォーマット (Trimbleオリジナルフォーマット), Convert to RINEXによりRINEX (The Receiver Independent Exchange Format: データ交換のためのGPS用標準フォーマット) へ変換した。軌道情報はIGSの最終暦 (Final SP3) を使用した。

固定局の配置による解析結果への影響を調べるため、使用する固定局を次の3つの組合せにより分け各caseについて解析した。

(i) case a

城辺 (950498), 与那国 (950499) 粟国 (960739) で、固定局と移動局を結ぶ線 (以後、位置の線とする) の交角が3 case中、最も広く配置バランスが良い組合せ。

(ii) case b

城辺 (950498), 与那国 (950499), 具志川 (960743) で、若干、基線長が長くなった組合せ。

(iii) case c

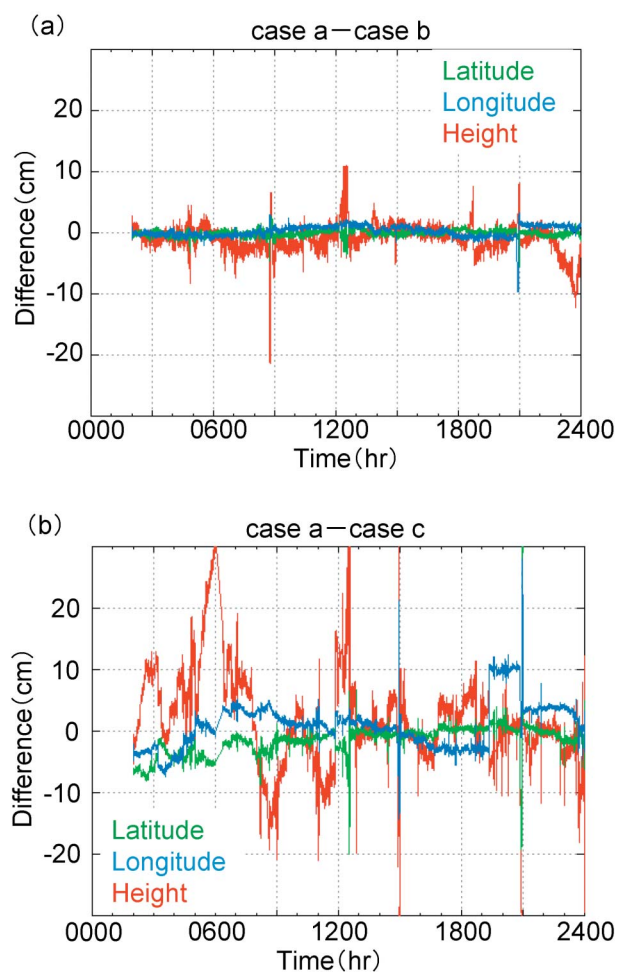
城辺 (950498), 与那国 (950499), 石垣2 (960750) で、一方向に配置が偏り位置の線の交角も3 case中、最も狭くバランスの悪い組合せ。

各caseによる解析結果の再現性を検証するため、case aとb, case aとcの解析結果の差分をとった (第6図)。第6図 (a) では、経緯度の差分は数cm, 楕円体高は10 cm程度に収まったが、第6図 (b) では、経緯度で10 cm, 楕円体高で20 cm程度に広がった。

以上の結果を踏まえ、case aを最も精度の高いITの解析結果として採用した。

(ロ) MSAS

GPS受信機 (AgGPS 132) RS-232 Cポートから出力されるNMEA (National Marine Electronics Asso-



第6図 (a) case aとcase bの解析結果の差  
 (b) case aとcase cの解析結果の差  
 Fig. 6 (a) Difference of results between case a and case b.  
 (b) Difference of results between case a and case c.

ciation：米国海洋電子機器協会) - 0183 (GPSデータのシリアルポート転送に関する規格) のGGA (Global Positioning System Fix Data) をPCに収録し、適宜フォーマット変換した。

ITとMSASの解析結果の差を第7図a, 差の統計値を第1表に示す。差の最大・最小の絶対値が約12 m (経緯度), 約36 m (楕円体高), 平均値が0.05 m (緯度), 1.5 m (経度), -2.1 m (楕円体高), 標準偏差が1.3 m (緯度), 1.1 m (経度), 4.3 m (楕円体高) という結果となり, MSASの結果には1 m (経緯度), 4 m (楕円体高) 程度のバイアスが含まれている。

(ハ) PPP

ITと同様にTrimbleオリジナルフォーマットからRINEXフォーマット変換した。

解析に使用した軌道情報・パラメータ等は以下のとおり。

- ・衛星軌道・時計 IGS Final (SP 3, CLK)
- ・地球回転パラメータ IGS Final (ERP)
- ・フィルタパス 3パスフィルタ
- ・推定時間・間隔 24 H+オーバーラップ0 H, 30秒間隔
- ・1秒サンプリング時計推定用High-rate IGS観測点 白田 (長野県佐久市)

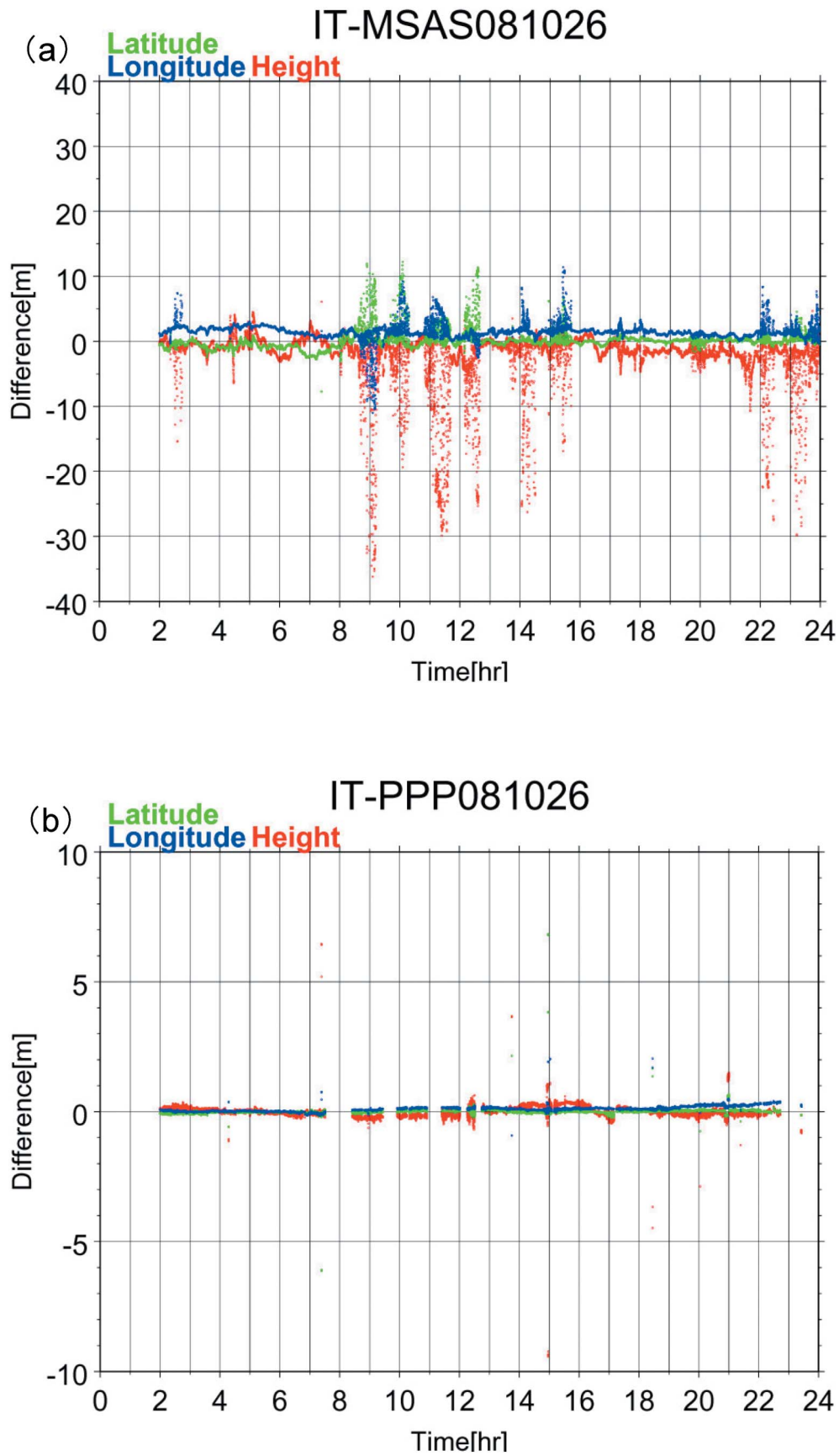
ITとPPPの解析結果の差を第7図b, 差の統計値を第1表に示す。瞬間的に差が大きくなる場合があるが, 差の平均値は, 0.01 m (緯度), 0.11 m (経度), 0.01 m (楕円体高), 標準偏差が0.11 m (緯度), 0.10 m (経度), 0.20 m (楕円体高) という結果となり良く合致していた。

(ニ) DGPS

MSASと同様にGPS受信機からのGGAを適宜フォーマット変換した。

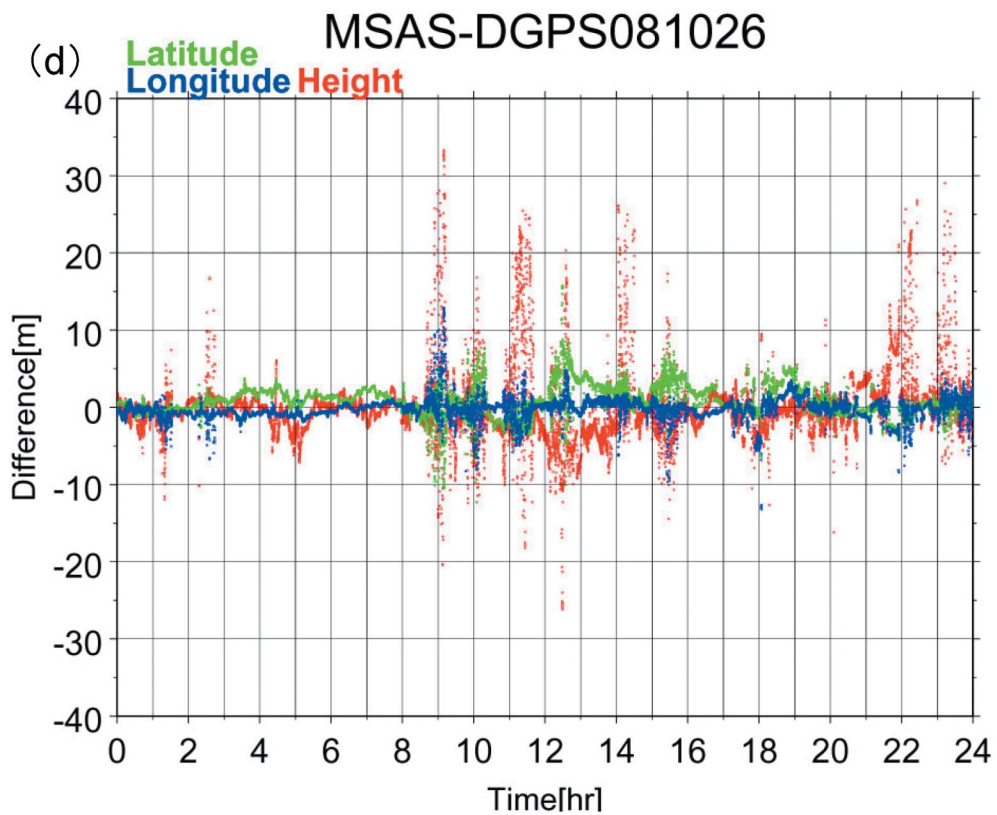
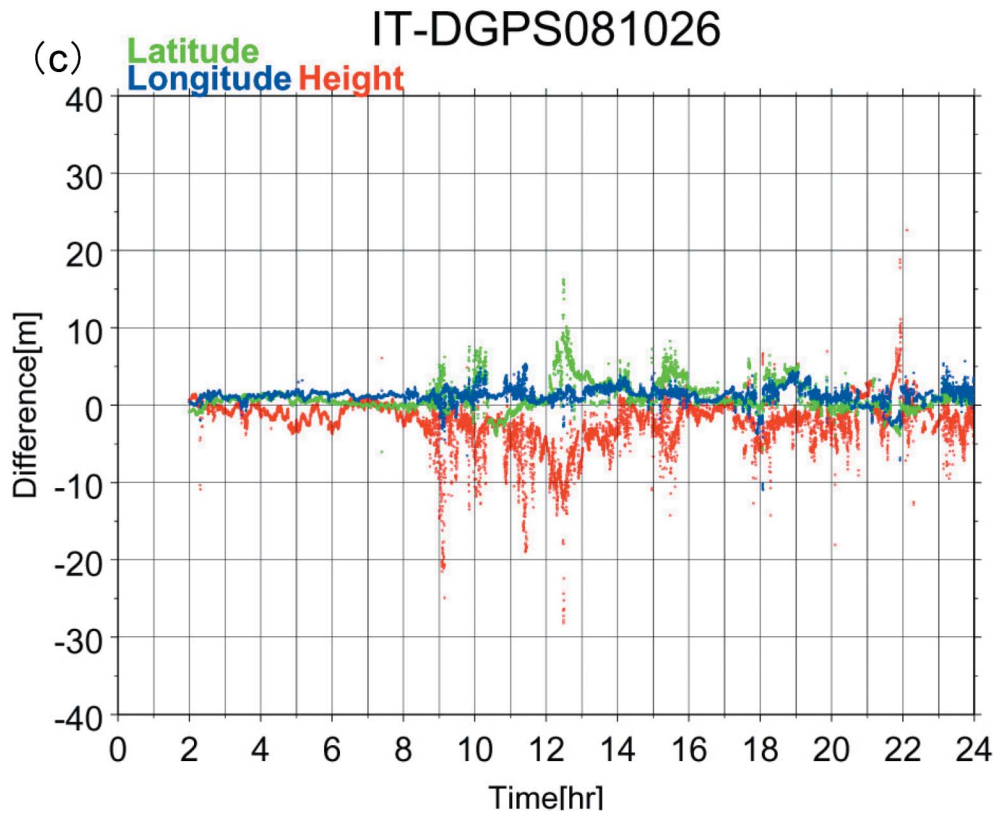
ITとDGPSの解析結果の差を第7図c, 差の統計値を第1表に示す。差の最大・最小の絶対値が約16 m (緯度), 約11 m (経度), 約28 m (楕円体高), 平均値が1.1 m (緯度), 1.3 m (経度), -2.1 m (楕円体高), 標準偏差が1.8 m (緯度), 1.0 m (経度), 2.9 m (楕円体高) という結果となり, MSASと同レベルのバイアス・ばらつきであった。バイアス・ばらつきについてはMSASと同様に瞬間的ではなくある程度の時間を経て変化している。

さらにMSASとDGPSの解析結果の差を第7図d, 差の統計値を第1表に示す。差の平均値は0.92 m (緯度), -0.27 m (経度), -0.07 m (楕円体高), 標準偏差が1.9 m (緯度), 1.4 m (経度), 4.3 m (楕円体高) という結果となった。MSASとDGPSアンテナの取付位置の差は水平で0.35 m程度, 差の経緯度の平均値から求めた水平距離は0.3 mであり, 平均された位置の差の絶対値はほぼ合致しているが差のばらつきが大きくなる時間帯がある。



第 7 図 2008年10月26日の解析結果の差 (a) ITとMSAS (b) ITとPPP  
Fig. 7 Difference of results on Oct. 26, 2008. (a) between IT and MSAS. (b) between IT and PPP.





第7図 2008年10月26日の解析結果の差 (c) ITとDGPS (d) MSASとDGPS  
 Fig. 7 Difference of results on Oct. 26, 2008. (c) between IT and DGPS (d) between MSAS and DGPS.



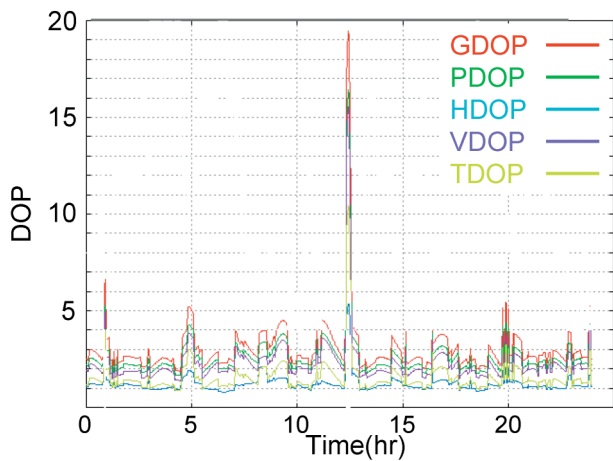
第1表 2008年10月26日のITとMSAS・PPP・DGPSの解析結果の差の統計

Table.1 Statistics for differences of results between IT and MSAS, PPP, DGPS on Oct. 26, 2008.

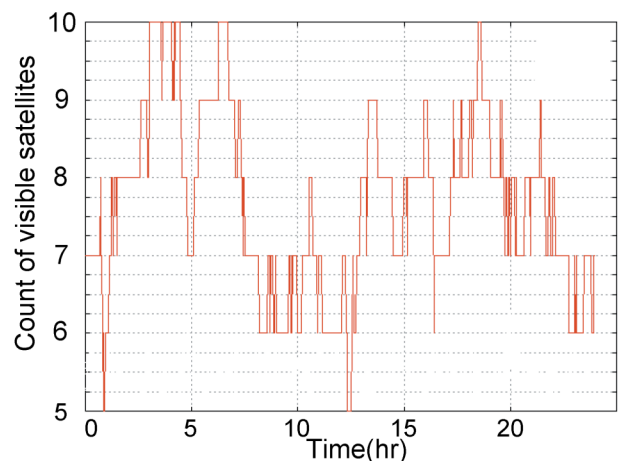
IT-MSAS						IT-DGPS					
	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	
Latitude	-7.719	12.244	0.045	1.282	1.283	-6.030	16.266	1.062	1.821	2.109	
Longitude	-11.002	11.423	1.485	1.149	1.878	-10.894	5.684	1.259	1.008	1.613	
Height	-36.178	6.100	-2.144	4.322	4.825	-28.140	22.627	-2.142	2.937	3.635	

IT-PPP						MSAS-DGPS					
	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	
Latitude	-6.118	6.831	0.006	0.108	0.108	-12.268	15.763	0.920	1.899	2.110	
Longitude	-0.917	2.055	0.108	0.098	0.145	-13.227	19.921	-0.266	1.378	1.403	
Height	-9.246	6.458	0.011	0.200	0.200	-26.180	33.330	-0.073	4.267	4.267	



第8図 2008年10月26日のDOP (高度15度以上)  
Fig. 8 DOP (elevation  $\geq 15$  degrees) on Oct. 26, 2008.



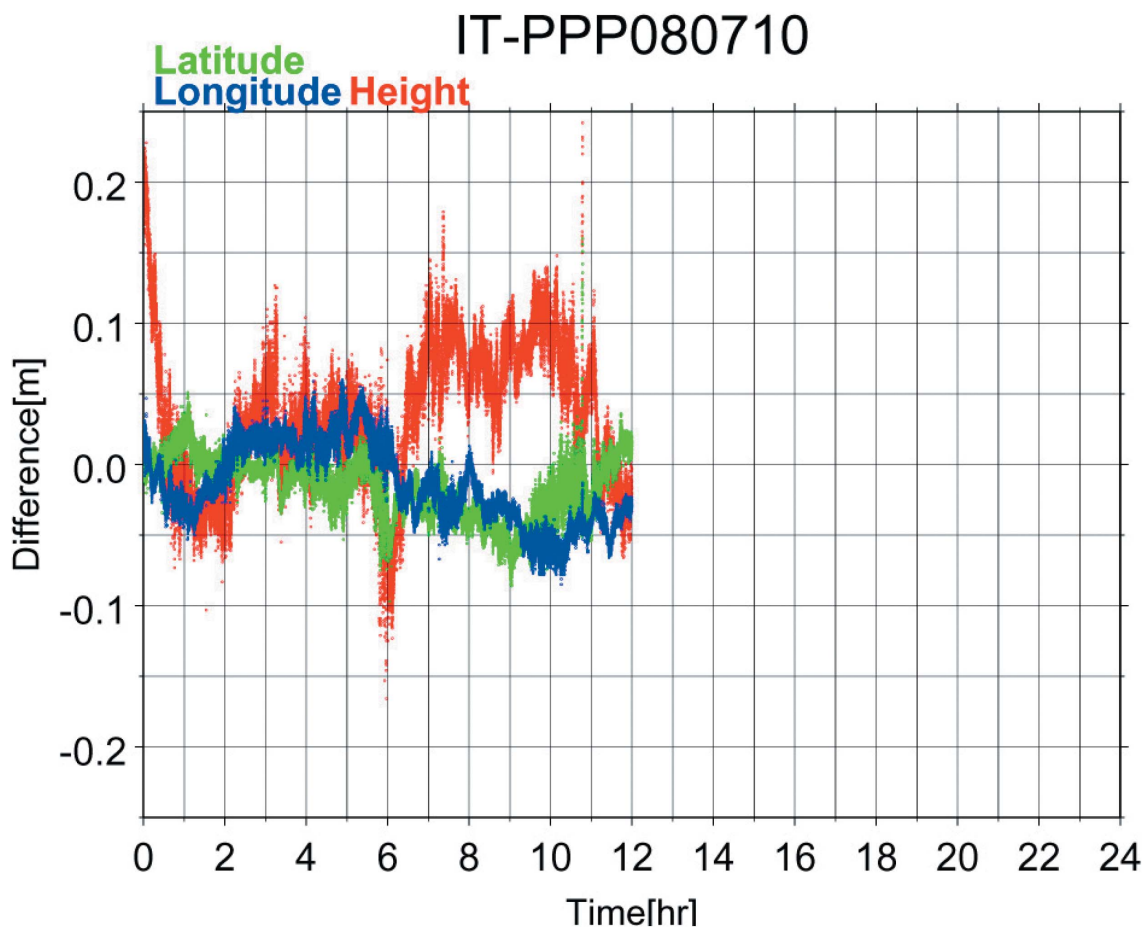
第9図 2008年10月26日の視認できるGPS衛星の数 (高度15度以上)  
Fig. 9 Count of visible GPS satellites (elevation  $\geq 15$  degrees) on Oct. 26, 2008.

第2表 2008年10月26日0200—0730のITとMSAS・PPP・DGPSの解析結果の差の統計  
 Table.2 Statistics for differences of results between IT, MSAS, PPP and DGPS from 0200 to 0730 on Oct. 26, 2008.

IT-MSAS						IT-DGPS					
	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	
Latitude	-7.719	0.893	-0.931	0.721	1.177	-6.030	1.814	0.627	0.498	0.800	
Longitude	0.406	3.031	1.793	0.572	1.882	-1.272	3.185	1.238	0.361	1.289	
Height	-6.417	6.100	-0.361	1.429	1.474	-3.827	6.130	-0.955	1.100	1.457	

IT-PPP						MSAS-DGPS					
	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)	
Latitude	-6.118	0.079	-0.022	0.112	0.114	-0.419	3.732	1.557	0.682	1.700	
Longitude	-0.144	0.765	0.000	0.040	0.040	-3.164	0.864	-0.555	0.564	0.792	
Height	-1.129	6.458	-0.007	0.137	0.137	-7.120	6.070	-0.594	1.600	1.706	



第10図 2008年7月10日のITとPPPの解析結果の差  
 Fig. 10 Difference of results between IT and PPP on Jul. 10, 2008.

第3表 2008年7月10日のITとPPPの解析結果の差の統計

Table 3 Statistics for differences of results between IT and PPP on Jul.10, 2008.

	IT-PPP				
	min(m)	max(m)	mean(m)	sd(m)	rms(m)
Latitude	-0.097	0.160	-0.016	0.021	0.021
Longitude	-0.085	0.060	-0.014	0.028	0.032
Height	-0.166	0.242	0.035	0.050	0.061

各GPS測位手法の解析結果の差が時間帯によっては大きくなるため、DOP（第8図）と視認衛星数（第9図）によって測位条件の比較的良い時間帯を確認したところ、視認衛星数が7個以上となる時間帯と各結果の差の小さい時間帯（0200から0730の間）が一致していた。この時間帯で再度、各結果の差をとった（第2表）。第2表をみると各結果ともばらつき・バイアスとも小さくなった。

(2) 2008年7月10日

(イ) IT

バランスの良い配置の固定局の組合せである館山(93047), 小室山(93048), 大島1(93051)を用いて解析した。

(ロ) PPP

解析に使用した軌道情報・パラメータ等は2008年10月26日と同様である。

ITとPPPとの解析結果の差を第10図、差の統計を第3表に示す。差の絶対値は、-0.02 m (緯度), -0.01 m (経度), 0.04 m (楕円体高), 差の標準偏差は0.02 m (緯度), 0.03 m (経度), 0.06 m (楕円体高) となり、すべて10 cm以内におさまっている。

5 考察・課題

(1) IT

相対測位法では固定局までの基線長やその配置バランスなどが解析結果に影響を与える。本稿では基線長の違いによる精度検証は行えなかったが、固定局の配置については、前項case aのように位置の線

の交角のバランスの良い組合せにより解析すると精度の高い解析結果が得られることが確認できた。

(2) MSAS

第2表の02:00から07:30までの時間帯における解析結果であれば、差のバイアス・ばらつきとも小さく水深測量等に活用可能である。その一方、第7図aの08:00以降の時間帯でばらつきが大きくなり、その原因はGPSデータ不良と考えられるが、第8図のDOPをみると1200頃に20付近に達する以外はほぼ5以下であり、第9図の視認衛星でも全時間帯ほぼ6衛星以上確保されており、データ不良となる要因はあまり考えられない。しかしながら、第3図、第4図から推測されるようにGPSアンテナ周囲にある船舶構造物が障害となりサイクルスリップ等が発生し、各GPSデータを不良化させた可能性がある。今後、観測条件（アンテナ周辺のロケーション等）を改善させ観測を行い、再検証を試みる必要がある。

(3) PPP

2008年7月10日の解析結果より2008年10月26日の結果のばらつきが大きいが、MSASと同様に10月26日のGPSデータの不良が原因と考えられる。しかし、どちらもバイアス・ばらつきとも20 cm以内に収まっており、高精度な水深測量等に活用可能である。

(4) DGPS

DGPSの解析結果はMSASとほぼ同レベルのバイアス・ばらつきを持ち水深測量等に活用可能であるが、これも精度を再検証する必要がある。解析結果のMSASとの比較では、バイアスは小さい（ただし緯度は約1 m）がばらつきは大きく、同じ相対測位法（ただし補正法は異なる）であるにもかかわらず2つの測位値が必ずしも合致しないことがわかった。

謝辞

技術コンサルタント高須知二氏には精密解析ソフトウェア「GpsTools」、国土地理院には電子基準点1秒サンプリングデータを提供していただいた。作図等にはGMT ver.4.2 (Wessel and Smith, 1998) を

使用しました。

#### 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).

梶原弘司, 地本直弘, 豊田利彦, 野村士平: 中波ビーコン局によるDGPSの測位精度について, 弓削商船高等学校紀要, Vol.22, 19-24, (2000).

河合晃司, 石川直史, 松本良浩, 望月将志: 海底地殻変動観測におけるKGPS解析の現状について, 海洋情報部技報, Vol.25, 107-111, (2007).

河合晃司, 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志: 長基線KGPSの精度評価について, 海洋情報部技報, Vol.24, 80-88, (2006).

国土交通省大阪航空局神戸航空衛星センター: MTSATシステム, (2008), retrieved November 2008, from <http://www.kasc.go.jp/system/index.htm>.

夏淑輝, 畑中雄樹: 超高精度GPS基線長解析手法の開発—局地電離層モデルを用いた電離層遅延補正—, 日本測量調査技術協会APA, No.75-10, 86-93, (2000).

坂井丈泰, 松永圭左, 星野尾一明: GPS広域補強プロトタイプシステムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106 No.77, 7-12, (2006 a).

坂井丈泰, 福島壮之介, 新井直樹, 伊藤憲: SBAS広域ディファレンシャル補正情報の品質評価, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, (2006 b).

高須知二, 笠井晶二: GPSによる精密単独測位 (PPP) 法の評価, 電子情報通信学会技術報告, Vol.105 No.218, 31-35, (2005 a).

高須知二, 笠井晶二: 測位衛星用高精度軌道・時計決定ソフトウェアの開発, 第49回宇宙科学技術連合講演会, (2005 b).

Wessel. P. and W. H. F. Smith : New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579, (1998).