

産業技術総合研究所地質調査総合センターにおけるGPS連続観測

大谷 竜¹・松本則夫¹・小泉尚嗣¹・高橋 誠¹・佐藤 努¹・
北川有一¹・佃 栄吉²・佐藤隆司¹・伊藤久男¹・桑原保人¹

Ryu Ohtani¹, Norio Matsumoto¹, Naoji Koizumi¹, Makoto Takahashi¹, Tsutomu Sato¹, Yuichi Kitagawa¹, Eiichi Tsukuda², Takashi Satoh¹, Hisao Ito¹, and Yasuto Kuwahara¹ (2003) The continuous GPS array observation by the Geological Survey of Japan, AIST. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 54(5/6), p.193 - 212, 27 figs., 3 table.

Abstract: A regional continuous Global Positioning System (GPS) array, consisting of AOA Turbo Rogue receivers and Choking antennas, was established by the Geological Survey of Japan (GSJ), AIST, mainly in and around the Kinki district in 1996. The number of the stations was reduced from 14 to 5 in 1999, and a new analysis strategy was implemented. The repeatability of the station coordinates analyzed through the new strategy is as same as the old one. In comparison with the coordinate variations of nearby GEONET stations, the secular variation is similar, but the overall repeatability is worse. In addition, a predominant half-year variation is found in the GSJ's coordinates. The number of epochs of carrier phase data observed by some GSJ's stations shows a half-year variation and has a strong correlation to a variation of a global total electron content (TEC). A similar half-year variation of the number of the epochs is also found at an IGS station with an AOA Turbo Rogue receiver but not at the nearby station with an Ashtech receiver in North America. These results imply that the half-year variation in GSJ's station coordinates is attributable to worse quality of the GPS observation data due to ionosphere perturbation, which is peculiar to Turbo Rogue receivers.

Keywords: GPS, permanent GPS array, GPS analysis strategy, crustal deformation, site coordinate, repeatability, seasonal variation, half-year variation, ionosphere perturbation

要 旨

1996年から産業技術総合研究所地質調査総合センター(旧地質調査所)においてAOA社製のTurbo Rogue受信機とチョークリングアンテナからなるGPS連続観測を開始した。1999年からはそれまでの14局から5局に減らすとともに、GPSデータの定常解析に新たな解析手法を導入したが、観測局の座標値の再現性は、旧来のものに比べて変わらなかった。周囲にある、国土地理院のGPS連続観測システム(GEONET)の観測局と比較すると、座標変動の定常的な変動に大きな差は見られないが、座標値の再現性には劣り、かつGEONETには顕著でない半年周期の変動が見られる観測局があることが分かった。解析で使用される一日当たりの位相観測データ(エポック)数を調べたところ、半年周期で顕著に増減していることが分かった。いくつかのIGS(International GPS Service:国際GPS事業)局の解析の結果、カリフォルニアにあるTurbo Rogue受信機でも同様な傾向が見られるが、すぐ近傍のAshtech社製受信機の局には見られないことが分かった。また、グローバルな電

離層総数(TEC)の最大値と比較したところ、両者に強い相関があることが分かった。このことから、半年周期の原因として、Turbo Rogue受信機に固有に生じる、電離層活動の活発化に伴う受信信号の品質低下の可能性が考えられる。

1. はじめに

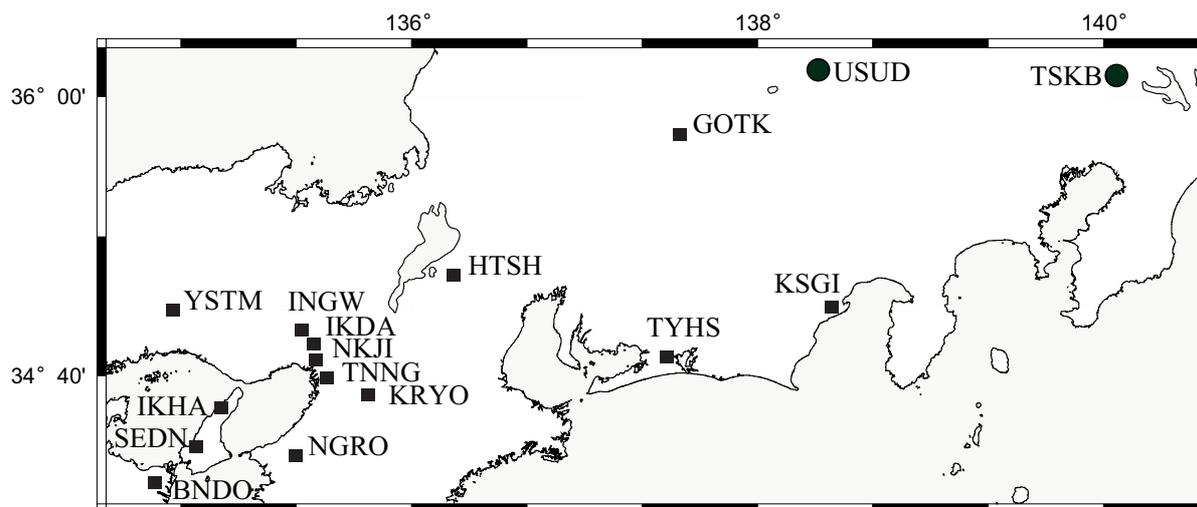
古来から、地震前後で井戸の水位の変化や湧水量、水温・水質の変化が報告されてきた。そこで産業技術総合研究所(以降、産総研と呼ぶ)地質調査総合センター(旧地質調査所)では、地震等の地殻活動と地下水変動の関連を解明することを目的に、東海地方を中心に地下水連続観測を1976年以来継続している。

こうした観測の結果、地震に前後していくつかの観測井で地下水位が特徴的な変化を見ることが分かってきた(例えば、Matsumoto(1992)、佃(2000)、佃他(2000))。しかしながら、その変動メカニズムについては未だに不明な点が多い。その理由の一つとして、地下水位の変化と比較するための広域的な地殻変動データがなかったことがある。

この10年、GPS(Global Positioning System:汎地球測

¹地球科学情報研究部門(Institute of Geoscience, GSJ)

²活断層研究センター(Active Fault Research Center, GSJ)



第1図: 産総研地質調査総合センターGPS連続局(■)と、定常解析に使用されているIGS局(●)の分布と局名の略号(名称については第1表を参照)。

Fig.1 Location of the continuous GSI's GPS stations (■) and IGS's GPS stations (●) used in the routine analysis. Abbreviations of the name of the stations (see Table 1) are shown.

位システム)を用いて高精度の測位が比較的容易に実現できるようになってきた(例えばHofmann-Wellenhof *et al.*, 1993).これを応用して,GPSを使って地震や火山噴火に伴う地殻変動を,これまでのような大きな労力を要せずに,精度よく測定できることが可能となってきた(多田他, 1997).GPSは各観測局での位置の測定を行っているので,ボアホール歪計のように測定地点近傍のローカルな変動だけではなく,GPSの観測網の広がりに応じた地殻変動場を捉えることができると期待されている。

地質調査総合センターでも,平成7年度,8年度と,地下水観測井に併設して,ボアホール歪計等とともに合計14点のGPS連続観測局を整備した(佃,1996).その後,後述するように観測局の数を減らしつつも,現在まで観測を続けている.本GPS観測の主な目的は,併設されているボアホール歪計等の地殻変動連続観測や地下水観測との比較を通じて,地下水変動が代表する地殻変動場の空間的・時間的な広がりを解明することである.また,観測局の多くが展開されている活断層近傍の変動形態のモニタリングも目的としている。

本報告では,地質調査総合センターで行われているGPS観測及び定常解析システムの概要について紹介するとともに,これまで得られた結果について主に測地学的な観点から議論する。

2. GPS連続観測網

第1図にGPS観測局の分布を示す.全てのGPSは地下水観測井に併設されており,主に近畿地方を中心とした活断層周辺に設置されている.全てのGPS観測局はAOA(Allen Osborne Associates)社製のチョークリング付きDorne-MargolinアンテナとTurbo Rogue受信機SNR-

8000からなる.アンテナを覆うドームも全ての局で同一型のもが使用されている.アンテナは主に2~5mの高さのステンレス製のピラーに設置されているが,一部のものについては建物の屋上や観測小屋の上に直接設置されている.観測局位置およびアンテナの設置形態については第1表にまとめてある.地下水観測井の多くが活断層のモニタリングを目的としたものであるため,その多くが断層沿いの谷間にある.そのために山岳等に視界が遮られて,GPSの観測条件としては必ずしも良いとは言えない.例として,安富局の外観を第2図に示す。

14局全ての観測局において,30秒間隔で24時間の連続観測が行われている.当初は観測最低仰角は15度に設定した.各局における24時間の観測データは,一日一回電話回線を通じて産総研関西センター(旧大阪工業技術研究所)へと送られ,そこからつくばの地質調査総合センターまでTCP/IPで転送され,地下水等の観測データも含め,データサーバに保存される(第3図).つくばでは,データサーバから解析用計算機に自動的に日々の観測データが転送されて定常解析が行われ,その解析結果がデータサーバに返されて,更にCDROMでバックアップが作成される.また,データサーバ上でWebシステムを用いた,時系列や速度場,三角網図の表示が可能となっている(第4図)。

観測は板東,秦荘,池田,育波,猪名川,広陵,草薙,根来,若王子,西淡,天王寺の11局については1996年4月以降から開始している.更に,豊橋,安富,王滝の3局については1998年に新たに観測を開始した.パイロットスタディーとして始められたこの観測体制は,この間に全国に整備された900点にも及ぶ国土地理院GPS連続観測システム(GEONET)の展開を考慮しつつ,必要な観測局の選抜等の見直しを進めた.その結果,GPS1024週問題(2000年問題と同種の日付の

局名	略号	緯度(度)	経度(度)	標高(m)	備考
板東	BNDO	34.1444	134.5139	43	ピラー(金属製)
王滝	GOTK	35.8279	137.5504	1089	ピラー(金属製)
秦荘	HTSH	35.1546	136.2528	167	ピラー(金属製)
池田	IKDA	34.8193	135.4362	76	ピラー(金属製)
育波	IKHA	34.5139	134.8964	120	ピラー(金属製)
猪名川	INGW	34.8900	135.3744	128	ピラー(金属製)
広陵	KRYO	34.5752	135.7479	87	ピラー(金属製)
草薙	KSGI	34.9908	138.4324	65	観測小屋屋上
根来	NGRO	34.2822	135.3291	149	ピラー(金属製)
若王子	NKJI	34.7462	135.4380	43	観測小屋屋上
西淡	SEDN	34.3204	134.7450	42	ピラー(金属製)
天王寺	TNNG	34.6590	135.5117	57	ピラー(金属製)
つくば	TSKB	36.1056	140.0874	67	ピラー(金属製), IGS局
豊橋	TYHS	34.7643	137.4669	124	建物屋上
白田	USUD	36.1331	138.3620	1508	建物屋上, IGS局
安富	YSTM	34.9853	134.6081	169	ピラー(金属製)

第1表 解析に使用したGPS観測局の位置(WGS84座標系による)。

Table 1 Position of the GPS stations used in the routine analysis (WGS84 coordinate system).

ロールオーバーに関する問題)に併せて1999年8月までに14局中,板東,秦荘,育波,猪名川,広陵,根来,若王子,西淡,天王寺の9局の観測局において観測を終了した。それ以降は,地下水,歪,地震等の並行観測が行われている,豊橋,安富,王滝,池田,草薙の5局で観測が続けられた。更にこの内,池田局は周囲の観測環境の悪化のために,2001年7月をもって観測を終了した。また後述するように,王滝局も観測条件が劣悪であったため正常な観測ができなく,2002年11月現在では,安富,豊橋,草薙の3局での観測に縮小している。また1999年8月には,GPS1024週間問題に併せて受信機ファームウェアのバージョンアップが上記5局全てについてほぼ一斉に行われている。

3. GPS観測データの定常解析

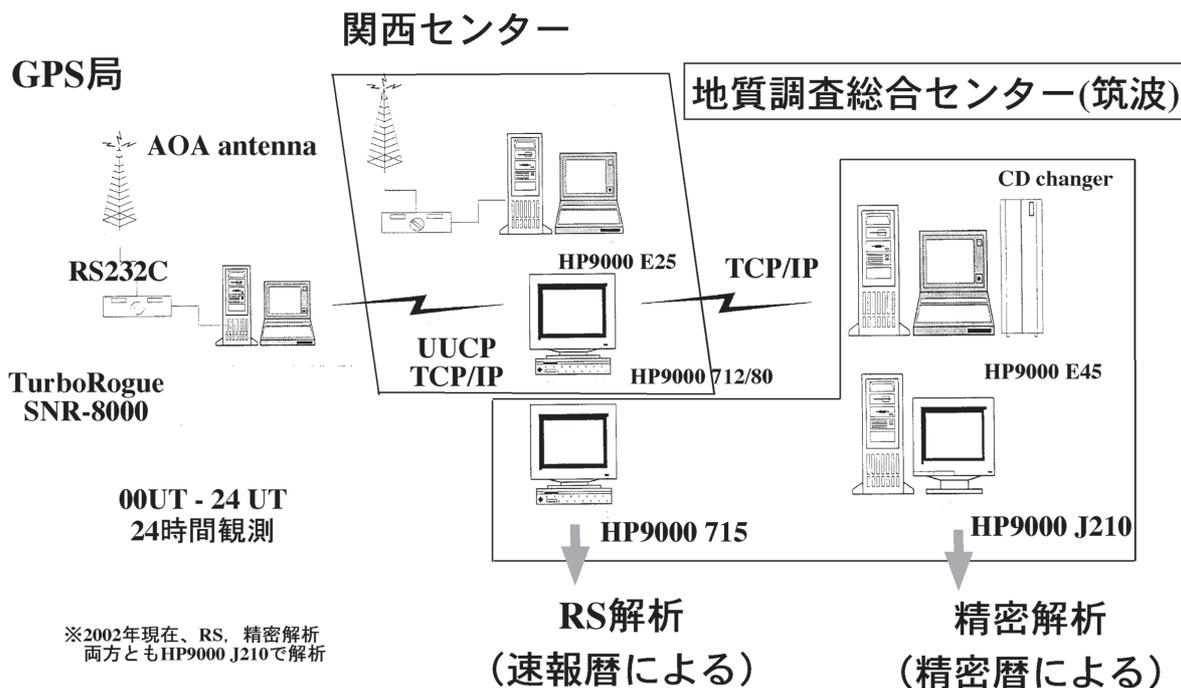
局位置を推定するための定常GPS測位解析には,アメリカ航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration)ジェット推進研究所(Jet Propulsion Laboratory(JPL))で開発されたGIPSY-OASIS II解析ソフトウェアパッケージ(release 4)が使用されている(Webb and Zumberge,1993)。また,解析にはJPLで計算された衛星軌道(暦),衛星搭載の原子時計の誤差情報および地球回転パラメータ(EOP)データが使用されている。解析方法は,衛星軌道,衛星時計およびEOPは完全に固定し,全観測局14局,及び本観測網と同型の受信機であるIGS(International GPS Service:国際GPS事業)のグローバル観測網に属する,つくば局(TSKB)および白田局(USUD)を加えた計16局について,全ての観測局のデータを同時に解析する方法(ネットワーク解析)で解析が行われ,局位置,天頂大気遅延量,受信機時計誤差,整数値バイアスが推定



第2図: 安富GPS局の外観

Fig 2. Appearance of the Yasutomi GPS station.

されている。ネットワーク解析を採用しているのは整数値バイアスを解くためであり,定常解析ではこれら全てのパラメータを推定して得られた座標値を最終解としているが,整数値バイアスを解かない座標解も求め,保存している(GPS解析の詳細は,辻(1998)や島田他(1998)を参照のこと)。衛星軌道の種類としてはfiducial fixと呼ばれるタイプのものを用いている。この結果,GPSの位置を規定する基準座標系は,その時々々の衛星軌道の計算に採用されている座標系に準拠しており,用いられている座標系の変遷に伴って見掛け上のとび(ギャップ)が生じる(後述)。マッピング関数としてLanyi(1984)のものが用いられている。なお,解析において,固体地球潮汐による観測局の位置変動は考慮されているが,海洋潮汐荷重による局位置変動は当初考慮されていなかった。



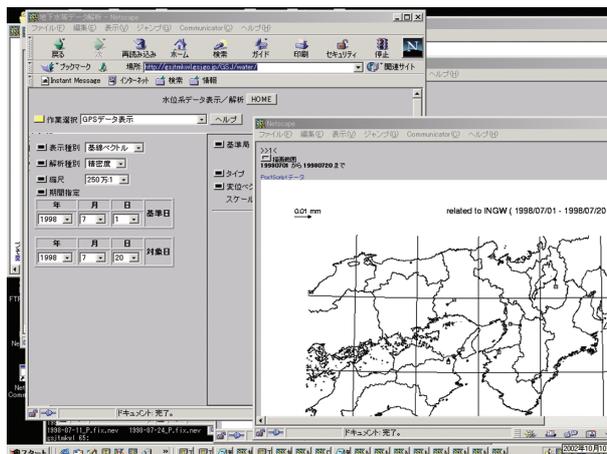
第3図 GPS観測・解析システムの概念図

Fig 3. Schematic figure of the GPS observation and analysis system.

1999年1月以降, 計算機の2000年問題への対処や, 観測局を従来の14局から5局に縮小したことに伴い, 解析手法の変更を行った. 新しい定常解析では, これら5局の観測局にIGSのつくば局(TSKB)を加えた6局についてGIPSY-OASIS IIを使った解析が行われている. 衛星軌道等と同じものを用いているが, GIPSY-OASIS IIのバージョンを従来のrelease 4から5.7へアップデートしたのに伴い, 新バージョンで可能となったNiellマッピング関数(Niell, 1996)の導入, 大気遅延勾配パラメータの推定(Bar-Sever, et al., 1998)や海洋潮汐荷重変形による観測局位置変動の組み込み(Matsumoto et al., 2001)等, いくつかの解析戦略の変更を行った. また, 観測最低仰角を10度に下げても多数の衛星を受信するとともに, アンテナ高を整合性のあるもの(基準を整準台水平面)に統一した. 以上をもって新解析の戦略とした. 解析時の主なパラメータを第2表, 第3表に示す.

1998年までの解析から, 王滝局では夏季に十分な観測データが取得できていないことや, 位相データの解析事後残差が他局と比べて大きいこと, また池田局では周囲の観測環境が著しく悪化したことなどから, 新解析では, これらの局については, それぞれつくば局と基線を組んだ独立した解析を行って, 残りの3局のネットワーク解析とは切り離れた解析を行っている. その他の点については新解析戦略と同じものである.

本定常解析では, 地殻変動の準リアルタイム監視を目的とした速報暦を用いた解析(RS解析), および高精度測位を目的とした精密暦を用いた解析(精密解析)の2種類が行われている. 解析は一貫して一日24時間の単位の観測



第4図: Webシステムを用いた解析結果表示の一例

Fig 4. Example of the web system for displaying GPS analysis results.

データで行われている. 速報暦による解析では, 観測終了後の24時間以内に結果が判明するよう設定がなされており, 迅速に地殻変動モニタリングを可能にしている.

4. 解析結果

定常解析で得られた各観測局の座標値の変動の時系列を第5図~第20図に示す. なお, 少数ながら, 座標値が平均的な値よりも非常に大きく離れて推定される場合がある. それらは, 使用する衛星軌道の精度等によって解析がうまくいかなかったためであると考えられるので, あらかじめ図か

産業技術総合研究所地質調査総合センターにおけるGPS連続観測(大谷ほか)

データタイプ		重み		最大数値		
位相データ		10 mm,	10 mm	50 mm,	25 mm	
疑似距離データ		1 m,	1 m	5 m,	5 m	
推定パラメータ	パラメタリゼーション	時間変動の拘束 (単位)		A priori sigma (単位)		
局位置	一日の箇で一定	-	-	100,	100	m
天頂大気遅延	ランダムウォーク	1.7x10 ⁹ ,	5.0x10 ⁸	20,	50	cm
大気遅延勾配	ランダムウォーク	-	5.0x10 ⁹	-	50	cm
受信機時計誤差	ホワイトノイズ	-	0.1	1,	1	sec
位相バイアス	ホワイトノイズ	-	100	1,	1	sec

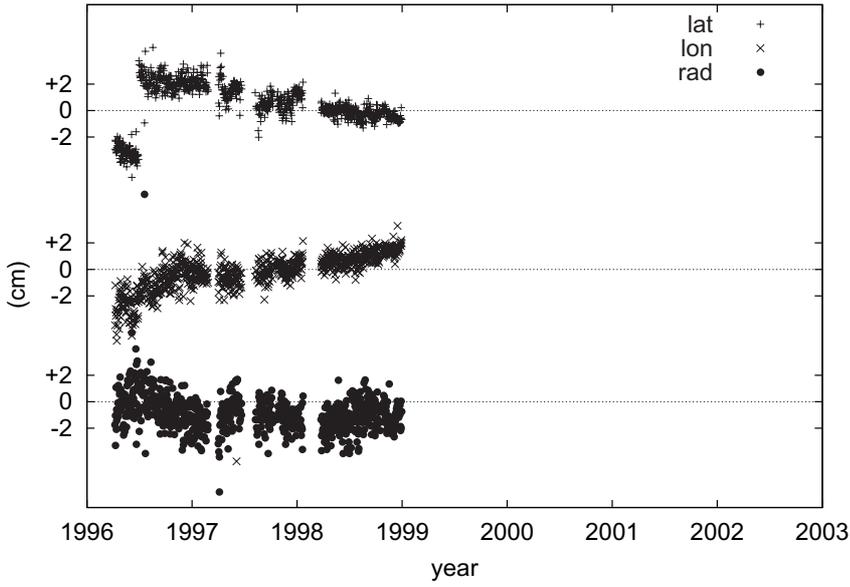
第2表 GPS解析で使用されているパラメータの設定. 各欄で数字が二つあるのは, 旧解析戦略, 新解析戦略, それぞれで採用された値を順に示す.

Table 2 Parameter setting in the routine analysis. Two figures indicate the setting for the previous and current analysis strategy, respectively.

YSTM	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1	Mf	Mm	Ssa
	鉛直成分振幅 (m)	.00705	.00314	.00142	.00087	.00869	.00664	.00277	.00132	.00022	.00007
東西成分振幅 (m)	.00218	.00126	.00033	.00036	.00187	.00146	.00060	.00029	.00007	.00002	.00000
南北成分振幅 (m)	.00315	.00124	.00065	.00033	.00218	.00166	.00068	.00034	.00002	.00002	.00003
鉛直成分位相 (°)	93.6	107.0	98.7	101.1	-122.4	-139.4	-124.2	-144.4	-9.4	-41.7	-71.3
東西成分位相 (°)	22.2	51.4	26.1	48.3	-164.3	173.3	-166.1	165.3	-27.7	-54.9	-108.8
南北成分位相 (°)	-59.1	-40.8	-67.5	-45.4	85.1	63.9	83.2	54.0	43.3	38.7	7.7
TYHS	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1	Mf	Mm	Ssa
	鉛直成分振幅 (m)	.01008	.00476	.00186	.00134	.01077	.00823	.00345	.00164	.00024	.00008
東西成分振幅 (m)	.00219	.00122	.00028	.00034	.00198	.00158	.00063	.00032	.00008	.00002	.00000
南北成分振幅 (m)	.00343	.00135	.00068	.00036	.00222	.00167	.00070	.00034	.00001	.00002	.00003
鉛直成分位相 (°)	76.7	94.4	80.9	89.1	-130.0	-148.2	-131.9	-153.6	-13.5	-45.6	-84.2
東西成分位相 (°)	-3.3	33.2	-6.7	30.6	-167.6	171.2	-169.4	164.2	-27.2	-53.1	-95.9
南北成分位相 (°)	-76.7	-57.8	-84.4	-63.3	80.5	60.6	78.5	51.4	61.9	44.0	8.2
KSNG	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1	Mf	Mm	Ssa
	鉛直成分振幅 (m)	.00979	.00477	.00175	.00134	.01115	.00854	.00357	.00171	.00026	.00009
東西成分振幅 (m)	.00236	.00128	.00030	.00036	.00210	.00168	.00067	.00034	.00008	.00003	.00000
南北成分振幅 (m)	.00316	.00123	.00062	.00033	.00218	.00163	.00069	.00033	.00001	.00002	.00003
鉛直成分位相 (°)	69.9	88.5	75.8	83.4	-132.4	-150.7	-134.3	-156.2	-12.8	-41.8	-55.4
東西成分位相 (°)	-6.4	31.5	-11.9	28.9	-167.7	171.6	-169.5	165.0	-26.3	-51.1	-81.7
南北成分位相 (°)	-79.0	-60.6	-86.4	-66.3	80.4	60.7	78.5	51.4	62.2	43.9	8.2
TSKB	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1	Mf	Mm	Ssa
	鉛直成分振幅 (m)	.00770	.00411	.00121	.00116	.01083	.00839	.00348	.00168	.00032	.00012
東西成分振幅 (m)	.00252	.00135	.00030	.00037	.00232	.00188	.00074	.00038	.00009	.00003	.00000
南北成分振幅 (m)	.00209	.00076	.00042	.00020	.00179	.00132	.00056	.00027	.00002	.00002	.00003
鉛直成分位相 (°)	51.9	73.6	62.9	69.2	-137.3	-155.7	-139.1	-161.2	-8.8	-28.6	-16.1
東西成分位相 (°)	-10.5	30.3	-19.5	28.1	-168.9	171.5	-170.5	165.3	-24.5	-45.8	-48.9
南北成分位相 (°)	-76.0	-60.4	-84.9	-66.9	86.8	67.4	85.2	57.0	43.2	38.8	7.6
IKDA	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1	Mf	Mm	Ssa
	鉛直成分振幅 (m)	.00809	.00367	.00159	.00102	.00925	.00706	.00296	.00140	.00022	.00007
東西成分振幅 (m)	.00219	.00125	.00033	.00035	.00188	.00149	.00060	.00029	.00007	.00002	.00000
南北成分振幅 (m)	.00332	.00130	.00067	.00035	.00214	.00163	.00068	.00033	.00002	.00002	.00003
鉛直成分位相 (°)	88.3	103.2	92.6	97.5	-124.8	-142.3	-126.7	-147.4	-11.1	-44.6	-88.2
東西成分位相 (°)	16.1	46.2	18.0	43.5	-167.2	170.8	-168.8	163.3	-28.0	-55.1	-108.8
南北成分位相 (°)	-66.4	-47.6	-74.7	-52.5	83.4	62.7	81.5	53.2	45.6	39.6	7.7
GOTK	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1	Mf	Mm	Ssa
	鉛直成分振幅 (m)	.00683	.00335	.00124	.00094	.00895	.00685	.00287	.00136	.00027	.00010
東西成分振幅 (m)	.00197	.00115	.00024	.00032	.00201	.00162	.00065	.00033	.00008	.00002	.00000
南北成分振幅 (m)	.00263	.00100	.00053	.00027	.00192	.00143	.00060	.00029	.00002	.00002	.00003
鉛直成分位相 (°)	71.5	87.5	79.9	82.2	-131.1	-148.7	-132.9	-153.8	-7.3	-30.3	-20.7
東西成分位相 (°)	-0.6	37.2	-0.9	34.8	-167.2	171.7	-169.0	164.9	-27.7	-51.7	-82.0
南北成分位相 (°)	-70.4	-52.6	-78.4	-58.2	84.1	63.6	82.2	53.7	41.1	37.8	7.5

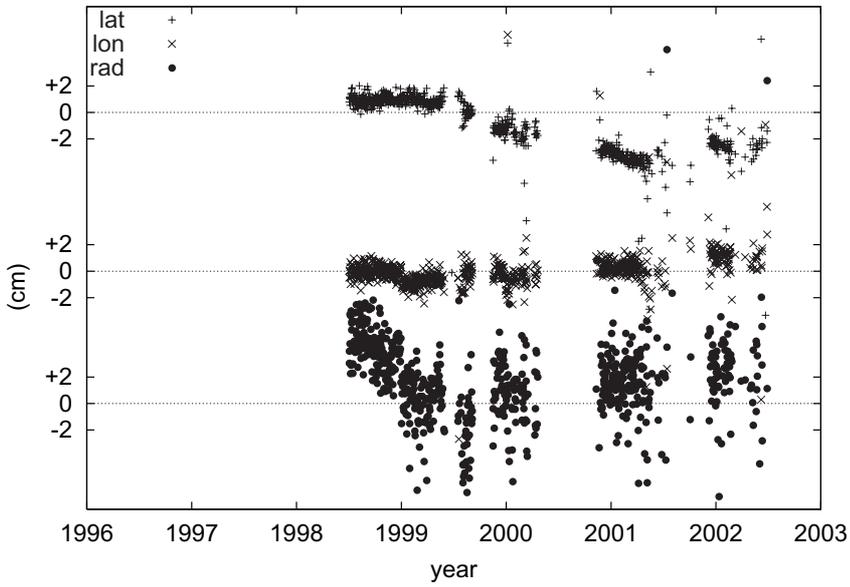
第3表 解析で使用された海洋潮汐の各分潮の振幅と位相. 上方向, 西方向, 南向きをそれぞれ正とする.

Table 3 Amplitude and phase of the ocean tide used in the routine analysis. Up, west, and south directions are positive.



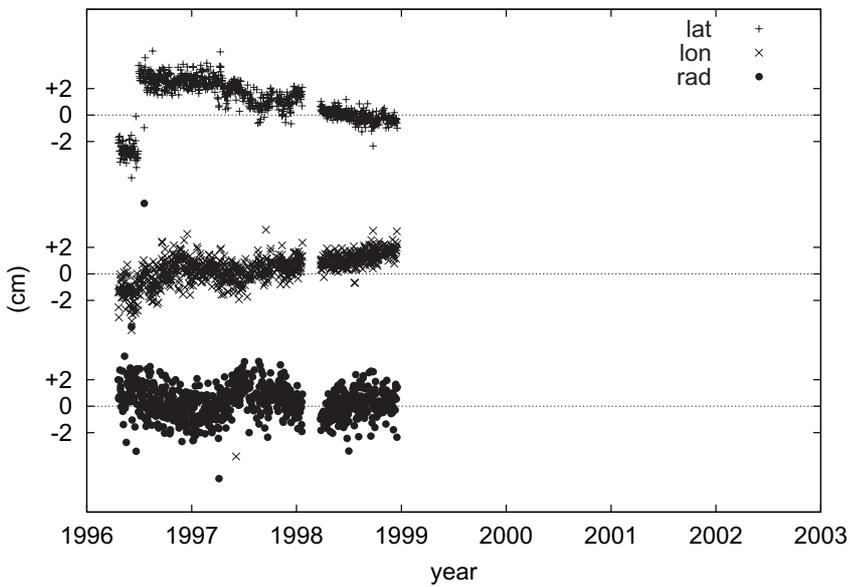
第5図: 板東GPS局の座標値変動. "lat", "lon", "rad"はそれぞれ緯度, 経度, 鉛直(高さ)成分を表す. 北, 東, 上向きが正. 縦軸は各成分の相対的な位置を, 横軸は年を示す.

Fig. 5 Coordinate variation of the Bando GPS station. "lat", "lon", and "rad" indicate latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical and horizontal axes indicate relative position of each component and year, respectively.



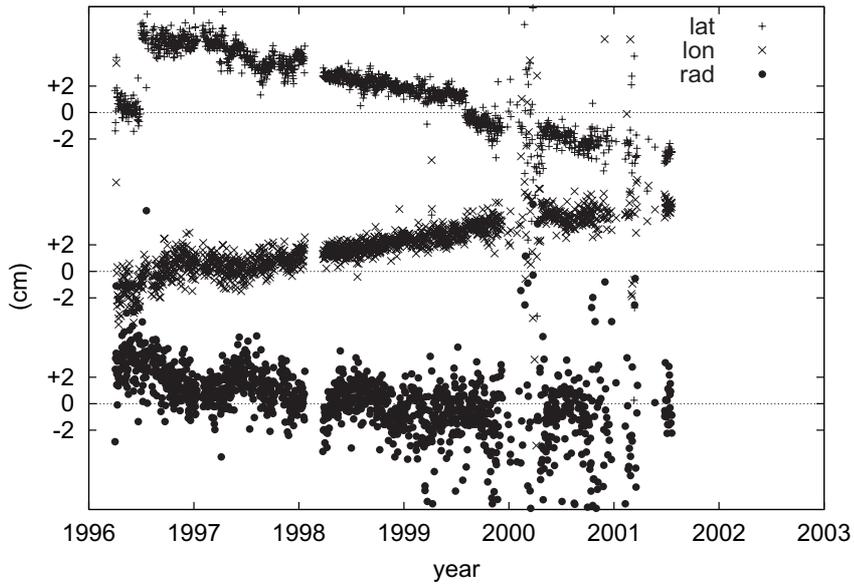
第6図: 第5図と同じ, 但し王滝GPS局.

Fig. 6 Same as Figure 5 but the Ohtaki GPS station.

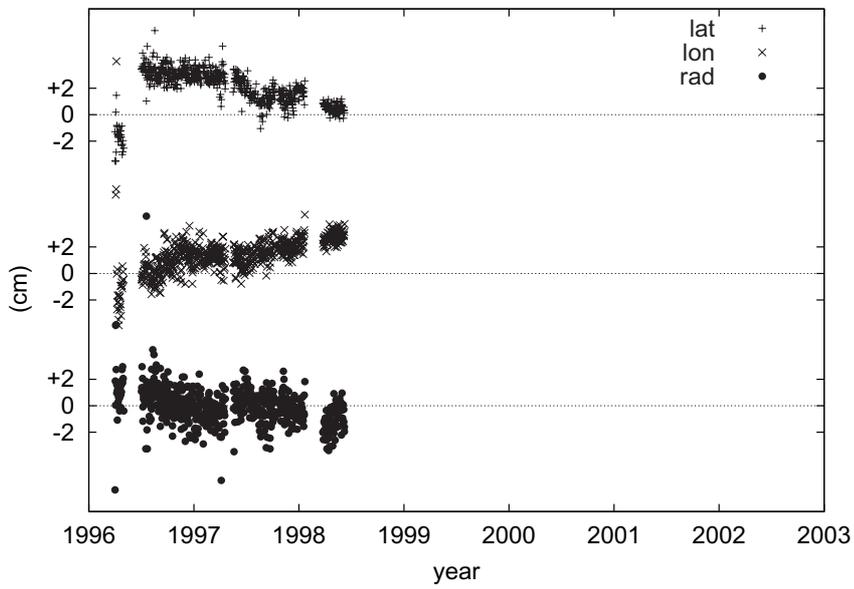


第7図: 第5図と同じ, 但し秦荘GPS局.

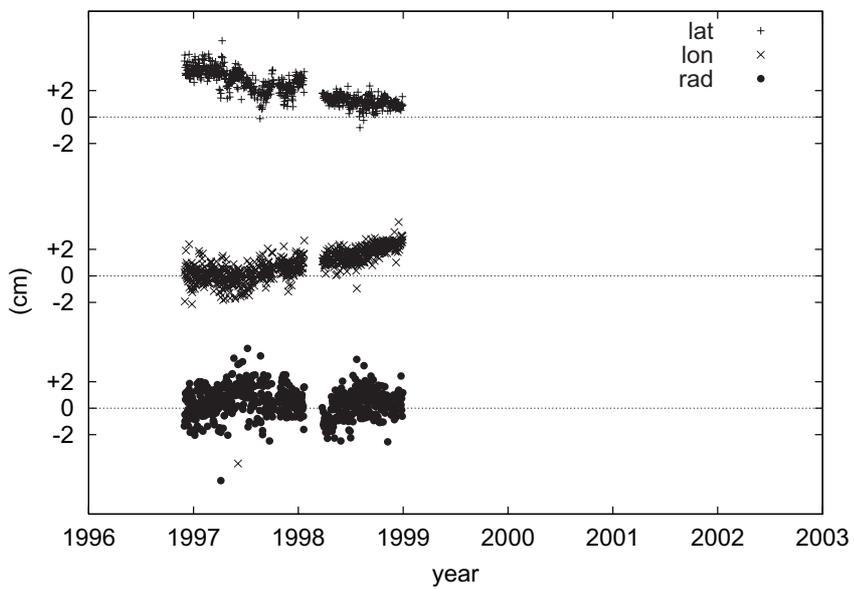
Fig. 7 Same as Figure 5 but the Hatasho GPS station.



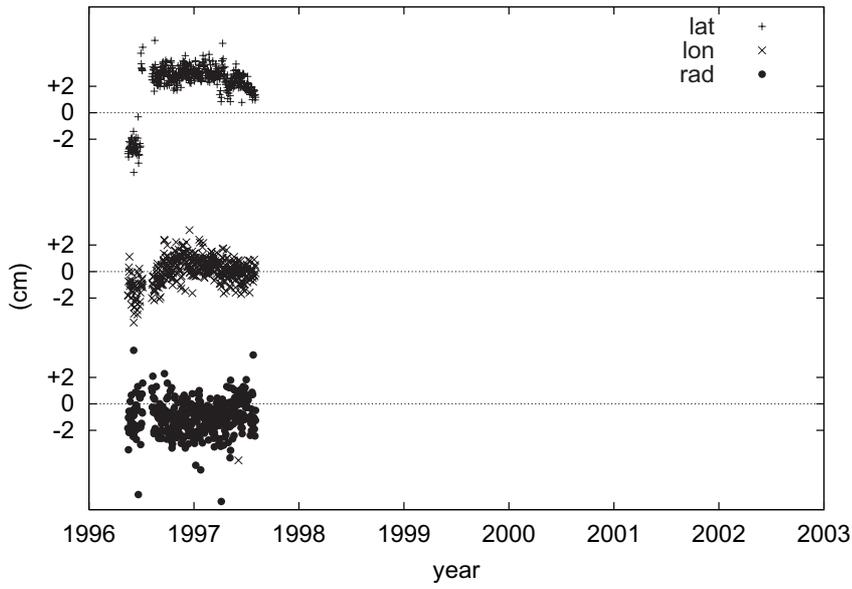
第8図: 第5図と同じ,但し池田GPS局.
Fig. 8 Same as Figure 5 but the Ikeda GPS station.



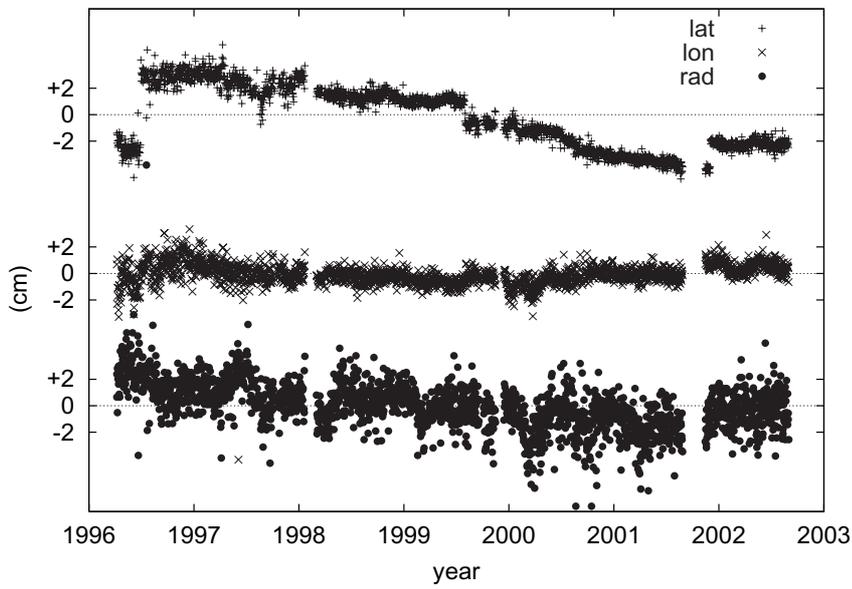
第9図: 第5図と同じ,但し育波GPS局.
Fig. 9 Same as Figure 5 but the Ikuha GPS station.



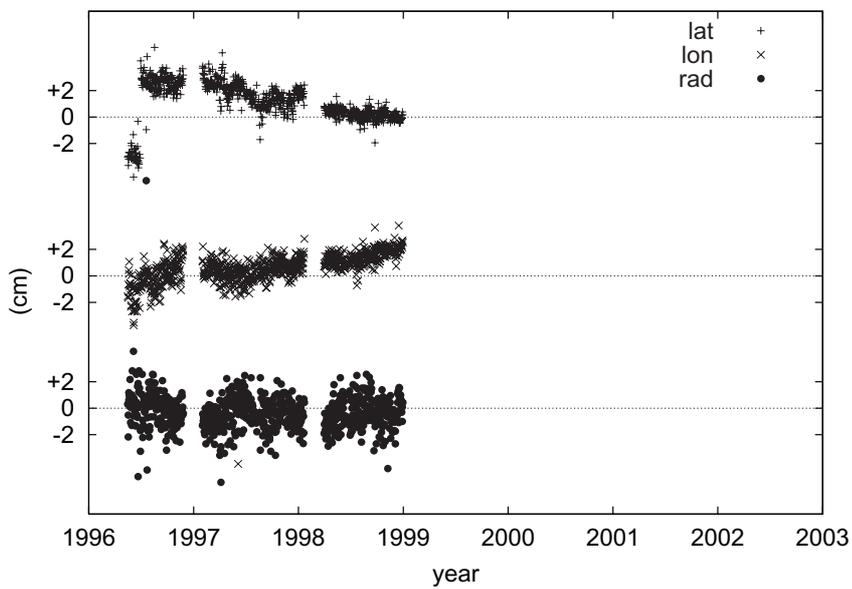
第10図: 第5図と同じ,但し猪名川GPS局.
Fig. 10 Same as Figure 5 but the Inagawa GPS station.



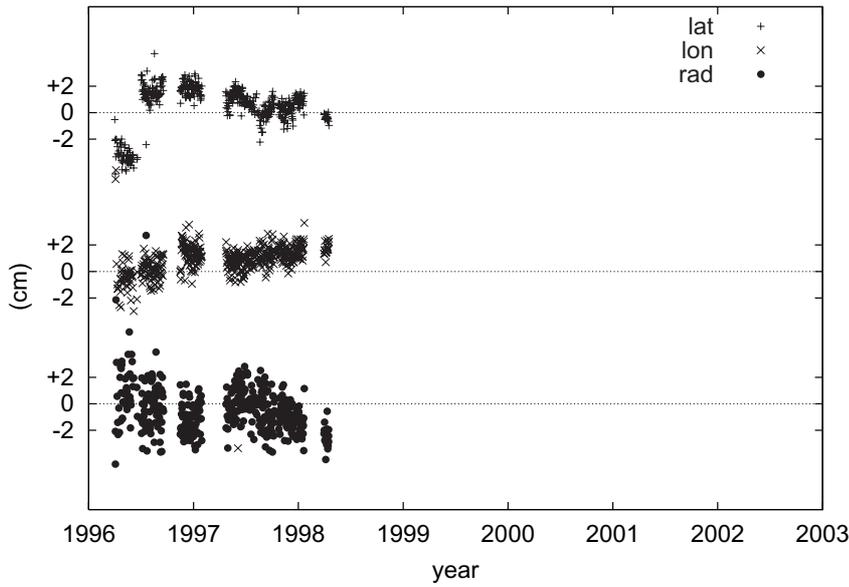
第11図: 第5図と同じ, 但し広陵GPS局.
Fig. 11 Same as Figure 5 but the Koryo GPS station.



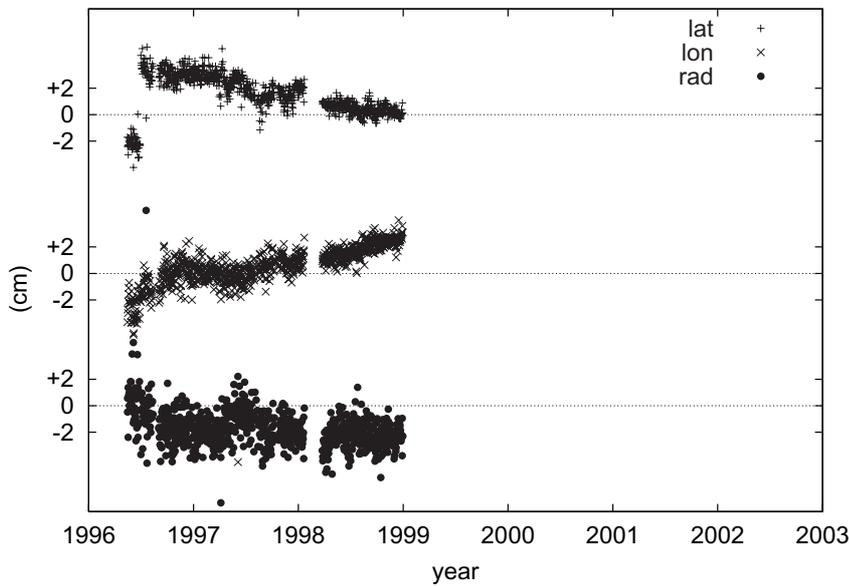
第12図: 第5図と同じ, 但し草薙GPS局.
Fig. 12 Same as Figure 5 but the Kusanagi GPS station.



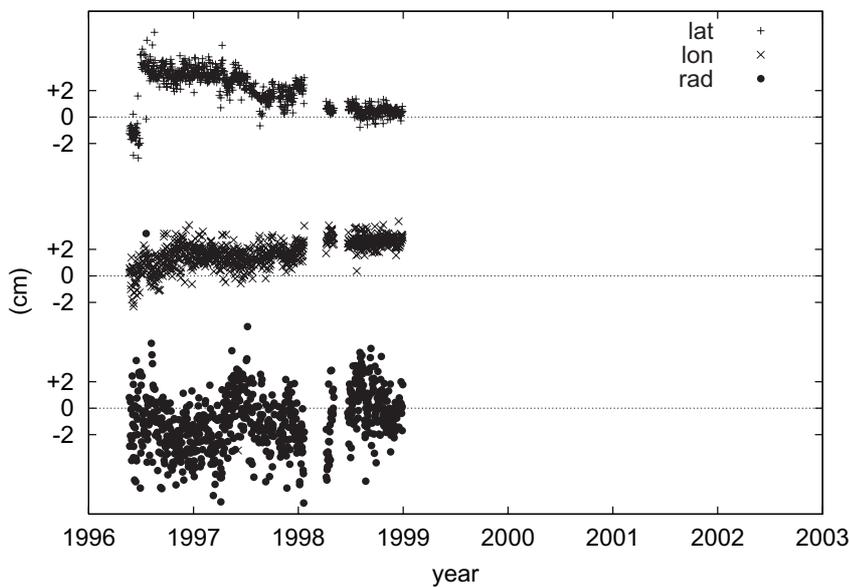
第13図: 第5図と同じ, 但し根来GPS局.
Fig. 13 Same as Figure 5 but the Negoro GPS station.



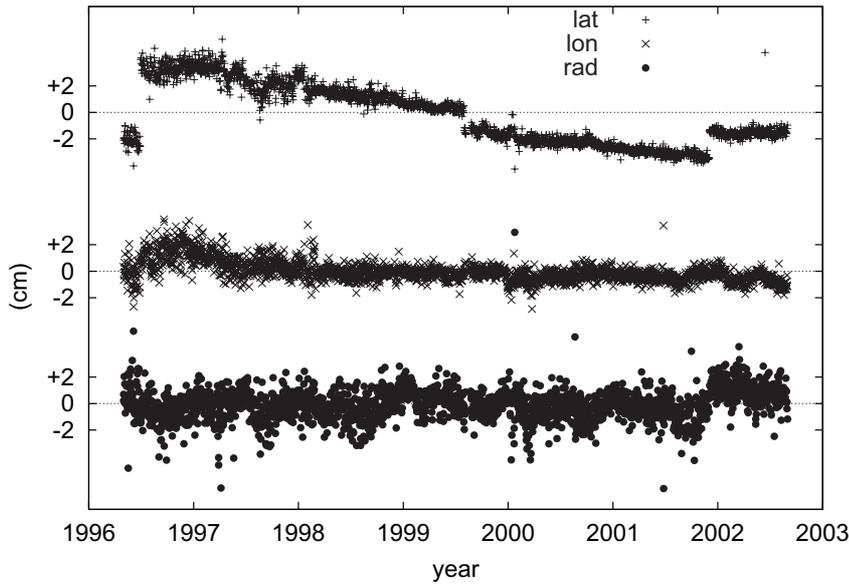
第14図: 第5図と同じ,但し若王子GPS局.
Fig. 14 Same as Figure 5 but the Nakoji GPS station.



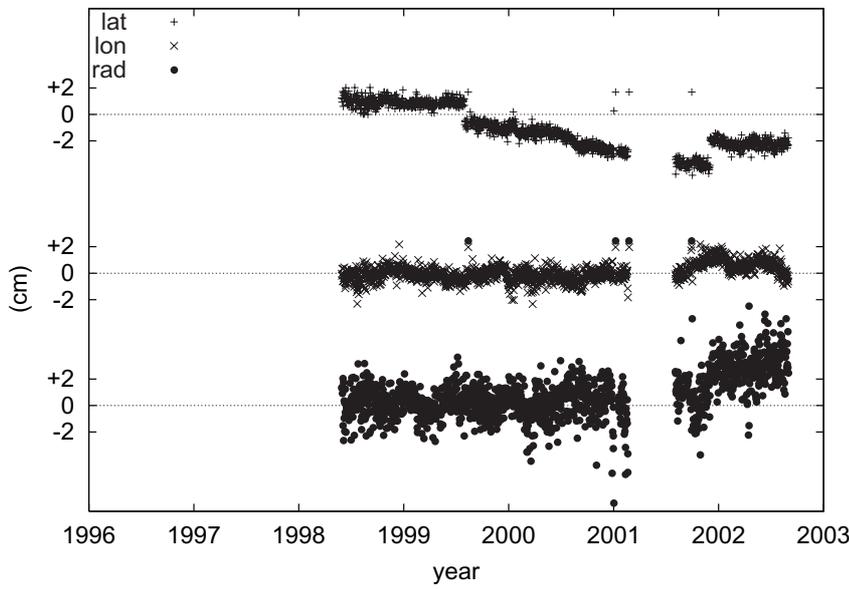
第15図: 第5図と同じ,但し西淡GPS局.
Fig. 15 Same as Figure 5 but the Seidan GPS station.



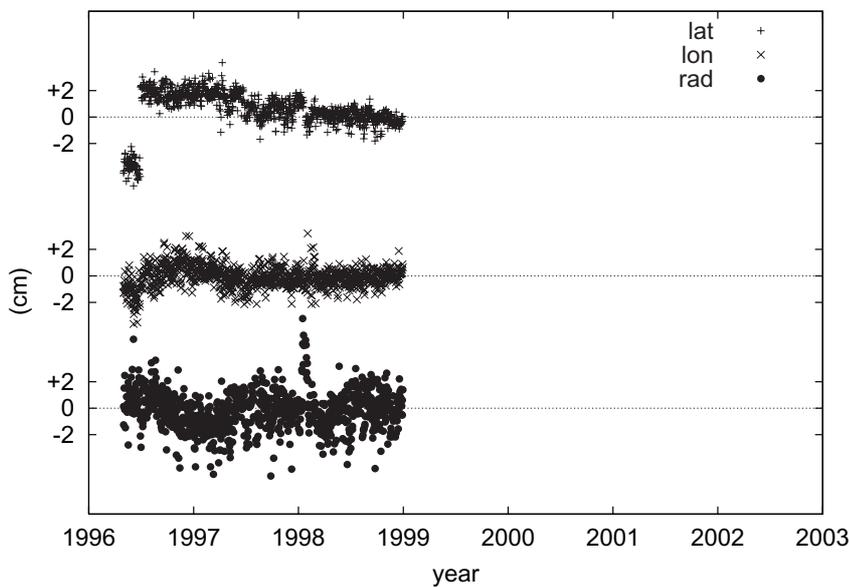
第16図: 第5図と同じ,但し天王寺GPS局.
Fig. 16 Same as Figure 5 but the Tennoji GPS station.



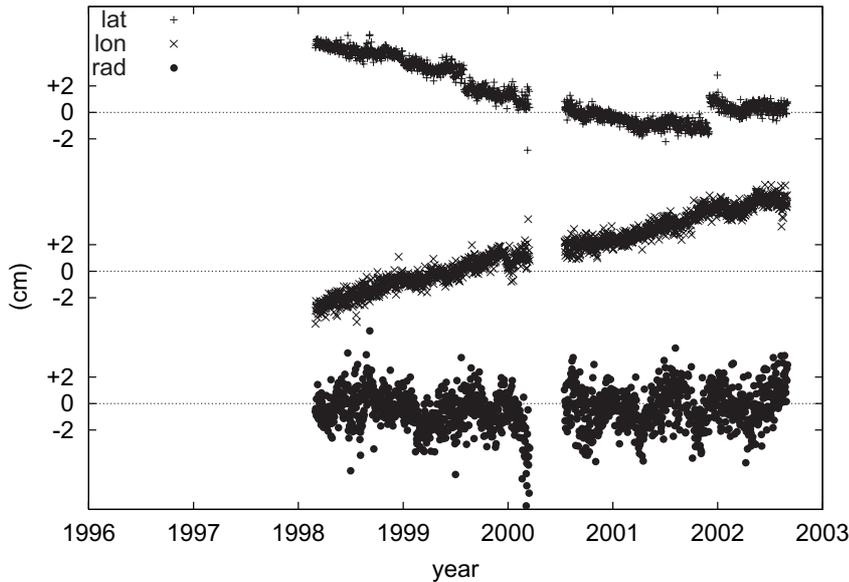
第17図: 第5図と同じ,但しつくばGPS局.
Fig. 17 Same as Figure 5 but the Tsukuba GPS station.



第18図: 第5図と同じ,但し豊橋GPS局.
Fig. 18 Same as Figure 5 but the Toyohashi GPS station.



第19図: 第5図と同じ,但し白田GPS局.
Fig. 19 Same as Figure 5 but the Usuda GPS station.



第20図: 第5図と同じ,但し安富GPS局.

Fig. 20 Same as Figure 5 but the Yasutomi GPS station.

らは取り除いてある。

各局の時系列に共通に見られるいくつかのとび(ギャップ)は,暦等に使われている基準座標系の変更に伴うものである。基準座標系としては,座標系の管理を行っている国際的な機関であるIERS(International Earth Rotation Service)が作成しているITRF(International Terrestrial Reference Frame)と呼ばれるもの,もしくはIGSが独自に作成したIGS版ITRF(IGSMail-2899, 2000)が使用されている。本解析では,1996年6月30日にITRF93からITRF94に,1998年3月1日からはITRF96に,1999年8月1日からはITRF97に,2000年6月11日からはIGS97に,そして2001年12月2日からはIGS00にそれぞれ変更が行われている。これらの変遷に伴い,その前後で最大数cm程度の時系列のギャップが生じている。

日々の座標値は,座標値の平均的な変動の周りにばらついて分布している。このばらつきを座標値の再現性という。再現性は局によって若干違うが,これは各観測局における観測ノイズや,解析が適切に行われたか等によって左右される。座標値の水平成分の再現性の季節による違いは顕著ではなく,およそ1cm程度の範囲内に収まっている。鉛直方向についてはその2~3倍程度悪く,2,3cmのばらつきがある。1999年1月1日のデータから解析戦略への変更を行っているが,若干だがその後の方が座標値のばらつきが小さくなっている(再現性がよくなっている)。過去に,大気遅延勾配の推定や,低仰角を含めた観測によって座標値の再現性が向上するという報告(例えばBar-Sever *et al.*, 1998)がなされているが,今回の結果についても過去の報告を裏付けるものになっている。

以下,各観測局に見られる変動の特徴とGPSの設置条件を簡単に説明する。

板東(BNDO,第5図):唯一の四国の観測局で河川敷に位置している。産総研観測網の中でも平均的な座標値の

ばらつきを示す。

王滝(GOTK,第6図):周囲を森林に囲まれているため,産総研観測局では最も高い5mのピラー上に設置しているが視界はよくない。夏季に一日当たりの観測データ量が著しく減少するがその原因は不明である。このために解が得られなかったり,得られても不安定になり再現性が悪化するものと考えられる。

秦荘(HTSH,第7図):平野に立地しているが周囲の建設物のため視界は余り良好ではない。鉛直成分の季節変動が比較的顕著である。

池田(IKDA,第8図):産総研関西センター(旧大阪工業技術研究所)内に設置されたが,周囲での建設工事によって,観測条件が急激に悪化した。座標値のばらつきが1999年頃より大きくなっているのはそのためと思われる。2001年7月に観測を中止した。

育波(IKHA,第9図):阪神淡路大震災を起こした野島断層沿いに設置された。視界は良好で観測環境はよいが目立った変動はない。

猪名川(INGW,第10図):周囲の視界が開けており,産総研観測局の中では最良条件の局。但し座標値の再現性自体は他局に比べて目立ってよいというわけではない。

広陵(KRYO,第11図):1997年の落雷によって観測機器が破損したため,観測を中止した。

草薙(KSGI,第12図):地震に伴う地下水変動が顕著に見られる観測井に併設された局。観測小屋の屋上に設置されている。2000年後半から,それまでの沈降から隆起へ転じているように見える。

根来(NGRO,第13図):中央構造線沿いに位置している。但し近くに山があり視界はよくない。

若王子(NKJI,第14図):産総研関西センター尼崎サイトの観測小屋の屋上に設置されている。周囲の観測環境は必ずしも良好ではなく,機械トラブルのため観測を1998年4

月に中止した。

西淡 (SEDN, 第15図) : 河川の土手上に設置された局。

天王寺 (TNNG, 第16図) : 上町断層上の斜面に設置されている。周囲の植生のために観測条件は良好ではなく、特に鉛直成分に見られる顕著な季節変動は、植生の影響による可能性がある。

つくば (TSKB, 第17図) : 国土地理院構内にあるIGS観測局の一つ。受信機はTurbo Rogue SNR-8100, アンテナはチョークリング付きのDorne Margolinで、産総研のシステムとほぼ同じものが用いられていたが、2002年8月より受信機が、Turbo Rogueの後継機種であるAOA社製Bench Markに交換された。ピラー上に設置されている (http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/log/tskb_20020805.log)。

豊橋 (TYHS, 第18図) : 名古屋大学地震火山観測研究センター三河地殻変動観測所の屋上にアンテナが設置されている。

白田 (USUD, 第19図) : JPLが管理しているIGS観測局の一つで建物の屋上に設置されている。受信機はTurbo Rogue SNR-8000, アンテナはチョークリング付きDorne Margolinで、産総研観測網と同じタイプのものが用いられている (<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/log/usud0010.log>)。

安富 (YSTM, 第20図) : 山崎断層のすぐ近くに位置しており、視界条件はよくない。1999年4月17日に、東に約10kmの地点でM3.9の地震が発生したが、GPSの座標値には顕著な変動は見られていない。また、2002年6月より併設するボアホール歪計に顕著な変動が見られたが、GPS座標値での対応する変化は明瞭ではない。

全体に共通するトレンドの特徴として以下のことがあげられる。まず、近畿地方を中心とした観測局の水平成分は、ほぼ同じような直線的な変動が卓越している。即ち、近畿地方以西についてつくば局を基準にして見ると、年間におよそ2cm程度の東向きの変動が共通に見られている。Ohtani *et al.* (2000)は、1999年までの各局の時系列から、つくば局を基準とした定常的な変動速度を計算し、近畿以西の観測局はほぼ同じような東進成分を有していることを報告している。これはつくば局が位置している北アメリカプレートに対して近畿地方以西はアムールプレートに属し、これが東進している (例えばHeki and Miyazaki, 2001) ことを反映しているためと考えられる。

もう一つの特徴として、水平・鉛直両成分ともに多くの観測局で季節変動が見られる。特に、鉛直成分については顕著に見られ、冬から春にかけて極小に、夏に極大となるような共通の変動が存在する。振幅は観測局によって異なるが、最大3cm程度に及ぶところもある。水平成分については振幅も小さく、短い時系列でははっきりしないが、長期の時系列においては緯度 (南北) 方向に、よりはっきりと認められる。こうした季節変動に加えて、産総研観測局には特に鉛

直成分において半年周期の変動がのっている。草薙や安富等のように局によっては半年成分の方が顕著である場合がある。後述するように、周囲のGEONETの観測局に比べても半年成分の変動が大きく卓越しており、産総研のGPS局に特有のものである。

また、1997年の中旬から後半にかけて、ほぼ全ての観測局の緯度 (南北) 成分に共通して見られる、更に周期の短い波打つような変動も存在する。これは産総研観測網が主に展開されている近畿地方のみならず、数百km離れたつくば局でも同様の変動が見られていることが特徴である。

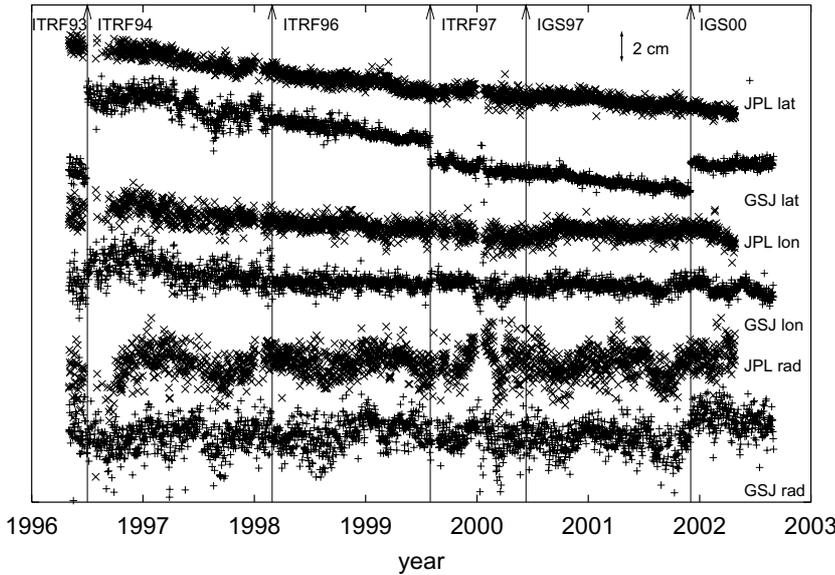
5. 観測局座標値変動の評価

5.1 ネットワーク解析手法の評価

一般にGPSによる座標値推定は、解析において与えられる衛星の軌道や時計誤差の精度により大きな影響を受ける。また、解析時のパラメータの設定等のような解析戦略を採用するかにもよる。特に、本解析においては、全ての観測局を同時に解析する方法 (ネットワーク解析) が採用されているが、一般にこの手法は、ある観測局に不良データが含まれ、その取り扱いが適当ではない場合、他の観測局の座標値推定にまで影響を及ぼす可能性がある。先に指摘した、遠方の観測局も含めて共通に見られる座標値の変動は、こうした原因で生じた、見掛け上のものである (真の地殻変動ではない) 可能性がある。

そこで本解析の妥当性を評価するため、異なる解析戦略で得られた結果との比較を行った。GIPSY-OASIS IIでは、精密単独測位 (Precise Point Positioning) と呼ばれる解析が可能である (Zumberge *et al.*, 1997)。精密単独測位は、ネットワーク解析では解いていた整数値バイアスが解けないものの、一点のGPS局だけで解析が可能であるため、他の観測局のデータの品質の影響を受けないというメリットがあり、ネットワーク解析の妥当性を評価できる。JPLではGIPSY-OASIS II解析ソフトウェアを使い、精密単独測位によって解析されたIGS観測局の座標値を公開しており (IGSMail-4136, 2002)、その内のつくば局の結果を本解析と比較することができる (両者が重複する1996年5月から2002年4月まで)。

結果を第21図に示す。この精密単独測位の解析では、座標系はITRF2000に統一されたものが使われているため、座標値にとびがない。この点を除けば、一年以上の長期的な傾向については両者の各成分ともよく一致しているといえ、プレート運動に起因すると考えられる定常的な変位等を計算する際には、解析手法による差は小さいと言える。しかしながら、数ヶ月程度の、より短い変動について見ると両者に若干の違いが見られる。例えば前節で指摘した、1997年の後半において緯度方向に数ヶ月程度の波打った変動がネットワーク解析では見られたが、その振幅は精密単独測位解析では小さい。1999年末から2000年の変わり目に向け



第21図 JPLの精密単独測位解析(図中で“JPL”)及び産総研のネットワーク解析(図中で“GSJ”)によるつくば局の座標値解析結果の比較。“lat”, “lon”, “rad”はそれぞれ緯度, 経度, 鉛直(高さ)成分を表す。北, 東, 上向きが正。座標系の変遷があった時を縦線で, 使用されている座標系とともに示している。縦軸は相対的な位置を, 横軸は年を示す。

Fig. 21 Comparison of the coordinate variations of the Tsukuba GPS station estimated through a precise point positioning analysis strategy by JPL (indicated as “JPL”) and the network analysis strategy by GSJ (indicated as “GSJ”). “lat”, “lon”, and “rad” indicate latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical lines indicate the time of changes of the reference frame used in the GPS analysis with its name. Vertical and horizontal axes indicate relative position and year, respectively.

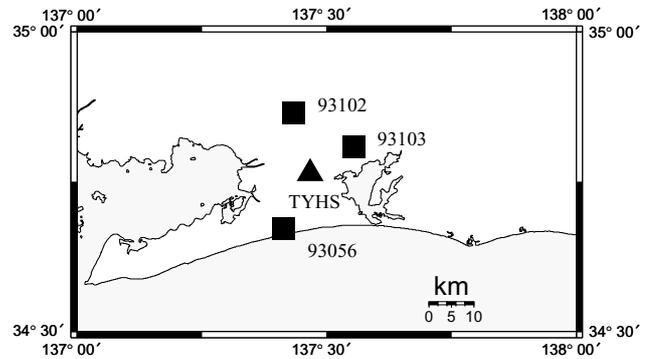
て鉛直成分においても両者に違いが見られる。これらの原因として, 上記のネットワーク解析における他の観測局の影響が考えられる。いずれにせよ, 解析手法により数ヶ月程度の座標変動には違いが生じるので, これらを地殻変動として検討する際には十分な注意が必要である。

5.2 近傍GEONET局との比較

次に, 近傍に設置されているGEONETの観測局と比較を行った。一例として, 豊橋局およびその周りを取り囲むGEONETのGPS局, 93102, 93103, 93056(第22図)の座標値変動を第23図に示す。なお, 国土地理院の局座標値は, 畑中他(2001)の解析による結果を用いた。なお, 彼らの解析においては基準座標系は同一のものに統一されているため, その変更に伴うギャップは存在していない。

4局とも直線的なトレンドに季節的な変動がのっていることが分かる。直線のトレンドはいずれも似たような傾向を示している。93056の直線トレンドの傾きが異なっているのは, 2001年頃から始まった, ゆっくりすべり(例えばOzawa *et al.*, 2002)が生じている地域の中心付近にこの局が位置しているからだと考えられる。また, 2001年の末に豊橋局の鉛直成分にギャップがあるが, これは座標系の変更に伴うものであると考えられる。更に詳しく見ると, 豊橋局にはGEONETに見られない数ヶ月程度の変動成分が見られる。例えば1999年の末から2000年にかけて, 2, 3ヶ月の急激な変化が緯度, 経度成分において見られて興味深い。ただし, 先に指摘したように, こうした変動が実際の地殻変動を反映しているかどうかの判断は難しい。数百km離れたつくば局でも同様な変動が見られていること, 周囲のGEONETには特にこれに対応した変動は見られないことから, むしろ解析上のノイズによるものである可能性が高い。

一方, このような座標値のトレンドに対するばらつきを見てみると, 豊橋局のばらつきはGEONETよりも若干大きい

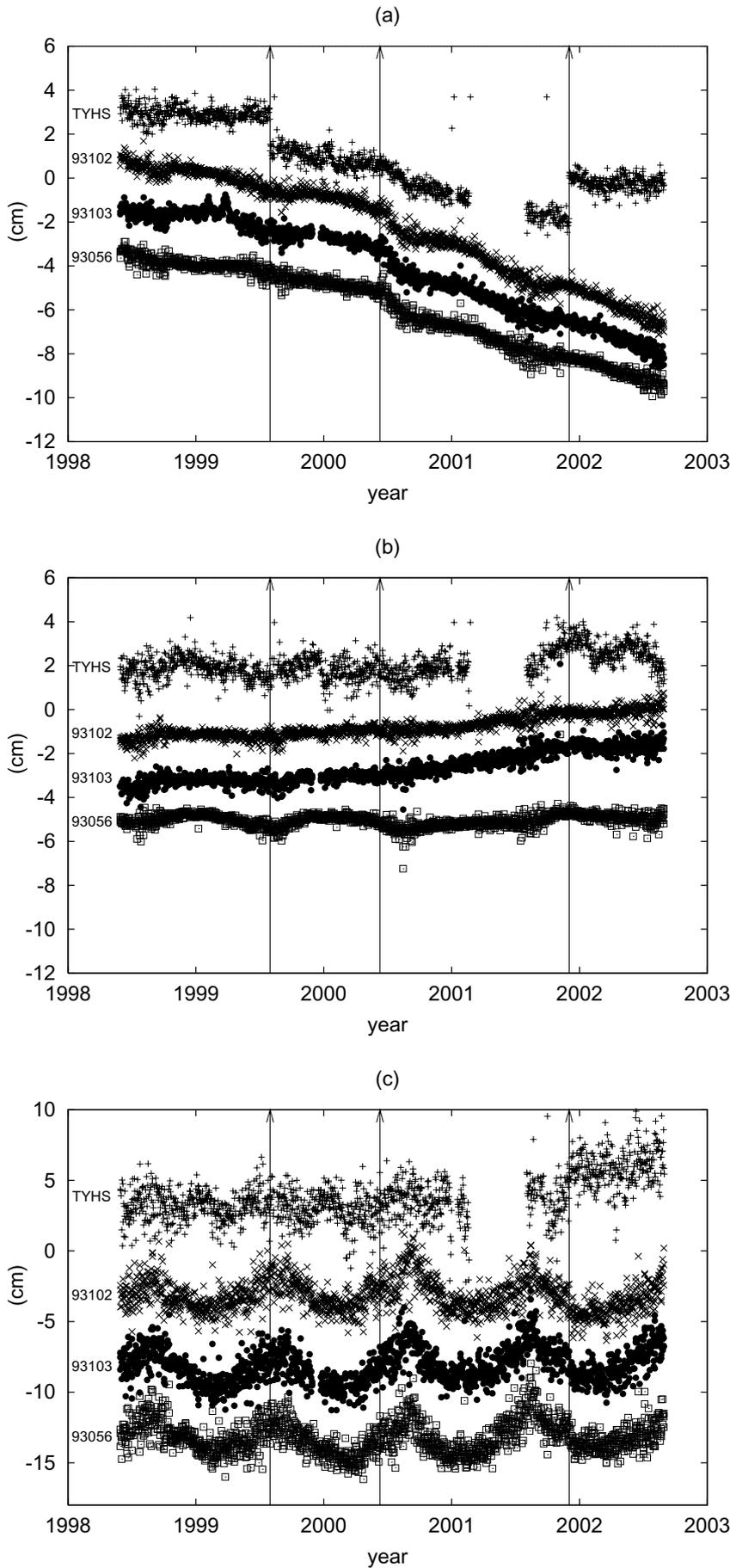


第22図 豊橋局(TYHS)および比較に用いた周囲のGEONET局(93102, 93103, 93056)の位置。

Fig. 22 Location of the Toyohashi station (TYHS) and the surrounding GEONET stations (93102, 93103, and 93056) used for comparison.

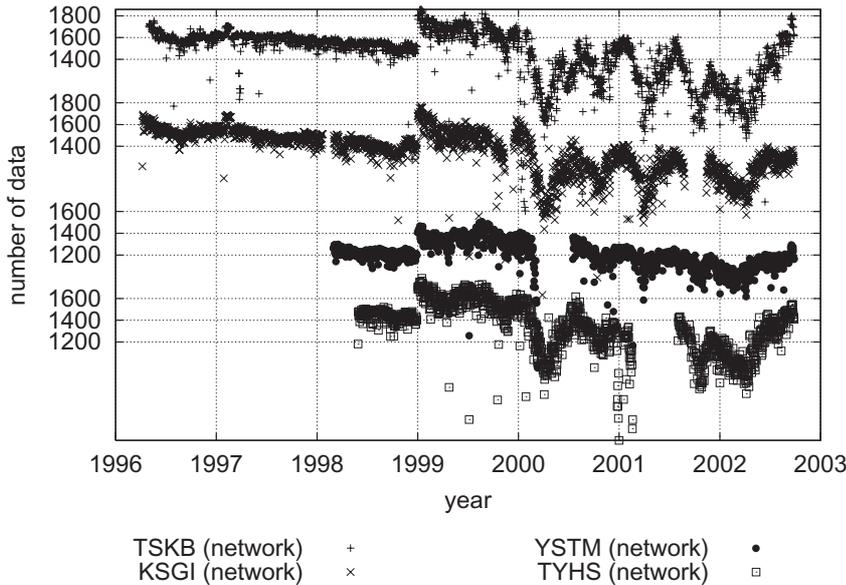
ことが分かる。特に鉛直成分にはこの傾向がより顕著である。他の産総研局とその周囲のGEONET局を比較しても, 同様な傾向が見られる。

この原因としては以下のことが考えられる。まず, 豊橋局が山のすぐそばに設置されていることから上空の視界が悪く, 衛星電波の受信条件が良くない。産総研の多くの観測局は, 活断層モニタリングも目的として谷間や山のすぐそばに設置されていることから一般に視界はよくなく, そのため受信できる衛星が少ないためにデータ数もそれに比べてそもそも少なくなっている。また, 視界の比較的良好な観測局においても, 産総研観測網で使用されている受信機SNR-8000は, 最大8衛星しか同時に受信できなく, 現在一般的に使用されている12チャンネルの受信機に比べるとそもそも衛星の受信能力が低い。これらが解析精度の相対的な低下を起こしているものと考えられる。更に, GEONETデータの解析では, アンテナ台底面からの反射波等のマルチパスによるアンテナ位相特性の変化の影響を低減させる



第23図 豊橋局(TYHS)および周囲のGEONET局(93102, 93103, 93056)の座標値の変動。(a), (b), (c)はそれぞれ緯度, 経度, 鉛直(高さ)成分を示す。北, 東, 上向きが正。図中の縦線は座標系の変遷があった時を示している。縦軸は各局の相対的な位置を, 横軸は年を示す。

Fig. 23 Variation of the coordinate of the Toyohashi station (TYHS) and the surrounding GEONET stations (93102, 93103, and 93056). (a), (b), (c) indicate latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical lines in each figure indicate the time of changes of reference frame used in the GPS analysis. Vertical and horizontal axes indicate relative position of each station and year, respectively.



第24図 座標解を推定するのに最終的に使用された一日当たりの位相データのエポック数. 定常のネットワーク解析結果による.

Fig. 24 The daily number of epochs of GPS carrier phase data used for the estimation of the station coordinates obtained through the routine network analysis.

手法が採用されているが,本解析ではそうした手法は導入されていない. Hatanaka *et al.* (2001a, b)によれば,こうした手法を取り入れた解析を行うと,座標再現性が向上することが報告されていることから,ここで見られた再現性の悪さの別の原因として,マルチパスの影響も考えられる. 国土地理院では,マルチパスの影響を小さくするため,静岡県に展開されている高精度比高観測を目的としたGPS観測局において,アンテナ架台の下に電波吸収材を敷設している(河和・菅, 2000). 今後本観測網でも,こうした試みを行って,軽減できるノイズを取り除いていくことで再現性を向上させる試みが必要である.

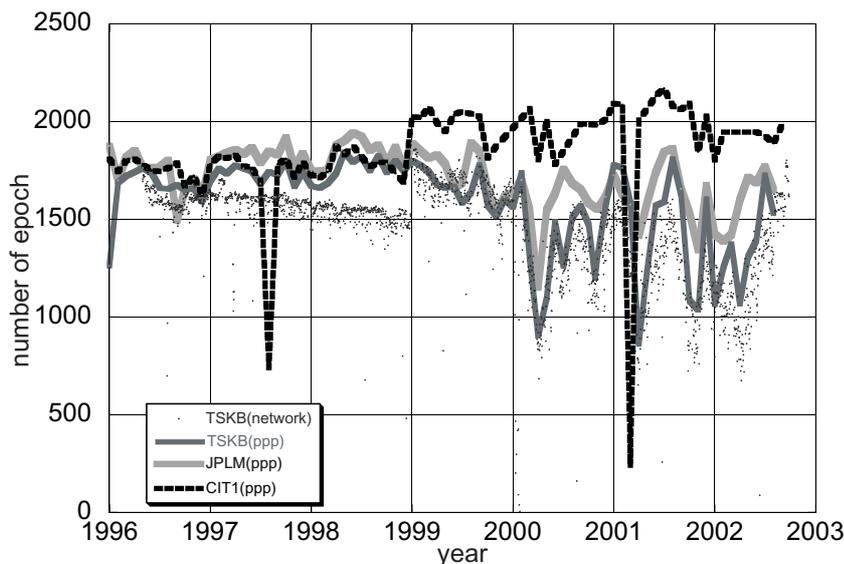
5.3 座標値変動にみられる半年周期の考察

前節で見たように,一般にGPSの座標値変動には季節変動が重畳しており,数ヶ月程度の地殻変動を議論する上で,精度良い議論を妨げていることが多い. 日本においてGPS座標値に顕著な季節変動が見られることはこれまで多くの研究によって報告されている. その要因については,大気遅延の推定誤差等,ノイズであるという考えと,プレート運動や積雪等の影響により実際に地殻が広域的に季節的に変動している等,シグナルを捉えているものという考えの両方があるが(例えば, Hatanaka *et al.*, 2001a, 2001b; Murakami and Miyazaki, 2001; Heki, 2001等),はっきりとしたことは分かっていない.

産総研観測局の座標値変動で特徴的なのは,季節変動に加えて半年周期の変動が特に鉛直成分に顕著に見られることである. 座標値のばらつきと同じオーダーかそれ以下であるため分かりにくいものの,例えば安富局の鉛直成分には,2000年以降に冬(1月頃)と夏(7月頃)に最大,春(4月頃)と秋(10月頃)に最小となるような顕著な半年周期の変動が見られる(第20図). 同様な傾向が草薙局の鉛直成分においても見られる(第12図). また振幅は小さいながら

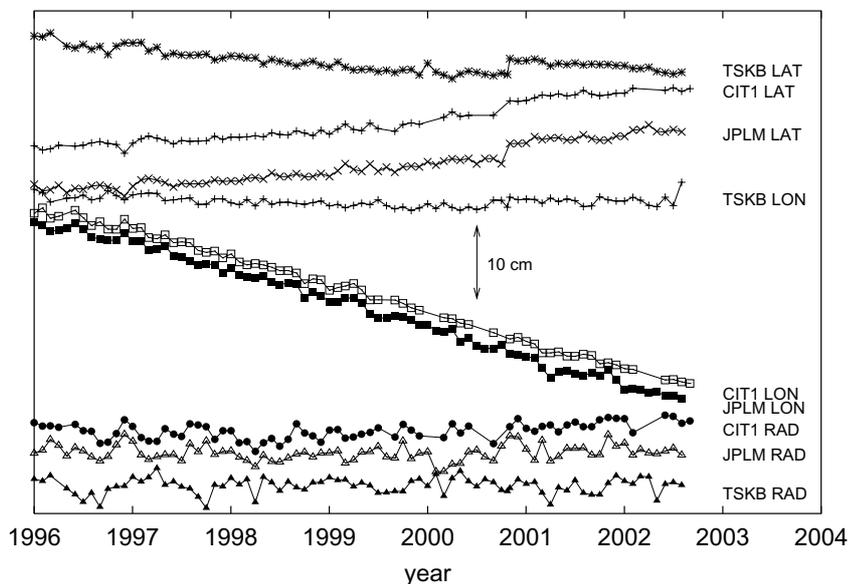
もよく見ると,つくば局においても同様な変動が見られることが分かる(第17図). 豊橋局についても,2001年前半に半年に及ぶ欠測があって分かりづらいが,他の観測局の半年変動と対応させると,同様な傾向が見て取れる(第18図). つまり,これらの変動の位相は局間の距離に関わらずよい相関を示す. この半年周期の振幅は,局によって異なるが,つくば局で数mm程度,草薙局では2cm程度にもなる. 安富局では,半年変動の周期は1999年~2000年頃からその振幅が大きくなっているように見える. 草薙局では2000年以前からもその傾向が伺える. 他のGPS観測局の多くについては1999年までで観測を中止しており,期間が短いのではっきりとは分かりにくい,1999年頃までのデータを見る限りでは半年周期の変動は余り顕著ではなく,むしろ年周成分が目立っている.

こうした半年周期の変動は,GPS観測データの解析において,最終的に使用される一日当たりの位相データの数にも見られる. 産総研GPS観測網では,30秒に一回の割合で衛星からの信号(位相データ)を受信した観測が行われている. 実際の解析では,計算時間を節約するために5分毎にリサンプリングしたデータを用いて解析を行っている. このようなGPSの観測もしくは解析に使用されているデータをエポックという. 第24図は,座標解を推定するのに最終的に使用された一日当たりの位相データのエポック数を代表的な観測局について示したものである. 図から明らかなように,特に2000年以降,およそ半年の周期を持って全ての観測局でエポック数が共通に顕著に増減していることが分かる. エポック数は,冬と夏に最大,春と秋に最小となるような変動をしており,これは先に見た座標の鉛直成分の変動とよく対応している. 2000年以降,半年周期の変動は非常に顕著であるが,1999年においても振幅は小さいながらも半年周期が確認できる. しかし1998年以前では半年周期の増減があるようには見えない. これは,GPS座標値に見られ



第25図 JPLM(AOA社製Turbo Rogue受信機), CIT1(ASHTECH社製Z-XII3受信機), TSKB(AOA社製Turbo Rogue受信機)の精密単独測位手法による解析(ppp)で最終的に使用された一日あたりの位相データのエポック数(一ヶ月毎にプロット). 参考までにTSKBのネットワーク解析(network)で使用された位相データのエポック数も示す.

Fig. 25 The daily number of epochs of GPS carrier phase data used for the estimate of the station coordinates of JPLM (AOA TurboRogue receiver), CIT1 (Ashtech Z-XII3 receiver), and TSKB (AOA TurboRogue receiver). The solutions are obtained through the analysis of precise point position strategy (ppp) every one month. The daily number of the epoch of the TSKB station obtained through the routine network analysis (network) is also shown for reference.



第26図 第25図の精密単独測位手法の解析で得られたJPLM, CIT1, TSKBの緯度(LAT), 経度(LON), 鉛直(RAD)成分の座標値変動. 北, 東, 上向きが正. 縦軸は相対的な位置を, 横軸は年を示す.

Fig. 26 Coordinate variations of JPLM, CIT1, and TSKB estimated through the precise point positioning analysis in Figure 25. "LAT", "LON", and "RAD" show latitude, longitude, and radial (height) components. North, east, and up directions are positive. Vertical and horizontal axes indicate relative position and year, respectively.

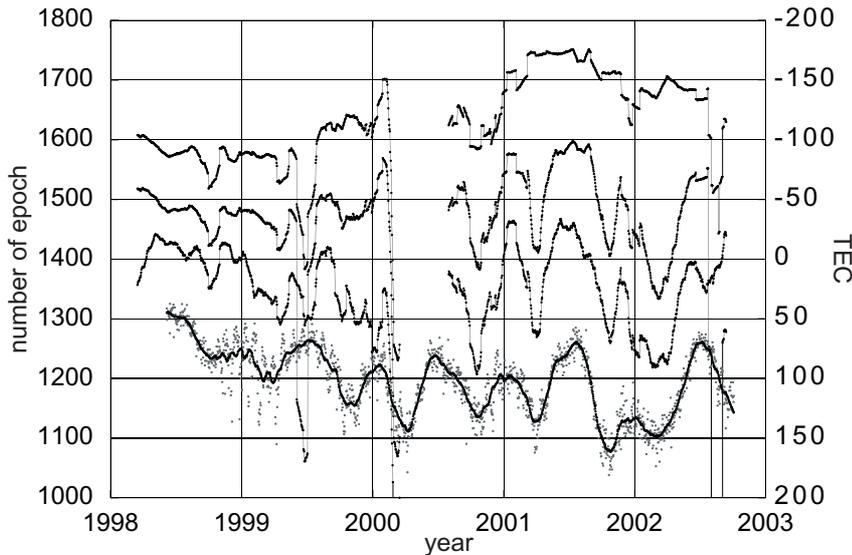
る半年周期が2000年以降大きくなったことと対応している。つまり、GPS座標値に見られる半年変動と、解析に使用される位相データ数との間には強い相関がある。なお1999年から使用されているエポック数が平均的に増加しているのは、観測最低仰角を15度から10度に変更する等の解析戦略の変更を行ったためである。

こうした半年周期が他のGPS観測局でも見られるかを調査するために、いくつかの世界のIGS局について追加的な解析を行った。解析は一ヶ月毎のデータについて、GIPSY-OASIS II (release 6.1)の精密単独測位手法を用いて各局毎に独立に行った。第25図は米国カリフォルニアのIGS局の一つであるJPLM(AOA社製Turbo Rogue受信機), それから直線距離で10kmほど離れたCIT1(ASHTECH社製Z-XII3受信機)のデータ解析に使用された位相データの最終エポック数を、同じ手法で再解析したTSKB(つくば

局)の最終エポック数とともにプロットしたものを示す。参考までに第24図で示した産総研ネットワーク解析で使用されたTSKBの位相データのエポック数も示す。

図から分かるように、精密単独測位手法を用いたTSKBの解析でも、エポック数に明瞭な半年周期が見られる。最低仰角を10度と設定するなど解析条件に若干の違いがあるために、使用されているエポック数に若干の違いが存在するが、この解析でも使用されるエポック数は、産総研ネットワーク解析と同じような変動を示している。このことは、第24図で見られた半年周期の原因が、ネットワーク解析によるものでないことを意味する。

更に興味深いことに、太平洋を隔てたJPLMでも、振幅はやや小さいものの、TSKBと同様な半年周期の傾向を示している。一方でJPLMからわずか10km程度しか離れていないCIT1ではそうした変動はほとんど見られない。つまり、エポッ



第27図 上から順に,安富局における,観測データ受信時,サイクルスリップ編集後,および最終的に座標解の推定に使用された位相データのエポック数の30日の移動平均を示す(単位は左軸),但し観測データ受信時のエポック数は,1/10にしてプロットしてある.また最下段の点と線は,Bern大学が算出している,一日あたりの地球上でのTECの最大値とその30日の移動平均をそれぞれ示す(単位は右軸).TEC(右軸)の軸の向きがエポック数(左軸)とは逆であることに注意.

Fig. 27 From top to bottom, the 30-day mean-averaged daily number of GPS carrier phase epochs at the stage of "data observation", after "cycle slip edition processing", and that finally used in the estimate of the solution of the coordinate for the Yasutomi station (unit shown in the left axis). The number of the carrier phase epoch of "data observation" is reduced by 10%. In addition to the number of epochs, the daily maximum TEC (dot) over the globe calculated by the University of Bern and its 30-day mean average (line) are plotted in the bottom (unit shown in the right axis). Note that the axis of TEC (right axis) is drawn reversely with respect to the left axis.

ク数の半年周期の変動は,観測機種タイプによってはグローバルに見られるといった傾向があることが分かる.但し,推定されたJPLMやTSKBの座標値には明瞭な半年周期の変動は見られない(第26図).しかし,産総研GPS局の解析結果のように,座標値に見られる半年周期の振幅は座標値自体の再現性(ばらつき)と同じオーダーかそれ以下である場合には,そうした変動が存在したとしても,少ないデータからは明瞭に見分けることが困難である可能性がある.

過去の研究によると,AOA社製Turbo Rogue受信機は太陽活動の活発化に伴う電離層の擾乱により,GPSの観測データであるL2と呼ばれる信号(位相データ)の受信が困難になるという報告がなされてきた(IGSMail-2071, 1999; IGSMail-2075, 1999; IGSMail-2190, 1999; IGSMail-2240, 1999).これはL2ロックロスと呼ばれる現象で,文字通りL2の信号が受信できなくなることである.一般に,GPS解析ではL1及びL2と呼ばれる二つの位相データの信号を受信し,電子層による遅延の影響をほとんど受けないLCという信号を合成して解析が行われている(例えば辻(1998)参照).しかし,L1に比べてL2の信号の感度はもともと弱く,何らかの原因で,あるエポックにおけるL2が受信できなくなると,L1だけではLCが作れないためにそのエポックについては欠測となってしまう.

試みに,一日当りの位相データのエポック数と電離層の擾乱が,どのように変動しているのか調査した.その際,GPS解析における各段階で使用されているエポック数についても調査した.残念ながら,定常解析では最終的に使用されたエポック数の情報のみしか保存されていない.そこで,安富局について1998年からの全データを,精密単独測位手法で再解析し,解析過程の代表的な各ステージで使用されている位相データのエポック数をプロットしてみたのが第27図である.なお,最低仰角は始めから10度に統一してある.図には,観測データ受信時,サイクルスリップ編集

後,最終的に座標解を推定する,それぞれの段階で使用されている一日あたりの位相データのエポック数がプロットされている.但し,図では観測データ受信時のエポック数(図で一番上の線)は実際の10分の1に間引いてプロットしてある(実際のエポック数はこの10倍)ので注意されたい.ここで,サイクルスリップ編集後というのは,データの前処理が終わった段階のことであり,30秒毎のGPSデータを5分間に間引くとともに,S/Nの悪いデータや,サイクルスリップという位相観測データに見られる「とび」を編集する等の観測データのquality checkが終了した段階である.こうした前処理を受けた位相データを用いて座標値が計算されるが,その際にも不良データ等は順次淘汰を受けて,最終的に使用されるデータは更に絞り込まれる.

図から,サイクルスリップ編集後において,位相データの数に顕著な半年周期の変動が生じていることが分かる.順に見ていくと,受信時においては一日当たり,1998年においては16000程度,2001年以降は17000程度のほぼ一定のエポック数が観測されている.全体を通じてみると,受信されている位相データはわずかに増減を繰り返しているものの,明瞭な半年の周期は見られない.ところが,サイクルスリップ編集を経た後には,位相データ数が2000年より明瞭に半年周期を繰り返す.即ち,受信はされるものの,品質の悪い位相データが含まれているため,サイクルスリップ編集の段階で淘汰されてしまっているものと考えられる.最終的に使用されるエポック数は,その後更に淘汰を受けてトータルで9割前後に減少し,半年周期が更に明瞭になる.

また、第27図から、使用される位相データの増減と、電離層に強い相関があることも分かる。図には、電離層の活動を示す指標として、1998年よりBern大学が一日毎に算出している、地球上におけるTEC (Total Electron Content: 天頂方向の断面積 1m^2 のコラムの中の総電子数)の最大値 (Rothacher and Mervert, 1996)がプロットされている (TECの符号の向きがエポック数とは逆であることに注意)。一般に電離層は太陽により大きな影響を受けるため、TECは緯度や季節、時刻によってその値は異なってくる (土屋・辻, 1995)が、ここでは、TECの一日の最大値の変化を電離層活動の一つの指標として用いてみる。この図を見て明らかのように、2000年以降のGPS解析で使用される位相データ数とTECの変化とは強い相関を示している。即ち、TECが大きくなると使用できる位相データの数が減少し、逆に小さくなると位相データが増加する。TECの大きさは、太陽に対する地球の地磁気軸の傾斜が変化することでも変化する。TECが半年の変動を持つのはこのためである。1999年頃からの太陽活動の活発化によって、TECの半年周期の振幅も大きくなってきており、特に1999年後半以降はそれ以前に比べると2倍程度の大きさになっている。ここで興味深いのは、それに対応して、使用される位相データ数の半年周期の振幅が2000年頃より顕著になっていることである。つまり、TECの半年変動の幅が大きくなるに従って、使用できる位相データ数も大きく変動している。

使用できるデータ数が減少すれば、それをを用いて推定される座標解の精度も悪化すると考えられる。またTECは昼夜によっても変動することから、一日の間の特定の時間帯しか有効な位相データの取得が行えない結果、座標推定値にバイアスが生じる可能性もある。こうした原因によって、産総研GPS局の座標値には、電離層の擾乱に対応した半年変動が生じているものと考えられる。2000年頃より産総研GPS局の座標値の半年変動が顕著になったのは、太陽活動がこの頃より活発化し、電離層の擾乱が大きくなったためであることが示唆される。鉛直成分で特に顕著なのは、鉛直成分がそもそも水平成分に比べて推定精度が悪い状況の元に、品質の悪いデータを使用したためにその影響が顕著に現れたためであると考えられる。

このように、AOA社製Turbo Rogue受信機による観測では電離層の擾乱の増大により大きな影響を受けていることが示唆される。

こうしたL2ロックロスの現象はAOAのTurbo Rogue受信機のハードウェアに起因する固有のものであると考えられ (IGSMail-2190, 1999)、他の代表的なGPSメーカーの受信機で発生した報告は今のところない。第23図の豊橋局の周囲のGEONET局において座標値に半年変動が見られなかったのは、GEONETの多くの観測局がTrimbleもしくはAshtech社製の受信機からなるためだと考えられる。

但し、以上のことだけでは、2000年以前にもある程度の大きさのTECの半年周期が存在するにも関わらず、位相

データ数の増減が顕著でないことや、また2000年以降も、安富局のように、最終的に使用される位相データ数の半年周期の振幅が小さいにも関わらず、座標値変動の半年周期の振幅が大きいこと等は説明されない。また草薙局の座標値のように、2000年以前から半年変動が検出できる局もあるので、単純にTECの変動の大きさがそのまま座標値の半年変動の大きさに反映するものではないと言える。これらの原因として、ある敷居値を越えると受信の感度が悪くなるといったTurboRogue受信機の特性に起因する問題 (IGSMail-2190, 1999)や、L2ロックロスを免れて受信できても、観測局の周りの観測環境によるノイズとの複合的な効果で、電離層活動の影響をより大きく受けやすい局と受けにくい局があるためといった可能性等が考えられる。また、今回電離層の擾乱の指標として一日当りのTECの最大値を用いたが、より適切な指標を選択することも必要であろう。今後、電離層の擾乱がどのように座標値推定に影響するのか、その詳細なプロセスの解明が必要である。

6. おわりに

1996年から観測を開始した産総研地質調査総合センターのGPS連続観測網の概要と現在までの解析結果について紹介した。現在、日本にはGEONETを中心として、全国に1000点以上にも及ぶGPS観測局があり、その中で産総研GPS観測網が占める割合は非常に小さい。しかしながら、産総研観測網はボアホール歪計による歪場、地下水位や水温、地震等の多くの並行観測を行っているという特徴があり、これらの観測と、産総研や他の機関のGPSを比較・結合することにより、各観測手法が捉えうる地殻変動の時間・空間的な広がりや、GPSの観測特性や誤差等についての知見が得られることが期待できる。近年のGPS観測網の展開によって、これまで捉えることの難しかったゆっくり地震や地殻深部における変形等を検出できるようになってきており、地殻活動研究の上でGPSには大きな期待が集まっている。しかし、GPSは地震時におけるステップ状の変位を除いて、季節変動に代表されるような一年以下の周期における特性についてよく分かっていないことが多い。産総研GPS観測網のTurbo Rogue受信機による観測で見られた座標値の半年周期が電離層の擾乱の影響を受けている可能性があることから分かるように、現在の観測精度の向上したGPSは様々なシグナルに対して敏感であり、地殻変動研究の上でGPSの結果の解釈を正しく行っていくためには、座標値推定に含まれている誤差等の測地学的評価が今後ますます重要になってくるものと思われる。また、本報告では触れなかったが、Turbo Rogue受信機はGPS衛星の軌道を決定するIGSの観測局で使用されており、電離層の擾乱は、GPS解析で使用される暦の精度にも影響を及ぼしている可能性がある。こうした測地学的観点からの評価はその重要性にも関わらず、地味であるが故に我が国ではなか

なか注目されずらい。産総研GPS観測網がそうした分野でも一定の役割を果たすことが期待される。

謝辞:地質調査総合センターGPS連続観測網の解析システムの構築の初期段階ではJPLのFrank Webb博士およびKenneth Hurst博士のご助力を頂きました。GEONETのデータは国土地理院から提供を受けました。海洋潮汐の計算の際には、国立天文台のGOTIC2を使わせて頂きました。一部の図の作成には、GMT(Generic Mapping Tools)を使用しました。また改稿の際には、査読者及び編集委員より有益なコメントを頂きました。記して感謝します。

文 献

- Bar-Sever, Y. E., Kroger, P. M., and Borjesson, J. A. (1998) Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver, *J. Geophys. Res.*, **103**, 5019-5035.
- 畑中雄樹・飯塚豊久・沢田正典・山際敦史・菊田有希枝 (2001) 新解析戦略によるGEONETデータの再解析, **27**, 日本測地学会第96回講演会予稿集.
- Hatanaka, Y., Sawada, M., Horita, A., Kusaka, M. (2001a) Calibration of Antenna-Radome and monument-multipath effect of GEONET--Part 1: Measurement of Phase Characteristics, *Earth Planet and Space*, **53**, 13-21.
- Hatanaka, Y., Sawada, M., Horita, A., Kusaka, M., Johnson, J., and Rocken C. (2001b) Calibration of Antenna-Radome and Monument-Multipath Effect of GEONET--Part 2: Evaluation of the Phase Map by GEONET data, *Earth Planet and Space*, **53**, 23-30.
- Heki, K. (2001) Seasonal modulation of interseismic strain buildup in Northeastern Japan driven by snow loads, *Science*, **293**, 89-92.
- Heki, K. and Miyazaki, S. (2001) Plate convergence and long-term crustal deformation in Central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2313-2316.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J. (1993) Global Positioning System: *Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York, 326p.
- IGSMail-2071 (1999) <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1999>
- IGSMail-2075 (1999) <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1999>
- IGSMail-2190 (1999) <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1999>
- IGSMail-2240 (1999) <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1999>
- IGSMail-2899 (2000) <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2000>
- IGSMail-4163 (2002) <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2002>
- 河和 宏・菅 富美男(2000) 高精度比高観測点(電子基準点)による東海地域の地殻変動監視について, 国土地理院時報, **93**, 34-43.
- Lanyi, G. (1984) Tropospheric delay effects in radio interferometry, in *Tracking and Data Acquisition Prog. Rept. 42-78*, Jet Propulsion Lab., **vol. April-June 1984**, 152-159.
- Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T., and Ooe, M. (2001) GOTIC2: A program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **47**, 243-248.
- Matsumoto, N (1992) Regression analysis for anomalous changes of groundwater level due to earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1193-1196.
- Murakami, M., and Miyazaki S. (2001) Periodicity of strain accumulation detected by permanent GPS array: Possible relationship to seasonality of major earthquakes' occurrence, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2983-2986.
- Niell, A. E. (1996) Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, **101**, 3227-3246.
- Ohtani, R., Koizumi, N., Matsumoto, N., and Tsukuda, E. (2000) Preliminary results from permanent GPS array by the Geological Survey of Japan in conjunction with groundwater-level observations, *Earth, Planets and Space*, **52**, 663-668.
- Ozawa S, Murakami, M., Kaidzu, M., Tada, T., Sagiya, T., Hatanaka, Y., Yurai, H., and Nishimura, T. (2002) Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, Central Japan, *Science*, **298** (5595), 1009-1012.
- Rothacher, M., and Mervert, L. (eds) (1996) Bernese GPS Software Version 4.0, *Astronomical Institute of University of Berne*, 418 p.
- 島田誠一・日置幸介・大谷 竜(1998) GPS解析ソフトウェア, 気象研究ノート, **192**, 73-92.
- 多田 堯・鷺谷 威・宮崎真一(1997) GPSでみた変動する日本列島, 科学, **67**, 917-927.
- 土屋 淳・辻 宏道(1995)GPS測定の基礎, 日本測量協会, 275p.
- 佃 栄吉・高橋 誠・佐藤 努・松本則夫・伊藤久男 (1996) 地質調査所における地震予知地下水観測網 - 近畿地域の地下水観測網の新設 -, 地質ニュース, **505**, 11-15.

- 佃 栄吉(2000) 観測強化地域および特定観測地域における地下水等観測研究, 地質調査所月報, **51**, 9, 391-400.
- 佃 栄吉・小泉尚嗣・桑原保人(2000) 地震防災対策強化地域及び活断層近傍における地下水等総合観測研究, 地質調査所月報, **51**, 9, 435-445.
- 辻 宏道 (1998) GPSの原理, 気象研究ノート, **192**, 1-13.
- Webb, F. H., and Zumberge, J. F. (1993) An introduc-

- tion to the GIPSY/OASIS-II, *JPL Publ. D-11088*, Jet Propul. Lab., Pasadena, Cal..
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H. (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005-5017.

(受付:2003年2月7日;受理:2003年8月5日)