

GPSによる精密比高観測

Precise Vertical Measurement by GPS

測地部 根本盛行・田中博幸・小枝 登

Geodetic Department

Moriyuki NEMOTO, Hiroyuki TANAKA, Noboru KOEDA

地理地殻活動研究センター 鷺谷 威

Geography and Crustal Dynamics Research Center Takeshi SAGIYA

要旨

短距離の点間をGPS測量機で連続観測し、比高（標高の差）の時間変化を高精度で求めることを目的として1997年～1998年にかけて試験観測を行った。

精度の評価は主に再現性により行い、アンテナ高を変化させて精度の確認も併せて行った。テストフィールドとして、国土地理院構内、伊東市川奈、建設省土木研究所構内を選定し、安定したアンテナの設置方法を工夫し、可能な限り観測方法に起因する誤差を小さくする努力をして観測を実施した。また、1997年度緊急測量訓練におけるGPS機動観測結果についても考察した。

これらの試験観測によってGPSによる比高観測から、一等水準測量の往復差の制限及び、往復差から求めた1

kmあたりの標準偏差に近い精度が得られた。また、少なくとも点間距離2kmの観測では、点間を複数区間に分割して観測し、解析結果を累積する方法でも、直接解析した比高の再現性と比べて、高い精度を実現できるデータが得られた。

1 はじめに

国土地理院では、伊豆半島東部を震源とする群発地震を監視するために電子基準点観測、水準測量、光波測距等多くの観測を実施している。その1つとして短周期変動クラスター観測がある（図-1）。

これは、特級短距離型光波測距儀（ME-5000）を用いた高精度の距離観測で、1975年から年2回程度定期的

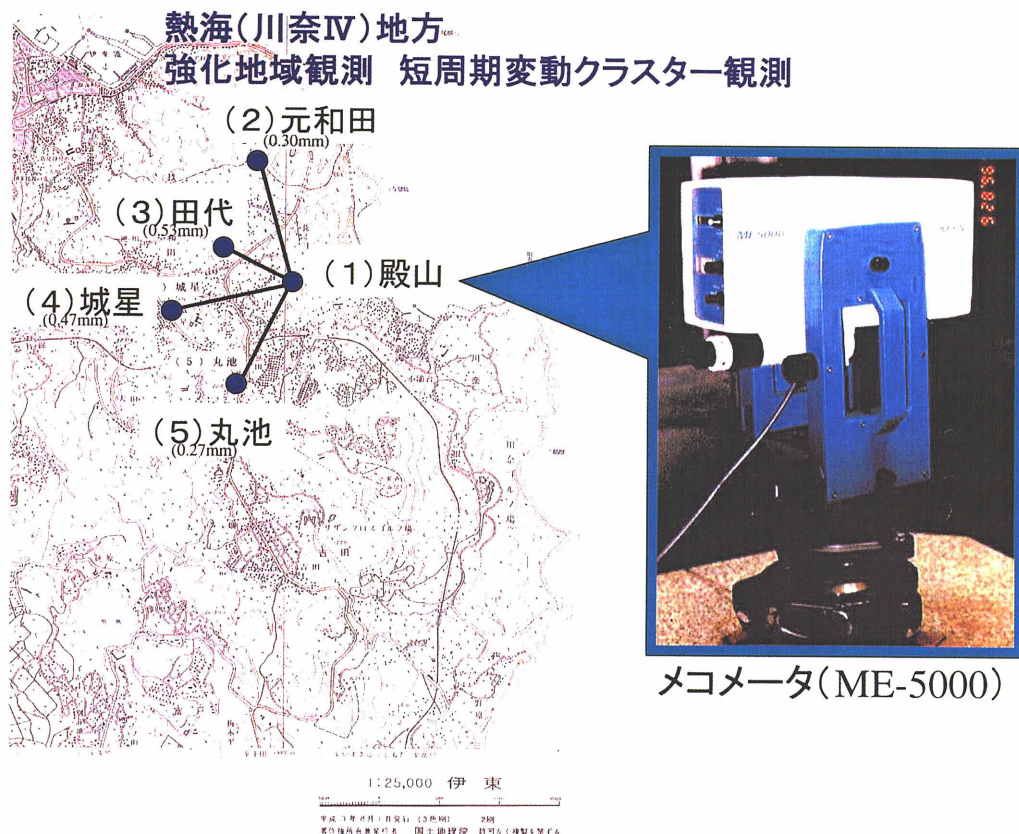


図-1 静岡県川奈地区短周期変動クラスター観測地域図

に行われている。1993年5～6月には群発地震発生時から終息までの地盤の変化を捉えるなど群発地震の消長を知る上で貴重なデータを提供している。

ME-5000は0.1mm単位の読み取りができ、高精度での測距が可能である。器械高もmm単位で測定し水平成分の分離計算が行われている。器械点及びミラー点の標高の変化を高精度に観測することができれば、より正確な水平成分の検出が可能となる。

地面の上下の変化を高精度かつ連続的に求める方法としては、水準儀による直接水準測量が一般的に考えられるが、これによる場合地面が揺れている状態では正確な観測が困難であり、細かく時間変化を得るためには多くの労力を必要とするなど、現実的方法とはいえない。そこで、GPS測量機による観測を検討することとし、精度を検証することにした。

2 観測手法と目標精度

GPS測量機による観測と、測距儀による観測を組み合わせる方法を考えた。これは、GPS測量機で上下の変化を連続的に観測し、その結果を使って精密な測距儀（ME-5000）で測定した斜距離から水平成分を正確に分離する方法である。

ME-5000による測距の精度は、 $0.2\text{mm} + 0.2\text{ppm} \times D\text{km}$ であらわされている（Dは測定距離）。静岡県川奈地区においては器械点及び全反射点は、ピラー方式になっており、セッティング誤差をなくす工夫がされている。また、器械及びミラー定数補正、周波数補正、気象補正計算を慎重に行うことにより各辺長とも約0.2mmの精度が得られている。従って0.2mmに影響する高さの変化量の検知が目標精度になる。標高と球面距離の関係について検討する。球面距離Sは、

$$S = (H_2 - H_1)^2 / 2D = h^2 / 2D$$

hの変化dhが距離に及ぼす影響は、

$$dS = (h/D) dh$$

となる。

各点の標高H及び距離S（表－1）から各辺において比高の変化dhが1cmあったとすると

殿山－元和田	$h/D = 30.72\text{m}/1028.75\text{m}$ $\times 1\text{cm} = 0.30\text{mm}$
－田代	$= 35.34\text{m}/664.65\text{m}$ $\times 1\text{cm} = 0.53\text{mm}$

表－1 各点の標高及び殿山からの距離

	標高(H)m	距離(S)m
殿山	189.7305	
元和田	220.4519	1028.7476
田代	154.3885	664.6496
城星	142.1487	1021.8897
丸池	163.4851	965.1681

－城星	$= 47.58\text{m}/1021.88\text{m}$ $\times 1\text{cm} = 0.43\text{mm}$
－丸池	$= 26.24\text{m}/965.17\text{m}$ $\times 1\text{cm} = 0.27\text{mm}$

となり、すべての辺で0.2mmを越える影響がでる。0.2mm程度に押さえるには、最も影響が大きい殿山－田代で4mm、影響が小さい殿山－丸池で7mm程度の比高の変化を求めることが必要となる。

3 国土地理院構内での試験観測

3.1 再現性による精度の検証

1997年6月上旬に4.5日間の連続観測を3点で実施した。この観測は、短距離における比高観測の精度を再現性で検証することとし、解析時間、解析ソフト、仰角マスクの違いによる検討を行った。

各基線の点間距離はそれぞれA：19.4m、B：94.6m、C：113.7mであり、受信機及びアンテナは、Trimble 4000SSi、Trimbleチョークリングアンテナを使用した（図－2）。設定したサンプリングレート及び仰角マスクはそれぞれ30秒、10度である。アンテナの設置は三脚を使用し電源はカーバッテリーを使用した（写真－1）。各観測点の座標値は近傍のIGS（International GPS Geodynamics Service）点TSKBから取り付け、12時間と24時間の2通りの観測時間を用いた場合の違い（図－3）、Berneseによる場合と、GPSurveyによる場合での解析ソフトによる違い（図－4）、仰角マスクを10度、15度とした場合の違い（図－5）による比較を



写真－1 アンテナの設置状況

表－2 再現性による精度検証

線長(m)	観測時間(時間)	データ個数	比高の最大格差(mm)	比高の標準偏差(mm)
19.4	24	4	0.1	
19.4	12	9	0.4	0.15
94.6	24	4	0.3	
94.6	12	9	0.4	0.15
113.7	24	4	0.3	
113.7	12	9	0.7	0.20

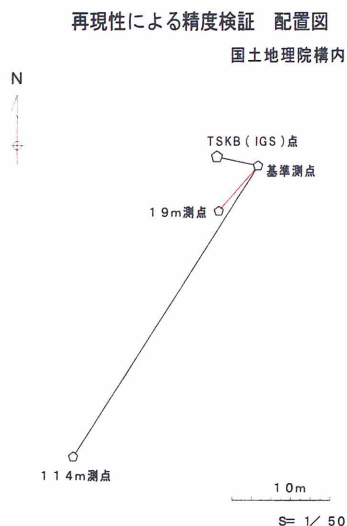


図-2 再現性による精度検証試験におけるGPS観測点配置図

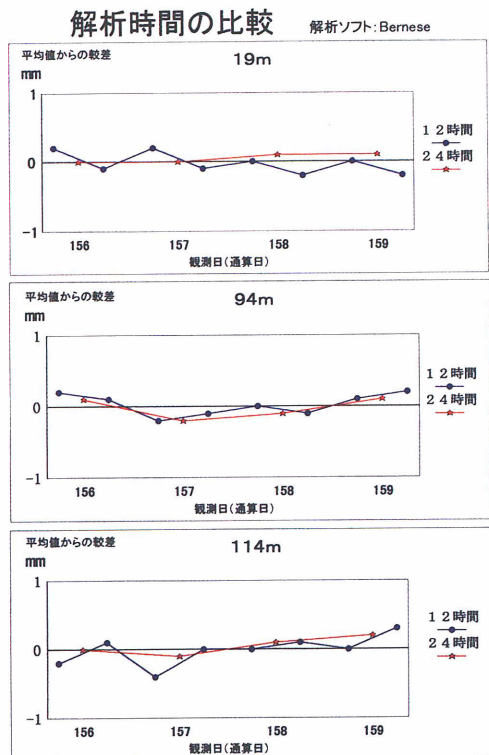


図-3 観測時間の違いによる結果

行った。また、IGS精密暦を用い、Bernese Ver.4.0の解析によって得られた比高データのまとめを表-2に示す。なお、標準偏差の計算は、データ数が少ない24時間観測については省略した。

この結果から、100m程度の基線については12時間以上の観測を行うことによりサブミリオーダーの精度で比高観測を行える可能性が示された。また、放送暦による解析でも同様な結果が得られており、市販の解析ソフトであるTrimble社のGPSurveyを用いても顕著な差は見られなかった(根本・他1998)。

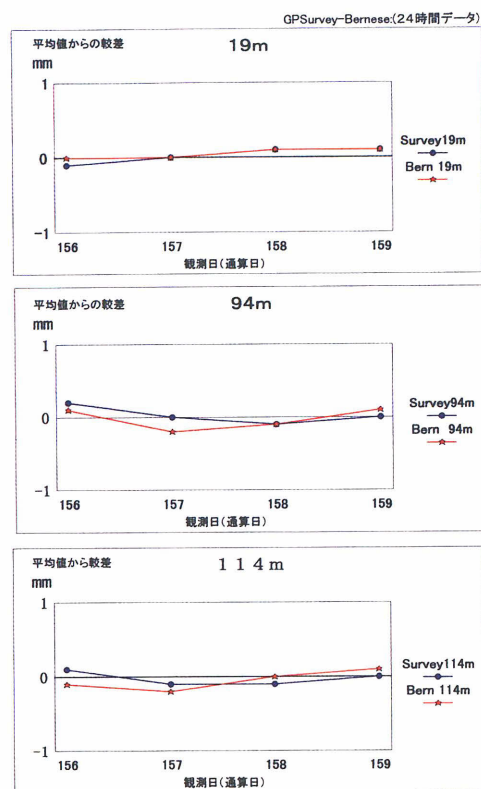


図-4 解析ソフトの違いによる結果(24時間観測データによる)

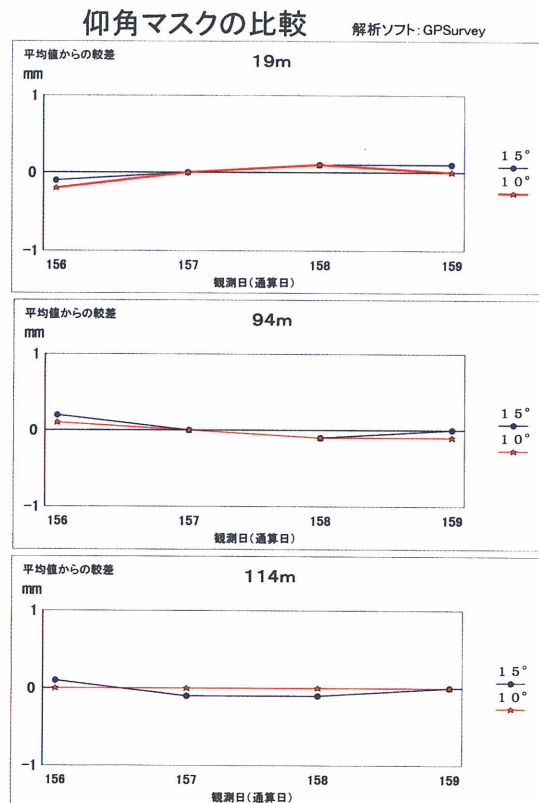


図-5 仰角マスクの変化による結果(24時間観測データ使用)

3.2 アンテナ高変化による精度の確認

基準となるアンテナ高を観測期間中に2回変化させ（+2.6mm, +1.9mm）、GPSの解析でアンテナ高の変化を正確に捉えられるかどうかを確認する事を目的として、1997年7月下旬に8.5日間の連続観測を4点で実施した（図-6）。解析は、アンテナ高を変化させた基準観測点とその他の3観測点を結ぶ3つの基線（19.1m, 19.4m, 271.5m）について行った。受信機はいずれも、Trimble 4000SSiを使用し、アンテナとして、19.1m離れた観測点についてはTrimbleマイクロセンターL1 L2アンテナを、その他はTrimbleチョークリングアンテナを使用した。アンテナの設置方法は、基準観測点と19.4m測点が三脚、19.1m測点がアンテナタワー用ポールを用いてワイヤーで支える方式（案山子方式）、271.5m測点が屋上据え置き型を採用した。なお、271.5m離れた観測点は国土地理院構内にある「地図と測量の科学館」の屋上に設け、10.5mの比高がある。

アンテナ高の変化は、アンテナを乗せる整準台の3つの整準ネジを同方向にほぼ同量回転させる方法で行った。変化量は①アンテナの側面に（約90度間隔）視準用の印を4箇所付ける、②アンテナから約8mの地点に固定点を選定する、③点検調整したレベル（WILD N3）及びWILD標尺を用いて、固定点に立てた標尺とアンテナの印間の水準観測を交互に行い、結果を平均する方法で求めた。

アンテナ高を変化させる前後に①～③の観測を行い、アンテナに印を付けた1点と約180度離れた側の1点の



写真-2 アンテナ高の測定状況

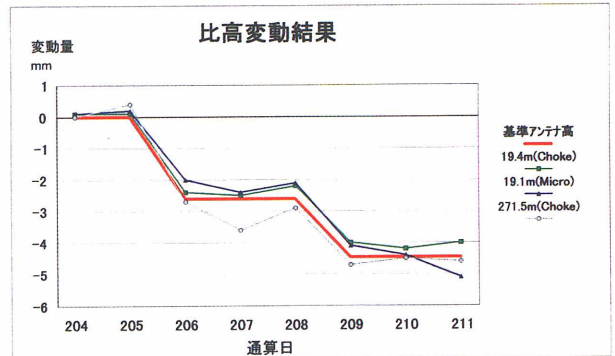


図-7 比高変動結果（根本・他1998）

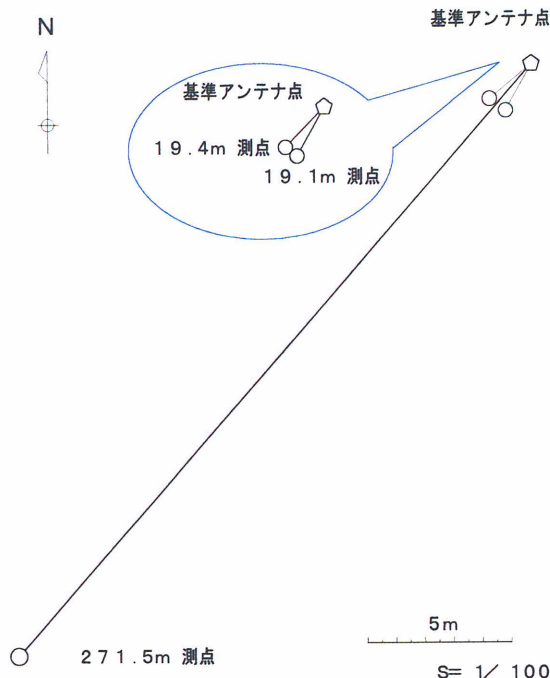


図-6 アンテナ高変化による精度確認試験の配置図

平均値と他の2点との平均値の比較により、最大でも0.04mmの較差という高精度で変化量を得ることができた（写真-2）。

観測時間：24時間、仰角マスク：10度、解析ソフト：GPSurveyの組み合わせで解析した高さ成分の時間変化を図-7に示す。すべての基線において、基準観測点の高さの変化量を精度よく捉えている。

4 伊東市川奈での試験観測

伊東市川奈地区で実施している短周期変動クラスター観測作業において、点間距離約600m～1km、高低差が約20m～50mの観測点で、より現実的な観測手法、解析方法を検討することを目的とした試験観測を3回実施した。

4.1 短周期変動クラスター観測作業での試験観測(1)

1997年12月上旬に短周期変動クラスター観測作業と平行して5.5日間試験観測を実施した（近江屋、1998）。GPS観測点は、クラスター観測点（器械点1、ミラー

点4)の近傍で上空視界を考慮して選点し、アンテナを設置した。受信機にはTrimble 4000SSiを使用し、各観測点のアンテナ種類、設置方法、アンテナ高は、表-3のとおりである(写真-3)。

設定したサンプリングレート及び仰角マスクは、それぞれ30秒、10度で、電源は全点カーバッテリーを使用した。

殿山測点を基準として各点の基線をGPSurveyで解析し、①仰角マスクの違いによる影響、②固定座標の違いによる影響を検討した。

①について、仰角マスクが10度(図-8)に比べ15度(図-9)及び20度(図-10)の方が再現性が良いと思われる。15度と20度の仰角マスクの違いは、ほとんど見られない。城星測点と丸池測点での顕著な違いの原因として、アンテナの違い、樹木による受信環境の違いが考えられる。

②については、単独測位で得られた座標を固定した解析(図-11)と、小室山にある電子基準点から取り付け

表-3 川奈地区におけるGPS試験観測(1)の条件

点 名	アンテナの種類	設置方法	アンテナ高
殿 山	Trimble チョーリング	案山子	3m
元和田	Trimble チョーリング	案山子	4m
田 代	Trimble チョーリング	三 脚	1.7m
城 星	Trimble マイコセンタ-L1L2	案山子	4m
丸 池	Trimble マイコセンタ-L1L2	タワー	10m



写真-3 アンテナ設置状況(殿山)

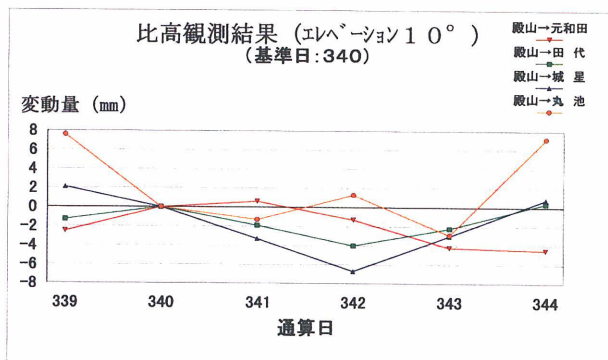


図-8 川奈地区におけるGPS試験観測(1)仰角マスク10度の場合の比高観測結果

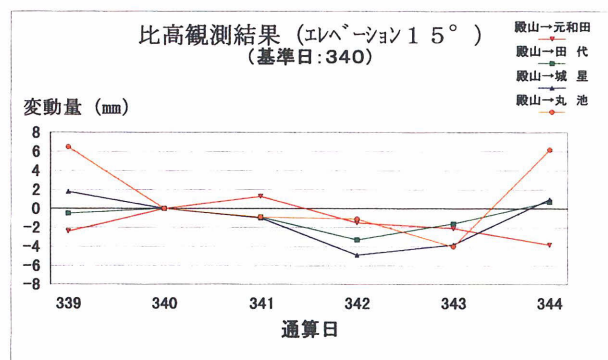


図-9 川奈地区におけるGPS試験観測(1)仰角マスク15度の場合の比高観測結果

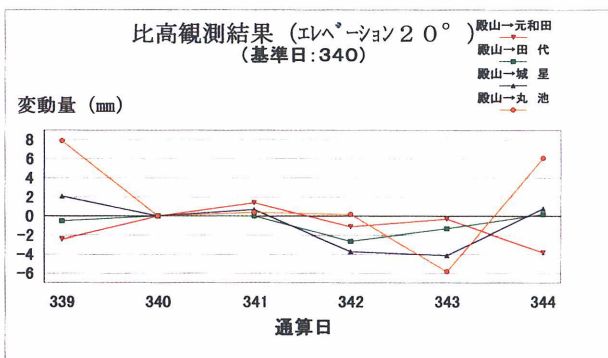


図-10 川奈地区におけるGPS試験観測(1)仰角マスク20度の場合の比高観測結果

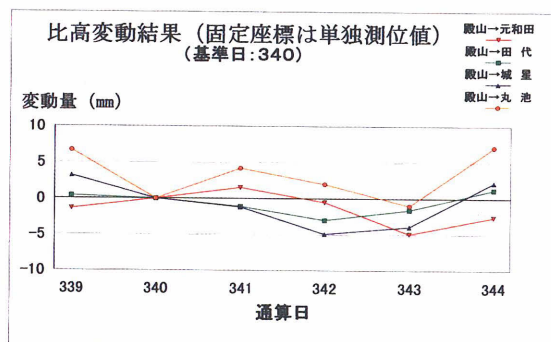


図-11 川奈地区におけるGPS試験観測(1)仰角マスク15度の場合の比高観測結果(単独座標固定)

た座標を固定した解析を比較した。結果は図-9に示され、電子基準点から取り付けた座標を使用した方が若干再現性が良い結果が得られた。

4.2 短周期変動クラスター観測作業での試験観測(2)

1998年3月上旬の6日間、4.1とほぼ同様な試験観測を行った(小枝, 1998)。アンテナには全てTrimbleマイクロセンターL1L2を用いた。また、受信機はマルチパス対策等の改良を施したTrimble 4000SSiGSSを全点で使用した。

この新型受信機には、①マルチパスを抑制するEVERESTと呼ばれるソフトウェア、②マルチビットA/Dコンバーターのチップ化により、電波障害でノイズが乗った衛星からの電波を、復元する技術SURF(SURVEY RF ASIC)及び③帯域外電波障害に対して強力に対応し除去する高周波ノイズフィルター: SAW Filter (Surface Acoustic Wave Filter) が内蔵されている(岩田, 1998)。

丸池測点では支障木の一部伐採等を行い、4.1の場合に比べ2m低い8mをアンテナ高としてGPSタワーを使用してアンテナを設置した。

仰角マスク15度、単独座標位置固定、GPSurveyによ

る解析結果を表-4、図-12に示す。高低差が20m~50m程度ある1km前後の4つの基線において、ほぼ1mmの精度で比高の値を検出できた。

4.3 短周期変動クラスター観測作業での試験観測(3)

1998年4月21日から始まった伊豆半島東部の群発地震にともなう緊急の短周期変動クラスター観測と同時にGPS観測を実施した(横川・篠原, 1998)。受信機、アンテナ、設置方法は4.2と同じであるが、丸池測点についてはアンテナ周辺の樹木の葉によるサイクルスリップを避けるため、アンテナ高を10mに変更した。殿山及び元和田測点は22日9時30分(UT)、その他の測点は23日5時30分から観測を開始し、28日0時00分までデータを取得した。

小室山にある電子基準点から殿山測点の座標を求め、解析条件を、仰角マスク15度、データ間隔30秒、観測時間UT0時~24時、解析ソフトGPSurvey Ver2.20として求めた結果を表-5に、ME-5000による測距結果を図-13に示す

GPSによる観測結果から、4日間の観測中では測距結果に影響する比高の変化はなかったが、殿山~元和田、殿山~丸池間の比高に優位な変化が見られる。なお、城星測点の24日と25日のデータは、24日の夜間に何らかの原因により、アンテナを支えているワイヤーが緩むというトラブルが、25日の11時(日本時間)に行ったダウンロード時に判明しワイヤーを張り直したことにより検討材料としない(横川・篠原, 1998)。

表-4 川奈地区におけるGPS試験観測(2)解析結果

観測 月日	殿山-元和田	殿山-田代	殿山-城星	殿山-丸池
	m	m	m	m
3. 6	+31.1751			-20.8189
7	.1753	-34.6615	-48.0392	.8197
8	.1768	.6608	.0381	.8200
9	.1746	.6604	.0379	.8185
10	.1738	.6616	.0399	.8187
11	.1737	.6601	.0382	.8184
平均	+31.1751	-31.6609	-48.0387	-20.8192
S.D	0.99mm	0.65mm	1.19mm	0.61mm

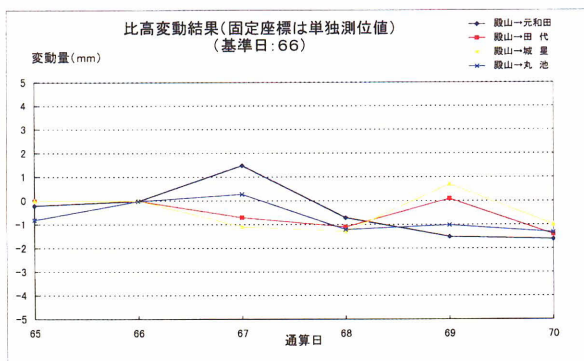


図-12 川奈地区GPS試験観測(2)比高変動結果

5日間の時間変動グラフ

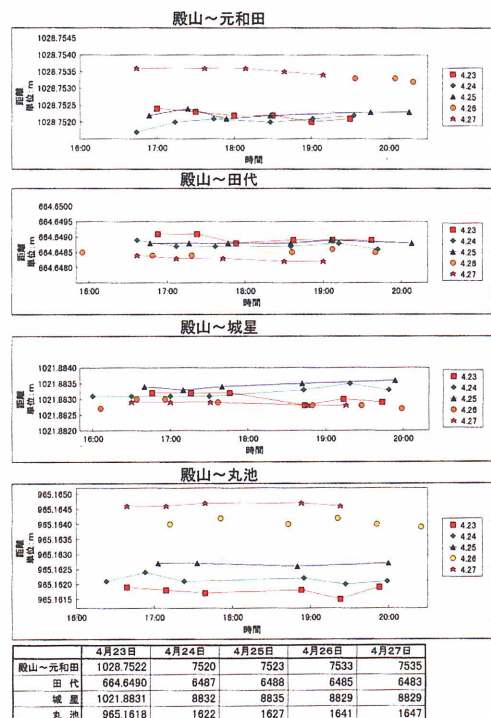


図-13 ME-5000による測距結果

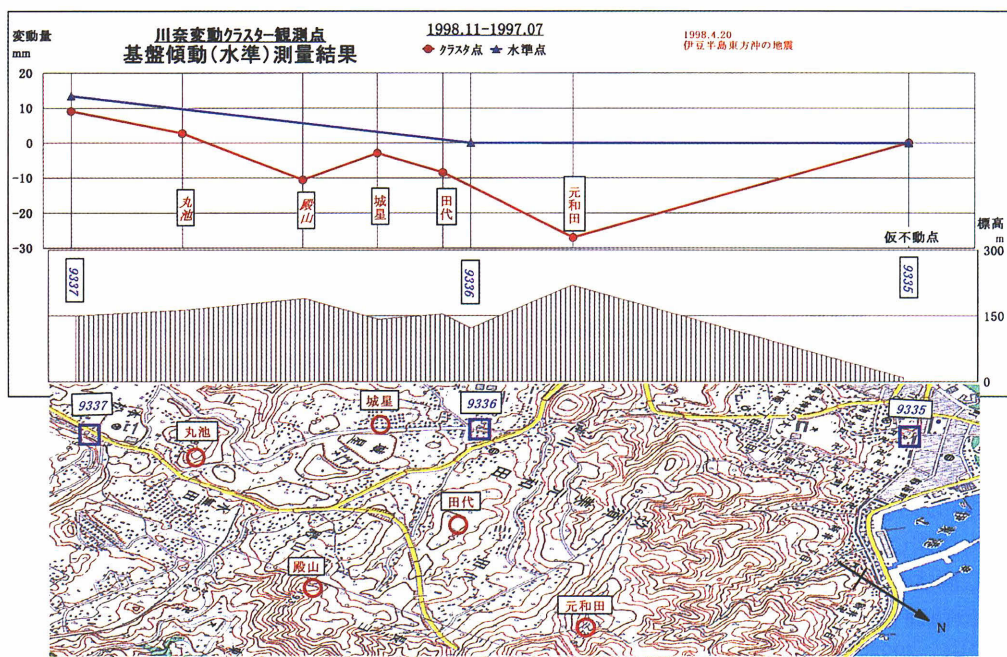


図-14 群発地震前後の水準測量結果

表-5 川奈地区におけるGPS試験観測(3)解析結果

測定区間	月日	通算日	比高(m)	比高の 変化量	距離(m)	変化量	観測Start Time
殿山～元和田	4.23	113	29.4165	0.0	1025.2222	0.0	00:00
	4.24	114	29.4152	-1.3	1025.2211	-1.1	00:00
	4.25	115	29.4122	-4.3	1025.2198	-2.4	00:00
	4.26	116	29.4126	-3.9	1025.2211	-1.1	00:00
	4.27	117					
殿山～田代	4.23	113	-36.5199		651.8241		03:22
	4.24	114	-36.5188	1.1	651.8232	-0.9	00:00
	4.25	115	-36.5180	1.9	651.8228	-1.3	00:00
	4.26	116	-36.5198	0.1	651.8228	-1.3	00:00
	4.27	117					
殿山～城星	4.23	113	-48.9060		1011.0127		03:20
	4.24	114	-48.9003	5.7	1011.0105	-2.2	00:00
	4.25	115	-48.9038	2.2	1011.0120	-0.7	00:00
	4.26	116	-48.9054	0.6	1011.0113	-1.4	00:00
	4.27	117					
殿山～丸池	4.23	113	-21.6687		960.0923		02:46
	4.24	114	-21.6681	0.6	960.0909	-1.4	00:00
	4.25	115	-21.6624	6.3	960.0922	-0.1	00:00
	4.26	116	-21.6629	5.8	960.0936	1.3	00:00
	4.27	117					

この変化は、群発地震を挟んで実施した水準測量の結果とよく調和しており(殿山を基点とすると、元和田が沈下、田代が変化なし、城星がやや隆起、丸池が隆起、図-14)、GPSによる比高の変化監視の有効性が検証できた。これらのデータから、ME-5000による殿山～丸池間における5日間の観測で捉えた辺長の伸びは、主に水平方向の変化によるものと考えられる。

5 平成9年度緊急測量訓練におけるGPS機動測量

国土地理院が平成6年度から静岡県御前崎地区で実施している緊急測量訓練において、平成9年度にGPSに

よる精密比高観測を実施した。この訓練は、国土地理院構内での良好な試験観測結果を基に、GPSを大量に連結して比高の変化を連続的に高精度で求める、という新しい測量方式に伴う(1)セッティング技術の習熟、(2)短距離・長時間観測の解析、(3)緊急時の作業体制の構築等を目的とし、得られたデータは有効に活用することとして実施した。

観測点は、静岡県大東町から小笠町内の、菊川の支流佐束川沿いに隣接距離を最短190m(電子基準点93093～NO①)から、最長距離1046m(NO⑥～NO⑦)の範囲で変化させた7箇所に選点した(図-15)。

アンテナの設置方法は、NO①～NO⑥が案山子方式(写真-4)、NO⑦が屋上据え置き型を採用した(写真-5)。

アンテナ高は、NO①～NO⑤が3m、NO⑥が2mである。受信機は、Trimble 4000SSiGSSを、アンテナは、NO①、NO③、NO④がTrimbleチョークリング、その他はTrimbleマイクロセンターL1L2を使用した。

電子基準点93093を仮不動点とし、9月2日の観測値(12時間)を基準として、3日及び4日の観測値(それぞれ24時間)との差をNO①からNO⑦測点まで(直線距離で2800m)の累積をグラフにした(図-16)。

解析は、隣接した観測の影響を受けないよう、全ての解析の基点の座標は、あらかじめ電子基準点93093から求めた値を使用した。

電子基準点93093及び、NO①～NO⑦までの8測点から選んだ全ての組み合わせについて、24時間の観測データがある3日及び4日の解析をし、基線長の順に整理した(表-6)。

今観測ではNO①において、ケースに収めた受信機の

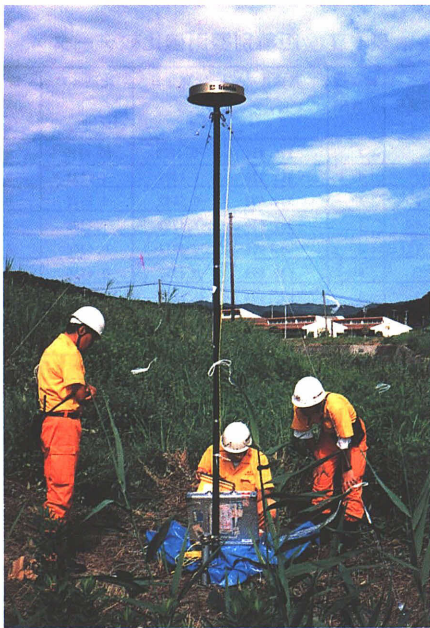


写真-4 案山子方式によるアンテナの設置



図-15 GPS比高観測図



写真-5 屋上据え置き型

御前崎地区高精度比高観測速報

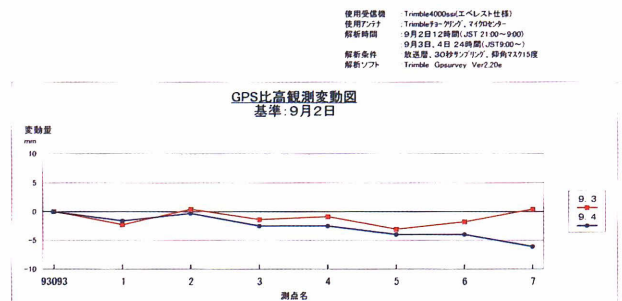


図-16 GPS比高観測速報

温度上昇により、データ不良が生じ、またNO⑦では上空視界が一部遮られているためデータ不足であった。これらの点を含む組み合わせを除いた全てについて改めて表-7に整理した。表-6及び表-7をそれぞれ図化して、図-17及び図-18に示す。2日間の再現性から、良好なデータであれば、少なくとも基線長が2 km程度までは一等水準測量の往復差の制限 ($2.5\text{mm} \times \sqrt{\text{Skm}}$) に収まる結果が得られた。

2 測点以上にまたがる基線において、直接解析した場合と、分割して解析し結果を積算した場合の比高差の再現性の比較 (例: 93093~NO⑥対93093~NO②+NO②~NO③+NO③~NO④+NO④~NO⑤+NO⑤~NO⑥) を図-19及び図-20に示す。データ量が限られているが、2 km程度の距離においては、点間を短距離に分割して解析し、結果を積算する方法でも良い再現性が得

Vertical repeatability of GPS

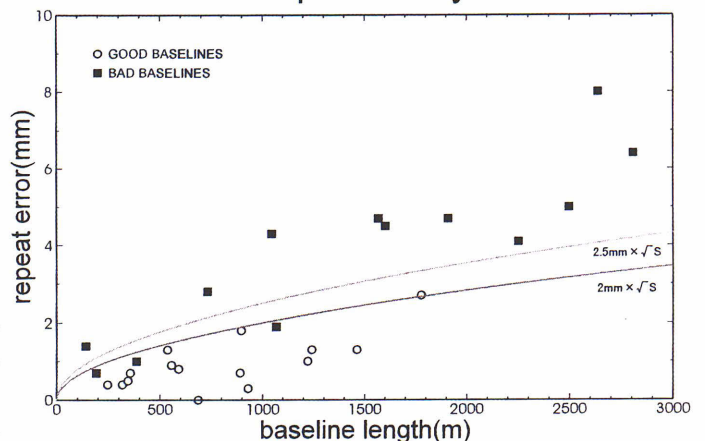


図-17 全データによる再現性

Vertical repeatability of GPS

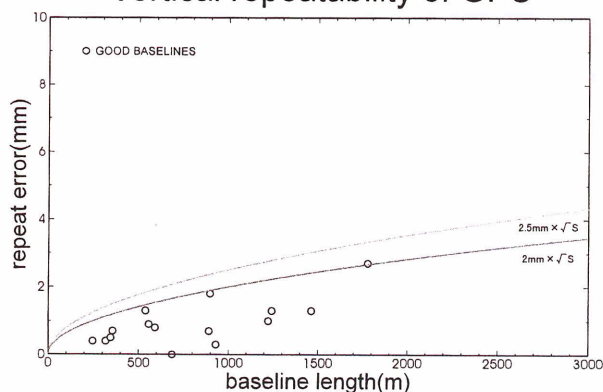


図-18 良好なデータによる再現性

Direct GPS vs. Indirect GPS

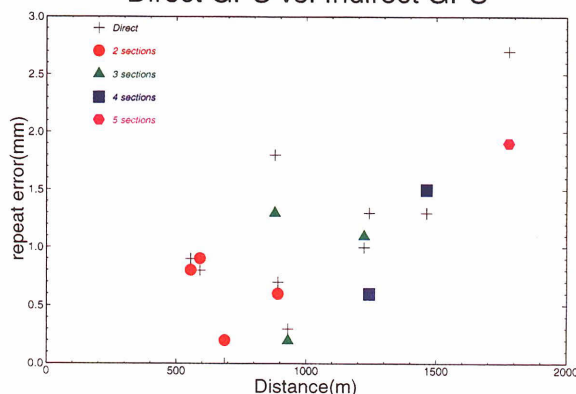


図-19 直接解析と間接解析の再現性比較

表-7 距離別観測値比較データ

アンテナの組合せ	測点1の番号	測点2の番号	基線長	比高3日	比高4日	較差
K	2	3	246.424	-0.4720	-0.4720	0.0004
K	93	2	317.320	-4.4028	-4.4032	0.0004
K	3	4	344.809	-0.5572	-0.5577	0.0005
K	4	5	355.830	-1.4302	-1.4295	-0.0007
C	1	3	387.506	0.0318	0.0308	0.0010
K	5	6	536.899	-0.4377	-0.4390	0.0013
K	93	3	555.904	-4.8750	-4.8759	0.0009
M	2	4	591.233	-1.0292	-1.0300	0.0008
C	3	5	686.857	-1.9874	-1.9874	0.0000
M	4	6	890.905	-1.8679	-1.8686	0.0007
K	93	4	897.008	-5.4316	-5.4334	0.0018
K	3	6	1,223.119	-2.4252	-2.4262	0.0010
K	93	5	1,242.719	-6.8621	-6.8634	0.0013
M	2	6	1,463.972	-2.8971	-2.8984	0.0013
K	93	6	1,778.647	-7.2993	-7.3020	0.0027

M: マイクロセンター, C: チョークリング, K: 混合

御前崎地区高精度比高観測

使用受信機: Trimble4000ss (S+V33仕様)
 使用ソフト: TrimbleOffice+V33, 4000ss+
 解析時間: 24時間 (JST 9:00~)
 解析条件: 放送型、30秒サンプリング、仰角7°以上、5度
 解析ソフト: Trimble Gpsurvey Ver2.20c

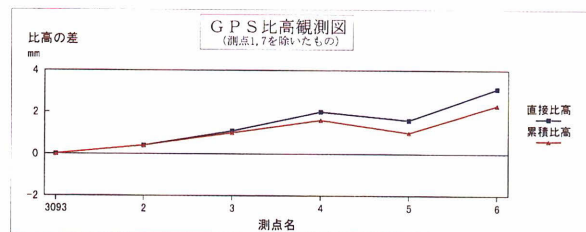


図-20 分割解析による再現性

表-6 距離別観測値比較データ

アンテナの組合せ	測点1の番号	測点2の番号	基線長	比高3日	比高4日	較差
K	1	2	141.091	0.5044	0.5044	0.0014
K	93	1	191.013	-4.9071	-4.9064	-0.0007
K	2	3	246.424	-0.4720	-0.4720	0.0004
K	93	2	317.320	-4.4028	-4.4032	0.0004
K	3	4	344.809	-0.5572	-0.5577	0.0005
K	4	5	355.830	-1.4302	-1.4295	-0.0007
C	1	3	387.506	0.0318	0.0308	0.0010
K	5	6	536.899	-0.4377	-0.4390	0.0013
K	93	3	555.904	-4.8750	-4.8759	0.0009
M	2	4	591.233	-1.0292	-1.0300	0.0008
C	3	5	686.857	-1.9874	-1.9874	0.0000
K	1	4	732.310	-0.5244	-0.5272	0.0028
M	4	6	890.905	-1.8679	-1.8686	0.0007
K	93	4	897.008	-5.4316	-5.4334	0.0018
K	2	5	929.480	-2.4594	-2.4597	0.0003
M	6	7	1,046.363	6.7702	6.7659	0.0043
C	1	5	1,068.902	-1.9552	-1.9571	0.0019
K	3	6	1,223.119	-2.4252	-2.4262	0.0010
K	93	5	1,242.719	-6.8621	-6.8634	0.0013
M	2	6	1,463.972	-2.8971	-2.8984	0.0013
K	5	7	1,569.155	6.3332	6.3285	0.0047
K	1	6	1,602.296	-2.3917	-2.3962	0.0045
K	93	6	1,778.647	-7.2993	-7.3020	0.0027
M	4	7	1,910.439	4.9027	4.8980	0.0047
K	3	7	2,252.459	4.3459	4.3418	0.0041
M	2	7	2,497.280	3.8737	3.8687	0.0050
K	1	7	2,637.388	4.3802	4.3722	0.0080

M: マイクロセンター, C: チョークリング, K: 混合

られることを示唆する結果が得られた。

6 土木研究所(試験走路)における試験観測

1998年6月に土木研究所構内の試験走路において試験観測を行った(図-21)。この観測は、観測点間が約200m~2kmにおいて長期間観測し、再現性と標準偏差から、観測距離と精度の関連を確認することを目的として実施した。

観測は、試験走路内の南北に延びる直線部分の約2kmに観測点を6点設け、1998年6月2日から6月28日まで実施した。アンテナの設置は、案山子方式(写真-6)とし、上空視界は全点において15度以上が確保されている(表-8)。

観測条件として、サンプリングレート及び仰角をそれぞれ30秒、15度で設定し、各観測点の座標は、国土地理院構内の電子基準点(92110)を既知点として求めた。

NO①~NO⑥の各点間と、NO①~NO③, NO④, NO⑤, NO⑥間について、6月2日を基準とした再現性を求めた。解析は24時間のデータをGPSurveyを用いて行った。(図-22)この図から、アンテナの設置を確実に行えば、2.5mm×√Skmの再現性が期待できる。

再現性から求めた標準偏差を図-23に示す。標準偏差は、ほぼ距離に比例する傾向が見られ、1km程度まで

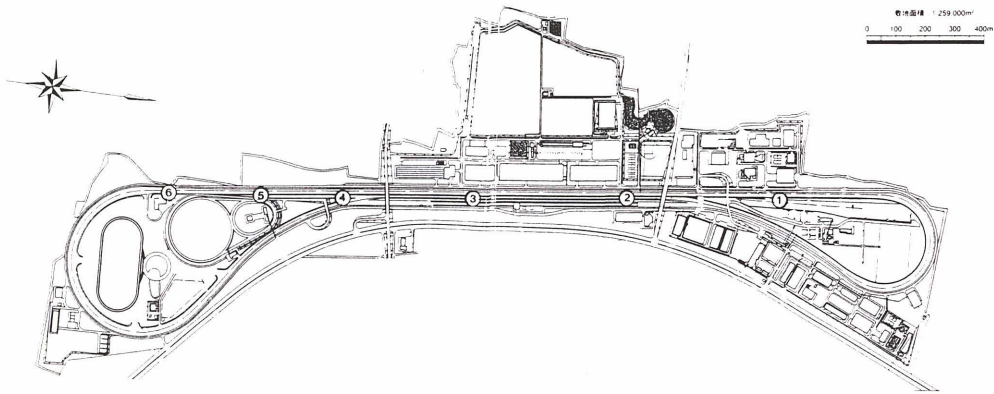


図-21 土木研究所試験走路



写真-6 試験走路内の設置状況

表-8 各点間距離及び器械高・機種

観測点	器械高	距離	備考
Na①	2.174m	—	Trimble 400SSiGSS
Na②	2.194m	588.22m	マイクロセンサ L1L2
Na③	2.194m	582.59m	
Na④	2.174m	391.89m	
Na⑤	2.194m	245.78m	
Na⑥	2.194m	271.97m	

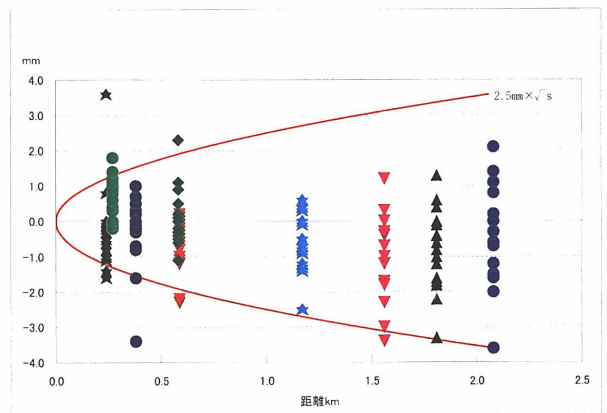


図-22 比高観測の再現性

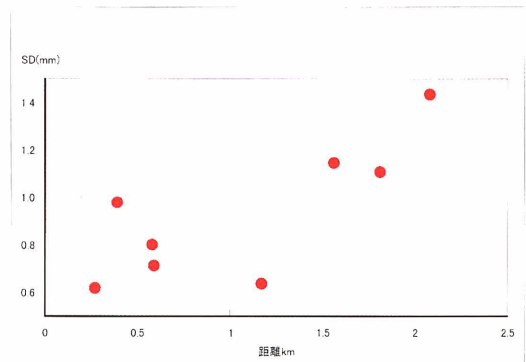


図-23 再現性から求めた標準偏差

は1mm以内、2kmで約1.5mmの精度が得られた。

7 まとめ

GPS観測を用いて比高の時間変化を高精度で求める手法の検討のため多くの試験観測を行った。

国土地理院構内で実施した100m程度の基線における試験観測では、①12時間以上の観測でサブミリオーダーの精度が得られる、②放送暦、市販の解析ソフトによる解析でも精度は劣化しない、③仰角マスクの違いによる差はない、⑤アンテナ高を変化させた観測では、その変化を正確に検出できる、等の結果が得られた。

伊東市川奈で実施した点間距離約600m～1km、高低差が約20m～50mの4基線では、①1mm程度の精度が得られる、②GPSによる比高観測が高さの連続監視に有効であることが、群発地震発生の前後に実施した水準測量との比較で検証できた。

静岡県御前崎地区で実施した緊急測量訓練では、観測点間2km程度までの基線において、①一等水準測量の往復差の制限に収まる再現性が得られる、②点間を短距離に分割して解析し、結果を積算する方法でも良い再現性が得られる、という結果が得られた。

土木研究所で実施した試験観測では、①再現性から求

めた標準偏差は、距離に比例する傾向が見られる。② 1 km程度までは1 mm以内、2 kmでは1.5 mmの精度が得られる、という結果が得られた。

これらの結果は、本計画が当初目的とした「静岡県川奈地区における短周期変動クラスター観測において、GPS観測で地面の上下の変化を正確に求め、特級短距離型光波測距儀による距離観測のデータから、水平変動成分と上下変動成分を分離する」という目標を達成しただけでなく、大量のGPS測量機を連結し、御前崎等地殻変動を監視したい地域において、比高の変化を連続的に高精度で求めることが出来る可能性を強く示唆するものである。

なお、今回用いた手法をGPSによる比高変化、連続観測手法を一般的として適用するためには、2周波で解析した5 kmを越える観測点間を、1 km程度に分割し1周波で解析した結果を比較し検討する事や、高精度比高観測にレドームが及ぼす影響の検討等は今後の検討課題として残されている。

8 おわりに

平成10年度補正予算で認められた「東海地震に必要なGPS高精度三次元位置情報提供システムの整備」(実行名称「高精度三次元連続観測システム」)により、静岡県森町から御前崎間に約1 km間隔で設置された25点のGPS観測がまもなく開始されようとしている。

このシステムの導入に先行して実施されたテスト観測

の結果では、約1 km～4 kmの距離でほとんどの基線において $2.5\text{mm}\sqrt{S\text{km}}$ 以内の再現性が得られ、約4 kmの基線を直接観測し解析するよりも、約1 km～1.6 kmの3区間に分割して観測し、解析結果を積算した方がより良い再現性が得られている。この結果も含め、多くの試験観測から得られた結果から、地殻変動の監視に貴重なデータを提供できるものと期待する。

今後GPS観測による高さに関するデータ取得の応用範囲は、さらに広がるものと思われる。本報告がそれらの基礎資料として少しでも役に立てれば幸いである。

謝辞

平成9年度は、地殻調査部観測解析課において、筆者(根本、小枝、鷺谷)を含む、森下一、岩田和美、近江屋慎吾、今給黎哲郎の各氏がプロジェクトチームを作り、観測、解析を担当した。平成10年度は、組織の改編に伴い測地部機動観測課が引き継いで実施した。観測、解析には筆者(根本、田中、小枝)の他、池田尚應、横川薫、岩田和美、篠原将人、重松宏美の各氏が参加した。水準測量の資料は、佐野伸明氏に協力していただいた。

黒石裕樹氏には試験観測の方法から、整理方法まで貴重なアドバイスを頂いた。

トリプルジャパン(株)の伊沢光磨氏にはアンテナ及び受信機に関する貴重な情報を頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 根本盛行・鷺谷 威・森下一・小枝登・岩田和美・近江屋慎吾・今給黎哲郎(1998): GPSによる超高精度比高観測, 日本測地学会第90回講演会要旨, 169-170
 近江屋慎吾(1998): 熱海(川奈)地方短周期変動クラスター観測作業報告, 地殻調査部作業報告
 小枝登(1998): 熱海Ⅱ(川奈Ⅱ)地方の短周期変動クラスター測量作業報告, 地殻調査部作業報告
 横川薫・篠原将人(1998): 熱海(川奈)地方短周期変動クラスター観測作業報告, 測地部作業報告
 岩田和美(1998): 高精度GPS比高観測の実現に向けて, 建設大学校1998年度高等課程高等測量科課題研究

関 連 文 献

- 今給黎哲郎(1998): UNAVCOにおける打ち合わせ結果について報告
 Charles Meertens(1997): Development of an L1-Phase GPS Volcano Monitoring System, Status Report
 Chris Alber, Randolph Ware, Christian Rocken, Fredrick Solheim(1997): GPS surveying with 1mm precision corrections for atmospheric slant path delay, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.24, NO.15, PAGES 1859-1862
 Randolph Ware, Chris Alber, Christian Rocken, Fredrick Solheim(1997): Sensing integrated water vapor along GPS ray paths, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.24, NO. 4, PAGES 417-420
 C. Alber, J. Braun, C. Rocken, GPS Research Group, UCAR(1998): Tracking and Multipath Analysis of Trimble Microcenter Antenna, GPS Antenna and Receiver Tests