

# 神奈川県温泉地学研究所における新しいGPS測量システムとその精度について

丹保俊哉\*、棚田俊收\*、代田 寧\*、伊東 博\*

New GPS surveying system and its accuracy of Hot Springs Research Institute of Kanagawa prefecture

by

Toshiya TANBO\* , Toshikazu TANADA\* , Yasushi DAITA\* and Hiroshi ITO\*

## 1. はじめに

温泉地学研究所では、神奈川県西部地震の予知研究や箱根火山の活動をモニタリングするために、県西部地域に各種の地殻変動測量施設を設置している(温泉地学研究所、1999)。このうち、GPS(Global Positioning System: 汎地球測位システム)の測量システムによる地殻変動測量が1992(平成4)年に箱根と真鶴で開始され、現在と同様な真鶴、箱根、山北、中井GPS受信局間の6基線の基線長測量体制が整えられたのは1994(平成6)年である。以降、GPS測量システムは神奈川県西部地域の地殻変動を把握し、予測される県西部地震に対する異常な地殻変動を検出するシステムの構築に貢献してきた(棚田ほか、1995)。また、これまでの研究では、フィリピン海プレートの沈み込みと神奈川県西部地域における圧縮場の形成を反映した地殻変動が検出されている(棚田ほか、2002)。

GPSによる測量システムでは、衛星からの信号を処理し高精度な基線長解析をおこなうため、電子計算機の存在が不可欠である。1990年代初め、一般にGPS測量の性能はまだ低く、ハードウェア、ソフトウェアの改良すべき余地、設備の運用寿命等の問題が残されていたものの、当所では、切迫性が指摘される県西部地震に対する予知研究をいち早く推進するため、GPS測量システムの早期導入を図った。しかし、昨今の電子計算機技術の向上はめざましく、これを反映してGPS測量はカーナビゲーションシステムに代表されるように我々の社会生活に浸透し、より高性能なものとなった。これまで、当所のGPSによる測量システムは上記に挙げたような成果を収め、その効果を実証してきたが、日進月歩の計算機システムを前にその性能は見劣りしつつあった。2001(平成13)年1月、測量システムの劣化が原因で基線長解析プログラムによるデータ処理が不良となり、復旧の見込みもなく測量は中断された。当所の県西部地震の予知研究におけるGPS測量システムはすでに主要な役割を担って

おり、これを機に測量システムを更新し、より高精度な測量を行える環境が必要とされた。

本報告は、2001(平成13)年10月に更新したGPS測量システムとその解析精度についてまとめたものである。

## 2. システム構成

今回のシステム更新では、基本的な部分の入れ替えがおこなわれたが、設計思想については旧システムとさほど変わってはいない。旧システムについては棚田ほか(1995)に詳細が報告されているため、ここでは新たな変更点や技術的な仕様、基線長解析の流れについてだけ、述べることにする。

### 2.1. GPS受信局

測量システムはCORS(Continuously Operating Reference Station: 連続運用基準局)システムを基本としている。受信局はLeica Geosystems社製のGPSアンテナAT502と受信機SR530で構成され、停電時は無停電電源による電力のバックアップを受ける。GPS受信局の位置を

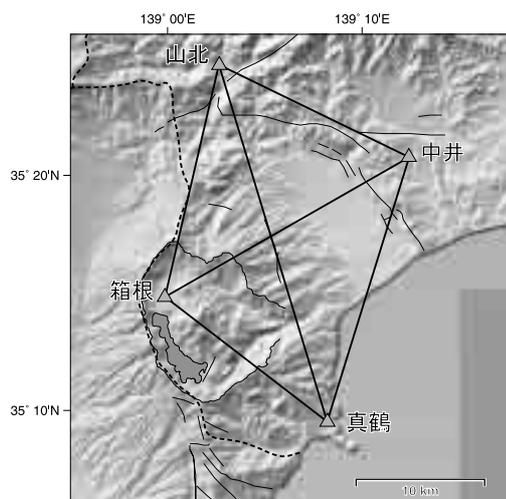


図1 GPS受信局の配置と測量基線

\* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586  
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第34巻, 27 - 34, 2002.

表1 GPS 測量機器の技術仕様

GPS受信機	Leica Geosystems社			
形式	SR530			
チャンネル数	12チャンネル L1 + 12チャンネル L2			
受信コード	L1測定項目	フルサイクル搬送波 C/Aコード L1 Pコード		
	L2測定項目	AS(Anti-spoofing) off 状態のフルサイクル搬送波 または、AS作動下のL2 Pコード		
測定精度	L1 搬送波位相	0.2mm RMS		
	L1 C/Aコード	5cm RMS		
	L2 搬送波位相	0.2mm RMS		
	L2 Pコード	5cm RMS		
	静止測量精度 (CRNet使用時)		水平成分	垂直成分
		1エポック	±[0~20mm+0.2mm/km]	3~5倍
		15分	±[8~16mm+0.2mm/km]	3~5倍
		1時間	±[5~10mm+0.2mm/km]	3~5倍
6時間		±[3~6mm+0.2mm/km]	3~5倍	
24時間	±[2~4mm+0.2mm/km]	3~5倍		
中断回復時間	120 nsec			
GPSアンテナ	Leica Geosystems社			
形式	AT502 L1/L2 2周波 マイクロストリップアンテナ(グランドプレーン内蔵)			

図1に、また測量機器の諸元については表1に示す。測定は30秒間隔で行われ、受信機内部のフラッシュメモリに記録される。なお、受信局・アンテナの設置箇所についての変更はない。

## 2.2. データ処理・解析システム

観測データの回収からデータ処理・基線長解析まで全ての処理は、Leica Geosystems社のGPS基線長解析ソフトウェアLEICA CRNet(Continuous GPS Reference Network)によって行われる。CRNetは旧システムのTRIMVEC-PLUSよりも、ハードウェアの性能要求が高いためIBM製PC、IntelliStation E Pro( Pentium 933 MHz ; SDRAM 654 Mb ; OS Windows 2000 SP3)を新たに導入し、その上で動作している。GPS受信局からのデータの回収は毎09時(グリニッジ標準時00時)に公衆電話回線によっておこなわれるよう設定してある。各GPS受信局からデータを受け取るとCRNetは、測量結果の整合性をチェックし、全GPS基線網の基線長解析を完全自動処理する。新しい処理システム"Epoch-by-Epoch"によって、CRNetは任意の必要条件に対して容易に適合でき、広範囲のコントロールとモニタリングが可能になっている。従来のリアルタイム測量法と比較して、この新しい処理システム"Epoch-by-Epoch"の主な利点は、センチメートルレベルの位置精度が2つ以上の受信局の1つのEpochによるデータだけという条件のもとで推定されていることを考慮して、整数波数不確定がそれぞれの

観測Epochで独立に見積もられるということにある。"Epoch-by-Epoch"のアルゴリズムでは、リアルタイムキネマティック法(RTK)に関連した初期化期間を必要とせず、1基線について1Epochを数ミリ秒で処理することができる。すなわち、連続的GPS測量において、木々や電線などの障害物によって起こる衛星の捕捉中断直後の再初期化の必要がないことである。全基線網の正確な"Epoch-by-Epoch"処理と調整のために、CRNetはRNA、すなわちGeodetics社が所有するリアルタイム・ネットワーク解析モジュール(Rapid Network Analysis algorithm)を使用している。

以下に、"Epoch-by-Epoch"システムの特長をまとめる。

- ・サイクルスリップと衛星の捕捉中断に影響されない。
- ・不良データの選別がRTK測量よりも容易である。
- ・多数のsingle-epochにおける静的位置のロバストな評価で、受信局の座標精度を改善する。
- ・高サンプリングレートによる大規模な測量基線網(50受信局以上)のリアルタイムな解析が可能である。
- ・30~40秒の処理時間を必要とするRTK測量と比較して瞬間的な初期化、再初期化が可能である。

なお旧システムでは、全てのGPS局において基準局を設定し、干渉測位方式による測量を実行したが、新シス

表2 CRNetの基線長解析によって得られる出力結果

```

Statistical Window - 2002/07/31 12:00:00 to 2002/07/31 23:59:30
-----
SITE | X(m)          | Y(m)          | Z(m)          | Lat(deg)      | Long(deg)     | Height(m)
     | Delta North(m)| Delta East(m) | Delta Up(m)   | DN-Truth(m)  | DE-Truth(m)  | DU-Truth(m)
     | Distance(m)
-----
Outlier stats
-----
MAN_ | -3948069.3228 | +3415453.9168 | +3652314.4224 | +35.159      | +139.137     | +97.626
     | +0.0000      | +0.0000      | +0.0000      | +0.0000     | +0.0000     | +0.0000
     | +0.0000
1440 solutions with 0 outliers ( 0.0%) (0 non-solutions)
North IQR = 0.00000, East IQR = 0.00000, Up IQR = 0.00000
-----
HAK_ | -3935939.4624 | +3421751.9645 | +3660780.9614 | +35.247      | +138.998     | +862.064
     | +9831.6604   | -12699.0475   | +744.2100     | -0.0075     | -0.0016     | -0.0099
     | +16077.3505
1440 solutions with 201 outliers (14.0%) (0 non-solutions)
North IQR = 0.02325, East IQR = 0.01829, Up IQR = 0.10222
-----
NKI_ | -3943135.4489 | +3402797.0897 | +3669345.1839 | +35.346      | +139.207     | +121.286
     | +20840.7711 | +6344.0754    | -13.6545     | -0.0045     | -0.0065     | +0.0010
     | +21784.9769
1440 solutions with 275 outliers (19.1%) (0 non-solutions)
North IQR = 0.02541, East IQR = 0.02037, Up IQR = 0.11522
-----
YKI_ | -3930468.4087 | +3411366.7866 | +3675381.2320 | +35.411      | +139.044     | +379.052
     | +28063.4624 | -8424.4191    | +213.9253    | +0.0052     | -0.0020     | -0.0239
     | +29301.4422
1440 solutions with 101 outliers ( 7.0%) (0 non-solutions)
North IQR = 0.02450, East IQR = 0.01777, Up IQR = 0.10097

```

テムでは仕様により、真鶴GPS局のみを基準局とした干渉測位に改められている。これは多くの解析時間を要する全基線解析と比較して、解析精度の低下はほとんどないためというLeica Geosystems社の措置による。

データ回収が終了後、直ちに基線長解析がおこなわれ、その結果は"ONSEN\_stats.txt"としてテキスト保存される。GPS局から回収した観測データ(バイナリとRINEX変換されたもの) CRNetによる基線網における各Epoch処理の結果、そして解析結果は、外部記憶装置である光ディスクドライブに保管されるように設定している。なお、当所では、2002年7月現在、基線長解析を12時間毎におこなうように設定している。解析に用いるデータ量はCRNetのメニューから30秒から24時間までを選択することが出来る。より長い解析間隔を選択すれば表1に示される静止測量精度のように測量精度は向上するが、当所におけるGPS測量の目的である神奈川県西部地震の先駆的な地殻変動の異常変化をいち早く検出するためには時間分解能を出来るだけ高く維持することが望まれる。そのため、測量精度を落とさないぎりぎりの解析間隔を経験的に求め、時間分解能の低下を防ぐ必要がある。この解析間隔の設定についてはこの後の3章、「観測結果と解析精度」において述べる。

表2に、"ONSEN\_stats.txt"の内容から2002(平成14)年7月31日12:00:00から23:59:30までの測量データによる1回分の解析結果を示す。解析結果はGPS

局毎にMAN\_(真鶴)、HAK\_(箱根)、NKI\_(中井)、YKI\_(山北)のヘッダーを付けてまとめられ、ITRF系(International Terrestrial Reference Frame:国際地球基準座標系)によるX,Y,Z値とWGS-84(World Geodetic System 1984:世界測地系)による緯度、経度、標高、そしてそれらの真鶴を基準とする基線長の各成分が出力される。さらに、基線長解析における統計的な評価として、解析期間内の外れ値(異常値)の数と南北・東西・上下成分の四分位範囲(IQR:データの下限から25%、上限から25%の間の幅)が出力される。IQRはデータが正規分布となっていない場合や外れ値がある場合などに対して有効になる。解析結果の主系列からの大きなずれである外れ値は、データ品質問題、マルチパス、GPS局特定のエラー(例えば、信号劣化・回折、アンテナの位相中心変動)、水蒸気遅延、衛星の軌道誤差そして整数波数不確定などに起因すると考えられる。CRNetは、解析の品質を下げないために、IQRの3倍を超える解析結果を外れ値として処理し、全データ量の20%を外れ値が占めると、解析を中断するようになっている。基線長は、最終的に12時間分の観測データ(1440データ)のIQRの中央値として1日2個の解が、データ収集の後の解析で算出される。またCRNetは初期値として設定した各基線長からのずれが任意に設定した一線(アラームライン)を超えると、画面上での視覚的な警告を発する。当所ではこのアラームラインを5cmに設定している。

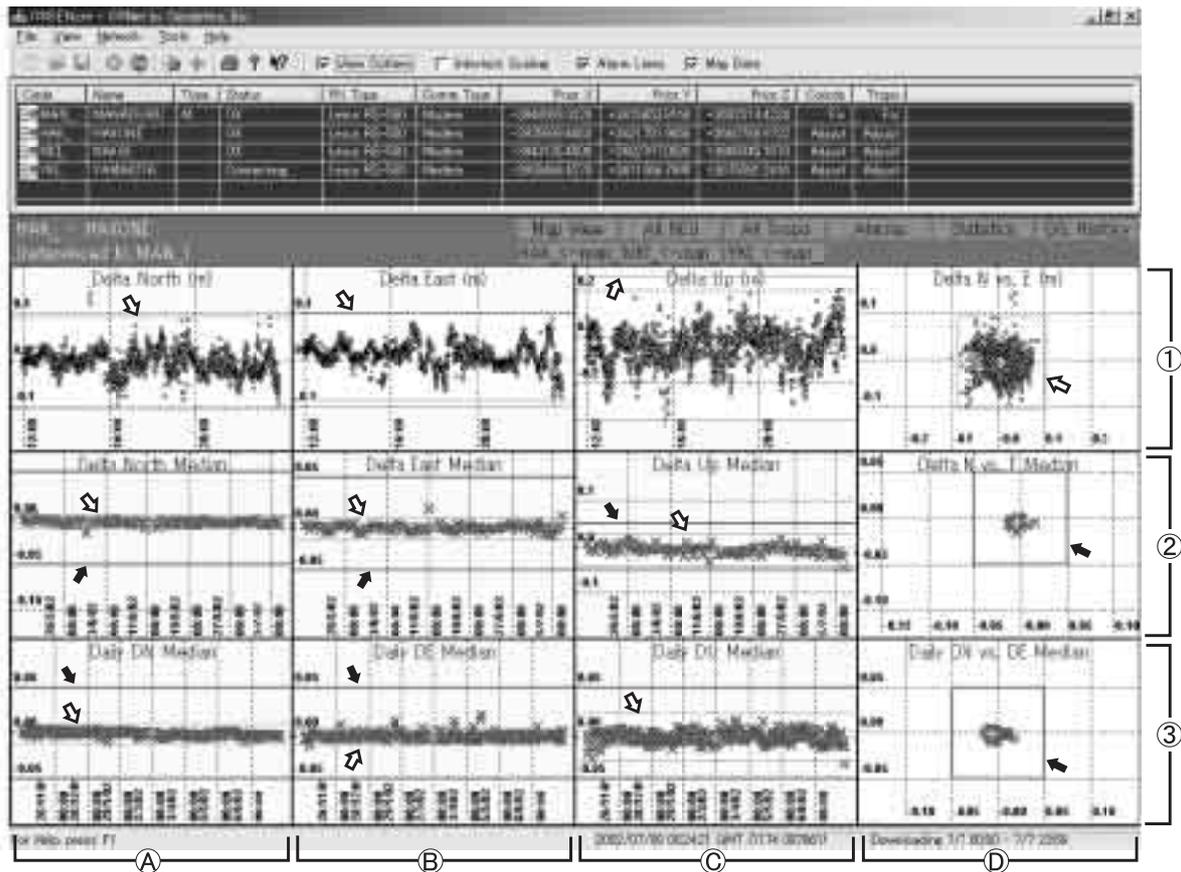


図2 CRNetによる基線長解析の端末画面出力  
 白抜き矢印はIQR、黒塗り矢印はアラームラインを指し示す。図中の①～④、～に関する説明は本文を参照のこと。

図2にGPS局からデータ回収・基線長解析の途中のCRNet端末画面を示す。画面は真鶴 - 箱根基線における12のグラフで構成されていて、縦方向に左から基線長の南北成分(図中①の範囲)、東西成分(図中②の範囲)、比高(図中③の範囲)、水平成分(図中④の範囲)の時間変化を表し、横方向に上から、1 Epoch毎で12時間分(図中①の範囲)、任意に設定した解析間隔(当所の場合12時間)毎で100データ(1200時間)分(図中②の範囲)、そして1日毎(図中③の範囲)で1年分の基線長解を把握することが出来る。図2で白抜き、および黒塗りの矢印で指し示した水平方向の線がそれぞれ、各時間範囲におけるIQRとアラームラインを表している。図中①と②の時間範囲は任意に変更することが出来る。

### 2.3. 可視化システム

測量結果の解析と可視化は、旧システムではそれぞれ別々の端末上で行われてきたが、新システムでは解析システムと同一の端末で行えるようになってきている。図3に可視化システムの表示例を示す。図示化できる内容は図3の右側のメニューで把握できるが、その内容・操作方法は旧システムと同一なものであり、棚田ほか(1995)に

詳細が報告されているため、ここでは省略する。

### 3. 観測結果と解析精度

図4は、真鶴 - 山北基線(基線長29.3 km)において解析間隔を1時間、2時間、4時間、6時間そして12時間と変更していったときの基線長の時間変化グラフ(2001(平成13)年10月25日～12月25日)とそのときの基線長の頻度分布をデータ量別に示している。すなわち、この図は基線長解析における解の収束状況を表している。解析間隔は1時間毎が2001(平成13)年10月25日～11月6日、2時間毎が11月7日～11月20日、4時間毎が11月21日～11月26日、6時間毎が11月27日～12月3日、そして12時間毎が12月4日以降と変更した。システムの運用開始直後で解析間隔が1時間の場合、解のばらつきは4 cm(1.37 ppm)程あるものの、解析間隔を4時間にまで増やした11月21日頃から2 cm(0.68 ppm)程度まで解のばらつきが押さえられるようになった。更に解析間隔を6時間、12時間と増やすことによって解の収束状況に効果が認められた。ただしそれは若干の効果で、1時間から4時間に解析間隔を変更したとき程ではなく、これ以上の解析間隔の延長はほとんど効果が上から

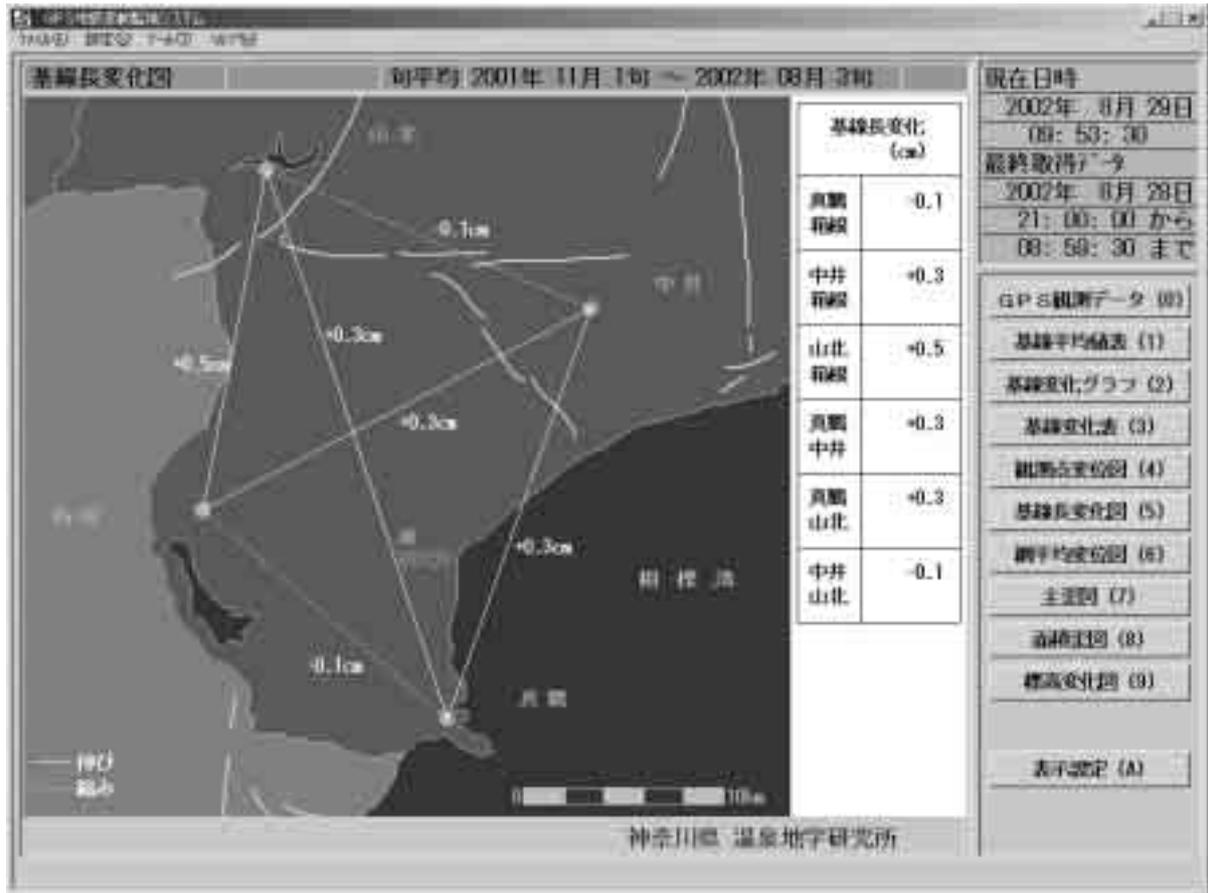


図3 基線長解析の可視化システムによる端末画面出力(基線長変化図)

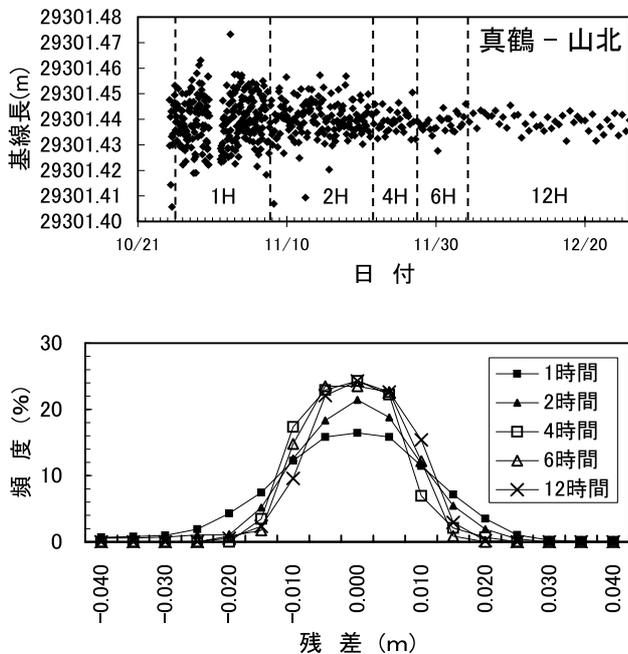


図4 真鶴 - 山北基線における解析間隔を変更していったときの解の収束状況(時間変化)と各解析間隔における解の頻度分布  
 図中上のグラフの破線は解析間隔の変更を表し、そのときの解析間隔をグラフ内部に示した。

ないと考えられた。また、旧システムにおける解析結果の時間分解能が12時間であったため、過去蓄積されたデータとの整合性を考慮して、解析間隔は12時間で固定した。ただし、図4の解析間隔別の頻度分布をみると、残差 $\pm 0.015$  mでの4時間と6時間および12時間の頻度差は数%未満であることが分かる。このことから、時間分解能を優先して、解析間隔を4時間または6時間に変更することを各基線別に測量結果を確認して、今後検討する必要がある。

図5はシステムの更新が行われた2001(平成13)年10月から2002(平成14)年7月までの、10ヶ月間の基線長、南北、東西、標高成分の時間変化を示す。測量再開当初の解析間隔が1~6時間のときの解は、算術平均によって12時間毎のデータとして整えた。新システムによる測量の再開は10月25日からである。サイクルスリップによる測量の中断が2回あったが概ね安定した測量が実行できている。各基線長の解のばらつきは2 cm(約1 ppm)程度までに収まっている。表1に示したCRNetにおける静止測量精度を参考にすると、12時間の解析間隔で水平成分は $\pm 3 \sim 5$  mm + 0.2 mm/km程度の精度と見積もられ、解析結果の誤差が大きいことが分かる。これは基

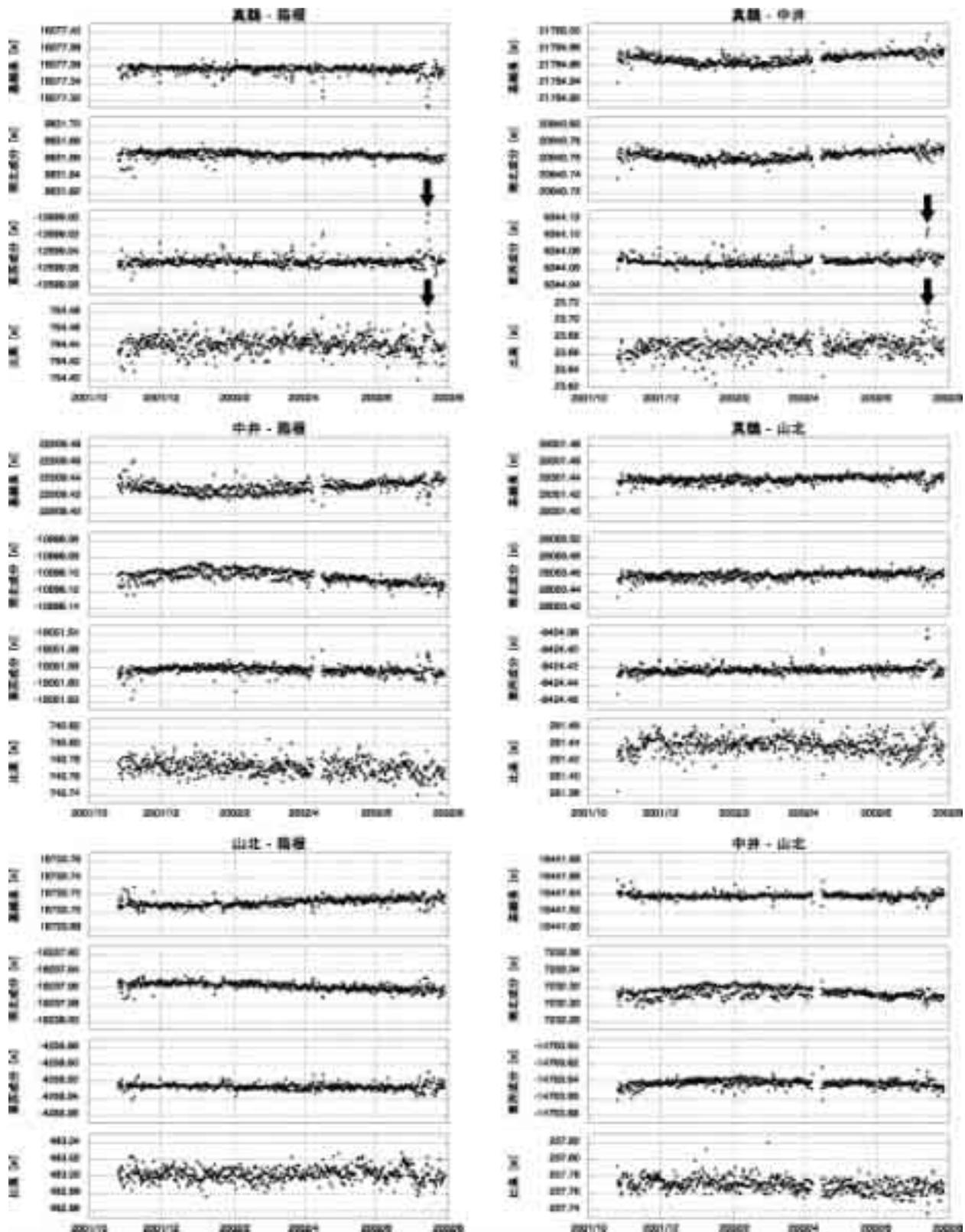


図5 全 GPS 基線における基線長とその南北、東西、標高成分の時間変化グラフ  
 図中の矢印は CRNet において異常と判断された変化を示す。

線の長さ依存する誤差や、受信局のアンテナが設置されている建物自身の伸縮などが影響していると考えられる。しかし、旧システムにおける基線長解析結果が 5 ppm 程度のばらつき( 棚田ほか、1995 )があったのと比較して、

新システムで 1 ppm 以下にまで改善することができたことは、システムを更新したことの最も大きな意義を示すものであるといえる。

システムを更新して以降、神奈川県西部地域では目

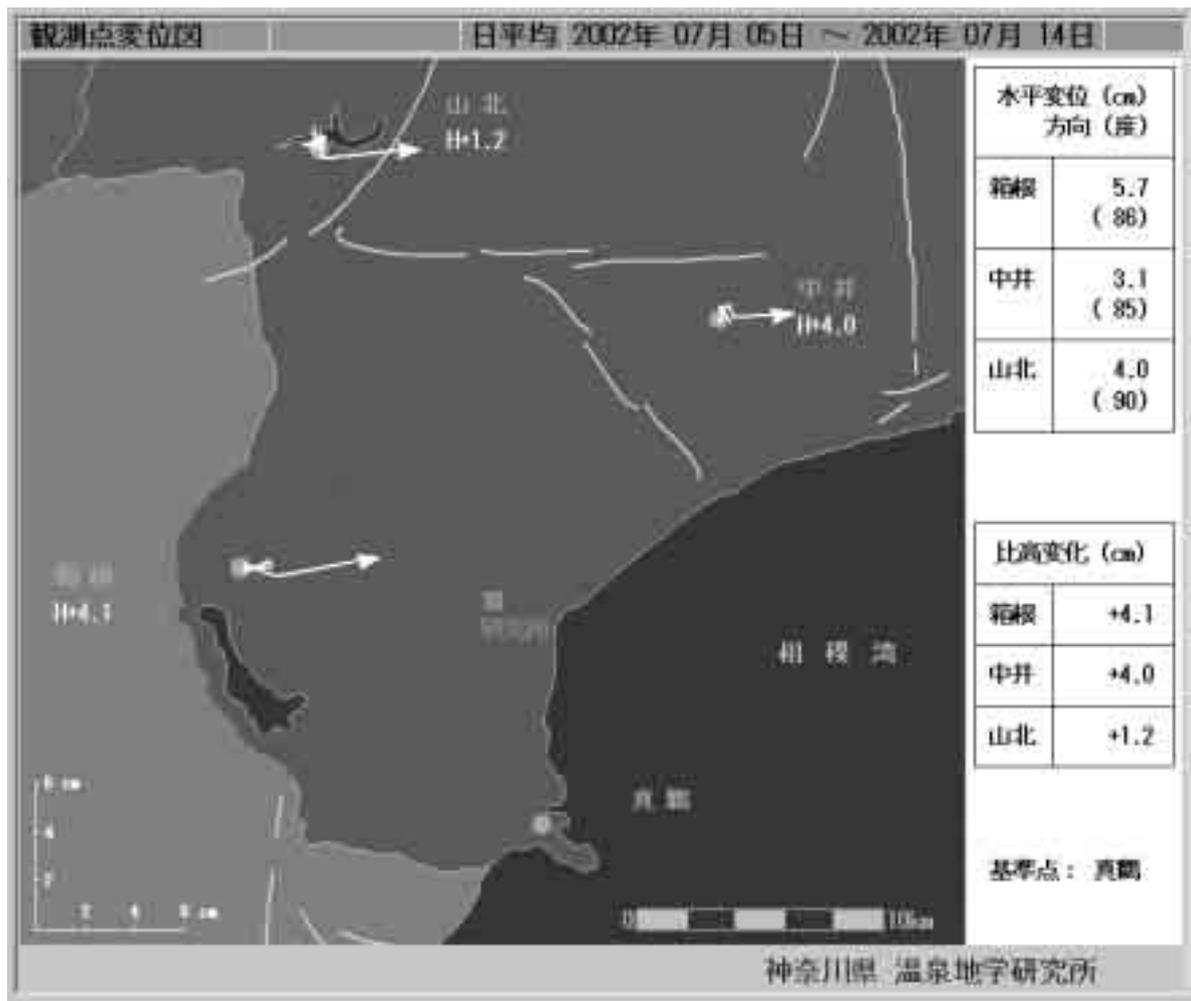


図6 7月14日に生じた基線長変化による見かけ上の各観測点の位置変位ベクトル(真鶴基準)

立った地震活動は生じていない。GPS測量を開始した時点では、2001(平成13)年6月12日から始まった箱根群発地震活動は、終息に向かう傾向にあり(棚田ほか、2002)、その影響を観ることはできない。図4のグラフ中に時々みられる外れ値は2.2章で述べたことが原因に挙げられるが、特に主系列からの逸脱が著しい2002(平成14)年7月14~15日にかけての解析結果は、真鶴-中井基線と真鶴-箱根基線の東西・標高成分でアラームラインを超えた。この原因を湿度や風力、気圧変化、電離層擾乱等に求めたが、何れにも当てはまらなかった。このときの観測点変位(真鶴基準)を調べるとすべてのGPS局が東に変位することが分かった(図6)。このため、基準点である真鶴GPS局に関する異常ではないかと考えたが、この現象が当所の観測網に限られたものであるかを確かめるために、国土地理院のGPS連続観測システムGEONET([http://mekira.gsi.go.jp/hendou\\_new.html](http://mekira.gsi.go.jp/hendou_new.html))の小田原-二宮基線(基線長11.66km)の基線長の時間変化を調べた。その結果、同じように7月14日の基線長の伸びを記録していることが分かった。しかし、

GPS局を神奈川県西部以外に広げるとこの現象はみられなくなり、またその変化は一時的なものであるため、地殻変動によるものではなく、先に挙げた影響因子以外の何かが局地的に作用した、見かけ上の基線長変化ではないかと考える。

#### 4. まとめ

システムの障害によって約6ヶ月近く中断されていたGPS測量を、より高精度なシステムに更新して再開した。

基線長解析の誤差は解析間隔を調整することで1ppm程度までに収めることが出来、良好な測量結果を得ているといえる。ただし、現在の測量精度を優先した時間分解能(12時間)で測量・解析を継続してゆくか、或いは時間分解能を向上させるか、全基線における解のばらつき状況を検討しなければならない。

システムを更新して以降、神奈川県西部の地震活動は静穏で、地殻変動に伴うような基線長変化は検出されなかった。

今回のGPS測量システムの更新により、当所における

地殻変動観測の目的である神奈川県西部地震に伴う異常のより小さな変化について検出することが可能になったといえる。しかし、新システムでは解析ソフトウェアの仕様により、旧システムでおこなわれていたすべてのGPS局を基準局とした基線長解析を真鶴局に固定したため、真鶴局で障害が発生した場合、他の3つのGPS局では基線長解析が行えないような設定となってしまう。つまり、真鶴局1局の異常だけで基線長解析が全ておこなわれなくなるため、真鶴局以外を基準局とした設定を作成し、万一の場合のバックアップ体制を整えることが、今後の課題である。

#### 謝辞

GPS測量を継続するにあたっては、企業庁管理局三保管理事務所管理課、真鶴町庶務課、中井町庶務課、箱根パレスホテルの方々のご協力を頂いています。本システムを更新するにあたっては、神奈川県防災局の全面的な協力を得ることによってなされました。ここに感謝の意を表します。

GPS測量システムの開発等は、株式会社アカサカテックによっておこなわれた。

#### 参考文献

- 温泉地学研究所（1999）温泉地学研究所における「神奈川県西部地震」の取り組み，温地研報告，29(12)，3-40．
- 棚田俊收、伊東 博、八巻和幸、小鷹滋朗、平野富雄（1995）神奈川県温泉地学研究所のGPS連続自動観測システム，温地研報告，26(12)，37-48．
- 棚田俊收、伊東 博、代田 寧、板寺一洋（2002）神奈川県西部地域におけるGPS観測結果とその特徴について，温地研報告，33，31-42．
- 棚田俊收、代田 寧、伊東 博、袴田和夫（2002）2001（平成13）年箱根火山の群発地震活動について，温地研観測だより，52，1-4．