

- 5) GRS80へ楕円体変換し楕円体高を算出
- 6) ジオイド2000によりジオイド高を減じて標高を算出。

これにより現在の状況下での1997.0エポックの相対的な高さは決定できるものの、VLBI観測点に準拠した絶対的な高さは求められていない。このため、1997.0エポックより現在まで不変かつ連続に観測を行っており、鹿島VLBI観測局、一等三角点「東京大正」と取り付け観測が行われているつくばIGS局(TSKB)を仲介に、VLBI観測局に準拠した電子基準点網の絶対的な高さを決定する計画である。

1), 2)の期間中に移設や欠測及び固有な地殻変動等により1997.0エポックの座標値が算出できない電子基準点は、平成14年度に新設された253点の電子基準点と同様に、「電子基準点維持要項(案)」に基づき、周辺電子基準点の改算楕円体高を用いて、個別に2日以上24時間精密基線解析を行い成果算出することになる。

2. 2. 6 標高改算の状況

このような手法により電子基準点の標高改算を行う計画であるが、幾つか問題点もある。

改定成果公表は、平成14年度新設電子基準点253点の成果公表とあわせ、平成16年4月1日を予定しているが、一般測量への電子基準点利用が進んでいる現状では、周知期間を含めトラブルが生じるのではないかと懸念される。11月末現在においても、幾つかの電子基準点においてF2解に原因不明のオフセットが生じているものが見つかっており、位相特性モデル等の変更タイミングに再調査が必要となっている。この部分を明確に処理した後、再解析を実施して標高改定作業にはいることになり、標高改定が終了した後に新設253点と成果算出不能点の成果計算にはいることになり、時間的な不安を抱えた状況である。また、厳密に測地成果2000構築の骨格網の固定点であるVLBI観測局と整合を図るには、再取り付け観測が必要であること、ジオイド2000構築の際に基準となっている電子基準点の楕円体高が変わることになり、ジオイドモデルとの評価も必要となることなどがあげられる。

2. 3 観測データ提供

2. 3. 1 電子基準点リアルタイムデータ提供の現状と未来

国土地理院では、平成4年度から電子基準点の設置に着手した。その翌年に南関東・東海地区に110点設置したのを皮切りに、その後も設置を続け、平成14年度に現在の1,200点設置が完了した。

電子基準点観測データであるRINEXデータが、

平成11年8月よりインターネットにより提供され、研究、測量などの用途で広く一般に利用されている。この項では、電子基準点において即時(リアルタイム)に取得される観測データ(以下「リアルタイムデータ」という。)が公開されるに至った経緯、リアルタイムデータを利用して行われている仮想基準点方式によるリアルタイム測位について述べる。

2. 3. 2 電子基準点リアルタイムデータ提供の経緯

電子基準点のデータを利用して、リアルタイムで高精度な測位実験はこれまでも行われており、平成9年度に民間において「RTK-GPS実験推進協議会」が組織され、電子基準点とDMCA無線を利用したリアルタイム測位の共同実験が開始された。さらに国土地理院でも平成12年～13年度にわたり、全国4地域22点の電子基準点において、DMCA無線を利用し電子基準点RTK補正用データの提供サービスが図られた。

平成12年8月(社)経済団体連合会が「一つの電子政府実現に向けた提言」を策定した。この提言のなかで、新事業・新産業を促進するプロジェクトとして地理情報システム(GIS)についてもふれ、その活用のための課題として「リアルタイムの高精度位置情報は、災害対策、ITS、カーナビ、デジタル地図など、国民生活や企業活動の基本的インフラとして期待できることから、電子基準点の拡充、高機能化や適切な保守等を図る必要がある」を挙げている。

また、平成13年11月には民間企業6社が発起人となり、「電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会」が設立されている。この協議会は、通信事業者、測量及び航測会社、ゼネコン、GPSメーカ、電機メーカ、大学及び研究機関など90以上の企業や団体が参加している。協議会では、国土地理院に対して「リアルタイム測位が全国どこでも利用できるよう、全国に設置されている電子基準点にリアルタイム測位の基準局としての機能を整備するとともに、利用システムの普及を図り、リアルタイムデータの提供促進」と要望が出された。

国土地理院でも、これらの提言・要望に添う形で、電子基準点データをリアルタイムでデータ取得が可能になるよう電子基準点のGPS受信装置の改造を平成12年度から開始した。平成14年5月27日から関東・中京・京阪神地域等の大都市を中心とした電子基準点200点のリアルタイムデータ提供を開始したのを皮切りに、現在931点の電子基準点において、リアルタイムデータが提供されている。平成15年度末までに1,200点の電子基準点のうち、地形的な要因等で常時接続化が不可能な点を除いた1,189点の

リアルタイム化を図るところである。

電子基準点のリアルタイムデータ提供にあたっては、電子基準点とデータ取得のための通信回線が常時接続の状態であることが必要であるが、通常の電話回線仕様では通信経費が多額となり、費用対効果の面で、好ましくない。そこで常時接続にあたっては比較的安価に効率的な接続が可能な仮想閉領域通信網（IP-VPN：Internet Protocol Virtual Private Network）を電子基準点の常時接続回線として採用している。

2. 3. 3 配信機関と位置情報サービス事業者

電子基準点のリアルタイムデータ提供は国土地理院から常時接続回線であるIP-VPNを通じて配信機関に提供し、配信機関から位置情報サービス事業者へのリアルタイムデータの配信を通じて行われる（図-27）。位置情報サービス事業者は、リアルタイムで高精度に位置を求めたい契約ユーザーに対して後述の仮想基準点方式等を利用した位置情報の提供を行う。

なお、国土地理院は、配信機関として(社)日本測量協会を選定している。一方、平成15年11月現在における位置情報サービス事業者は、株式会社ジェノバ（平成14年1月設立）と日本GPSデータサービス株式会社（平成14年4月設立）の2社である。

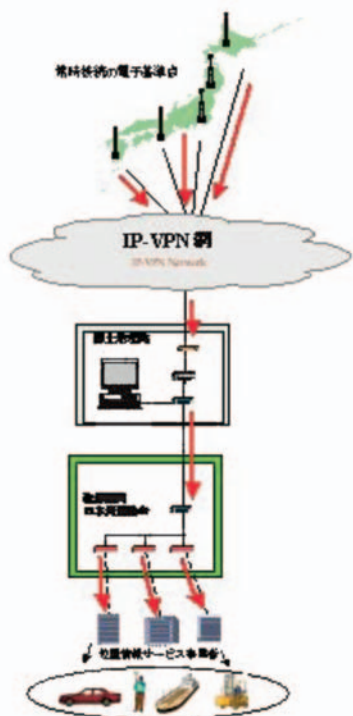


図-27 電子基準点リアルタイムデータの流れ

2. 3. 4 仮想基準点方式によるリアルタイム測位

電子基準点リアルタイムデータを利用する方法として、仮想基準点方式がある（図-28）。

仮想基準点方式とは、位置を測定したい場所に設置されたGPS受信機（以下、「移動局」という。）のデータから、その周囲の電子基準点で受信したデータを用いて、必要とする場所に架空の観測データを生成し、その移動局の近傍にあたかも実際の電子基準点の同じ機能をもつ電子基準点を設置し、移動局と相対的測位を行い移動局の測位を行う技術を行う。仮想基準点方式には以下の3つの方法がある。

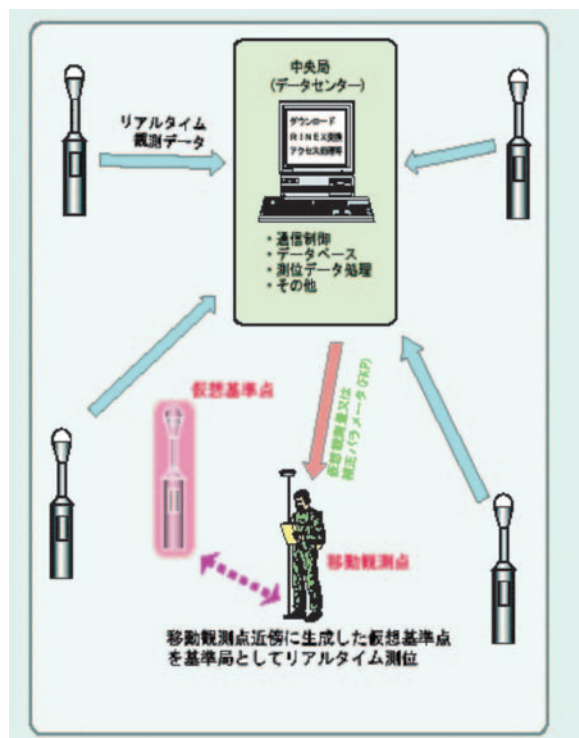


図-28 電子基準点リアルタイムデータを利用した仮想基準点方式のイメージ

（1）仮想基準点単独生成法

この方法は、3つの工程から構成される。まず、移動局の概略位置を単独測位またはDGPSによる観測結果により、求める。次に、周辺の電子基準点の観測データをベースに移動局の近くに仮想の基準点を設置し、その位置情報とそこで得られるであろう観測データを生成・伝送する。最後にこのデータを用いてRTK測位を行う。

この方法の特徴として、移動局と仮想基準点データを生成・伝送する制御センターが必要であり、移動局と制御センター間の双方向通信方式が必要である。移動局側では大きい計算は不要のため、移動局を簡略化できる一方、ユーザー数が極端に増加した場合には制御センターの負担が増大することが予想される。

(2) エリア補正パラメータ法

エリア補正パラメータ法は、仮想基準点単独生成法のような双方向通信方式ではなく片方向通信方式によるものである。この方法は、基準点ネットワークを傾く平面とみなし、面補正関数により決定される補正パラメータを移動局に送信する。移動局はこのパラメータと観測データによって位置を測定するものである。高次項の関数は複雑な補正面をよりよくカバーできる。この方法ではデータの通信量が多くはないが、移動局側で各自の計算を要するため、処理を行う専用ソフトが必要となる。

(3) グリット補正法

グリット補正法は、基準点ネットワーク内にあらかじめ決められたグリットにおいて、基準点の観測データ及び補正値を計算しておき、移動局が一番近いグリットを選択して、その観測データと補正値を補間計算によって位置を測定するものである。移動局と仮想基準点の距離は短い方が良いので、より正確な測位には、密なグリット点が必要である。これを実現するためには、大量な補正データが必要となる。この方法では、全グリット点の補正データが各移動局に送信されるが、ネットワーク内の移動局に同じデータを送信するために制御センターから移動局までは放送のように片方向通信のみでよい。

2. 3. 5 リアルタイムデータの活用と今後の計画

電子基準点のリアルタイムデータ活用は大きく二つに分けることができる。1つは言うまでもなく電子基準点本来の目的である地殻変動観測である。2つ目は測量目的やGIS構築、カーナビ等での民間活用である。

国土地理院では、電子基準点を使って全国の地殻変動を24時間連続して連続・監視を行っている。観測データは、電子基準点データのリアルタイム化によって、通常1日1回の解析・監視からリアルタイムでの解析計算による監視が可能となり、今後さらに地殻変動監視への貢献が予想される。

一方でリアルタイムデータ提供により、電子基準点を利用して数cmの精度でリアルタイムに位置情報を提供するサービスが民間でも可能となったことから各種測量はもとより、位置情報を必要とするあらゆる業務等に利用できることになる。

国土地理院では、全国にある電子基準点1,200点のうち、今年度中に1,189点においてリアルタイムデータが提供されるようになるが、平成15年度中に電子基準点24点の増設を行う予定である。これらはすべて電子基準点リアルタイムデータ提供が図られることになっている。

平成4年、南関東・東海地域の地殻変動検出を目

的として設置が開始された電子基準点（当時はGPS連続観測点）は、この10年の間に全国に1,200点展開され、観測データも一般に公開された。観測データの利用目的は、当初、研究が主であったが、電子基準点が測量法でいうところの測量標となり観測データが基本測量・公共測量において使用可能となってからは、測量という営利事業に利用される手前、運用の停止・データの配信遅延などへの、利用者のデータに対する目も厳しいものになってきている。先に述べた、リアルタイムデータを利用した位置情報サービスも開始されている。

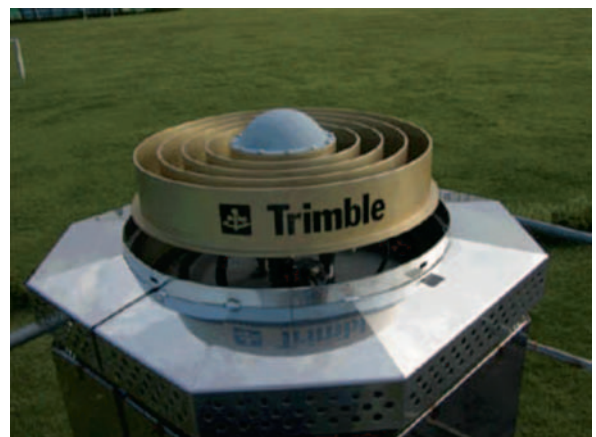
これは、電子基準点を含めたGEONET自体が測量、位置情報インフラとしての地位を確立したと言えると同時に、今後もユーザーに対して、電気・水道と同様、定常的な運用が可能な体制をひいていくことが必要不可欠であると考ええる。

2. 4 電子基準点の維持管理

2. 4. 1 電子基準点の改造・改良

(1) アンテナ交換

マルチパスはGPS測位解の大きな誤差要因のひとつとして知られている。電子基準点では、マルチパスの影響およびアンテナ位相特性から生じる問題を除去するため、平成14年度から平成15年度の約9ヶ月間をかけて、ほぼ全電子基準点のアンテナ交換を行った。交換後のアンテナには、マルチパスによる影響が小さいといわれているDorne&Margolin T型のチョークリングアンテナ（TRM29659.00）を採用した（写真－4）。アンテナ交換が終了した現在では、Javad社のLegacy受信機とCR-4アンテナの組み合わせである2点（「日進」、「八日市」）と、今回改造を見送った電子基準点9点を除く、1,189点がTRM29659.00アンテナとなった。アンテナ交換を行ったことにより、電子基準点の観測データのマルチパスが減少し、特にL2でその成果が著しく見られることが確認されている。



写真－4 TRM29659.00チョークリングアンテナ

(2) 受信機交換

平成14年度に行われた電子基準点の改造では、アンテナ交換にあわせて、受信機もTrimble社の最新機種である5700RCに交換され、上述の2点を除き、Trimbleの受信機に統一された。内訳は、Trimble 4000SSEが2点、4000SSiが7点、5700RCが1,189点となっている。これにより、受信機内部のリングメモリーも大容量化され、長期の通信トラブルの際にも、復旧後のリカバリーでデータ回収が可能となった。さらに、受信機を最新機種に交換したことにより、受信機内部時計の精度が改善され、アンテナ交換とあわせマルチパスの減少の改善が確認されている(図-29)。

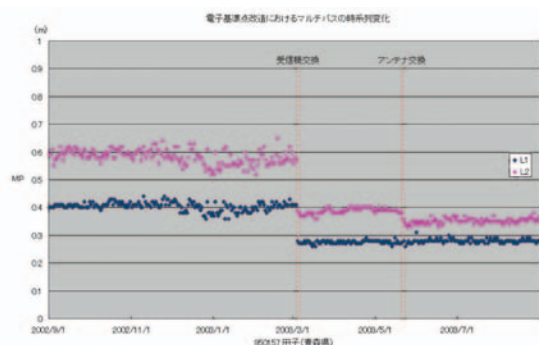


図-29 改造におけるマルチパスの時系列変化

(3) レドーム交換，設置

平成14年度に行われた電子基準点の改造の一環として、アンテナの保護および位相特性モデル確立に向けた架台形状の統一化のため、レドームが設置されていない電子基準点には、新たにレドームを設置した(写真-5)。今回の改造により新たにレドームが設置された電子基準点は、92、93番台を中心に83点である。そのうちの「練馬」、「浜松」、「宇佐美」、「豊橋」の4点の屋上型架台は、レドーム設置にあわせ架台も最新型タイプに交換している。さらに、旧レドームタイプであるFRP円錐型の10点については、他の電子基準点と同様なプラスチック丸形のレドームに交換した。

また、傾斜計が未整備であった92、93、94、95番台の合計600点の電子基準点に傾斜計を設置した。傾斜計データは、30分ごとに取得され、GPSデータとあわせて中央局に転送されている。



写真-5 レドーム交換・設置
(設置前(左)と設置後(右))

レドーム設置のためピラー幅を広く加工してある

(4) 避雷器設置

落雷・誘導雷・接地雷から各機器を保護するために、アンテナに同軸避雷器さらに電源部および通信部に避雷器を未装着の全点を対象に設置した。避雷器性能は、同軸避雷器で応答速度4 nsec以下、電源部避雷器で応答1 nsec以下、サージ20,000A、通信部で応答3 nsec以下、サージ10,000Aとなっている。この設置工事は、レドーム、アンテナを取り外す必要があるため、基本的にアンテナ交換、レドーム交換にあわせて実施されている。

(5) 位相特性

高精度なGPS基線解析では、アンテナ位相特性を補正するために位相特性モデルを用いる必要がある。電子基準点では、アンテナ架台とレドームの形状にいくつかの異なったタイプが存在するため、アンテナ架台タイプに応じて構築したアンテナ位相モデルを用いて解析を行っている。前述したように、平成14年度よりアンテナ交換が行われたため、交換後の電子基準点に使用する新たなアンテナ位相特性モデルが必要となった。そこで、架台モデルを用いて検定観測を行い、各架台とチョークリングアンテナの組み合わせに対してのアンテナ位相特性モデルを構築した。その際、アンテナ架台上部でのアンテナの取り付け高に見られた高さの不統一が、測位解に影響を及ぼすことが明らかになったため、アンテナ交換に併せて位相特性モデル構築の際に基準としたアンテナ取り付け高に統一している。アンテナ交換前にGEONETで使用していた位相特性モデルは24種類に上っていた。アンテナ交換に伴い、新たに構築した位相特性モデルは8種類であり、交換後は以前の2種類の位相特性モデルを加えた総数10種類のモデルで間に合うこととなる。これらアンテナ交換、調整およびアンテナ位相特性モデルの構築によって、新GEONETでは解析精度の向上が期待されている。

(6) その他の改造・改良

(a) ピラー改良(積雪対策)

平成14年度に増設された253点の電子基準点ピラーについては、これまで問題とされてきた日射変動の影響を軽減するため、円柱型の内管に八角柱の外管を配した二重管構造とした。しかし、これら02新設点の架台では、レドームの外側に外管が張り出しているため、降雪地域においては架台上部に積雪し、レドーム全体を覆ってしまうことが設置後に判明した。このような状態はマルチパスを増加させ、観測データに影響があることが確認されている。このような積雪による障害に対応するため、電子基準点アンテナ架台の外管上部30cmを切断し、改良された外管上部に交換するピラー改良作業を実施している(写真-6)。これによりレドームの外側の張り出し部分がなくなり、レドームへの積雪が防げることになる。改造の対象となる電子基準点は、降雪地域に位置する電子基準点を対象に総数179点である。



写真-6 02型ピラー改良前(左)と改造後(右)

(b) 電源部改造

現在の電子基準点は、GPS受信機・傾斜計に無停電電源装置が接続されており、停電後6時間の連続観測が可能となっている。しかしながら、通信装置は無停電電源装置が接続されていないため、常時接続回線に接続されているにもかかわらず、瞬断の場合でも通信装置初期化のため約1分間の通信断が生じてしまう。さらに、災害時で停電となった場合は、リアルタイムデータをはじめ電子基準点のデータ取得が行えない状態となる。

このため、停電時でもデータ取得を可能とするため、通信装置にも6時間バックアップ可能な無停電電源装置に交換することにした。改造の対象となる電子基準点は、東南海・南海地震地殻監視強化地域および東海地震に係わる地震防災対策強化地域に位置する電子基準点の総数197点である。これに併せて、電子基準点の増設に伴い、データ提供の機能を

増強する必要が生じたため、各装置に保存用・提供用サーバーの増設を行っている。

2. 4. 2 地殻変動を監視する上での問題点と対策

電子基準点網と解析処理装置は、平成14年度に大改造した。改造前のGPS観測機器は、Trimble, Ashtech, 及びLeicaという3社の機器を採用していた(図-30)。各社のGPSアンテナは、位相特性の相違から異機種間での基線解析に問題を抱えていた。これを回避するため、国土地理院構内に製造会社の異なる機器で構成された解析用固定点を3箇所設置し、GEONETでは解析網を3つに分離・独立した処理を行っていた(図-32, 表-6)。

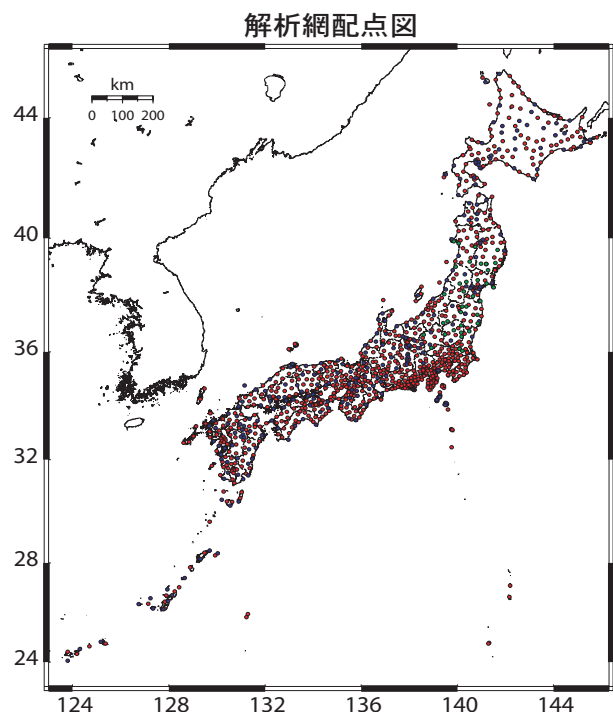


図-30 旧GEONETに存在した3つの解析網
プロットの色で解析網を分類表示している。
赤: Trimble網, 青: Ashtech網, 緑: Leica網

3つの解析網の固定点は、すべて国土地理院構内に設置されており、異なる製造会社の機器で構成されている(表-6)。

表－6 新旧GEONETの解析網の比較

網	旧 GEONET			新
	Trimble	Ashtech	Leica	
固 定 点	92110 つくば1	942002 つくば (地理院)	96TKB4 つくば4	92110 つくば1
Anten na	Permanen t L1/L2	Model 700779. A	Micropul se antenna L1/L2	TRM 29659. 00
受 信 機	4000SSI 4000SSE	GP-R1DY	SR-9600	5700
点数	681	230	36	1, 200

新GEONETでは、14年度に新設した250点と併せて機器がTrimble製に統一されて全1,200点は「Trimble網」に統合

この解析方法は同一の解析網に属する観測点間では整合性を確保しているものの、解析を複雑にしているばかりでなく、異なる解析網の点間で不整合が生じる問題があった。これらの問題解決と高精度化を計るため、前述の改造が行われた。

解析処理においても、解析時間の分解能が24時間データ解析を継続しつつ新たに6時間データの3時間おき解析を追加、解析手法もネットワークの再構築や新しい位相特性モデル、潮汐モデル等の導入によって高精度化されるとともに、装置は一新し高速化が計られ、地殻変動監視は時間的・精度的に強化された。一方、GPSアンテナを初めとしたハードウェアを交換することは、解析結果に工事に伴う不連続が生じた。

また、電子基準点本体が、地震や火山噴火活動に伴い傾斜・沈下することが傾斜測定によって判明した。それらの多くは、イベント発生とほぼ同時に引き起こされることから、解析結果には正味の地殻変動の他に電子基準点本体の傾動が含まれ、周辺と整合しない点が確認された。受信環境は、初代の電子基準点設置から10年以上経ち、主に周辺樹木の生長から十分な視界が確保ない点が増えつつある。立木は、春から夏に掛けて葉が茂り、その影響は解析結果に変位を与えている。

本稿では、地殻変動の監視・解析に大きな障害の要因となった保守項目と地震に伴ってピラーが傾斜した例を説明する。さらに観測点周囲の環境変化がもたらす見かけ上の変化についての原因と今後の対策を紹介し、地殻変動でない要因によるオフセットについては補正方法とその有効性を述べる。

(1) 保守

(a) 固定局のアンテナ交換

ここでの固定局とは、解析上の固定点となっている国土地理院構内の「つくば1」を指す。「つくば1」は、旧GEONETにおいてTrimble網約700点、新GEONETにおいては全点の解析の固定点であり、解析上最も重要な点である。「つくば1」は、2003年3月5日に他の点と同様にアンテナ交換・レドーム交換を実施した影響で、同一解析網に属する全点で解析結果にギャップが生じた。幸いこのギャップは、網全体に系統的なスケール変化や回転の有意な変化は殆ど無いことが確認された。

(b) アンテナ交換

アンテナは、外見からアンテナの位相中心の位置を特定することが構造上できないので、交換前後で中心を完全に一致させることはできない。この作業によるギャップは、点毎にピラー頂部の構造が電子基準点の設置年で異なることやレドームの交換・取り付けが同時に実施されたため、点毎に固有の値となった。

(c) アンテナ設置位置の調整

アンテナ設置位置の調整とは、アンテナ交換に併せて位相特性モデル構築の際に基準としたアンテナ取り付け高に統一したことを指す。背景として、アンテナ交換工事が始まった当初は、アンテナの設置位置が統一されないまま交換された。

(d) レドーム取り付け・交換

この工事は基本的にはアンテナ交換日に実施しているが、一部で別の日に行っている点もあり、アンテナ交換同様、解析の時系列データにギャップを生じ、解析結果に影響を及ぼしている。

(2) 電子基準点本体の傾動

軟弱地盤に設置された電子基準点本体が、地震や火山噴火活動の激しい揺れによりピラーやコンクリート基礎の自重によって傾斜や沈下することが傾斜計や傾斜測定によって判明することがある。傾斜計は、Applied Geomechanics社のMD900-TSを採用し、ピラー内部に受信機や通信装置と同様に収納箱に納められている。傾斜量は0.004度の精度で、30分から1時間間隔で南北・東西方向の傾斜が測定できるように調整されている。傾斜測定とは、電子基準点のコンクリート基礎4隅に埋設した固定鉚を水準儀で測定し基礎の傾きから間接的に求める方法、ピラー側面の上下に刻印されたマークをセオドライトで測定する方法、及びピラー内部の垂球の位置から直接ピラーの傾きを求める方法がある。

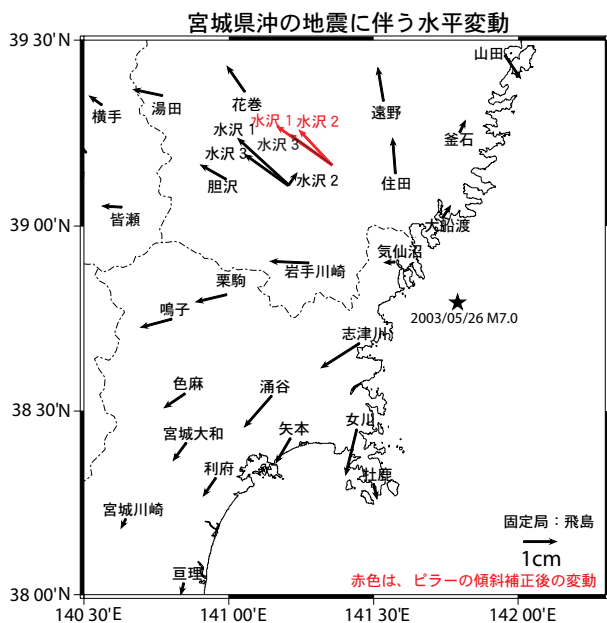


図-31 2003年5月26日に発生した宮城県沖の地震前後の水平地殻変動
基準期間2003/5/16～5/25の平均値に対する5/27～6/5の平均値を示す。赤色のベクトルは、「水沢1」、「水沢2」について地震に伴うピラー傾斜を、傾斜測定結果を元に補正したベクトルを示す。

2003年5月26日に宮城県沖の地震（M7.0）が発生し、震央から放射状に約1.5cmの水平変動が観測された。水沢測地観測所構内に設置されている電子基準点「水沢1」「水沢2」「水沢3」は極めて近い位置に有りながら、「水沢1」と「水沢2」は、「水沢3」や周辺の点と異なった変動が見られ、ピラーが地震によって傾斜した可能性が示唆された。正味の地殻変動を得るには、解析結果に含まれた傾斜の大きさと方向を傾斜計や傾斜測定から推定し補正しなければならない。図-31は、「水沢1」と「水沢2」についてセオドライトで測定する方法から補正し、色分けして補正前後を比較したものである。傾斜計を用いても同等の補正結果となった。傾斜補正後のベクトルは、周辺の点と調和的になり補正が有効であることを実証している。また、2003年7月26日に発生した宮城県北部の地震でも、震源に最も近い電子基準点「矢本」は傾斜計と傾斜測定から東へ約8mm傾斜したことが判明した。

(3) 周辺の環境変化

電子基準点の受信環境は、周辺樹木の生長や構造物の建設によって、著しく悪化する。初代の電子基準点は設置から10年経ち、設置当初良好であった環境は上空が遮られ十分な視界を保っているとは言い難い点が増えつつある。特に立木は、春から夏に掛けて葉が茂り、サイクルスリップやマルチパスを引

き起こし、見かけ上の年周変位となって解析結果に現れる。また、その量と方向によっては、年々バラツキが大きくなり一定方向に変位する場合もある。



写真-7 「館岩」の周囲の状況を東方向から撮影（左）、アンテナと同じ位置での上空写真（右）

写真-7は、福島県の電子基準点「館岩」を東から撮影したものとカメラをGPSアンテナと同一の高さまで上げて上空を広角レンズで撮影した写真である。両写真から北西方向にカラ松が突き出ていることが確認できる。この松の先端で仰角は30度に達し、解析の仰角15度を大きく超えている。図-32は「館岩」のサイクルスリップやマルチパス発生箇所をスカイプロットで表した図である。プロットの大きい箇所がマルチパスの発生度合いを、プロットのラインが途切れた箇所がサイクルスリップを示している。サイクルスリップやマルチパスは北西方向で頻発しており、他に目立った遮蔽が無いことや上空写真で突き出した松の方向と一致していることから、要因はこの松と断定でき、このような障害物は可能な限り伐木や枝払いして良好な状態を維持できるよう努めている。

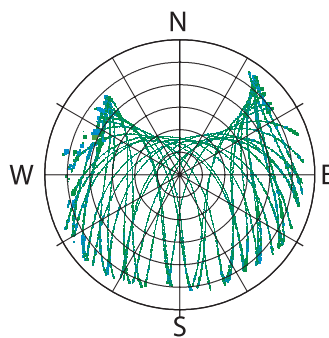


図-32 「館岩」のマルチパスのスカイプロット図



写真-8 2003年7月25日に電子基準点「那智勝浦」の北側樹木を伐木した前後の様子。