

算機能力の不足であったが、それは時代とともに計算機能力が向上したことによって容易に解決された。より困難な問題は、過去の観測データの大部分が未整理のままテープに保存されていたためにアクセスに多大な労力がかかることにあった。この問題を解決するためには、ランダムアクセスが可能なメディアに観測データのアーカイブを構築することが必須である。その設計には高度で複雑なデータベースシステムを用いる必要はなく、データ仕様とその格納方法を規格化するだけで十分である。そこで、データ仕様はRINEXフォーマットで30秒サンプリング24時間分を1ファイルとし、CD-ROMに日付毎のディレクトリを作成して格納するだけという、極めてシンプルなデータアーカイブを設計した。テープから読み出して規格化・整理したデータを順次CD-ROMに保存し、アーカイブを構築していった。なお、現在ではより便利な大容量のディスクアレイを使用しており、CD-ROMはバックアップとしての役目を担っている。データアーカイブのディレクトリ構造はディスクアレイでもCD-ROMでも同様にするので、メディアによらず統一的な扱いが可能である。

以上の様な準備を経て、1996年3月以降のデータが再解析された。これにより長期に渡って均質な解が得られたことにより、地殻変動の議論における不確定要素の軽減に大きく貢献した。Hatanaka et al. (2003) によるF1解の精度評価によると、トレンドや年周変化を取り除いた後の残差のRMSが、水平成分で2.8mm、鉛直成分で10.3mmという結果が得られている。

なお、J0およびJ1で「組み合わせ暦」を使用していたのは、次のような事情によるものである。IGS暦は00:00~24:00UTの時間単位で作成されているが、GEONET観測点のデータ転送は通信コストの安価な深夜に行われていたので、このセッションで解析するには、データ転送をその日の夜まで待たなくてはならなかった。その日のうちに解析結果を得るためには、セッションの開始時刻をデータ転送開始時刻の直前に設定する必要がある。そこで、解析のセッションを00:00~24:00JST (-09:00~15:00UT) として、この時間帯のデータを24:00JST (翌日の00:00JST) 以降に転送することにした。また、衛星軌道暦をこのセッション時間にあわせるために、速報暦の終わりの9時間分 (-09:00-00:00UT) と予測暦の始めの15時間分 (00:00-15:00UT) を組み合わせた「組み合わせ暦」を用いた。実際に組み合わせ暦として用いられたのは、IGS解析センターの一つである欧州軌道決定センター (CODE) による速報暦と予測暦を組み合わせたものである。

(3) 最新の解析戦略 (F2, R2, Q2)

2002年度の更新作業によって、全点を対象とする定常解析が、最終解析 (F2)、速報解析 (R2)、および迅速解 (Q2) の3種類となった。記号は、それぞれFinal, Rapid, Quickの頭文字である。F2はF1を改良したものである (詳細は後述)。3者の解析に使用するモデルは基本的に同一で、異なるのは解析スケジュール、セッション時間、および使用する暦である。R2とQ2には組み合わせ暦ではなくIGS超高速暦を用いる。J0, J1では、セッションを日本時間の00:00で区切っていたが、その理由であった解析結果の遅延の問題はリアルタイムのデータ転送と計算機能力の向上により解決した。そのため、R2の解析セッションは00:00-24:00UTとした。

Q2は6時間のデータウインドウを3時間ずつずらしながら準リアルタイムで解析するもので、GEONETのデータがリアルタイムで転送される体制が整ったことにより可能になったものである。Q2およびR2に用いるIGS超高速暦は、前半が速報暦、後半が予測暦であるが、予測暦は軌道変更などには対応できず、予測が大きくはずれる場合があるので、軌道情報の品質をチェックして使用する必要がある。Q2およびR2では、GEONETの観測点の中から向きの異なる複数の長基線を解析し、その位相残差を基に大きな軌道誤差を持つ衛星を検出し、それを解析から外す処理 (畑中, 2000) を行っている。

1. 3. 2 解析戦略の変更点

F2戦略は旧システムでのF1の解析戦略 (Hatanaka et al., 2003) を基本に、改良を加えたものである。F1との違いを表-5にまとめた。

(1) サブネットワークの廃止

最大の変更点は、サブネットワークの廃止である。F1では、網全体を受信機種種に応じてTrimble網、Topcon網、Leica網の3つのサブネットワークに分割していた。各サブネットワークは、固定点も別々であり、事実上独立に解析されていた。この戦略には、サブネットワーク毎に誤差の違いや、固定点の局地的な変動によって、サブネットワーク同士の間に見かけ上のランダムあるいは系統的な変動が生じるといった大きな欠点があった。そのため、異なるサブネットワーク間の基線では、地理的に近くともノイズは大きく、地殻変動の監視にとっても大きな障害であった。

F2戦略では、サブネットワークを廃止することにより、上記の問題を解決した。網全体を5つの地域クラスターと広域的なバックボーン・クラスターで構成した。これは、F1解析におけるTrimble網の構成方法を網全体に適用したことになる。アンテナ

表-5 F1とF2の主な違い

	F1 (旧システム)	F2 (新システム)
サブネットワーク	おおむね受信機種に応じて3つのサブネットワークに分割	サブネットワークを廃止。
新点追加の扱い	随時、地域クラスターに編入。	947点+ α の基本網と追加網に分割し、新点は追加網へ編入。
解析時の固定点	サブネットワーク毎に異なる固定点	固定点は単一
座標系	ITRF97	ITRF2000
位相特性モデル	Hatanaka et al. (2001a)	Hatanaka et al. (2001a)、宮原他(2003b)
検証可能性	異なるサブネットワーク間の比較	100点あまりの観測点でチェック用の独立な解析を行い、比較・検証に供する。

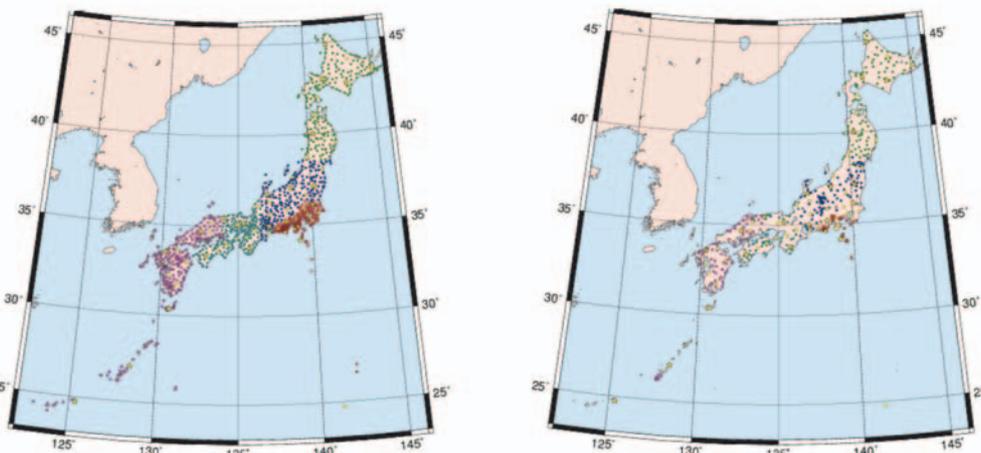


図-21 基本網（左）および追加網（右）。それぞれの網は色分けされた5つの地域クラスターに分けて分散処理される。黄色でプロットされた観測点はBC点で、そのうち星形のもはBB点である。BC点とBB点は両方の網に共通である。

がチョークリングに統一される前の古いデータについては、異なるアンテナや機種が混在することになるが、その影響は位相特性モデルによる補正によってカバーされると考えた。ただし、旧TOPCONのアンテナは位相特性に大きな方位性があるため、これと他機種アンテナの観測点とで基線を組んだ場合の位相残差は仰角依存性のみのモデルでは解消されないが、この点については無視した。ただし、これらの観測点はバックボーン観測点（以下、「BB点」という。）や放射状網の中心点（以下、「BC点」という。）には用いない。

(2) 新点の追加の扱い

網の形態がなるべく時代と共に変化しないように、網全体を長期間にわたってほぼ一定の基本ネットワーク（以下、「基本網」という。）と随時変更される追加ネットワーク（以下、「追加網」という。）の2つに分けた。基本網は2001年度の段階で存在した947点の電子基準点及び4点の軌道追跡局（一部例外あり）が含まれる（図-21左）。一方、追加網は2002年度に追加された253点の他、機動観測点や

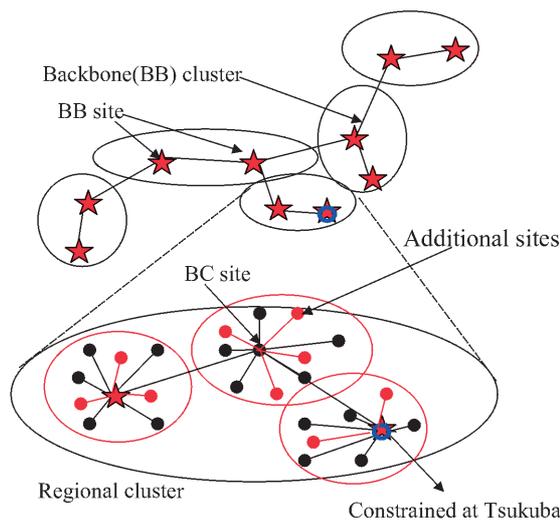


図-22 F2におけるクラスター結合処理の概念図

高精度比高観測点などが含まれる（図-21右）。基本網は前項で説明した方法で解析されるが、追加網の解析戦略は基本網と幾つか異なる点がある（図-22）。

- 1) 基本網と同様に全国を5つの地域クラスターに分割する。基本網との結合のために基本網のBC点を含めておく。
- 2) 各地域クラスターを基本網の解析で得られたBBクラスターの正規方程式ファイルと結合する。
- 3) その際、基本網に含まれる観測点の座標値は、基本網で得られた解に強く拘束し、大気遅延量と座標を推定する。

この網構成と解析スキームでは、基本網で座標解が得られているBC点によって網を固定するので、基本網のように地域クラスターを一つに結合する必要はない。また、基本網と同じBC点を用いるので、異なるクラスターの間で基線間の相関を無視することによる影響は、基本網と同程度以上にはならない。BBクラスターと結合するのは、基本網と同様、大気遅延量の絶対値の推定精度を安定化させるためである。したがって、BB点については大気遅延量の解が全地域クラスターの数(5×2=10)だけの種類が存在する。なお、BERNESE Ver.4.2で扱える観測点番号が999以下なので、一つのネットワーク処理を999点以内に押さえる必要があったことが、このスキームを考案したもう一つの理由である。このことは、計算時間を短縮することにもつながっている。

(3) チェック用解析

サブネットワークによる変動の違いは、地殻変動の監視にとって大きな欠点ではある一方、サブネットワーク固有の問題点を検出する手がかかりでもあった。サブネットワークを廃して全体が一つの網になると、網固有の問題が生じてもそれをチェックする手段がない。そこで、新システムでは日本全体をカバーするように100点程度の網を組んでチェック用に解析し、本解析の結果との比較チェックを可能にしている。

(4) 位相特性モデル

F1 (及びJ1) では、アンテナ機種と架台タイプの組み合わせ毎に検定された位相特性モデル (Hatanaka et al., 2001a) が用いられたが、F2 (及び、R2, Q2) においても基本的な方針は同じである。2002年11月から2003年7月の間に、ほとんどの観測点のアンテナがDorne Margolin T型のチョークリング・アンテナに置き換えられたので、このアンテナタイプと各架台の組み合わせによる位相特性の検定を行って得られたモデル (宮原ほか, 2003b) を適用した。ただし、電子基準点の改造作業との関係で幾つか留意すべき点がある。

まず、適用する位相特性モデルはアンテナ及び架

台タイプのみ依存するものであるが、現実には観測点毎に個体差がある。特に、ある架台タイプはアンテナ設置位置に多少の自由度があるため、観測点によって架台上面からアンテナ底面までの高さ(「アンテナ高」と区別するため、以下では「アンテナ設置高」という。GEONETでは、アンテナ参照点と座標参照点は原則として一致しているため「アンテナ高」はゼロである。)がまちまちである。この影響によって、高さ方向に数cm程度のバイアスが生じることが宮原ほか(2003a)により示されている。このばらつきを軽減するために、2003年の冬から夏にかけて、アンテナ設置高を基準位置へ調整する作業が行われた。厳密に言えば、異なるアンテナ設置高毎に位相特性が異なるので、位相特性は調整前と調整後で異なる。しかし、全ての架台タイプについてアンテナ設置高毎に位相特性モデルを検定するのは極めて困難である。また、アンテナ設置高だけではなく架台の材質の違いやレドームの個体差等によっても位相特性は微妙に変化する。アンテナ設置高の効果だけを厳密に検定しても、座標時系列上のオフセットを完全に消去するほどの効果は期待できない。そのため、調整前後にかかわらず基準位置で検定した位相特性モデルを適用することとした。したがって、解析結果得られた座標の時系列には、アンテナ設置高の調整量のオフセット及びこれに伴う位相特性の変化によるオフセットが含まれる。

1993年に設置されたアンテナ架台のほとんど多くはレドームのないタイプであったが、今回の改造でレドームを設置した。一方で、改造に伴うアンテナ交換や、前述のアンテナ設置高の調整も行われたが、これらの作業は、必ずしも同じ日に行われていない。そのため、観測点によっては、レドーム設置前にチョークリング・アンテナが使用されたり、従来のアンテナがレドームと一緒に使用される、という状況が一時的に生じた。しかし、これらのケースに対して位相特性を厳密に検定するのは極めて煩雑で、特殊なケースのためにいたずらにモデルを複雑にすることになる。そこで、アンテナ交換とレドームの設置が同時に行われたものと見なして、全てアンテナ交換のタイミングで最終的な改造後の位相特性モデルを適用することとした。したがって、観測点の改造が最終状態になる前の解析結果は、厳密な検定結果を適用したものではない点に注意する。

1. 3. 3 解析結果の精度

地震・火山活動に伴う地殻変動の比較的少なかった1996-1999年のデータを用いて、F1とF2の基線時系列を比較した。図-23は、八郷(93002)を起点とした各点の基線ベクトルの時系列から直線トレンドと年周・半年周成分を推定して差し引き、残差の

RMSを基線長を横軸にプロットしたものである。グラフから明らかなように、F1とF2の精度には全体として大きな差はないが、特に八郷からの距離の長い所でF1よりもF2の方が精度のよい観測点がやや目立つ。これらのほとんどはF1においてTopcon網に属していた観測点である。これは、F1解ではTrimble網とTopcon網の相対的な変動があるため、Trimble網に属する八郷を固定すると、Topcon網の

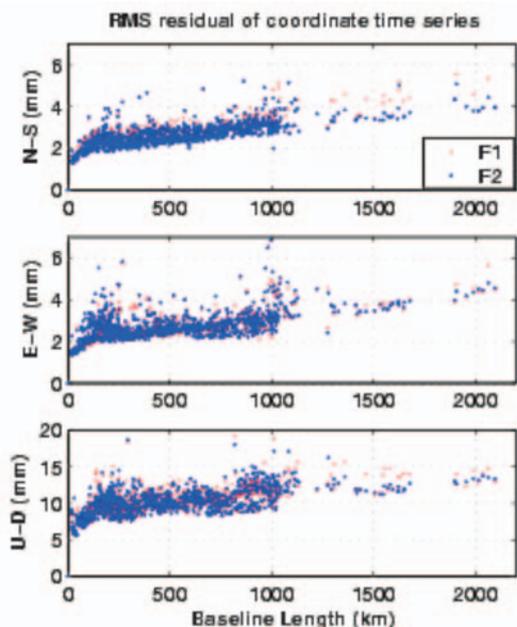


図-23 基線長を横軸に、F1解（赤）とF2解（青）の基線の長期再現性（直線トレンドおよび年周・半年周成分を差し引いた残差のRMS）をプロットしたグラフ。上から南北、東西、および上下成分。

観測点の変動が大きくなるためと思われる。

図-24はF1とF2の基線時系列の比較例である。図-24左に示すのは、F1で異なるサブネットに属していた観測点を結ぶ基線の例であるが、F2がF1よりも明らかにばらつきが小さくなっている。これまでサブネットワーク間でモードの異なっていたノイズが、サブネットワークの廃止して一つのネットワークにしたことによって共通モードになった効果と思われる。

一方、同一サブネット内の基線については、F1とF2で短期的な変動や年周変化にはほとんど差が見られない（図-24右）。このことは、Hatanaka (2003a) によるクラスター結合の強化が機能して、網の変更によらず安定な解が求まっていることを示唆している。また、サブネット内の基線が異機種混合になったことによる悪影響が心配されたが、少なくとも24時間セッションの解析ではその影響が極めて小さいことがわかる。このことから、基線ベクトルの短期的変動の要因を考える上で、網の構成の違いは考慮から排除できる。また、F1の同一サブネット内の基線に関してはF1とF2の間にほとんど差が見られないことから、F1におけるサブネットワーク間のノイズのモードの違いの原因が、各サブネットワークの固定点に固有なノイズであることが伺える。

図-23と同様の計算でF2とQ2の精度を比較したものを図-25左に示す。ただし、2003年9月26日に発生した十勝沖地震の余効変動による速度変化の影響を避けるため、計算には2003年11月1日から2004年1月19日までの約2ヶ月半の解析結果を用いた。

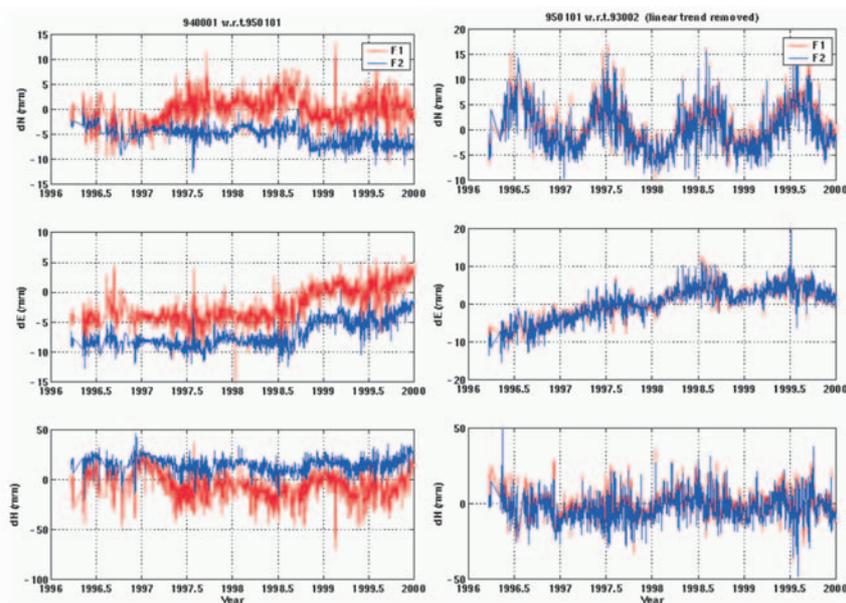


図-24 F1解（赤）とF2解（青）の基線時系列の比較例。異機種基線（猿払-稚内；左）および同機種基線（八郷-猿払；右）の例を示す。

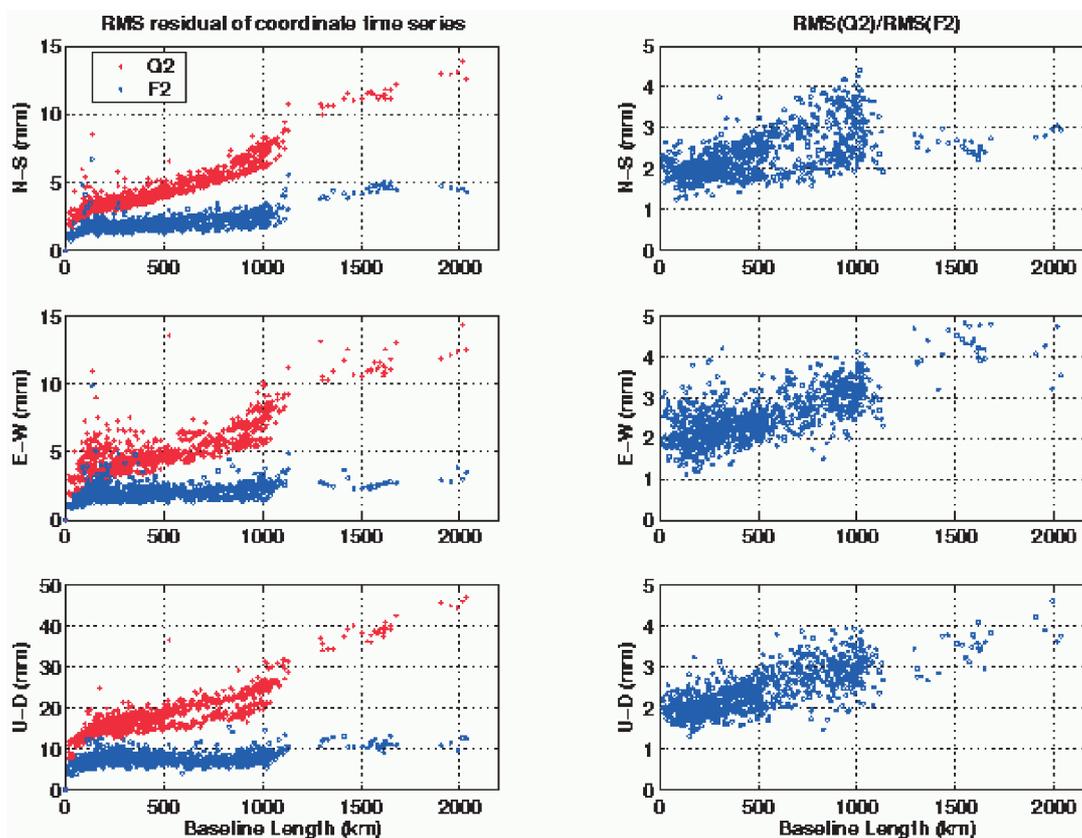


図-25 基線長を横軸に、Q2 (赤) とF2 (青) の直線トレンドからの残差RMS (左)、およびF2に対するQ2の残差RMSの比 (右) をプロットしたグラフ。それぞれ、上から南北、東西、および上下成分。

また期間が短いため年周・半年は除去せず、直線トレンドのみを差し引いて残差のRMSを計算した。したがって、図-23がいわば4年間の長期再現性を表すのに対し、図-25左はこの2ヶ月半の短期再現性を表す。このグラフからは、F2解の精度が距離にそれほど大きく依存しないのに比べて、Q2解は距離による精度の低下が大きいことが明瞭に読みとれる。これは主に暦の違いを反映したものと考えられる。単純にデータ量の違いから予想される標準偏差の増大は2倍である。図-25右では、200~300km以内の基線で残差RMSの比が約2であり、ほぼ予測通りの精度低下になっていることがわかる。距離が大きくなるにつれて比が大きくなるのは、超高速暦の誤差の影響が距離に比例して効いているためと考えられる。データ量の違いを考慮すれば、Q2解析は200~300km以内の距離において、F2と比べても遜色のない精度を持っているといえる。なお、Q2のグラフが数100kmから1000kmまでの距離範囲で2列に分かれているのは東北日本と西南日本で差があるため、東北日本の方が西南日本に比べて若干精度がよい。

1. 3. 4 定常解析のさらなる改良に向けて

本節の最後に、定常解析システムのさらなる改良の可能性やアイデアについて触れておく。

BERNESE ver. 4.2の網結合プログラムが大気遅延勾配パラメータを扱えないため、今回の改良では、大気遅延勾配の推定オプションの組み込みは見送られた。しかし、大気遅延勾配が特に夏季における座標水平成分のノイズの一因であり(Miyazaki et al., 2003)、また、座標南北成分の年周変化の原因の一部でもあるので (Hatanaka, 2003b)、その推定による精度向上は極めて有望である。したがって、大気遅延勾配の推定は、将来のシステム改良において優先すべき事項の一つであろう。

GEONETの平均点間距離は20km程度だが、地域クラスターを結合するための背骨であるBBクラスターの点間距離は数100kmになる。そのため、BBクラスターのバイアス整数化率は地域クラスターに比べて若干低い。これを改善するための方策は2つほど考えられる。一つは電離層モデルの利用である。ワイドレーン・バイアス整数化の際には電離層ノイズが邪魔になるが、電離層モデルを利用すれば、それをある程度補正することが可能である。もう一つは、基線毎のバイアス整数の際に基線の中間地点付近の観測点を何点か含め、ネットワークモードで

(つまり基線間の相関を考慮して) 整数化することである。これによって、実質的に点間距離の短い基線を接続したのと同様の効果が得られるものと予想される。

現在の定常解析では衛星の仰角マスクを15度に設定しているが、低仰角衛星のデータを重みを下げて使用し、大気遅延勾配の推定と組み合わせることによって、精度が向上するという研究もある (Rothacher et al., 1998)。一般に低仰角衛星のデータはマルチパスなどのノイズが大きいのが欠点であり、悪条件をくぐり抜けて、大気遅延パラメータと座標鉛直成分の分離がよくなるというメリットを引き出せるかどうかは鍵である。リアルタイム接続された電子基準点では、リアルタイム・データの民間利用の便宜を図るために、受信機の仰角マスクの設定が15度から5度に変更されたので、低仰角衛星データの効果の検証は可能である。電子基準点の場合、上空視界の限られた観測点も多いので効果の程はわからないが、検証する価値はあるだろう。

地震火山活動への緊急対応のためには、迅速さだけでなく精度も要求される。定常解析においては、Q2は迅速さと時間分解能を優先させるために6時間のセッション、R2は精度を優先させるために24時間セッションとなっている。しかし、図-25右に示したように、距離200~300kmまではQ2とF2の精度の差はデータ量の差でしかない。したがって、Q2の解を24時間分集めて重み付き平均を取るだけで、24時間セッションの解析結果と同程度の精度が得られるはずである。さらにこれを移動平均の方式で行えば、24時間セッションと同様の解析結果を3時間毎に得られる。これは座標時系列に対してローパス・フィルターをかけることに相当するが、カルマンフィルターなどと違って基底関数がコンパクトなため、各時点の結果に寄与するデータの時間範囲が明確で、イベントのタイミングを見極めるのが重要な場面に適している。現状では24時間解析の精度の結果を1日に1度しか得られないが、この極めて単純なスキームを導入することによって24時間解析と同程度の精度がより高い頻度で得られるようになれば、地震や火山活動時の緊急対応における判断に大いに役立つであろう。

今回の改良ではリアルタイム解析は定常解析には位置づけず、緊急時に限られた基線で行うという扱いになっている。しかし、将来的には全点でリアルタイム解析を定常的に行うことも夢ではないであろう。その精度はQ2よりも落ちるであろうが、大きな地殻変動に対してはより迅速な対応が可能になる。その実現のためには、リアルタイム解析の研究及び運用経験を積んだ上で、GEONETのような大規模な観測網でリアルタイム解析を行うための解析およ

び運用のスキームを確立することが必要であろう。

2. 国家基準点としての電子基準点

2.1 測地成果2000と電子基準点

国土地理院では、平成13年6月20日に測量法を改正した。改正の要旨は、日本測地系から世界測地系への移行である。

日本測地系から世界測地系に移行するにあたり、経緯度原点数値及び基本三角点の成果等を変更する必要迫られ、測地部を中心に「測地成果2000」と呼ばれる宇宙技術に基づいた高精度な基準点体系が構築された。この「測地成果2000」を算出するにあたり、次のような手順が取られた。ただし、ここでは電子基準点に関わった主要な部分のみに留める。

2.1.1 国際VLBI測量

国際VLBI測量は、1992年以降、米国航空宇宙局 (NASA) との共同研究により国際的な共同観測事業である個体地球力学事業 (DOSE) 及び地球回転連続観測事業 (CORE) に参加し、国際超長基線測量事業として国際VLBI測量を実施してきた。この測量によって、日本測地系を世界測地系である国際地球基準座標系 ITRF94 (国際地球回転観測事業により、VLBI, SLR, LLR, GPS等の宇宙測地技術を用いて決定された地球重心を原点とする三次元直交座標系で、1994年までの観測データを用いて1996年に決定された。以下、「ITRF94」という。) に結合した。

2.1.2 国内VLBI測量

鹿島VLBI観測局を基準として、国内VLBI測量を可搬型VLBI観測装置により、つくば、新十津川、水沢、鹿野山、砺波、海南、相良、新富及び父島の9箇所において実施した。この測量で求められるのは、鹿島VLBI観測局を中心としたそれぞれの測量地点への基線ベクトルである。この基線ベクトルを用いて鹿島VLBI観測局のITRF94座標値から各測量地点のうち、新十津川、新富、海南、水沢、相良、父島のITRF94座標値を求めた。

2.1.3 電子基準点測量

電子基準点はVLBI観測局と結合することにより、ITRF94に準拠した座標値を高精度で決定することができる。この電子基準点591点並びにつくば、新十津川、父島及び鹿屋のGPS衛星軌道追跡局4点を全国31のクラスターに分割し、GAMIT (精密基線解析ソフト) により解析計算を行った。31分割した理由は、GAMITの解析能力を考慮して1クラスター当たりの電子基準点を最大30点としたことと、GAMITが対応していない異機種間の基線ベクトル解析を回避するためである。この計算は、1996年12月27、28、

31日及び1997年1月1, 4, 5日の6日間それぞれの日毎に、それぞれのクラスターごとに、つまり6日間×31クラスター、合計186セットの基線ベクトル解析計算結果を得た。

2. 1. 4 取り付け観測

鹿島VLBI観測局では、VLBIの示す座標の位置がアンテナ中心であるため観測機器を設置できない。よって、電子基準点網に結合する参照点を設置した。新十津川VLBI観測局では、金属標の上にアンテナが設置されているため偏心点を設置した。その他のVLBI観測局では、建設時に金属標が設置されている。この参照点、偏心点及び金属標（以下、「VLBI観測点」という。）と2. 1. 3で使用された点の周囲の電子基準点との解析計算を行った（砺波、鹿野山は除く）。同様に日本経緯度原点に隣接する三角点「東京大正」と周辺の電子基準点との基線ベクトル解析計算を行った。

2. 1. 5 GLOBK（調整計算ソフト）によるデータ結合

2. 1. 2, 2. 1. 3で得られた、VLBI観測点7点、電子基準点591点、GPS衛星軌道追跡局4点及び三角点「東京大正」の計596点の基線ベクトル解析結果をGLOBKにより結合し、1996年12月27, 28, 31日及び1997年1月1, 4, 5日のそれぞれの日毎、すなわち6日分の基線ベクトル解析結果データを整えた。

2. 1. 6 VLBI観測点固定による平均計算

鹿島VLBI観測局において、繰り返し観測の結果求められた速度ベクトルを用いて、1997年元期の座標値を決定した。この鹿島の速度ベクトルを用いて、国内VLBI測量による新十津川及び海南のVLBI観測局の1997年元期の座標値を求め、鹿島、新十津川及び海南におけるVLBI観測点をITRF94における1997年元期の座標値で固定し、2. 1. 4で得られた6日分の基線ベクトル解析データを用いてそれぞれの日毎にGLOBKにより平均計算を行った。

2. 1. 7 座標変換パラメータ

2. 1. 5で得られた平均計算結果を、三角点「東京大正」、水沢、相良、新富及び父島のVLBI観測点それに電子基準点ごとの平均値を求めるため表計算ソフトに読み込み624点の6日間平均のITRF94における1997年元期の座標値を計算した。この中から5日分以上の解析結果を持つ電子基準点595点と三角点「東京大正」をITRF94における1997年元期の座標値として採用した。

三角点「東京大正」において、日本測地系測量成

果との比較により国際地球基準系ITRF94から日本測地系への変換パラメータを求めた。

2. 1. 8 基準点座標97

電子基準点595点のITRF94座標値を座標変換プログラムにより、ITRF94の三角点「東京大正」において接合したGRS80楕円体上の座標に変換した。三角点「東京大正」において、ベッセル楕円体を接合し、電子基準点595点の歪みのないITRF94座標をベッセル楕円体に固定した。

この測地系をTokyo97と定義し、座標を基準点座標97とした。

2. 1. 9 新設された電子基準点

2. 1. 5で座標を決定できなかった電子基準点356点については、GAMITが異機種間の基線解析に対応することになったため、全国を数点単位の117のブロックに分け、1997年8月1, 2日の2日間のデータを使用し、GAMITにより基線ベクトル解析計算を行った。この結果を座標変換プログラムによりGRS80楕円体上の座標及び基準点座標97に変換した。

電子基準点及び高度基準点測量等により電子基準点と結合された三角点の基準点座標97を座標変換プログラムにより、ITRF94系に準拠したGRS80楕円体の座標に変換した。この値が新しい世界測地系によるものであり、三角点の座標として公表されている。

このように、電子基準点は世界測地系への移行に当たり大きな役割を果たしてきた。

測量法に基づく電子基準点の成果には、アンテナ位相中心をアンテナ下部に投影した位置の座標と付属金属標中心の座標がある。これに対し、三角点や水準点の成果は一つしかない。この違いは、電子基準点を利用してトータルステーション等により地上測量を実施するにあたり、器械をアンテナ中心に設置することが事実上不可能なため、付属金属標を設置し、その利用に供しているからである。

電子基準点は、地殻変動検出のみならず地上測量による公共測量等に基準を与える国家基準点であることを忘れてはならない。

2. 2 電子基準点の成果決定手法

2. 2. 1 成果決定理論

電子基準点の成果は、基準点体系分科会の提言に基づき、測地成果2000構築の骨格を担う目的により、測地部測地第2課において計算された。当初は、測地観測センターで実施しているGEONET定常解析（Bernese解析）の最終解（F0解）をSINEXフォーマット（Solution Independent EXchange）に変換したデータを用いてGLOBKにより調整計算するこ

とにしていたが、点検シュミレーションの結果よりGAMITによる精密基線解析結果を用いGLOBKによる調整計算で決定することに変更した。点検シュミレーションの内容は、Bernese解を変換したSINEXデータとGAMITによる解析結果をそれぞれGLOBKで仮調整計算し、その座標値を比較した。その結果、長さに換算して5 cmを超える座標差をもつ電子基準点が19点存在することが分かった。このため、当該電子基準点と隣接する電子基準点を選択し、当該電子基準点と選択した電子基準点間の座標差を求めた。また、Berneseにより当該電子基準点と選択した電子基準点の再解析を実施し再度座標差を求めた。この座標差同士を比較したところ、SINEXデータを使用した結果に大きな誤差が含まれていることが判明した。この誤差は、Bernese解をSINEXデータに変換する際に、拘束条件が自動的に付加されることが原因となっている可能性があるため、SINEXデータは成果算出には使用しないこととした。一方、GAMITによる精密基線解析及びGLOBKによる調整計算は、高度基準点測量でも採用されている処理手法であり、両ソフトウェアは同一機関（マサチューセッツ工科大学及びカリフォルニア大学スクリプス海洋研究所）で開発されているため、解析結果をSINEXデータに変換することなく直接取り込める。このような状況により、GAMITによる精密基線解析を採用することとした。

GAMIT解析に用いる電子基準点データは、①データの元期をあわせる、②品質のよい日のデータを使用する、という理由より、1996年12月27日、28日、31日及び1997年1月1日、4日、5日の6日間の24時間観測データを使用することにした。この期間に運用している電子基準点は612点あり、その他にGPS衛星追跡局4点を含めた計616点のデータが精密基線解析に用いられた。基準座標値としては、ITRF94の新十津川、水沢、鹿島、海南、相良及び新富の国内VLBI観測局6局を解析に使用した。精密基線解析に用いたGAMIT (Ver.9.56) は、最大解析測点が30点に設定されていること、異機種間の解析に対応していないことから、Trimble受信機とAshtech受信機の電子基準点に分割し、同機種の解析となるよう616点の電子基準点を31のクラスターに分割し解析を行った。各クラスターは、隣接した全てのクラスターと重複した電子基準点を2点以上含むように構成され、クラスター間の整合性をもたせている。各VLBI観測局と一等三角点「東京大正」は、隣接する電子基準点と取り付け観測を行い、同様に精密基線解析を実施した。各クラスターの解析結果や取り付け観測結果は、日毎にGLOBK (Ver.4.12H) により結合され、調整処理された座標値を求めた。調整計算の固定座標は、鹿島、新十津川及び海南の

VLBI観測局とした。各電子基準点の最終的な座標成果は、GLOBKにより求められた6日分の座標値の平均値を採用したが、データが6日分ない電子基準点については、求められた座標値が5日分ある場合に限り、その平均値を座標成果として採用した。これにより595点の電子基準点成果が決定された。

なお、データ欠測により成果が算出されなかった21点の電子基準点及びその後新設した電子基準点については、以下の条件に基づき追加計算を実施し、356点についてその後順次座標成果が決定された。

- 1) 観測データは、設置してから地盤が安定する時間を考慮して、設置後1年以上経過したものを標準として使用する。
- 2) 使用する観測データは、24時間の複数日とし、その品質を確認する。
- 3) RINEXデータ、精密暦を用い、異機種間解析が可能なGAMIT (Ver.9.60) により解析処理する。
- 4) 調整計算は、GLOBKによる調整計算又は三次元網平均計算で行う。
- 5) 固定点は、受信機タイプに関係なく、既に座標値が決定している周辺の電子基準点3点以上を使用する。

これにより、測地成果2000構築の骨格網を担う947点の電子基準点とGPS衛星追跡局4点の計951点の成果が決定された。

2.2.2 成果決定作業要領について

電子基準点の成果決定に係わる要領は、資料「電子基準点維持要項（案）」として存在している。新設電子基準点の成果算出や復旧成果は、現状ではこの内資料「電子基準点維持要項（案）」に基づき処理されている。以下に成果決定に関する項目を抜粋記載する。

第12条ニ(6) 成果の算出

新設、移設又は再設を行った場合は、以下の要件により成果の算出を行う。

・電子基準点

設置後半年経過後に以下の計算を行い決定する。それまでの期間は、定常解析で計算される精密基線解析結果を暫定成果とするが、公共測量での成果の使用を認めないことを原則とする。

基線解析	既知点 (電子基準点)	3点以上 (原則)
	解析ソフト	精密基線解析ソフト
	観測時間	連続24時間*2日以上
	使用暦	精密軌道暦
	日間較差	水平10mm以内 比高20mm以内
平均計算	三次元網平均	連続24時間*2日以上

これとは別に、地震等の地殻変動により電子基準点の成果改定が必要な場合がある。この場合も原則的には上記要項に沿って新成果を算出することになるが、離島等では、既知点とする周辺電子基準点に限られるうえ、成果としては島内又は周辺の局所的な相対関係のみが重要であることから、以下の成果改定手法が用いられている。

GEONETによる定常解析の精密暦解析から、推定した1997年1月1日と成果更新時の座標値を求め、この座標値から1997.0エポックから成果更新時までの間の変動量を計算し、その変動量を電子基準点成果に加えて1997.0エポック時の新成果とする手法である。この手法は、精密暦解析によって得られた座標時系列が線形的な変化と仮定し、座標値と変動量を算出するものである。

計算手順は

$$(dX,dY,dZ)_{97} = (X,Y,Z)_{97} - (X_0,Y_0,Z_0)_{97}$$

$$(dX,dY,dZ)_{xx} = (X,Y,Z)_{xx} - (X_0,Y_0,Z_0)_{xx}$$

$$(X, Y, Z) = (dX,dY,dZ)_{xx} - (dX,dY,dZ)_{97}$$

$$(X,Y,Z)_{new} = (X,Y,Z)_{old} + (X, Y, Z)$$

ただし、座標値推定には精密暦解析の各成分の分散共分散行列を重みとして用いる。

(X,Y,Z)：成果更新各電子基準点座標値

(X₀,Y₀,Z₀)：つくば1 (92110) 座標値

添字97,XXは1997.0及び成果更新時の推定座標を表す。

(X,Y,Z)_{new}：新成果座標値

(X,Y,Z)_{old}：旧成果座標値

また、測量法施行規則で電子基準点標識の形状として明記されている付属金属標の成果算出要領は、平成15年9月24日に「電子基準点付属標取付観測作業要領」として改定された。この要領によると、付属標の成果は、電子基準点成果を基にGPS測量機を用いた1時間以上の静的干渉測位方式により決定することになる。その際の付属標のアンテナは、GPSアンテナタワーを用いて電子基準点とほぼ同高とすることになっている。また、付属標の標高は、ジオイドモデルにより得られた楕円体高からジオイド高を減じて求めることに統一された。

2. 2. 3 精密基線解析ソフトウェア

GPS連続観測システムでは、世界の最先端技術によって開発された学術用ソフトウェアを用いて精密基線解析を行っている。精密基線解析ソフトウェアは、ベルン大学で開発されたBernese、マサチューセッツ工科大学とカリフォルニア大学スクリプス海洋研究所で開発されたGAMIT (GPS At MIT) /GLOBK (Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program) 及びカリフォルニア工科大学とNASAジェット推進研究所で開発されたGIPSYを用

いている。これらのソフトウェアでは、長距離や高低差のある基線解析で大きな障害となっていた大気中の水蒸気による電波遅延の問題を推定パラメータで補正することで高精度な解析結果を得ることができる。電子基準点成果は、先に述べたように、検討の結果GAMIT/GLOBKによって算出されている。なお、地殻変動の解析が目的であるGEONETの定常解析、緊急解析ではBerneseが用いられている。

各精密基線解析ソフトウェアによる解析方法は次のとおりである。

(1) Bernese

Berneseによる基線解析では、アンテナ位相の問題を回避するために同一機種によるグループを作り、機種ごとに基線解析を行っている。解析手順は、同一受信機ごとに骨格となる電子基準点とそれに付属する電子基準点のグループで構成され、第1段階として「つくば」(国土地理院構内の電子基準点)を固定して日本列島を縦断する形で100~300km間隔で骨格となる基線解析を行っている。この後に第2段階として地域毎のブロックで処理を行い各観測点の座標値を決定している。「つくば」の固定点は、国際観測網によって維持されているつくばIGS局(TSKB)のITRF座標系を基に決定されているので、各観測点は毎日ITRF座標系に準拠して決定されていることになる。

(2) GAMIT/GLOBK

GAMIT/GLOBKは、基線解析計算を行うGAMITと調整計算を行うGLOBKの2つのソフトウェアで構成されている。電子基準点成果算出で用いられたGAMIT解析では、アンテナ位相の問題を避けるために機種ごと、地域ごとのブロックに分けて、そのブロック間では2点以上の観測点を重複させて整合性を持たせている。GLOBKでは、GAMITの出力ファイルであるブロックごとのファイルをカルマンフィルタ・アルゴリズムを用いて結合し、全体的な解を算出して座標値としている。

(3) GIPSY

GIPSYは、精密な衛星軌道と時刻を用いることで精密な1点測位を可能としている。GIPSYでは、衛星軌道や時刻が精度良く固定されたときに観測点の個々の位置、対流圏遅延量の補正等が他の観測点と無関係になり1点だけの小規模な線形系を解いている。このために、受信機の種類に束縛されることがなく観測点の座標値を求めることができる。

2. 2. 4 電子基準点標高の改算

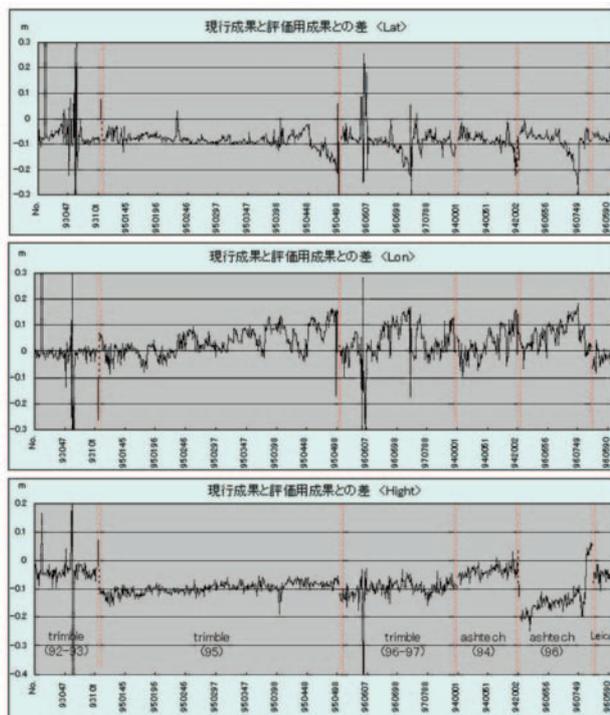
電子基準点標高成果は、先に述べたようにGAMITによる精密基線解析結果が基になっている。解析結果をGLOBKによりVLBI観測局のITRF94座標を固定し求められた座標値からGRS80楕円体高を算出し、ジオイド2000により標高を算出している。電子基準点の楕円体高は、ジオイドモデル構築等の基準に用いられているが、現在の知見からは計算過程に問題があったことが判明している。その最大の要因は、電子基準点のアンテナ架台形状（写真－3）とレドーム等の違いにより生じるアンテナ位相特性を考慮せずに計算したことである。



写真－3 アンテナ架台形状

このため、電子基準点の設置年次及び機種の違いによる系統的な格差が生じていることが分かっている。図－26は現行成果とGEONETにおいてアンテナ架台、レドーム形状毎に位相特性モデルを構築し、これを導入した最終解（F1解）から求めた評価用成果との比較である。緯度、経度、高さ方向とも設置年次及び機種の違いによる系統的な格差が鮮明に現れている。特に高さ方向の格差が大きく、最大10数cmに及んでいることが分かる。

測地観測センターでは、平成14年度に電子基準点改算作業の一環として、GEONETの高精度化を目的にほぼ全電子基準点のアンテナ機種をDorne&Margolin T型のチョークリングアンテナに交換した。さらにアンテナ交換時にアンテナ取り付け高を、位相特性モデル構築の際に基準とした高さに統一した。これにより成果表に記載されているアンテナ高（定数）が変更され、物理的にもアンテナ底面の高さも変更しているため、標高改算の良い機会と判断し電子基準点の標高改算を行うことにした。緯度、経度の水平位置については、系統的な較差は小さく一般の測量では影響が少ないこと、及び改算により三角点をはじめとする各種基準点との成果隔離が生じ、これに伴う影響が大きいことを考慮し見送ることにした。



図－26 現行成果と評価用成果との比較

2. 2. 5 標高改算手法

標高改算の手法等は、「電子基準点成果の維持管理に関する連絡委員会」の基に測地観測センター内の「電子基準点標高改算WG」を設けて、複数回の議論によりセンター案を作成した。この間の議論で、改算成果算出方法の幾つかを検討している。前述の「電子基準点維持要項（案）」に基づき、2日以上の24時間精密基線解析を行い決定する方法、離島等の改算で用いている方法等も検討したが、計算量が多くなり、現在最も高精度な解析結果を用いるということ念頭に以下の方法案を採用した。

新GEONETのデータ解析結果であるF2解を用いる。F2解は均一な解析仕様で再解析されているため、アンテナ交換が全て終了してから固有な地殻変動が生じていない期間までのデータを用いて座標値を推定し、最も地殻変動が定常（一定）である期間から、直線近似で各点の速度ベクトルを算出して基準エポックの座標値を推定することにした。計算工程は以下のとおりである。

- 1) 2003.9.1の各電子基準点の座標値を算出（期間：2003.8.12～2003.9.21）
- 2) 1998.1.1～1999.12.31の2年間のデータより各点の速度を算出
- 3) 1)の座標値に2)の速度を補正し、1997.0エポックの座標値を算出
- 4) F2解の座標系はITRF2000のためITRF94へ座標変換