

国際GNSS事業（IGS）の活動における 国土地理院の貢献

キーワード：GPS
IGS
座標系

地震調査官

畑 中 雄 樹

国際GNSS事業（IGS）の活動における国土地理院の貢献

1. はじめに

GPS (GNSS) の観測技術は 1990 年代に飛躍的な進歩をとげ、今では VLBI や SLR 等と共に精密測地観測の中心的な技術と見なされている。この飛躍的な進歩には、精度の高い座標系や精密衛星軌道情報が国際協力によって維持されていることが背景にあり、そのために重要な役割を果たしているのが国際 GNSS 事業 (IGS; International GNSS Service) である。IGS のプロダクト (生産物、成果) として、GPS ユーザーにとって最もなじみ深いのは GPS 衛星の精密暦 (IGS 暦) であろう。しかし、IGS の活動はそれだけに留まらず、解析手法やモデルの高度化、新たなプロダクトの開発、データやプロダクトの共通フォーマットの普及など、幅広く GPS (GNSS) に関する基盤を提供し、地球科学を初めとする様々な分野に貢献している。

国土地理院は、一方で IGS のユーザーである。特に国土地理院が全国に 1200 点以上展開している電子基準点のルーチン解析には IGS 暦を使用するのは勿論のこと、IGS で培われてきた解析モデルの知見を解析システムに取り入れることによって、IGS 暦との整合性を保ちつつ解析結果の精度を高めている。したがって、日本列島の地殻変動の監視にとっても IGS は重要な要素である。その一方で、国土地理院も早くから IGS の活動に参加し、IGS 点 Tsukuba (TSKB) および Syowa (SYOG) を運用し、また地域準解析センターとして IGS 参照フレーム構築の一旦を担っている。

本講演ではまず、IGS を簡単に紹介し、IGS の多岐にわたる活動のうち特に基本的な座標系の維持に関するものに焦点をあて、その内容および国土地理院の役割について解説する。

2. 国際 GNSS 事業 (IGS) とは

IGS は、地球科学の研究や学際的な応用等に資するために、グローバル衛星測位システム (GNSS) の標準的で最高精度のデータとプロダクトを提供することを使命として、1994 年に国際測地学協会 (International Association of Geodesy; IAG) の基に設立された事業である (設立当初の名称は国際 GPS 地球力学事業)。表-1 に、IGS terms of reference (IGS 委任事項) に書かれている IGS の努力項目、プロダクト、支援目的、構成をまとめる。IGS では、国際協力による参加機関の自主的な運営によって、全世界的な GPS 観測網 (図-1) の維持、データ流通、解析が行われ、精密暦を初めとする GNSS 関連の高精度なプロダクトをユーザーに提供している。また、IGS の活動を通して開発された GNSS に関する各種の仕様や共通データフォーマット等は、事実上の標準として支持されている。これらの活動を通して、地球科学その他の GNSS の応用の促進に貢献している。

IGS では、衛星軌道決定などの解析を複数の解析センターがそれぞれの解析ソフト・戦略を用いて重複して解析し、その結果を結合することで、IGS としての最終的なプロダクトを生成している。こうした手続きは、解析結果の冗長性を利用して精度評価を行い、信頼性を高めているだけでなく、複数の解析センターが切磋琢磨することにより、新たな技術革新を促進する要因ともなっている。

3. IGS による ITRF 基準座標系の実現

ITRF 座標系は、国際地球回転及び参照系事業 (IERS; International Earth Rotation and Reference Systems Service) が、VLBI、SLR、GPS 等の宇宙測地技術によって構築・維持している座標系で、現代測地学の粋を集めた世界最高水準の精度を持つ座標系である。この座標系にアクセスするには、ITRF 系の座標値を持った観測点との取り付けが必要である。しかし、一般ユーザーが VLBI 点や SLR 点から取り付けるために VLBI 観測や SLR 観測を行うことはコスト的にみても現実的ではないので、予め座標

表－1 IGS の内容 (IGS Term of Reference より)

努力項目	<ul style="list-style-type: none"> 高精度で信頼性の高い GNSS データとプロダクツの、オープンかつ迅速な提供 IGS のプロダクツ、標準、慣用の広い受容の促進 最先端の専門的知識、意欲的なプロジェクトやアイディアの追求による革新 ユーザーのニーズの変化への対応を通じた、新たな成長の機会の探索・追求 IGS 文化 (同意識、オープンさ、包括性、協力、等) の維持・育成 効果的なリーダーシップ、管理、経営による、自発的な組織の維持
プロダクツ	<ul style="list-style-type: none"> 高精度 GPS 軌道情報及び関連情報 地球回転パラメータ IGS 追跡局の座標及び速度 GPS 衛星および追跡局の時計情報、時間スケールプロダクツ 電離圏情報 大気圏情報
科学上の支援目的の例	<ul style="list-style-type: none"> 国際地球固定座標系 (ITRF) へのグローバルなアクセスの実現および改良 固体地球変形のモニター 地球回転のモニター 水圏(海面、氷床、他)の変化のモニター 科学衛星の軌道決定 電離層モニター 気候学的研究、いずれは気象予報モデル 時刻同期、時計 (周波数) 比較
構成	<ul style="list-style-type: none"> 観測点のネットワーク データセンター 解析センターおよび準解析センター 解析センター・コーディネーター 作業部会、試験プロジェクト、試験サービス 特定プロダクツ・構成要素のコーディネーター 中央局 運営委員会



図－1 IGS 観測網 (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/> より)

値の取り付けられた地上のマーカから測量を行う必要があり、その利用は限定されたものとなる。しかし、GPS 点なら観測も容易でコストも比較的小さいため展開が容易で、しかもユーザーが直接 GPS 観測で取り付けることが可能になる。現在稼働している IGS 観測点は 330 点を超えており、これらの

観測点の ITRF 座標値（および速度）を決定することができれば、理想的な ITRF 系へのアクセスポイントとなる。ユーザーは、IGS 点の ITRF 座標値と観測データを入手し、ユーザーの観測データと合わせて基線解析を行うことによって、容易に ITRF 系における座標値を得ることができる。これは日本でされている電子基準点測量と基本的に同様の考え方である。

そこで、IGS は 1995 年に「ITRF 高密度化」試験プロジェクトを立ち上げ、グローバルな観測網で構築される参照フレームに、より密度の高い地域 GPS 観測網を組み入れ、密度の高い ITRF フレームを構築することになった。2000 年には、試験プロジェクトが終了し、主としてグローバル観測網の座標フレームの解が IGS の正式プロダクトとなった。これらの解は、IERS にも提出され、ITRF の維持・改良にも役立てられている。

国土地理院は、アジア地域における ITRF の高密度化の一端を担い、また、国内の電子基準点網を中心として座標系の維持に資することを目的に、この活動に試験プロジェクトの段階から参加し、地域準解析センターとして、国内の数点の観測点をグローバル観測点と合わせて解析している。

IGS における解析全体の流れを大まかに見ると、グローバル観測網による座標フレームの構築と、地域観測網の接続の 2 つに分かれる。グローバル観測網による座標フレームの構築は、以下のやや複雑な手続きを踏んで行われる。これは、解析・評価の効率を保ちながら、衛星軌道や地球回転パラメータと観測点の座標フレームの間の整合性を保つための、極めて巧みな工夫である (Kouba et al., 1998) :

- 1) 複数の解析センター (AC) が IGS グローバル観測網のデータを解析して、衛星軌道、地球姿勢パラメータと観測点座標を推定し、日毎の軌道ファイルと地球姿勢回転パラメータファイル、および観測点座標および地球姿勢パラメータを含む週毎の SINEX ファイル (A-SINEX; SINEX は IGS で開発された、推定パラメータの解およびその共分散をセットにしたフォーマット) を AC 毎に作成する。このとき、参照フレーム観測点 (RF 点) と呼ばれる 100 点余りの観測点の座標値を (IGS 版) ITRF 座標値に制約して解析結果に ITRF 系を導入する。その際に用いる制約条件は、後の処理で一旦制約条件を外して解の結合を行う必要があるため、最少制約条件 (minimum constraint) または緩い拘束条件とする (この A-SINEX は IERS に提出され、IERS による ITRF の維持にも用いられる.)。
- 2) 2 つのグローバル網準解析センター (GNAAC) が一週間分の A-SINEX を結合して週単位の (地球姿勢パラメータを含む) グローバル結合解及び共分散 (G-SINEX) を生成する。
- 3) 解析センターコーディネータ (ACC) は、G-SINEX を結合して、P-SINEX を生成する。その際に RF 点を最少制約条件で ITRF 系に制約して、ITRF 系が導入される。結合結果の日毎の地球姿勢パラメータおよび週毎の観測点座標値が正式プロダクトとなる。
- 4) 次に ACC は、結合結果の SINEX ファイルと各 AC の SINEX ファイルの間の週毎の変換パラメータを求め、これによって各 AC の軌道及び地球姿勢パラメータを変換する。更に、変換結果と IGS 正式プロダクトの日毎の地球姿勢パラメータの差に基づいて、各 AC の軌道を回転させて P-SINEX に整合させる。最後に ACC は、変換された AC の軌道を結合して、IGS の最終軌道暦とする。

以上で、IGS プロダクト (軌道/地球姿勢パラメータ/観測点座標) 相互の整合性を保ちながら、IGS グローバル観測点による ITRF 参照系が実現される。これを、IERS による実現とは区別して、「IGS 版 ITRF 実現」(IGS realization of ITRF) と呼んでいる。

次に、上記のグローバル解に地域観測網を結合することによって、IGS 版 ITRF をより高密度に実現する :

- 5) 地域網準解析センター (RNAAC) が各地域の観測点を解析し、SINEX ファイルを生成する (R-SINEX)。このとき、グローバル網との結合のため数点の IGS グローバル観測点を解析に含め、制約条件は最

少制約条件 (minimum constraint) または、緩い拘束条件とする。また、解析には IGS 最終暦を用いる。

6) GNAAC が、G-SINEX と R-SINEX を結合し、地域網を含む SINEX ファイルを生成する。その際、RF 観測点を (IGS 版) ITRF に拘束することにより、ITRF 系を導入する。

以上の処理の流れを図-2 に模式的に示した。なお、ここでは軌道/地球回転パラメータ/観測点座標に話題を絞ったが、IGS では衛星及び観測点の時計情報、大気遅延量、電離層遅延も参照系の一部に準ずるものと見なしており、これらについても他のプロダクトとの整合を取っている。特に、衛星時計情報と参照系の整合性は精密単独測位系の測位手法では本質的に重要である。

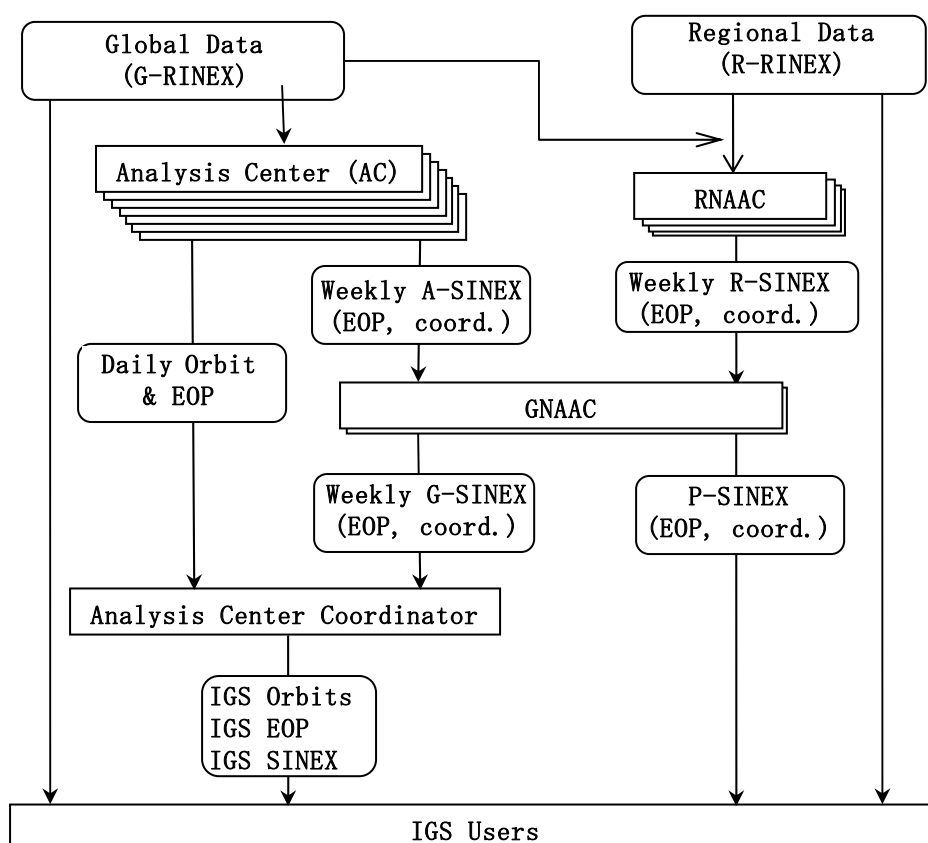


図-2 IGSにおける解析の流れ

国土地理院は、この中で RNAAC の一つとして、日本およびその周辺の観測点のデータを解析し、その SINEX ファイルを IGS に提出する役割を果たしている。図-3 は、現在国土地理院が RNAAC として解析している観測点である。アンカーとなるグローバル観測点は日本付近からかなり遠くにとられているが、これはプロジェクト開始当時の、まだ日本周辺に IGS 点が少ない時期の設定を変えていないためである。近年西太平洋-アジア地域にも IGS 観測点が増えてきたため、これらを解析に含め、国内の観測点についても観測点の移転を反映させ、南鳥島など IGS 点の空白を埋めるためにより適した観測点を含めるよう、解析全般の見直しを現在行っている。



図-3 現在、国土地理院が IGS 地域解析の対象としている観測点.

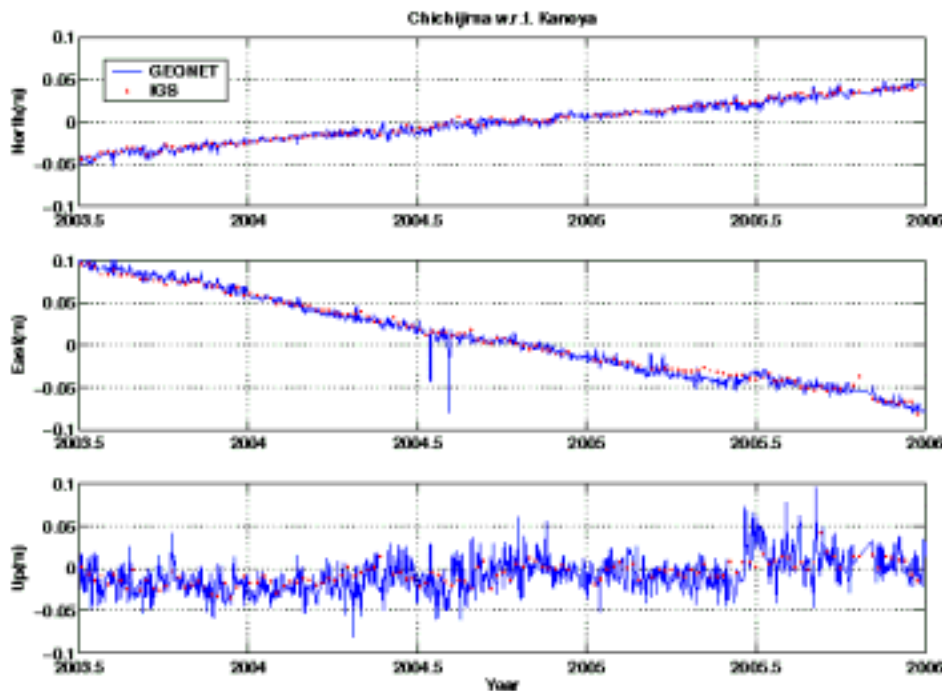


図-4 GEONET の日々のルーチン解析結果（青線）と IGS による週毎の結合結果（赤点）の比較例（鹿屋-父島基線）。上から南北，東西，および上下成分。基線ベクトル成分の基準値は共通にしてある。

IGS で結合された解析結果を，GEONET の解析結果と比較することによって，相互のチェックをすることができる。GEONET のルーチン解析では，つくばの観測点 1 点のみを，予め IGS 点から取り付けられた ITRF 座標値に固定して解を求めている。1 点固定の方が多点固定よりも解の安定性は低いはずだが，拘束条件が最小限であるため，誤差の分析が比較的容易になるというメリットがある。一方，IGS

の解析においては複数のアンカー点によって地域網をグローバル網に結合している。図-4は、鹿屋-父島基線について、両者の解を比較したものである。基線ベクトルに関しては両者がよく一致していることがわかる。電子基準点を骨格とする日本列島の基準座標系の維持・管理には、VLBI とのコロナーションなどで独立な観測との相互比較を行い、信頼性を高めてゆくことが重要である。電子基準点の一部を IGS 観測網の中に位置づけることは、同じ GPS 同士の比較ではあるものの、IGS 版 ITRF 実現の中で電子基準点の座標値の整合性を評価する機会を与える。

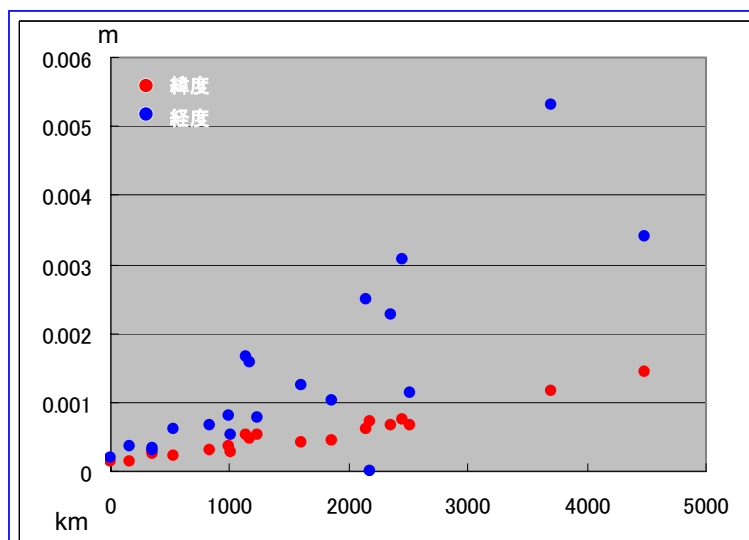
4. アンテナ位相特性モデルの影響評価

GPS による基準座標系の維持にとって、これまで解決が困難であった問題の一つが、アンテナ位相特性であった（例えば、畑中，2006）。地上アンテナの位相特性モデルについては IGS においても長年議論されているが、現在採用されているモデルは、確たる根拠のない位相特性を仮定した基準アンテナに対して、相対的に検定された位相特性モデルである。このモデルによって異機種アンテナ間の比高に生じる系統誤差の問題は解決したが、本来は絶対値についても根拠のある位相特性に基づいたモデルを使うべきである。ところが、それを用いると観測網のスケールが VLBI などの結果と整合しなくなるといった問題があり、暫定的な措置として相対検定の値を使っていたのであった。この不整合の原因が衛星アンテナの位相特性の誤差にあり、これを考慮することによってこの問題を解決できることが近年明らかになった。そのため、IGS では近い将来、ルーチン解析に用いる衛星及び観測点の位相特性モデルを変更することを予定している（Gendt and Schmidt, IGS mail #5189, 2005）。

IGS 暦のユーザーにとって気がかりなのは、この変更がどの程度ユーザーの解析結果に影響するのか、またユーザー側の解析においても IGS に合わせて位相特性モデルを変更しなければならないのかという点である。前述の IGS での解析戦術からわかるように、IGS 最終プロダクトは、RF 点の座標値を ITRF 値に拘束することによって得られるので、基本的に IGS 暦は IGS 版 ITRF 実現に準拠し、大局的には参照フレームのスケールには大きな変化が生じないだろうと予想される。しかし、プロダクトの内部整合性が改善される可能性があるため、全く変化がないわけではない。影響がどの程度の大きさであるかは実際に解析してみなければわからない。

図-5は、IGS の地域解析において従来の精密暦を用いて解析した結果と新たな位相特性モデルで作成された精密暦を用いて解析した結果の差を、基線長を横軸にとってプロットしたものである。後者の解析には、IGS 解析センターの一つスクリプス海洋研究所が、試験的に新たな位相特性モデルを用いて解析した軌道情報を使用した。また、2種類の解析で異なるのは精密暦のみで、ユーザーとして解析に用いる位相特性モデルはどちらも従来のモデルを使用している。この結果から、暦による系統差は距離にほぼ比例し、その大きさは、4000km でたかだか5mm程度であることがわかる。従って、暦の解析仕様の変更はグローバルにミリメートル・レベルの議論をする場合には影響するが、ローカルな地殻変動や通常の測量ではほとんど問題にならないレベルであることがわかる。

このような評価は、国土地理院の GEONET のルーチン解析の運用やその結果を用いた地殻変動監視業務にとっても重要である。GEONET のルーチン解析には IGS による精密暦が使用されるが、その仕様変更による影響は顕著なものではないので、IGS の解析仕様の変更に合わせて GEONET のモデルを緊急に変更する必要はなさそうである。なお、近い将来の IGS 解析仕様の変更においては、基準座標系の変更（現在の ITRF2000 から今後公開される ITRF2005 へ）も予定されている。その影響については、ITRF2005 が公開されるまではっきりしたことは言えないが、いずれにしても位相特性モデルの変更とは別問題である。



図－5 従来の精密暦を使用した解析と新たなモデルによって得られた精密暦による解析結果の比較.

5. 終わりに

本講演では、主として IGS における ITRF の実現を中心に、国土地理院の活動との関係を見てきた。IGS では、他にもリアルタイム化へ向けての動きや、GPS 近代化や Galileo 等、今後の GNSS 時代へ向けて様々な検討がなされており、今後も精密 GNSS 測位の基盤、事実上の標準を提供してゆくであろう。国土地理院における電子基準点の運用も既にリアルタイム化されており、IGS 超高速暦を用いた準リアルタイムのルーチン解析が行われている。将来、IGS のリアルタイム化が実現し、GEONET の（準）リアルタイムのルーチン解析の精度向上や安定化につながれば、地殻変動監視にとっても大きなメリットとなろう。逆に、すでにリアルタイム化された GEONET の背景に、国土地理院から IGS へ貢献できる面があるかも知れない。また、IGS の最近の活動の一つに、Tide-Gauge Benchmark Monitoring (TIGA) 試験プロジェクトがある。これは、GPS 観測で比較的精度の低い高さ成分の問題を検討し、ひいては海面変動の検出に役立てるため、験潮施設における GPS 連続観測によって潮位観測をグローバル参照フレームに結合する試みである。国土地理院が地殻変動監視を目的で潮位観測施設に併設した GPS 連続観測点のデータは、このプロジェクトの目的にもかなうため、そのデータを試験プロジェクトに提供している。

IGS が発足してから 12 年が経過し、国土地理院を初めとする IGS 暦のユーザーにとっては、IGS は普段あまり意識しないが必要な不可欠な空気のような存在になりつつある。しかし、GNSS をめぐる状況は時代と共に変化しつつあり、IGS の活動も座標参照フレームの維持を基本としながら、現状に合致するようその機能を拡張し、常にダイナミックに変化している。それは、GPS の近代化や新たな GNSS の時代を迎えた今後の国土地理院の GPS (GNSS) 政策にとっても大きな意味を持つものであり、国土地理院の IGS への関与のあり方を常に模索してゆく必要があるだろう。

謝辞

スクリプス海洋研究所の試験的軌道決定結果の使用にあたり、同研究所の P. Fang 博士の協力を得ました。

参 考 文 献

- 畑中雄樹(2006):地球センサーとしてのGPS連続観測網の高度化 -GPS観測量に含まれるシグナルとノイズの分離-, 測地学会誌, 52, 1-19.
- Kouba, J., J. Ray, M. M. Watkins (1998): IGS Reference Frame Realization, in IGS Analysis Center Workshop Proceedings, European Space Operation Centre, Darmstadt, Germany, 139-171.