

## GPS 統合解析技術の高度化（第3年次）

実施期間 平成21年度～平成23年度

地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室 畑中雄樹

### 1. はじめに

GEONETの整備により、日本列島の地殻変動を約20kmの均一な空間分解能と精度で観測する体制が整えられ、その運用が10年以上の長期にわたり維持されてきたことにより、単に地震・火山等の個々のイベントに伴う地殻変動を明らかにするだけでなく、より長期的・広域的な地殻活動の性質を捉えることが可能になってきた。一方、火山周辺の地殻変動や歪み集中帯等のより小さな空間スケールの地殻変動を精密に捉えるためには、GEONETでも空間分解能が不足しており、GEONETを補完するGPS連続観測網（点）の展開や、繰り返し観測がより稠密に行われている。現状では、それらのデータはGEONETと別のシステムで独立に解析されており、解析戦略や固定点の扱い等に違いがあるため、GEONETによる全国的な広域の地殻変動情報と合わせて評価する際には、解の整合性に疑問を残すことになる。そこで、本研究では、座標変換や網の歪みの補正などの特段の工夫をすることなく運用の異なるGPS観測点間の比較や評価が行えるよう、GEONETの定常解を基盤として、広域から局所までの地殻変動情報を一貫した基準で統一的に扱うことを可能とする技術の開発を目的とする。

### 2. 研究内容

2周波または1周波受信機を用いる任意の観測点について、GEONETの定常解に整合する解析結果を得るための技術（以下、「GPS統合解析」または「統合解析」という。）を開発する。平成22年度までに、2周波受信機を用いた観測点についてのGPS統合解析の手法を構築し、1周波受信機を用いた観測点の解析に必要な電離層遅延補正手法について予備的な検討を行った。平成23年度には、電離層遅延補正手法を構築し、1周波受信機を用いる観測点に対応する基線解析戦略を決定し、GPS統合解析システムのプロトタイプを構築する。

### 3. 得られた成果

電離層遅延補正手法を構築し、その精度評価を行った。構築した電離層遅延補正手法は、GEONETの観測データを元に電離層遅延補正モデルを生成し、一周波データによる基線解析において適用するものである。電離層遅延補正モデルの生成手法は、以下の4つのステップからなる。

#### ① 観測点毎・衛星毎の電離層線形結合の生成

各 GEONET 点について、二周波観測データの電離層（幾何フリー）線形結合を位相および擬似距離について算出し、位相から算出した線形結合のバイアスを擬似距離から算出したものと合うように調整（コード平滑化）を施すものである。コード平滑化処理が施された電離層線形結合は、衛星への視線方向の電離層遅延量（STEC、総電子数（Total Electron Content; TEC）と電離層遅延量はほぼ比例関係にあり、互いに換算可能であるため、以下ではこれらを同義として記述する）、衛星および受信機のコードバイアス（DCB）、およびコード平滑化におけるデータアーケ毎のバイアス調整誤差の和である。

② VTEC モデルおよび DCB の分離推定

①において算出した電離層線形結合をデータとして、衛星 DCB, 受信機 DCB および上空のモデル面(地心を中心とする半径 6771km の球面)上で与えられる鉛直方向の電離層遅延量 (VTEC) モデルを分離推定する。推定手法は、Ma & Maruyama (2003)の方法をグリッド内挿モデル用に改良し、時空間平滑化条件を課すものである。VTEC モデルの空間格子間隔は  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  , 時間格子間隔は 10 分, 内挿手法は空間については双一次内挿, 時間については線形内挿(つまり tri-linear 内挿)とする。

③ 二重差方程式を用いたデータアーク毎のバイアスの調整

①で求められた電離層線形結合から推定された衛星 DCB および受信機 DCB を差し引くことによって STEC 値が得られるが、これには DCB の推定誤差の他に、二重差によって打ち消されないデータアーク毎のコード平滑化の誤差が含まれる。そこで、この STEC 値を a priori 値とし、更に二重差方程式による拘束条件を課して調整することにより、STEC 値の二重差の精度向上を図る。これにより、二重差が位相観測値の精度を持ち、かつ、アンビギュイティー決定の結果が反映された電離層遅延量が得られる。二重差方程式の構成においては、GEONET の定常解析と同様の処理で二重位相差アンビギュイティー決定を行ない、その過程において整数化に失敗した二重差アンビギュイティーについては、これを構成する観測点間一重差のアンビギュイティーを未知パラメータとして設定し、STEC 値と共に推定する。

④ 衛星毎の電離層遅延補正モデルの推定

③で調整された STEC 値を入力として、GPS 衛星毎に電離層遅延補正モデルを構築する。モデルは、まず、地表における  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  の緯度・経度格子点において観測される各衛星についての 5 分毎の STEC 値がパラメータとして推定される。次に、格子点上で得られた推定値を、隣接する 4 つの格子点で囲まれる区画に対応する双一次補間式に変換し、その内挿係数を区画毎のファイルとして出力する。

また、上記の電離層遅延補正モデルを適用するための汎用の補正ツールを作成した。補正ツールは、RINEX 形式の観測ファイルを入力とし、電離層遅延量について補正された値を同じ形式で出力するものである。そのため、GPS 基線解析の前処理として補正を適用することが可能であり、特に GPS 基線解析ソフトウェアの改修を要することなく、一周波観測の基線解析において電離層遅延の補正を行なうことができる。

以上の手法により生成した電離層遅延補正モデルを 1 周波データによる基線解析に適用し、得られた基線解の再現性を評価した。各 GEONET 点について、最短距離にある GEONET 点との間で基線を組み、GEONET の定常解析と同様、24 時間および 6 時間という 2 種類のセッション長の各場合について、電離層遅延補正モデルを適用して L1 観測量のみによる解析を行った。評価結果を表-1 に、24 時間セッションによる解析結果のばらつきの RMS について、定常解との比較結果を図-1 に、南北成分の RMS

表-1 基線長 10km における基線解のばらつきの RMS の評価表結果 (単位: mm)

セッション長	評価対象期間		東西	南北	上下
24 時間	2003/7/26~9/25	本研究	1.81	1.76	6.93
		F3 解	1.67	1.67	6.75
6 時間	2011/10/1~10/31	本研究	2.66	2.76	9.74
		Q3 解	2.94	3.01	10.70

の地理的分布を図-2に示す。図-1において基線解のばらつきが基線長とともに増加する傾向が見られるが、基線長 10km 以内では、定常解(F3 解)とほぼ同程度以下である。ただし、南西諸島や小笠原諸島では基線再現性がやや大きい。これらの結果は、6 時間セッションの場合についてもほぼ同様であった。

一周波受信機を用いた GPS 観測点に対応する GPS 統合解析手法の解析戦略を構築した。解析対象とする観測点の近隣にある GEONET 観測点を与点とする基線を組み、上記の電離層遅延補正モデルを適用して基線解析を行う。その際、座標値及び対流圏遅延パラメータについて、与点とする GEONET 点においては GEONET の定常解で得られるもので固定し、解析対象点においては新たに推定する。与点の選択にあたっては、電離層遅延補正誤差の影響を最小限にするため、データの品質において予め設定した基準を満たす GEONET 点のうち、解析対象点から最短距離にあるものを自動的に選択することを標準とするが、GEONET 点からの取り付けが行なわれる解析対象点を与点として指定することも可能である。また、参照点の変更による座標解のバイアス誤差の変化を避けるため、データの品質に関わらず、特定の観測点を与点として明示的に設定することも可能とした。以上の手法と、平成 21 年度に構築した 2 周波受信機の場合の解析手法を合わせることにより、GPS 統合解析手法を完成させた。

以上の解析戦略を適用して GPS 統合解析を行うシステムのプロトタイプを構築した。システム全体は、電離層遅延補正モデル生成装置、補正情報サーバ、GPS 統合基線解析装置からなる。電離層遅延補正モデル生成装置は、GEONET のデータを解析し、電離層遅延補正モデルを生成するものである。補正情報サーバは、電離層遅延補正モデル生成装置によって生成された電離層遅延補正モデルと、GEONET の定常解析で得られる対流圏遅延モデルや座標値などの、GPS 統合解析に必要なデータを格納するものである。GPS 統合基線解析装置は、解析対象とする任意の GPS 観測点および参照点に用いる GEONET 観測点のデータと補正情報サーバから取得する補正情報を用いて基線解析を行うものである。また、補正情報サーバに格納するデータについては、1996 年以降の GEONET の全運用期間について整備を行なった。

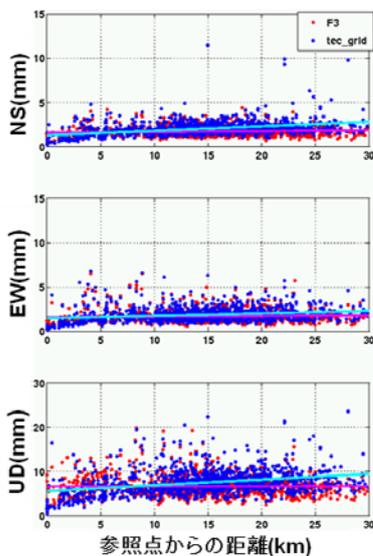


図-1 基線解のばらつきの RMS の比較(24 時間セッションの場合)。GPS 統合解析手法(青)および定常解(赤)。

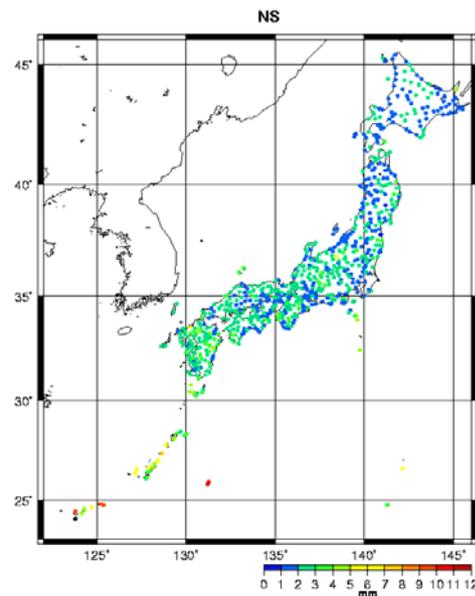


図-2 基線解のばらつきの RMS の地理的分布(24 時間セッションの場合、南北成分)。

外部機関（(独)産業技術総合研究所，神奈川県温泉地学研究所，気象庁）が運用する GPS 連続観測点のデータを入手して，それらに GPS 統合解析手法を適用し，得られた座標解の GEONET の定常解との整合性について，それぞれ独自に運用されている解析システムによる解析結果と比較した．二周波受信機を用いている外部機関の観測点について，GEONET の定常解析システムに組み入れた解析により得られた座標解を求め，これを基準に，本研究で開発したシステムによる解，および，独自の解析システムによる解の差の各成分の時系列の例を図-3に示す．独自システムによる解においては，定常解析システムで得られた解との差に，固定点の扱いや解析戦略等の違いによると思われる，トレンドの違いや季節的変化が見られるのに対し，GPS 統合解析手法によって得られた解については系統的な差がほとんど見られず，定常解との整合性が高いことがわかる．

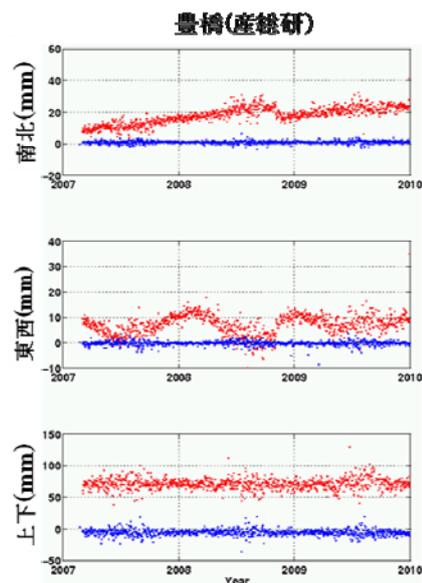


図-3 GEONET の定常解析システムに組み入れた処理による座標解との差の時系列の比較．豊橋観測点（産業技術総合研究所）の例．GPS 統合基線解析システムによる解の差（青）および，独自の解析システム（大谷他，2010）による解の差（赤）．

#### 4. 結論

昨年度までの開発に加え，電離層遅延補正モデルの構築手法，一周波 GPS 受信機を対象とした基線解析手法を開発し，GPS 統合解析手法およびシステムのプロトタイプを完成させた．GEONET 観測点および外部機関の GPS 観測点に本手法を適用して，得られた結果を評価した結果，本手法による解が，独自の解析システムで得られた座標解に比べて，GEONET の定常解と高い整合性を持つことが示された．このことから，本手法は，任意の GPS 観測点について，その変動を GEONET の定常解と合わせて統一的に解釈するうえで，有効な座標解を与えるものと考えられる．

なお，本研究で開発した電離層遅延補正モデルや，その生成過程においては，衛星の視線方向の STEC 値や上空のモデル面における電離層の VTEC モデルが副産物として生成される．これらは，地殻変動観測に限らず，一般の GPS 基線解析における電離層遅延補正や，電離層の状態把握，SAR 干渉画像における電離層ノイズの評価など，様々な目的に応用できる可能性がある．

#### 謝辞

本研究で開発した手法の評価のため，気象庁，神奈川県温泉地学研究所および（独）産業技術総合研究所による GPS 連続観測点のデータを使用した．データの入手等にあたって原田昌武氏，伊東博氏，大谷竜氏，板場智史氏の協力をいただいた．ここに，感謝いたします．

#### 参考文献

- Ma, G. and T. Maruyama (2003) : Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan, *Ann. Geophys.*, 21, 2083-2093.
- 大谷竜，他(2010)：産総地質調査総合センターにおける新GPS連続観測システム，地質調査研究報告，Vol. 61 (1/2)，57-74.

# 世界測地系における国内位置基準の監視の高度化に関する研究 (第2年次)

実施期間 平成22年度～平成24年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 高島 和宏

## 1. はじめに

国土地理院は国家の位置基準を管理する機関として、超長基線測量 (VLBI) や電子基準点測量 (GPS) 等により、我が国の測地基準系を維持管理している。平成14年に公表された測地成果2000算出のための基準系構築において、VLBI観測局を既知点とし、1997年1月1日を元期に、その前後6日間のGEONET観測データから求められたスタティックな測地系が採用された。しかしながら、日本列島は4つのプレート境界に位置し、地殻変動の激しい地域であって、年月の経過とともに国家測量成果の世界測地系との乖離が大きくなる。そこで、グローバル観測結果に基づいて世界測地系の中での日本列島の動きを正確に捉え、測地基準系の歪みを時系列的に監視する手法の開発が求められる。そのためには、VLBIとGPSの観測について、個々の技術の特性の違いを考慮して統合する解析手法の研究に取り組む必要がある。

本研究では、世界測地系における日本の測地基準系の歪みを監視する手法を構築することを目的とし、VLBI観測とGEONET観測を時系列的に統合する解析技術の開発を行い、これをシミュレーション技術により評価した上で、国際VLBI事業 (IVS) において取りまとめられた新しいVLBI観測仕様に対応する国内VLBI観測の技術指針をとりまとめることを目標としている。

## 2. 研究内容

本研究は、特別研究として3年計画で実施しており、第1年次にはVLBIシミュレーターを整備し、第2年次は、VLBI観測とGEONET観測を時系列的に統合する解析手法の開発を行う。まず、統合解析において比較検討の対象となる、VLBI観測における様々な条件設定が基線解析精度に及ぼす影響について、VLBIシミュレーションデータを用いた基線解析によって基礎的な調査を行う。次に、異なる観測条件設定の組み合わせ数は膨大であるため、統合解析手法の評価を効率良く実施できるよう「統合基線解析アプリケーション」を開発するとともに、VLBIデータとGEONETデータを時系列的に統合解析する手法を検討する。

## 3. 得られた成果

VLBI観測における観測条件の違いが基線解析精度に及ぼす影響について、VLBIシミュレーターにより生成したデータを用いた基線解析を行い、基礎的な調査を行った。従来、VLBI観測条件設定を行う際、1セッション (24時間) における観測総数 (一つの電波源について同時に観測を行った基線の組み合わせの総和) を可能な限り増やすことが観測局の位置決定精度向上に寄与すると考えられてきた。そのため、観測スケジュール作成では、観測総数が最も多くなる観測条件を採用する方法がとられてきた。そこで、現在行われている、国内6観測局を用いた群遅延を観測量とするVLBI観測において、観測総数と基線解析の精度の関係について、可変な観測条件項目のうち、主たる2項目だけを変える

場合と全ての項目を変える場合とを調べた。

まず、観測条件として「周波数帯域」と「最少積分時間」の2項目のみを変えた場合について、基線解析における遅延時間残差と観測総数を図-1及び表-1に示す。比較の基準として、周波数帯域を8MHz、最少積分時間が15秒の場合を採ることとする。周波数帯域を4MHz幅に変えると、観測総数は585回減少した。これは、周波数帯域を狭くすることで、受信感度が下がり、必要な積分時間が長くなる電波源の観測が生じたためと考えられる。一方、最少積分時間を30秒に変更すると、観測総数は114回減少した。これは、電波強度の強いいくつかの電波源において、必要以上の長さとなる最少積分時間の観測が行われるものが生じたためと考えられる。また、遅延時間残差のWRMSは4MHz幅とすると0.16cm大きくなり、最小積分時間を30秒にすると0.13cm大きくなった。これらの結果は、従来の考え方と整合している。

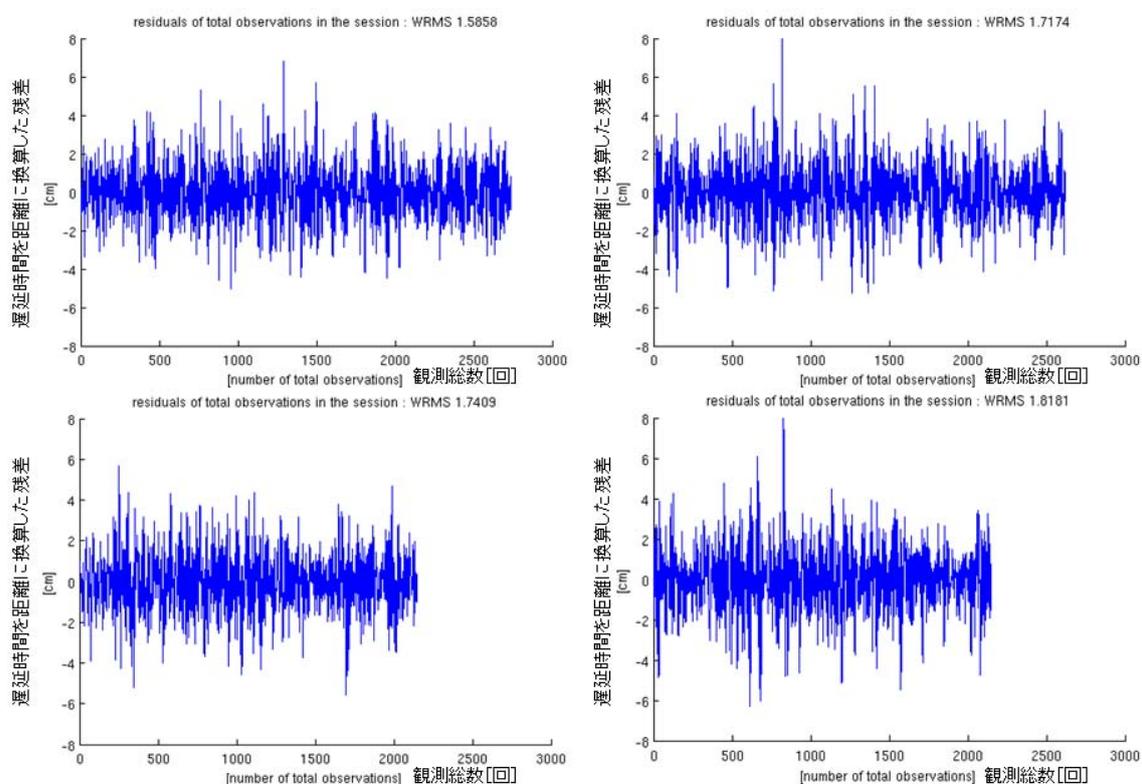


図-1 観測条件の2項目を変えた場合の遅延時間残差  
各チャンネルの周波数帯域幅・最小積分時間  
左下 4MHzBW・15sec 右下 4MHzBW・30sec

表-1 異なる観測条件における遅延時間残差と観測総数

BW \ min-scan	15 sec	30 sec
8 MHz	WRMS 1.5858 cm 2709 obs.	WRMS 1.7174 cm 2595 obs.
4 MHz	WRMS 1.7409 cm 2124 obs.	WRMS 1.8181 cm 2108 obs.

他方、その他の設定項目を変化させた場合を含め、シミュレーションを行った基線解析の全てについて、観測総数と遅延時間残差のWRMSの関係を図-2に示す。このグラフからは、観測総数の増加が、遅延時間決定精度の向上に必ずしもつながらないようにみえる。このことは、観測スケジュール作成の前提とされる「観測総数の増大が精度向上をもたらす」という従来の認識に反する。その原因については、観測総数の増加に伴って使用する電波源の数が増加し、電波源の持つ構造の広がりや位置情報の不確定性に伴う誤差の影響が大きくなり、遅延時間決定精度を劣化させていることが可能性の一つとして考えられる。したがって、国内 VLBI 観測仕様(案)を取りまとめる際に、どの電波源を観測対象とするかの取捨選択条件が重要な指標となり得ることが明らかとなった。

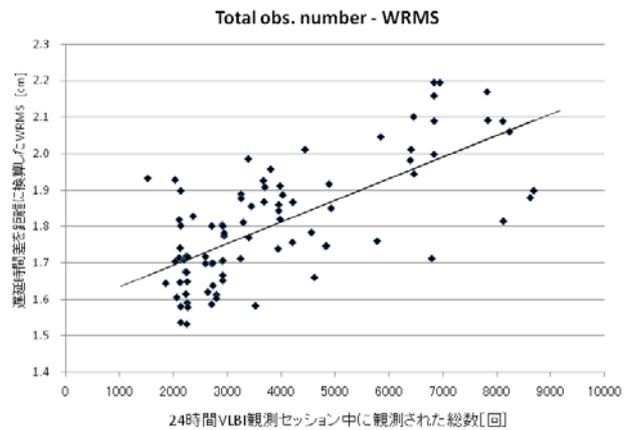


図-2 観測総数と遅延時間残差のWRMSの関係  
24時間セッションにおける観測総数と基線解析における遅延時間差のWRMSを示す。実線は線形回帰直線である。

また、第1年次の調査で行った基線解析の評価過程では、VLBI シミュレーションデータ生成において、大気擾乱に起因する遅延時間誤差をより現実的に見積もるため、適切な大気擾乱パラメータの設定が重要である事がわかった。このパラメータ推定にはハイレートサンプリングモードを用いて取得したGPS観測データからの算出が適しており、そのデータ取得として、「つくばVLBI観測局」と「始良VLBI観測局」のそれぞれの近傍においてGPS観測を実施した。

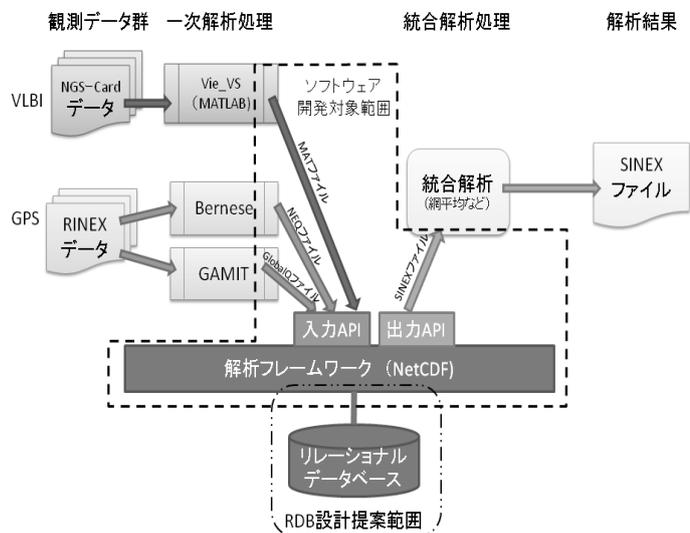


図-3 統合基線解析アプリケーションの処理の流れ

VLBI観測とGEONET観測の時系列的な統合解析手法については、米国マサチューセッツ工科大学が開発したソフトウェアGLOBKを基盤として用いる方針とし、VLBI及びGPSのシミュレーションデータを用いて、変動を正しく推定できるかの確認を進めている。VLBI観測とGPS観測のシミュレーションデータを用いた統合解析の実行においては、異なる観測条件が設定された膨大な組み合わせについて基線解析と統合解析を連携させた評価を行う必要があり、それを効率的に実行するため、「統合基線解析アプリケーション(図-3)」を開発した。このアプリケーションは、VLBIとGPSデータの個別解析(一次解析処理)により生成された結果ファイル群を統合解析処理に効率的に引き渡すため、各独自ファイルフォーマットを共通ファイルフォーマットである

SINEX 形式に変換する API を具備するとともに、結果ファイル群を NetCDF 形式でアーカイブする機能を有しており、膨大な数のファイル管理や検索・抽出管理を容易に行うことができる。

#### 4. 結論

様々な観測条件設定における VLBI シミュレーションデータの基線解析結果を精査したところ、従来の認識と異なり、観測総数の増加が、遅延時間決定精度の向上に必ずしもつながらない傾向が認められた。ただし、今回のシミュレーションでは、観測回数がおおよそ 2,000 回以下の場合については含まれていないことに注意が必要である。いずれにしても、観測条件として一つの指標のみで単純に観測精度を見積ることは必ずしも適切でなく、電波源構造の大小や位置情報の不確定性、天空上における電波源の幾何学的配置、周波数帯域など、総合的に評価することが重要であることを示している。また、つくば VLBI 観測局と始良 VLBI 観測局のそれぞれの近傍において取得した、ハイレートサンプリングによる GPS 観測データを用いて大気擾乱パラメータの算出を行い、シミュレーションデータの更なる信頼度向上を目指したい。

今後、統合解析手法の開発を完成させるとともに、それを用いた統合解析の評価を行って最適な国内 VLBI 観測仕様（案）としてとりまとめる予定である。

# GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究（第2年次）

実施期間 平成22年度～平成24年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 石本 正芳

## 1. はじめに

国土地理院では、地震や火山活動の解明への寄与や防災活動の支援を目的として、地殻変動を監視し、その情報を関連機関等に提供している。地震や火山活動に伴う地殻変動の監視には、全国に展開されている GEONET の解析結果が重要な役割を担っている。GEONET の解析結果には様々な誤差が含まれており、そのために、速やかにかつ信頼性の高い地殻変動情報の提供にとって障害となる場合がある。このような誤差のうち、特に大気遅延に起因する誤差が問題となる場合が多い。GEONET の定常解析では、大気遅延勾配推定の導入により、空間スケールの大きな気象現象に伴う測位誤差が大幅に軽減されている。しかし、時間、空間スケールの小さな大気擾乱に起因すると考えられる誤差が依然として見られており、地震や火山活動時における速やかな信頼性の高い地殻変動の把握の妨げになる場合がある。

本研究では、早期のかつ信頼性の高い地殻変動把握に寄与することを目的として、時・空間スケールの小さな大気擾乱が GEONET の解析結果に及ぼす影響を評価する手法を開発し、大気擾乱による測位結果への影響を評価可能とするプロトタイプシステムを構築する。

## 2. 研究内容

対象とする領域において、気象庁の数値予報モデルを基に時・空間分解能の高い数値気象モデルを生成するためのシステムを構築し、このシステムを用いて、時・空間スケールの小さい大気擾乱と測位誤差との関連性を明らかにするとともに、大気擾乱の測位結果への影響評価を指標化する。さらに、これらの計算を自動的に行うことが可能な大気擾乱の影響評価システムを構築する。

平成23年度は、昨年度導入した二種類のソフトウェアによる高分解能数値気象データの相互比較を通じて、パラメータ等の最適化を行ってシステムを完成させる。得られたシステムを用いて、地形などによる地域的な気象現象や急激な時間変化を生じる気象現象などといった特徴的な気象条件の種類ごとに、推定される誤差と解析結果のばらつきとの整合性を分析し、指標の改良を行うとともに、測位解析結果への影響が大きい気象条件、数値気象モデルの誤差再現の妥当性の評価を行う。

## 3. 得られた成果

昨年度、二種類の数値気象データ計算ソフトウェア（CReSS 及び NuWFAS）を導入した。GEONET の定常解析に対し、小スケールの大気擾乱が及ぼす影響を速やかに評価するため、そのプロトタイプシステムの構築においては、計算効率の高い NuWFAS を基盤として用いることとしている。NuWFAS について、これまでに実施した高分解能のモデル化で品質が良好である CReSS との比較を通じて、空間分解能及び時間分解能のより適切な設定値を決定するための調査を行った。調査では、これまでに大気遅延に起因する測位誤差の発現が明らかとなっている、霧島新燃岳周辺及び伊豆半島における観測事例を対象とした。評価には、昨年度試作した整合度指標を用い、高分解能数値気象モデルを用いて推定される誤差と実際の誤差との整

合性を調べた。まず、空間分解能による違いについて、時間分解能を 30 分に固定して調査を行った。空間分解能を 1 km より小さくすると計算処理に莫大な時間を要し、本研究で目的とする速やかな評価を実現することが困難であるため、1 km 及び 2 km を設定とし、任意の空間分解能を設定できる NuWFAS についてはこれに 1.5km の場合を追加することとした。表-1 に、それぞれの場合に得られた整合度指標を示す。この結果では、CReSS, NuWFAS とともに、空間分解能を小さくすると実際の誤差との整合度が高くなる傾向がある。ただし、NuWFAS については空間分解能による指標の違いは CReSS ほど顕著ではない。また、空間分解能 1km では、指標は CReSS の方がやや高いものの、NuWFAS とほぼ同じであることがわかった。したがって、計算所要時間を考慮し、NuWFAS の 1.5km を基本とすることとした。次に、空間分解能を 1.5km とした NuWFAS を用いて、時間分解能を、60 分、30 分、10 分間隔と変えた場合について比較を行った。得られた整合度指標を表-2 に示す。この結果では、時間間隔が小さいほど指標が高くなる傾向があるが、それらの差は顕著なものではない。しかし、60 分とした場合には、30 分、または 10 分間隔と比較して大きな違いが出る場合もあったため、時間分解能として 30 分を選ぶこととした。これらの設定を採用して高分解能数値気象データ計算システムを構築した。

このシステムを用いて、推定される誤差と GPS 解析結果に見られる誤差との間の整合性を問うためには、高分解能数値気象モデルによる誤差の再現が、現実の気象現象を正しく反映したものであるのかを明らかにする必要がある。ここでは、小スケールの大気擾乱に起因するものであることが明らかな誤差の事例について、GPS 解析結果に現れた誤差との対応に注視しながら高分解能数値気象モデルから得られるデータを分析し、大気擾乱が誤差をもたらすメカニズムを明らかにすることにより、高分解能数値気象モデルによる誤差再現の妥当性を評価する。対象とした事例は、昨年度から行っている調査により誤差がよく再現された霧島新燃岳周辺の電子基準点「都城 2」に見られる西向きの変位 (図-1 (a)) である。まず、高分解能数値気象モデルから得られる風速場において、強い西風が霧島山を越えると、空気塊が上下に振動し伝播していく擾乱 (山岳波) が生じていることがわかった (図-1 (b))。次に、高分解能数値気象モデルから屈折率を求めると、風速の分布に対応し、下降風から上昇風に変化するところで屈折率が極小、上昇風から下降風に変化するところで屈折率が極大となることがわかった。このことは、「都城 2」の西側で屈折率が小さく東側では大きい、つまり、大気遅延量は観測点の西側で小さく、東側で大きくなることを示しており、GEONET の定常解において西向きの変位になることと整合している。さらに、この機構解釈が妥当であるか観測値において評価するために、GPS 解析で得られる位相残差と高分解能数値気象モデルを用いて推定した場合の位相残差との比較を行った。その結果では、位相残差の方向分布傾向及びその時間的变化が一致しており、高分解能数値気象モデルを用いて推定した遅延量はその時間変化を含め現実を再現していることが示唆される。今回行った、高分解能数値気象モデルから得られる風速場と屈折率の空間分布の調査、及び位相残差の方向分布の比較という分析方法により、測位解析結果への影響が大きい気象条件、数値気象モデルの誤差再現の妥当性を評価することが可能であることが示された。整合性の指標作成については、この分析方法を利用した、数値気象モデルの誤差再現の妥当性の評価を考慮して改良を行い、完成させる。

#### 4. まとめ

昨年度導入した数値気象データ計算ソフトウェアにおける設定パラメータのうち、空間分解能と、時間分解能について最適値を決定し、高分解能数値気象データ計算システムを構築した。このシステムを用いて生成された高分解能数値気象モデルにより、GEONET の定常解の誤差がよく再現された事例を対象として気象擾乱の状態を分析した結果、山岳波の発生が誤差の原因であることが示された。さらに、GPS 測位信

号における位相残差を推定し実際の GPS 解析結果と比較すると、高分解能数値気象モデルを用いて推定される遅延量がエポック毎にも現実を反映していることが示唆された。したがって、対象事例においては山岳波が測位解に大きな影響を及ぼすこと、山岳波で生じる測位誤差の再現に高分解能数値気象モデルが有効であることがわかった。また、高分解能数値気象モデルから得られる風速場及び屈折率分布の調査、位相残差の方向分布の比較が、測位解析結果への影響が大きい気象条件、数値気象モデルの誤差再現の妥当性の評価に有効であることがわかった。

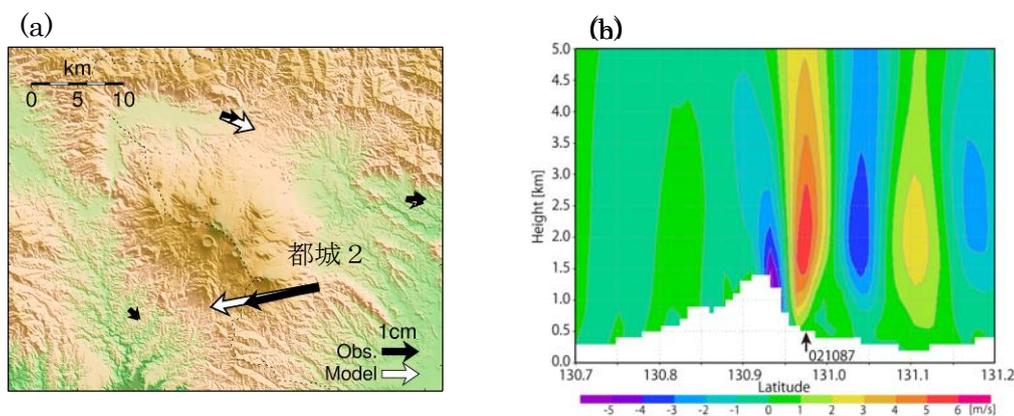
今後は、本報告で用いた調査方法による数値気象モデルの誤差再現の妥当性評価を考慮した整合度指標を完成させ、国内でみられる特徴的な気象条件のそれぞれについて、推定される誤差と解析結果のばらつきとの整合性を評価するとともに、その評価結果及び整合度指標に基づいた測位誤差への大気擾乱の影響評価手法を構築し、大気擾乱の影響評価のためのプロトタイプシステムを構築する予定である。

表ー1 異なる空間分解能における数値気象データ計算ソフトウェア CReSS または NuWFAS を用いて推定した誤差と Q3 解析結果の整合度指標。時間分解能は 30 分。整合度指標は、値が小さいほど、整合度が高いことを示す。

空間分解能 [km]	霧島新燃岳周辺		伊豆半島	
	CReSS	NuWFAS	CReSS	NuWFAS
2	1.78	1.43	2.39	1.84
1.5	-	1.39	-	1.78
1	1.32	1.36	1.64	1.76

表ー2 時間分解能を変えた場合の、数値気象データ計算ソフトウェア NuWFAS を用いて推定した誤差と Q3 解析結果の整合度指標。空間分解能は 1.5km。

時間分解能 [分]	霧島新燃岳周辺 NuWFAS	伊豆半島 NuWFAS
60	1.44	1.79
30	1.39	1.78
10	1.36	1.76



図ー1 2011年2月28日3時の高分解能数値気象モデルから推定した誤差と観測値(Q3解)の水平変位の比較(a)、及び高分解能数値気象モデルで計算された「都城2」を通る東西鉛直断面における鉛直風の速度分布(b)。

## 次世代 GNSS の利用可能性に関する研究（第 4 年次）

実施期間 平成 20 年度～平成 25 年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 宗包 浩志

### 1. はじめに

衛星測位システムといえば、これまで、米国の GPS やロシアの GLONASS がその代表的なものであったが、近年、それらに加え、ヨーロッパの Galileo、中国の COMPASS などさまざまな衛星測位システムが計画されている。また、GPS 自体も、更なる高精度化、頑健性を達成するため、既存の衛星を新たなコードや周波数を追加した高性能衛星に順次入れ替えていく、GPS 近代化計画を推進中である。我が国においても、衛星測位の補完・補強システムとして準天頂衛星システムが計画されており、関係機関により、そのための研究開発が実施されている。これらの新しい衛星測位システムについて、測量への利用可能性の評価や効率的な導入方法の検討のため、シミュレーションによる測位精度予測、実運用後の試験観測による測位精度評価等が求められている。

### 2. 研究内容

準天頂衛星等の次世代衛星測位システムに関し、その開発運用動向を踏まえつつ、利用可能性や効果的な測量方法についての検討を行う。そのため、運用開始後における試験観測による精度検証やそのための技術支援を行うとともに、既開発の「衛星測位システム・シミュレータ (SPSS)」を活用したシミュレーションによる評価や異なる衛星測位システム間の基準系の結合手法の検討等に取り組む。

本年度は、キネマティック GNSS 解析において、GPS に加えて GLONASS を利用した場合の実測における測位精度の評価を試行した。

### 3. 得られた成果

ヨーロッパにある IGS 観測点のうち、GPS と GLONASS を同時受信している 4 観測点（「GRAZ」、「MTBG」、「PENC」、「UZLH」）のデータを用い、GRAZ を固定点とし、残りの 3 観測点について、二周波キネマティック GPS 解析による座標値の推定を行い、推定された座標解の再現性を評価した。評価には、2011 年 12 月 31 日の 1 日を対象とした。解析にはソフトウェア「RTKLIB 2.4.1」(Takasu, 2010)を使用し、(1) GPS のみ使用の場合 (GPS only)、(2) GPS と GLONASS をあわせて用い、GLONASS の波数不確定性をフリーにした場合 (GPS+GLO free)、(3) GPS と GLONASS をあわせて用い、GLONASS の波数不確定性を解く場合 (GPS+GLO fix) の 3 通りの解析について比較した。解析に使用する暦には、欧州宇宙機関 (ESA) から公表されている、GPS と GLONASS の統合精密暦を使用した。観測点の情報を表 1 にまとめる。

表－1 解析に使用した観測点の情報

観測点名 (所在国)	受信機	アンテナ	GRAZ からの基線長
GRAZ (オーストリア)	LEICA GRX1200+GNSS	LEIAR25. R3	-----
MTBG (オーストリア)	TPS GB-1000	TPSCR3_GGD	101 km
PENC (ハンガリー)	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG	297 km
UZLH (ウクライナ)	NOV OEMV3	NOV702GG	538 km

次に、推定された座標解の再現性および FIX 率を表－2 に示す。まず、FIX 率に注目すると、GLONASS の波数不確定性を解かない場合 ((1) および (2) のケース) にはいずれも FIX 率が 100% に達したのに対し、GLONASS の波数不確定性を解く場合では、基線の両端の受信機が同一である GRAZ-PENC 基線を除く基線では、FIX 率が低くなっている (GRAZ-MTBG で 0%, GRAZ-UZLH では 60.2%)。このような低い FIX 率の原因は、GLONASS の観測量に含まれるチャンネル間バイアスが、基線の両端で受信機の機種が異なる場合には、二重位相差を取っても完全には消去できないためであると考えられる (例えば山田他, 2010)。次に座標再現性に注目すると、どの基線においても、GPS のみの観測データを解析する場合 ((1) のケース) に比べ、GLONASS を含めて波数不確定性を解かない場合 ((2) のケース) の方が、20~30% 向上している。これは、GLONASS を入れることで平均衛星数がほぼ 2 倍となっていることに対応している。また、GLONASS の波数不確定性を解く効果については、GLONASS の波数不確定性が解きやすい基線の両端が同一受信機の基線 (GRAZ-PENC) の場合においても、改善があまり見られないことが分かった。

表－2 基線解の座標再現性

基線	解の種類	座標再現性			平均衛星数	*FIX 率 (%)
		南北成分 (m)	東西成分 (m)	上下成分 (m)		
GRAZ-MTBG	(1) GPS only	0.0089	0.0062	0.0162	8.2	100
	(2) GPS+GLO free	0.0068	0.0051	0.0125	15.3	100
	(3) GPS+GLO fix	0.0074	0.0057	0.0131	15.3	0
GRAZ-PENC	(1) GPS only	0.0084	0.0065	0.0180	8.3	100
	(2) GPS+GLO free	0.0060	0.0054	0.0145	15.3	100
	(3) GPS+GLO fix	0.0059	0.0053	0.0148	15.3	100
GRAZ-UZLH	(1) GPS only	0.0121	0.0083	0.0234	8.2	100
	(2) GPS+GLO free	0.0084	0.0068	0.0188	15.0	100
	(3) GPS+GLO fix	0.0094	0.0083	0.0242	15.0	60.2

\* (1), (3) では GPS と GLONASS をあわせた FIX 率, (2) では GPS のみの FIX 率を表している。

#### 4. 結論

キネマティック GPS 解析において、GPS に加えて GLONASS を利用した場合の実測における測位精度について、予備的な評価を行った。その結果、GLONASS を含めることによって観測される衛星数がほぼ倍増し、座標再現性に向上効果が見込めること、基線の両端の受信機が異なる場合にはチャンネル間バイアスの影響のため、GLONASS の波数不確定性が正しく決定されにくいこと、基線の両端の受信機が同一の場合でも、GLONASS の波数不確定性を決定しなくても、同等の座標再現性の解が得られる

ことなどがわかった.

#### 参考文献

Takasu T. (2010): Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock, IGS Workshop 2010, Newcastle upon Tyne, England, June 28 - July 2.

山田英輝・他(2010): RTK-GPS/GLONASS における受信機間 inter-channel bias の calibration とその評価, 測位航法学会 2010 年度大会予稿集.

# 日本の標高基準系の絶対的位置決定技術の高度化に関する研究（第3年次）

実施期間 平成 21 年度～平成 25 年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 黒石 裕樹

## 1. はじめに

測量法において、日本の標高基準は平均海面からの高さで表示すると規定され、水準測量で直接結合されていない離島を除き、東京湾平均海面が平均海面を定義し、水準原点の原点数値が高さの基準として定められている。一方、VLBI や GPS などの宇宙測地技術の進展とその国際観測の継続的な実施によって地表基準点の幾何学的な三次元位置（経・緯度と楕円体高）が国際的測地基準系（ITRF）において正確に決定され、我が国においても国際的な基準に基づく水平位置の表示が可能となり、世界測地系が導入された。また、重力場観測衛星の登場、宇宙測地技術による世界の詳細な地形モデルの作成やジオイド決定手法の高度化により、空間分解能が高い全球重力ジオイド・モデルが構築され、各国の標高基準系を統一、あるいは、相互の位置関係を明らかにする国際結合を進める可能性についての議論が国際測地学協会（IAG）などで行われている。

テクトニック・プレートの収斂境界に位置する日本列島では、（高さを含め）地殻変動による基準点位置の時間変化が全国的に生じるため、標高基準系を維持するとともに地震サイクルにおける長期的上下変動を把握するため、全国の一等水準測量が繰り返し行われている。長距離に亘る水準測量では、計測誤差の累積による系統誤差などによる内部歪みの存在が懸念される。そこで、長期的上下変動把握や平均海面からの高さという標高基準系実現の高精度化を図るため、ジオイド・モデルの絶対的精度向上を含め、標高基準系の絶対的位置決定技術の高度化が必要となっている。

## 2. 研究内容

本課題では、日本の標高基準系の絶対的位置決定技術の高度化に取り組む。まず、全国水準測量からの標高決定において広域的な誤差を生じうる、潮汐（海洋潮汐荷重を含む）効果の影響について定量的に評価、分析を行う。また、ESA（European Space Agency）により 2009 年 3 月に打ち上げられた、全球重力場を詳細に観測することを目的とする衛星 GOCE（Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer）による成果等を用いた中・長波長重力場の決定技術の高度化を通じた日本のジオイド決定の高度化を進める。

第 3 年次においては、昨年度評価を加えた全球重力場モデルよりも長い期間の GOCE 観測と、他の重力場観測衛星 GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment）等の観測を用いて算出された全球中・長波長重力場モデルについて、日本とその周辺における品質評価を行う。

## 3. 得られた成果

昨年度においては GOCE による一回目の重力観測期間（61 日分）のデータを用いて作成された全球重力場モデルを対象としたが、今回、6 ヶ月超の GOCE 観測データを 6.5 年超の GRACE 観測データなどと組み合わせ作成された全球重力場モデルを対象とする。そのさい、陸上重力場データと人工衛星アルチメトリーによる海域重力場データも含めることにより最も高い分解能である混合モデル EIGEN-6C（球面調和係数

1420 次まで ; Foerste et al., 2011), および, 衛星データだけを用いたモデルのうち, EIGEN-6C と最も高次まで適合度の良い GOCO02S (球面調和係数 250 次まで ; Goiginger et al., 2011) を扱うこととし, 最新の全球高分解能モデル EGM2008 (Pavlis et al., 2008) および最新の日本列島の重力ジオイド・モデル JGEOID2008 (Kuroishi, 2009) と比較しつつ, 日本列島における精度を評価する.

IAG の国際全球重力場モデル・センター (ICGEM) による GOCO02S のジオイド高のスペクトル (degree variance) 分布において, 次数が凡そ 180 次を超えると, 信号強度が有意な低下を示している. そこで, GOCO02S については次数 180 次までの球面調和係数を採る. 一方, EIGEN-6C では全ての係数を採ることとする. ジオイド・モデルの精度を評価する場合, 特に日本列島では, 短波長のジオイド起伏が大きく, その影響を低減する必要がある. そのため, 採用された次数より高次の成分について EGM2008 の係数を 2190 次まで連結したものをを用いることとする.

各重力ジオイド・モデルについて, ジオイド測量による主要 4 島のジオイド高データ (816 点) に対する較差の統計量を表一に示す. GOCO02S は, EGM2008 に比べると, 直接較差では標準偏差にほとんど違いがなく, 平面回帰後の残差の分散では約 4 % の増大を示している. 一方, EIGEN-6C では, 直接較差と平面回帰後の残差のいずれにおいても, EGM2008 に比べ, 有意な分散の低下が認められる. JGEOID2008 に比べると, EIGEN-6C は, 直接較差の分散ではほとんど違いがなく (2 % 強の減少), 平面回帰後の残差の分散は約 9 % 大きくなっている. 従って, 現時点において公表されている全球重力場モデルを基盤としても, 日本列島の重力ジオイド・モデル JGEOID2008 を改善する効果は期待されない.

表一 全国 816 点のジオイド高データを用いたジオイド・モデルの較差統計量. ‘Direct differences’ は直接較差, ‘Planar fit’ は平面回帰を行った較差であり, mean と SD はそれぞれ平均と標準偏差, 回帰平面の傾斜率と最大傾斜の方位角をそれぞれ Tilt と Azimuth を示す.

Geoid Model	Direct differences		Planar fit		
	Mean (cm)	SD (cm)	Tilt (ppm)	Azimuth	SD (cm)
EIGEN-6C	-22.12	8.34	0.13	79°	6.25
GOCO02S	-22.07	8.85	0.15	87°	6.73
EGM2008	-21.72	8.88	0.11	43°	6.61
JGEOID2008	-20.20	8.44	0.18	97°	5.99

#### 4. 結論

6 ヶ月超の GOCE 観測データを 6.5 年超の GRACE 観測データなどと組み合わせて作成された全球重力場モデルについて, 日本列島におけるジオイドのモデル精度を評価した. 主要 4 島におけるジオイド高データに基づくと, 先行公表されたモデルに比べ精度に改善が認められるものがあるが, 最新の日本の重力ジオイド・モデルを改善する効果は期待されないことが分かった.

#### 参考文献

- Foerste, C. et al. (2011): EIGEN-6 A new combined global gravity field model including GOCE data from the collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse, presented at the 2011 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 3-8, 2011
- Goiginger, H. et al. (2011): The combined satellite-only global gravity field model GOCO02S, presented at the 2011 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 3-8, 2011
- Kuroishi, Y (2009): Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, Earth Planets and Space, 61 (7), 807-813
- Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, J.K. Factor (2008) An Earth gravitational model to degree

2160: EGM2008. presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008

# GPS リアルタイム解析の品質向上に関する研究 (第3年次)

実施期間 平成 21 年度～平成 25 年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 宗包 浩志

## 1. はじめに

GPS リアルタイム解析は、高速で進行する地殻変動の把握および防災情報の提供に活用が期待されている。科学技術・学術審議会による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について(建議)」において、国土地理院は、GPS の 1 秒間隔データを用い、地震前後や火山噴火過程等、高速に進行する地殻変動について、その時間推移を準実時間で把握する技術の高度化を図るとされており、GPS リアルタイム解析技術を高度化することが求められている。また、国土地理院では、平成 21 年度から実施している研究開発基本計画において、GPS 測量等 GNSS による測量の活用を図るため、各種の誤差の低減及び迅速な位置情報の提供に関する研究開発を行い、測量等において必要な知見・成果等が得られることを目指して、本研究はそれに資するものである。

GPS リアルタイム解析は、スタティック解析に比べて観測誤差の影響を受けやすく、座標解の安定性が低いことが知られており、リアルタイム性を維持しつつ座標解の安定性を向上させる高度な解析手法の開発が必要である。GPS リアルタイム解析の誤差源は、主に、GPS 衛星からの電波が観測点付近の地物に反射されて到達することにより発生するマルチパスと、大気による電波遅延によるものと考えられている。マルチパスに起因する誤差については、通常、GPS 衛星の配置がほぼ恒星日周期を持つことを利用し、座標解を恒星日単位でスタッキングして作成された恒星日フィルタを用いて補正されるが、実際の GPS 衛星の周期は、衛星毎にばらばらであり、恒星日からずれることが知られており、正確な方法ではない。一方、大気による電波遅延は、通常、解析時に座標と同時に推定されるが、大気による電波遅延量と座標解は強く相関している上、推定モデルが単純であって、荒天時には複雑な電波遅延が十分取り除けないため、その影響を軽減する新しい手法が求められている。

## 2. 研究内容

本研究では、GPS リアルタイム解析における、マルチパスおよび大気による電波遅延量の影響を軽減するため、位相残差マップを用いたマルチパス除去手法や数値気象モデルを用いた大気誤差の低減手法について開発を行うことにより、GPS リアルタイム解析における座標解の品質向上を実現する。そのため、後処理キネマティック GPS 解析について上記手法の開発を行い、次に、開発した手法を GPS リアルタイム解析へ取り入れるための技術開発を行う。

昨年度、平成 21 年度に開発した、位相残差マップによるマルチパス誤差除去手法を将来的に GPS リアルタイム解析へ応用する準備段階として、元とする GPS リアルタイム解析ソフトウェアの候補である trackRT を用いて GPS リアルタイム解析を試行したが、波数不確定性の誤決定によると思われる解の発散がしばしば生じることが判明したため、本年度は trackRT とは異なるアルゴリズムに基づく GPS リアルタイム解析ソフトウェアについて GPS リアルタイム解析を試行し、その実用性を評価する。

### 3. 得られた成果

「PPP-Wizard」は、フランス国立宇宙研究センター(CNES)で開発されたソフトウェアである(Laurichesse et al., 2009). このソフトウェアは、ドイツ連邦地図測量庁(BKG)で開発されたリアルタイムGPSデータ処理ソフトウェアBNCをベースとしており、RTCM形式で配信されるリアルタイムGPSデータを受信し、PPP(精密単独測位法)によるキネマティック解析を行う機能を持つ. その解析においては、CNESにより配信される補正情報を組み込むことで、波数不確定性の決定を行うことができるという特徴を有する.

IGS観測点の「水沢(MIZU)」の観測データを対象として、2011年5月25日から3日間、PPP-Wizardを用いたリアルタイム測位を試行した(図-1). 図-1(右)の通り、しばしば波数不確定性がリセットされ、FIX率が0%におちてしまう事象が発生していることがわかる. 図-1(左)を見ると、そのような現象に対応して座標解がリセットされ、再収束するまでの間座標解に跳びが生じている. そのような跳びをアウトライヤーとして除外(閾値0.5mで判定)した場合の座標解の再現性は、(N, E, U) = (0.07, 0.10, 0.16) (m)であった. 図-1(左)を細かく見ると、5月25日の正午頃から26日の正午頃にかけて、座標解が大きくゆらいでいることが分かる. 図-1(右)によるとこの時間帯で、特にナローレーンのFIX率が大きく低下しており、このことが測位解の劣化の原因と考えられる. 一方、5月26日正午以降においては、ワイドレーン、ナローレーンともにFIX率はほぼ60%以上で安定しており、測位解の座標再現性が、(N, E, U) = (0.03, 0.04, 0.10) (m)と良好であった.

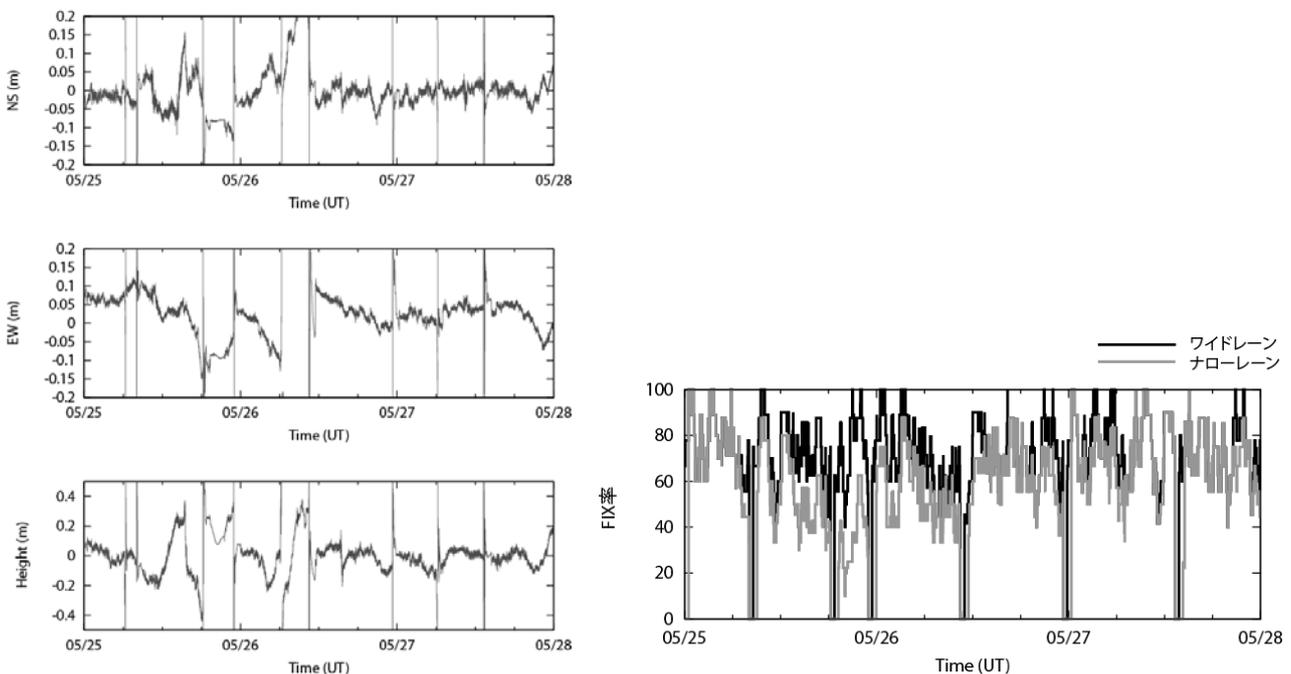


図-1 PPP-Wizardによるリアルタイム測位解析の例(IGS観測点「水沢(MIZU)」). (左)が測位解三成分の時系列, (右)が波数不確定性のFIX率を示す.

### 4. 結論

CNESで開発されたPPPによるGPSリアルタイム解析ソフトウェアPPP-Wizardを用い、リアルタイムキネマティック解析を試行した. その結果、一部の期間で良好な測位結果が得られるものの、他の期間ではしばしば波数不確定性がリセットされること、ナローレーンの波数不確定性FIX率が低下し

て座標解に揺らぎが生じる場合があることなどが分かった。従って、このソフトウェアは、現状ではまだ安定性に欠け実用的とはいえないが、PPP において波数不確定性を決定する手法は潜在的には有望な手法であり、今後とも、技術発展の動向を注視する予定である。

#### 参考文献

Laurichesse, D. , F. Mercier, J.P. Berthias, P. Broca, L. Cerri (2009): Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination, Navigation, 56 , 135-149.

# 地殻上下変動計測の整合性向上に関する研究（第3年次）

実施期間 平成 21 年度～平成 25 年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 黒石 裕樹

## 1. はじめに

日本の標高基準は、東京湾平均海面を基準とする高さの系として定められ、全国の一等水準測量を骨格として正標高（ヘルメルト高）が与えられている。一方、宇宙測地技術の測地測量への導入と電子基準点網（GEONET）の構築により、基準点の幾何学的な三次元位置が世界測地系に基づく測地基準点成果として決定され、これらの楕円体高を正標高と関係づけるジオイド・モデルも提供されている。

テクトニック・プレートの収斂境界に位置する日本列島は、地震や火山の活動が活発であり、それらの発生や進展機構の解明や監視を行うことが防災や減災の支援のために重要である。その取り組みの一つとして、国土院では地殻変動の全国的な監視が継続して行われている。地殻変動については連続的な監視が GEONET により実現されており、上下変動については水準測量の繰り返し観測に加え、近年では衛星 SAR（合成開口レーダー）による監視が取り入れられている。また、沿岸部には験潮場が設置され、長期間に亘って潮位変化の観測が行われ、水準測量と併せて長期的な上下変動の推定にも活用されている。

GPS 技術については、IGS（国際 GNSS 事業）による国際観測や GEONET による国内観測が継続され、それらを用いた測地測量技術の高精度化研究が国際的にも進められており、地殻の上下変動成分を安定して観測する利用技術の発展が期待されている。上下変動の観測に関する、これら異なる技術は、異なる高さ（物理的標高、幾何学的楕円体高や地殻に対する潮位面の相対高など）を捉えるものである。したがって、我が国における地殻上下変動を短期、中長期的に高精度で把握するためには、これら異なる技術について整合した変動観測を実現することが求められる。そこで、本課題では、上下基準系に関係する、験潮、GPS、水準測量、ジオイド等の観測・モデルについて、それぞれの精度向上を図るとともに、相互比較を通じて整合性の評価および改善を図ることを目的とする研究を行う。

## 2. 研究内容

本研究では、上下基準系に関する計測である験潮、GPS、水準測量などの観測技術や、日本の標高基準系の絶対的位置と内部整合性などを評価するための国際的な標高基準として期待される絶対的な全球的ジオイド・モデルについて、相互の整合性を評価し、それらの整合性を高めるための解析技術の改良を行う。

第3年次においては、隣接する潮位観測におけるコヒーレンシー分析に基づく平滑化手法を構築し、その手法を東京湾近傍の4つの験潮場に適用することにより評価を行う。

## 3. 得られた成果

構築された潮位平滑化手法は二段階の処理からなる。まず、各々の験潮場について、潮位および最寄りの気象観測点における海面位気圧の1時間間隔のデータを対象として、暦年ごとに BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) による海洋潮汐と気圧応答の推定・除去を行い、経年的潮位値を求める。つぎに、経年的潮位値の日平均値をとり、線形回帰後の残差時系列について Morlet ウェーブレットによる半離散化ウェーブレット変換を行い、海面位のステリック変動や海象に伴う変動が共通性を持つ、隣接する2験潮場について、得

られたウェーブレット変換を用いたコヒーレンシー解析を適用し、有意なコヒーレンシー成分を除去することで平滑化潮位の日平均時系列とする。

この平滑化手法を東京湾周辺にある油壺験潮場（国土地理院）、横須賀験潮所（海上保安庁）、東京検潮所・千葉検潮所（気象庁）の4点で得られた1978年から2008年までの31年間の観測データに適用した。コヒーレンシー解析によると、油壺と横須賀の間ではほとんどの時期と周期においてコヒーレンシーが高くなっているのに対し、東京と千葉では、1年周期では全期間においてコヒーレントであるが、それより短い周期においてはコヒーレントではない時期がかなりみられた。後者は東京湾奥にあつて河口に近いため、互いにコヒーレントではない短周期変動が多く含まれていると推測される。

各点について、有意なコヒーレンシー成分を除去して得られた平滑化潮位の日平均時系列から月平均値を求めたものを図-1に表す。図-1には、国土地理院による最寄りのGPS連続観測局における定常解析・最終解（F3解）から求めた、地盤楕円体高の沈降成分を併せて示している。油壺と横須賀の平滑化潮位は全体を通じて互いによく似た変化を示し、東京と千葉の平滑化潮位では単周期変動が個別に残存するものの中期的変化はよく似ている。1990年代後半以降に得られている、GPS連続観測による地盤高に認められる変化の傾向は、平滑化潮位の中期的変化と良く対応しており、これらを組み合わせて潮位の楕円体高変化を求めると、当該期間においてほぼ線形な（海面上昇）速度を示す。その速度は、人工衛星海面高度計による観測に基づくAVISOの解析から推定されたものと、誤差の範囲において整合した。

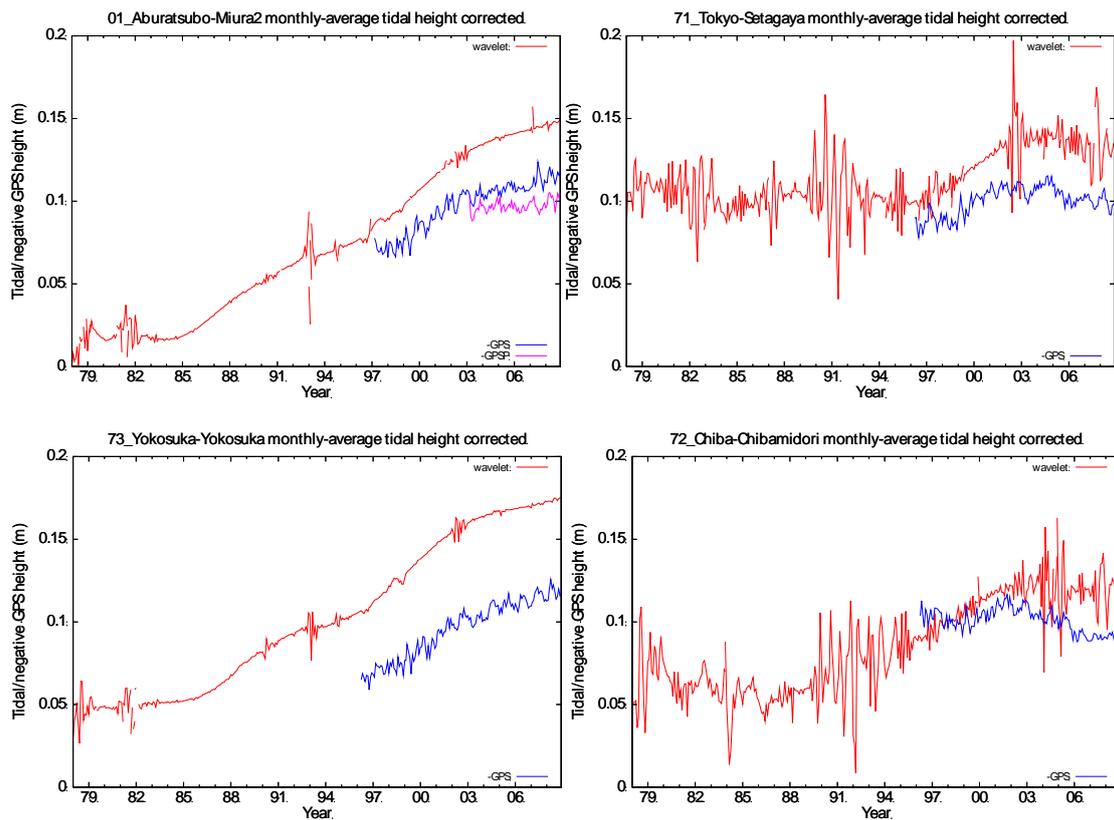


図-1 平滑化潮位の月平均値と対応するGPS連続観測局における地盤楕円体高変化（黒石，2012）。上左は油壺，上右は東京，下左は横須賀，下右は千葉。横軸は観測年（暦年の下二桁で表示），縦軸は相対的な潮位値，または，対応するGPS連続観測局におけるGPS観測による地盤の相対的楕円体高の反符号値である。

油壺と横須賀の潮位平滑化については、より長い期間（1967年から2010年までの44年間）のデータを用いることができる。また、日本水準原点と油壺験潮場固定点の間では、国土地理院により1～2年ごとの頻度で繰り返し水準測量が行われている。これらを組み合わせることで、油壺の平滑化潮位面に基づく日本水準原点の高さを試算することが可能である。今回、繰り返し水準測量については、水準原点から三浦半島の西岸の路線を経て油壺固定点に至る単路線の観測による累積比高を採ることとする。そのため、水準網による調整処理等が行われず、通常の実測成果に比べ、精度が幾分劣ることとなる。また、この区間の測量には1ヶ月から7ヶ月の期間を要しており、平均潮位面の高さとしては、原点における測量を行った暦年の年平均平滑化潮位値を参照することとする。この方法により1970年から2010年までの期間について得られる、油壺の平均潮位面に対する原点の高さは、水準観測における誤差のばらつきの範囲で分布することが分かった。

#### 4. 結論

験潮場における潮位観測の平滑化手法が構築された。その手法は、海洋潮汐と気圧応答を推定・除去した経年的潮位の時系列について半分散化ウェーブレット解析による局在化変換を行い、海面位のステリック変動や海象に伴う変動が共通性を持つと推定される、隣接する二つの験潮場におけるウェーブレット変換の間でコヒーレンシーを分析し、各験潮場における経年的潮位から有意なコヒーレンシー成分をそれぞれ除去するものである。

この手法を東京湾周辺の4つの験潮場のデータに適用した結果、潮位の滑らかな変化が明らかとなり、その変化は、最寄りのGPS連続観測局におけるGPS観測から求められる地盤の楕円体高変化による成分と、時間に線形な速度成分からなっていることが分かった。後者は、人工衛星海面高度計観測に基づいて推定された海面上昇速度と整合している。また、油壺験潮場の平滑化潮位面を基準とし、験潮場固定点からの繰り返し水準測量データを用いて試算された日本水準原点の高さは、1970年から2010年の期間において、誤差の範囲内で安定している結果が得られた。これらは、平滑化手法の経年的な潮位変化抽出における有効性を示している。今後、GPS連続観測局が併置された験潮場に対して平滑化手法を適用し、GPS連続観測による地盤上下変動との比較を通じて、手法の性能評価をさらに進めたい。

#### 参考文献

- 黒石裕樹 (2012): 平均海面位変化と上下変動の検出に向けた験潮データの平滑化手法, 測地学会誌, in press.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro (1991): A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507-516.

# GPS のマルチパス誤差の定量的評価に関する研究 (第2年次)

実施期間 平成 22 年度～平成 23 年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 宗包 浩志

## 1. はじめに

地面や地物等により反射された電波によるマルチパスが原因となる測位誤差については、そのメカニズムが複雑であること、また、キネマティック・短時間スタティック測位では影響が大きいものの、衛星配置が恒星日の周期を持つため測位誤差も同じく恒星日周期を持ち、24 時間測位においては平均化されるため影響が小さいと考えられてきたことなどから、これまで十分に検討されてこなかった。ところが近年、地面反射によるマルチパス誤差が、当初懸念されていたキネマティック・短時間スタティック測位における影響に加え、降雨に伴う地面の電波反射率の時間変化や衛星配置の時間変化に伴い、時間的に相関をもつ複雑な測位誤差をもたらすことが分かってきた。そのような誤差は、中・長期的な地殻変動の監視において障害となりうるものであり、定量的な評価手法が求められている。

## 2. 研究内容

GPS 受信機 SNR (信号ノイズ比) を用いて GPS 時系列に含まれる地面反射マルチパス誤差を定量的に評価する手法を試行するとともに、土壌水分量のモデリングにより独立に地面反射マルチパスを推定し、両者の比較を行う。また、いくつかの GPS 連続観測点について、キネマティック・短時間スタティック測位および 24 時間スタティック測位のそれぞれについて、推定された地面反射マルチパスによる測位誤差を、実際の座標誤差時系列と比較し適合度を評価する。

本年度は、昨年度実施した地面反射マルチパスによる測位誤差と 24 時間スタティック測位座標時系列との比較に引き続き、キネマティック測位座標時系列との比較を実施する予定であったが、予備的な検討の結果、キネマティック測位座標時系列においては地面反射マルチパス起源ではないと思われる誤差が卓越しており、そのままでは比較は困難であることが分かった。そこで、本年度は、キネマティック測位座標時系列に含まれる地面反射マルチパス起源ではない誤差の同定を行うため、キネマティック GPS 座標誤差時系列について、経験的直交関数 (EOF) による分析を行った。

## 3. 得られた成果

米国ジェット推進研究所において開発された GPS 解析ソフトウェアである GIPSY-OASIS II を用い、精密単独測位法により、2011 年 3 月 6 日～11 日 (ただし、東北地方太平洋沖地震の発生前まで) の期間について、電子基準点におけるキネマティック座標解を推定した。その際、マルチパス誤差の影響を低減するために、位相残差マップを用いたマルチパス誤差の低減を施し、衛星軌道誤差などに由来する共通誤差の除去を行った (Munekane, 2012)。次に、同じく米国ジェット推進研究所において開発された GPS 座標時系列分析ソフトウェア qoca を用い、東北地方の電子基準点 289 点の座標時系列について、EOF によるモード分解を行った。

EOF によるモード分解の結果、第 1 モードは 3 月 9 日におきた東北地方太平洋沖地震の前震に伴う地殻変動に対応するが、第 2、第 3 モードには空間分布において特徴的な誤差が現われることが分か

った。つまり、第2モードの空間パターンはほとんどの観測点において南北変位、第3モードの空間パターンはほとんどの観測点において東西並進を示している。例として、図-1に電子基準点「石下」(960583)における、第2、3モードの合成で表現される時系列と観測値の時系列を示す。石下では、前震に伴う地殻変動の影響はほぼ無視できる大きさであり、第2、3モードの合成で表現される時系列は実際の時系列とよく一致している。第2、3モードの合成で表現される時系列の特徴としては、変動が現地時間の日中に限られること、南北成分では、午前中に北に向かって動き続け、それから午後になると南に動き続けて元に戻って収まること、また、東西成分では、明け方になると西向きに動き始め、ほぼ正午を境に東向きに転じ、夕方から夜にかけて元の位置に戻って収まること、があげられる。この様な変動は、日射による電子基準点のピラーの傾動で説明できることが知られている(畑中他, 2005)。

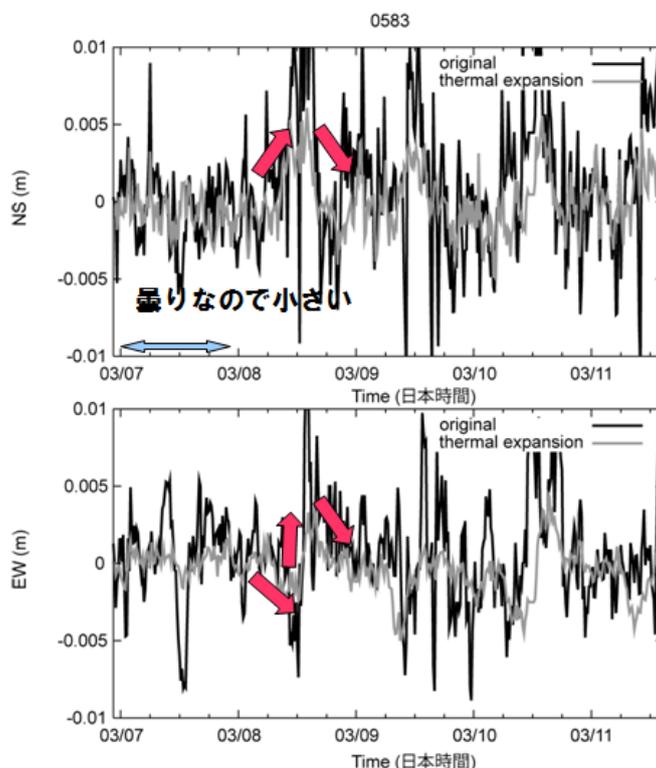


図-1 電子基準点「石下」(960583)におけるモード2および3で表現される時系列(灰色)と観測値の時系列(黒色)の比較。

#### 4. 結論

東北地方の電子基準点289点について、キネマティック座標時系列をEOFによりモード分解し、その主な成分について特徴を分析した。その結果、キネマティック座標時系列に含まれる誤差として、日射による電子基準点ピラーの傾動によるものを同定した。

日射による電子基準点ピラーの傾動は、ほぼモード2、3の合成で表現できるが、他のモードにも混入している可能性があり、EOFのみで完全に除去するのは困難である。今後は、電子基準点に併設されている傾斜計を用いた、日射による電子基準点ピラーの傾動の補正手法を開発するとともに、補正後の時系列について、地面反射マルチパス誤差の影響を定量的に評価する予定である。これについては次年度から特別研究課題「地殻変動監視能力向上のための電子基準点誤差分析の高度化に関する研究(平成24年度~26年度)」として引き継ぐ。

参考文献

畑中雄樹, 山際敦史, 湯通堂亨, 宮原伐折羅(2005) : GEONET のルーチン解の精度評価, 国土地理院時報, 108, 49-56.

Munekane , H. et al. (2012): Coseismic and early postseismic slips associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake sequence: The EOF analysis of GPS kinematic time series, submitted to Earth Planets Space.

# VLBI 相関処理技術を利用した時空情報正当性検証に関する基礎研究(第3年次)

実施期間 平成 21 年度～平成 24 年度  
地理地殻活動研究センター  
宇宙測地研究室 高島 和宏  
共同研究者 市川 隆一 高橋富士信  
大坪 俊通 小山 泰弘  
関戸 衛 岳藤 一宏  
ホビガー トーマス

## 1. はじめに

近年、地理空間情報利用の普及拡大に伴い、利用する位置情報の信頼性担保が求められるようになってきた。多くの場合、位置情報は、その位置が決定された時刻とセットの4次元情報として利用されるため、位置および時刻を併せた時空情報としてその正当性を証明することが求められる。そこで、本研究は、国家標準にトレーサブルな時空情報であることを証明するための手法を確立することを目的に、国家位置基準を定めている国土地理院(GSI)と日本標準時を定めている(独)情報通信研究機構(NICT)を中核とする共同研究により、時空情報正当性検証技術を開発する。

## 2. 研究内容

VLBI では、電波源(Quasar)からの信号を複数の電波望遠鏡で同時受信し、相関処理して得られる望遠鏡間の電波の到達時刻差(Delay)とその変化率(Rate)を用いて、双方の望遠鏡の位置関係を決定できる。そこで、本研究では、この手法を応用し、地上デジタル放送等の電波源を用いて、時空情報認証局とユーザの位置関係から求められる理論的な電波の到達時刻差と同じ相関処理結果が得られるかどうかで、その正当性を検証する仕組みを構築する。本研究の前半2カ年において、時空情報検証に係るハードウェアを各機関で構築した。後半2カ年は、これらのハードウェアをネットワーク接続し、時空情報検証の実証実験を行う計画となっており、本年度は、その一環として、個々のハードウェアの接続と正当性検証のためのデータ取得実験を実施する。

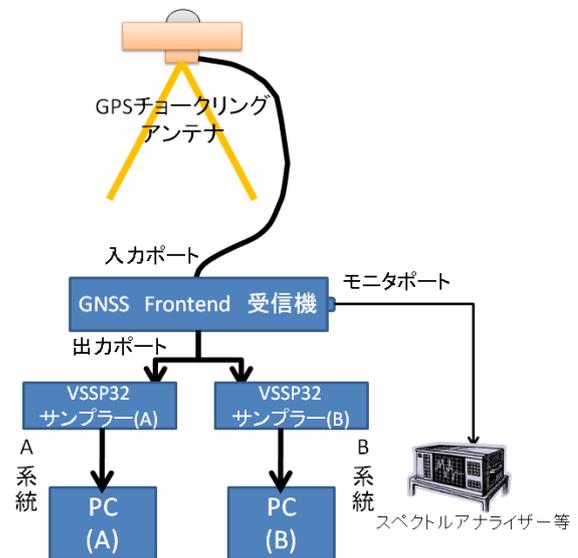


図-1 セルフチェック試験時の機器構成

GNSS Frontend 受信機で受信された GPS 衛星電波をスペクトルアナライザー等で確認した。また、受信機出力を二分配した A 系統と B 系統でそれぞれサンプリング(AD変換)し、独立して記録を行った。それぞれの系統において記録されたデータの相互相関処理を行い、Delay/Rateともに0の相関ピークが得られることを確認した。

## 3. 得られた成果

### 3.1 検証データの取得実験

データ取得実験に先立ち、図-1に示すセルフチェック試験の設定を行い、スペクトル

アナライザー等の計測機器で受信状況の確認を行ったのち、ゼロベースライン試験のために、A系統とB系統に二分配した並列データの取得を行った。この試験において、図-2に示すとおり、遅延時間(delay)と遅延時間変化率(Rate)を0とするところに相互相関ピークが現れた。従って、今回セッティングした計測機器単体での設定や性能に問題が無いことが確認された。

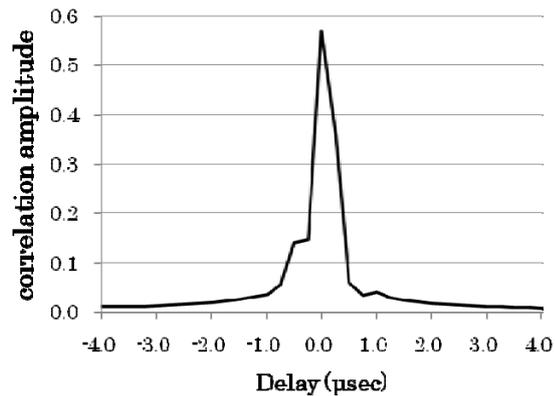


図-2 セルフチェック試験結果  
Rateを0と仮定し、Delayについて $\pm 4\mu$ 秒のサーチ幅で相関処理した結果を示している。相関強度1.0であれば、電波波形が完全一致していることを示すが、本セルフテストでは相関強度は0.58となっており、若干SN比のロスが見られるが、システム上のDelay誤差がないことを確認できた。

次に、図-3に示すシステム構成にて、鹿島とつくばに2台のデータ取得装置を設置し、同時にデータを取得し、つくばと横浜において相関処理する実証実験を8月9日と1月13日に実施した。国土地理院は、つくばにおけるデータ取得と相関処理を担当した。

### 3.2 検証データの相互相関処理実験

#### 【国土地理院】

2点で取得されたデータを、国土地理院においてVLBI定常業務で用いられている相関処理ソフトウェア「cor」((独)情報通信研究機構で開発)により相互相関処理した結果、図-4に示す相関ピークを得た。その相関ピーク値は理論値よりも数百分の1程度と弱く、Delay方向に等間隔に並んで複数のピークが現れている。このことから、理論値から予想される主ピークを示すものではなく、相互相関関数のサイドローブを見ている可能性が高い。その原因としては、データ取得装置の間で時刻同期がとれていないことが疑われる。

今回の実証実験では、別途開発が行われている、双方向時刻同期システムの組込みが完了しておらず、鹿島-つくば間において厳密な時刻同期が行なわれなかったことが問題となった。国土地理院において相関処理に用いたソフトウェアは、高精度に時刻が維持されていることを前提としたVLBI定常観測のデータ処理に使われているものであり、実用上512点程度のDelayサーチ幅に制限されている。そのため、今回の実証実験のように時刻同期精度が低い場合、相関ピークを検出することは非常に困難となる。

#### 【横浜国立大学】

横浜国立大学において、本研究のために新たに開発した相関処理ソフトウェアを用いた相互相関処理が行われた。時刻同期精度が低い場合などでも相関ピークの検出を容易とするため、サーチ幅を3200

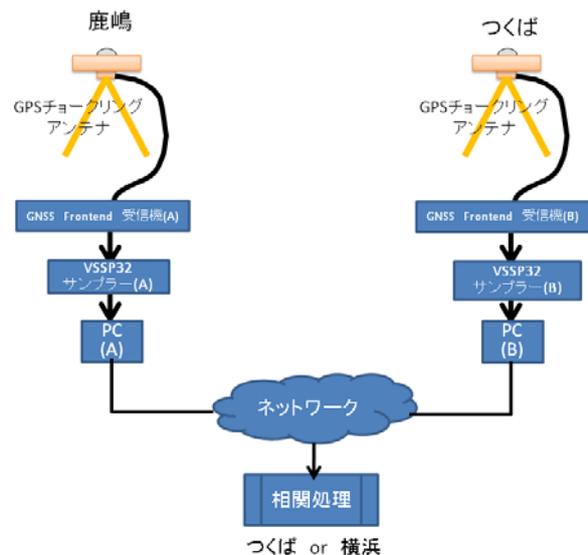


図-3 実証実験システム構成図

鹿島及びつくばの2点で同時にデータを取得し、インターネット回線(SINET4, JGN-X)を用いて、遠隔地にある相関処理システムへデータ受け渡しを行った。相関処理は、国土地理院(つくば)及び横浜国立大学(横浜)の2ヶ所で異なる処理ソフトウェアを用いて実施した。

万点と大幅に広げた相関処理ソフトウェアとされている。このソフトウェアは、PCに内蔵した画像処理ユニット (GPU) を活用しており、従来の中央演算装置 (CPU) を用いた計算処理と比較して、大幅な計算速度の向上と多数の並列計算を可能としている点が特徴である。本ソフトウェアにて取得されたデータの相互相関処理を行った結果の一例を図-5に示す。Delayだけでなく、Rateのサーチ幅も非常に広がっているため、複数のGPS衛星の信号に対する相関ピークを同時検出できている。

#### 4. 結論

開発した時空情報正当性検証システムを用いた実証実験を行った。離れた2地点において取得されたデータを相関処理した結果から、今回のシステムに関しては、正しく時空情報正当性を検証できる仕組みになっていることが確認できた。ただし、システムに時刻同期機能を組み込む点については、課題として残っている。今回新たに開発されたGPUを用いた相互相関処理が成功したことで、複数の電波源を一度に検出でき、大幅な解析の効率化が達成できると考えられる。最終年度となる来年度は、引き続き、共同研究機関と共に、異なる実施場所やGPS以外の電波を用いた実証実験を行う予定である。

本研究は、科研費基盤研究A (課題番号21241043) の助成を受けて実施している。

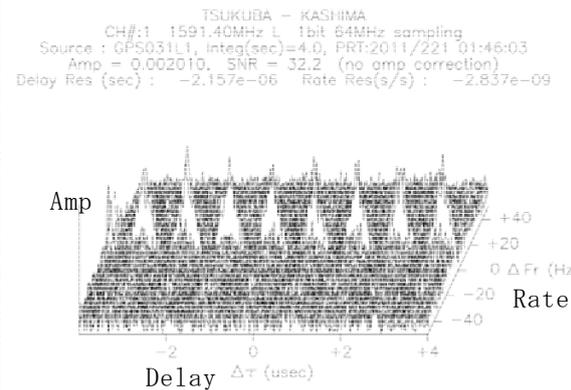


図-4 実証実験データの相互相関処理の結果 (VLBI 定常観測用「cor」による)  
GPS衛星 (PRN31) のL1信号を用いた。横軸 (Delay) 方向に複数の相関強度の低いピークが検出された。相互相関関数のサイドローブであると考えられる。

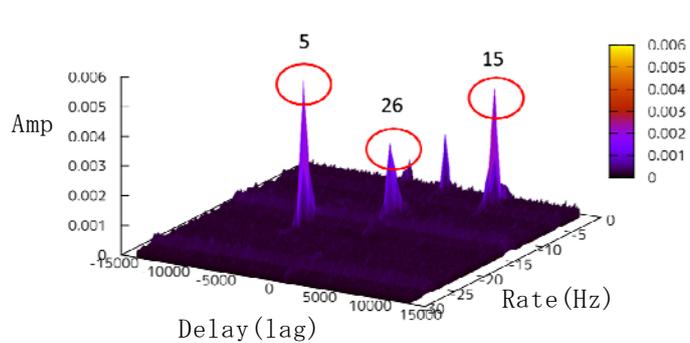


図-5 実証実験データの相互相関処理の結果 (横浜国立大学開発のGPUによる)  
図-4と同じデータを用いた。横軸 (Delay) 方向に±15000点、縦軸 (Rate) 方向に0~30 (Hz) をサーチした結果、GPS衛星のL1信号として3個 (PRN5, PRN15, PRN26) のピークを同時検出することに成功した。