

## IGS 再計算精密暦の国内 G P S 観測網データ解析による評価 (その3) Evaluation of IGS reproduction precise ephemeris applying the analysis of Japanese domestic GPS network data (Part 3)

島田 誠一<sup>1\*</sup>

Seiichi Shimada<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> NIED

IGS では、1400 G P S 週 (2006 年 11 月 5 日) 及び 1410 G P S 週 (2007 年 1 月 14 日) に IGS 精密暦の計算方法を変更する以前の期間について、1410 週以降と同一条件で精密暦を再計算している。

島田 (2011) は、1996 年～1999 年の期間について、東海・伊豆地域の約 90 点の GEONET 点、5 点の防災科研観測点の観測データを、座標基準点として東アジア周辺の約 15 点の IGS 観測点を用いて、従来の IGS 最終暦と IGS 再計算暦を用いて解析して、東海・伊豆地域の観測点の座標値再現性を比較した。解析では、東海・伊豆地域及び座標基準点とした IGS の観測点座標値、観測点上空の天頂遅延量・大気勾配、及び ambiguity 値を推定した。その結果、IGS 再計算暦の座標値再現性は、従来の IGS 最終暦と比較して標準偏差の大きさから判断すると必ずしも有意とはいえないが、特に東西成分と上下成分において IGS 再計算暦の座標値再現性が向上していた。

本研究では、同じ解析で得られた両軌道暦を用いた国内観測点の座標値解について、系統差を比較した。その結果、標準偏差の大きさから判断すると必ずしも有意とはいえないが、IGS 最終暦では IGS 再計算暦より座標値解が北方・西方・上方に偏位していることがわかった。また、この期間に IGS 最終暦は基準座標系としては ITRF94, ITRF96, 及び ITRF97 と基準系を更新している。これらの座標系を用いていた期間の座標値解のあいだの系統差を求めると、ITRF94 基準系を用いていた期間と ITRF97 基準系を用いていた期間とのあいだの差は、ITRF96 基準系を用いていた期間と ITRF97 基準系を用いていた期間とのあいだの差よりはるかに大きいことがわかった。ただし、ITRF94 と ITRF97 とのあいだの上下成分以外は、標準偏差の大きさから判断すると有意とはいえない。

キーワード: IGS 再計算暦, 座標値系統差, 座標値ステップ

Keywords: IGS reproduction precise ephemeris, systematic biases of site coordinates, systematic discontinuity of site coordinates

## マルチ GNSS による高精度測位技術の開発

### Development of a new precise positioning technique using multi-GNSS signals

古屋 智秋<sup>1\*</sup>, 酒井和紀<sup>1</sup>, 万所求<sup>1</sup>, 辻宏道<sup>1</sup>, 平井英明<sup>1</sup>, 川元智司<sup>1</sup>, 宮川康平<sup>1</sup>, 宮原伐折羅<sup>1</sup>, 畑中雄樹<sup>1</sup>, 宗包浩志<sup>1</sup>  
Tomoaki Furuya<sup>1\*</sup>, SAKAI, Kazuki<sup>1</sup>, MANDOKORO, Motomu<sup>1</sup>, TSUJI, Hiromichi<sup>1</sup>, HIRAI, Hideaki<sup>1</sup>, KAWAMOTO, Satoshi<sup>1</sup>,  
MIYAGAWA, Kohei<sup>1</sup>, MIYAHARA, Basara<sup>1</sup>, HATANAKA, Yuki<sup>1</sup>, MUNEKANE, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院

<sup>1</sup> GSI of Japan

国土地理院では、平成 23 年度より、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な国土管理のための複数の衛星測位システム（マルチ GNSS）による高精度測位技術の開発」（平成 23～26 年度）として、これまで GPS 測量が困難であったビル街等を含め、国土管理に必要な高精度測位の効率的な実施のため、米国の GPS をはじめ、日本の準天頂衛星（QZSS）、ロシアの GLONASS、EU の Galileo といった各国の衛星測位システムのデータを統合的に利用するマルチ GNSS 高精度測位技術の開発及び標準化に向けた検討を進めている。なお、プロジェクトの実施にあたっては、外部有識者委員会を開催し、大学や関係機関のアドバイスを得ている。

本発表では、平成 24 年度までに得られた成果について報告するとともに、平成 25 年度以降の技術開発の計画について述べる。

技術開発の内容は、大きく次の 3 つに分けられる。

- 1) マルチ GNSS の解析技術等の開発
- 2) 解析技術の検証
- 3) 高精度測位技術の標準化

平成 24 年度は、1) において、平成 23 年度に開発した異なる種類の受信機間で発生する GLONASS チャンネル間バイアス（IFB）を補正する方法の検証や、異なる衛星系間で発生する受信機ハードウェアバイアス（ISB）を補正する方法の開発・検証を実施した。今後、東京海洋大学で開発されたオープンソースの測位ソフトウェアである RTKLIB v2.4.1 (Takasu, 2011) をベースに、これらの補正を実装した測量用解析ソフトウェアを作成し、平成 25 年度早期に GPS・準天頂衛星・GLONASS に対応可能なプロトタイプ版の公開を予定している。なお、計算手法の開発・検証にあたっては日立造船株式会社・東京海洋大学・立命館大学、測量用解析ソフトウェアの開発にあたっては富士通株式会社の協力を得た。

また、2) において、準天頂衛星を含むマルチ GNSS の観測が可能な受信機を 3 機種利用して、つくばにおいて GNSS 衛星の試験観測を行い、それら観測点を組み合わせることができる様々な基線について、GPS 信号のみで測量をする場合、準天頂衛星・GLONASS を加えて測量をする場合、複数の種類の受信機を用いて測量をする場合の各場合において解析を実施し、準天頂衛星の効果や各衛星のデータ品質及び特性を評価した。3) については、平成 25 年度以降に実施予定である。

（プロジェクトホームページ：[http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss\\_main.html](http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html)）

## 複数 GNSS 対応高精度軌道時刻推定ツール MADOCA の開発 Development of multi-GNSS precise orbit and clock determination tool MADOCA

高須 知二<sup>1\*</sup>, 安田明生<sup>1</sup>, 小暮聡<sup>2</sup>, 中村信一<sup>2</sup>, 三吉基之<sup>2</sup>, 河手香織<sup>2</sup>, 曾我広志<sup>3</sup>, 平原康孝<sup>3</sup>

Tomoji Takasu<sup>1\*</sup>, Akio Yasuda<sup>1</sup>, Satoshi Kogure<sup>2</sup>, Shinichi Nakamura<sup>2</sup>, Motoyuki Miyoshi<sup>2</sup>, Kaori Kawate<sup>2</sup>, Hiroshi Soga<sup>3</sup>, Yasutaka Hirahara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京海洋大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 日本電気

<sup>1</sup>Tokyo University of Marine Science and Technology, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>3</sup>NEC Corporation

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は準天頂衛星 (QZSS) の LEX (L バンド実験) 信号チャンネルを使った測位補強情報による、単独搬送波位相測位 (PPP) 実験の計画を進めている。この PPP 測位補強の目標精度は 10 cm RMS 以下であり、サービスエリアは QZSS の放送信号が受信できる太平洋上を含んだアジア・オセアニア地域全域である。測位補強対象の衛星系は GPS、GLONASS、QZSS および Galileo である。

PPP は地上の基準点に依存せずに広範囲のユーザに高精度測位サービスを提供することが可能なため、精密農業、津波ブイ、地殻変動監視、GNSS 気象学等をはじめとする多数の理学・工学応用が期待されている。PPP 用の測位補強情報の生成には広域の地上基準局の観測データを使った高精度な衛星軌道・時刻決定が必須である。本プロジェクトでは、そのために複数 GNSS 対応のリアルタイム GNSS 基準局網 (MGM-net) を整備すると共に、高精度軌道・時刻推定用ソフトウェアをスクラッチから開発するものとした。ここで開発したソフトウェアを MADOCA (Multi-GNSS advanced demonstration tool for orbit and clock Analysis) と呼んでいる。

MADOCA の開発は二段階で実施され、平成 23 年度には GPS、GLONASS および QZSS 用オフライン解析機能の実装と評価、平成 24 年度にはリアルタイム解析機能の実装およびオフライン解析機能の Galileo 対応拡張が行われた。MGM-net、MADOCA および QZSS LEX を使用した PPP 実験自体は平成 25 年度から実施される予定である。

MADOCA の開発にあたっては、新規開発した衛星太陽輻射圧モデルや衛星姿勢モデルを含んだ精密軌道力学モデル、IERS Conventions 2010 や電離層高次項補正等を取り入れた最新の測地学・大気モデル、整数値バイアス決定や受信機バイアス推定等の複数 GNSS 対応の GNSS 衛星精密軌道・時刻決定技術が導入されている。パラメータ推定手法としては、オフライン推定では逐次最小二乗法、リアルタイム推定では拡張カルマンフィルタ (EKF) が使用される。最大 90 機に及ぶ GNSS 衛星の軌道・時刻決定時間の短縮と数値計算安定化も大きな技術課題であり、そのための行列演算アルゴリズムの最適化を行った。軌道力学モデル、測地学・大気モデル等の大部分のモデルはモジュール化・標準ライブラリ化され、容易に拡張・交換可能とすると共に、オフライン推定およびリアルタイム推定の両方で共用される。データ形式としては標準的な GNSS データ規格である、RINEX 2、SINEX、IONEX、ANTEX 等を取り扱うと共に、最新規格である RINEX 3、RTCM SSR (state space representation)、RTCM MSM (multi-signal message) (一部ドラフト) 等もサポートされる。

軌道・時刻推定結果は、GPS および GLONASS に関しては IGS 最終暦との比較、QZSS および Galileo に関してはオーバラップ、SLR 残差、ESA 暦および DLR 暦との比較によりその精度が評価された。パラメータチューニングやモデル改良により、オフライン軌道・時刻に関しては、概ね IGS 解析センター最終暦と同程度の性能 (GPS 3 cm 以下、GLONASS 5 cm 以下、3DRMS) を達成している。リアルタイム軌道・時刻に関しては現在精度評価中である。

本報告では以上 MADOCA の以上の技術概要を紹介すると共に、現時点での MADOCA の性能評価結果、今後の拡張計画について述べる。

キーワード: GNSS, QZSS, 精密単独測位, LEX, 軌道決定

Keywords: GNSS, QZSS, PPP, LEX, orbit determination

## セミアリアルタイム海底地殻変動観測に向けた GNSS 測位精度評価

### An accuracy evaluation of GNSS positioning toward semi-real time seafloor geodetic observation

山本 淳平<sup>1</sup>, 長田 幸仁<sup>1\*</sup>, 太田 雄策<sup>2</sup>, 平原 聡<sup>2</sup>, 出町 知嗣<sup>2</sup>, 佐藤 俊也<sup>2</sup>, 木戸 元之<sup>1</sup>, 藤本 博己<sup>1</sup>, 内田 雅之<sup>3</sup>

Jumpei Yamamoto<sup>1</sup>, Yukihiro Osada<sup>1\*</sup>, Yusaku Ohta<sup>2</sup>, Satoshi Hirahara<sup>2</sup>, Tomotsugu Demachi<sup>2</sup>, Toshiya Sato<sup>2</sup>, Motoyuki Kido<sup>1</sup>, Hiromi Fujimoto<sup>1</sup>, Masayuki Uchida<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター, <sup>3</sup> 測位衛星技術株式会社

<sup>1</sup>International Research Institute of Disaster Sciences, Tohoku Univ., <sup>2</sup>RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>3</sup>GNSS Technologies Inc.

GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測は、陸上の GPS や水準測量観測だけでは分解能が不足するプレート境界浅部の地殻変動場を理解する上で極めて重要な観測手段である。しかし現在、海底地殻変動観測は特定の海域を繰り返し観測するスタイルとなっており、地殻変動場の時空間変化をリアルタイムで捉えることができない。GPS/音響結合方式は洋上部分と海底部分から成っており、洋上部分に相当する曳航ブイまたは船舶の位置や動揺を把握するために高サンプリングの GPS データを用いる。海底部分は音響トランスデューサーを用いた音響測距観測により、洋上部分を基準とした海底局の位置が推定される。現状では、これらの観測が終了した後に後処理キネマティック相対測位が行われ、後処理解析による洋上部分の位置が数 cm 程度の精度で決定されている。仮に GPS 解析部分のリアルタイム化と高精度化が可能になれば、自航式ブイや係留ブイ等を用いた GPS/音響結合方式によるセミアリアルタイム海底地殻変動観測に向けて大きな進歩になると考えられる。

一般的に、GPS でリアルタイムに位置を把握する手段として RTK-GPS 測位と精密単独測位の 2 種類が存在する。RTK-GPS 測位の場合、基線が長くなるほど推定精度は悪化し、かつ基準局と移動局のデータが解析上必要となる。一方、精密単独測位は基準点を必要としない解析方法であるため、測定精度が観測場所に依存せず、かつ解析は移動局のデータのみで行える。そこで、本研究ではリアルタイム精密単独測位の精度評価及び、RTK-GPS 測位を洋上で行うために必要な通信網についても試験を行ったのでその結果を報告する。

精密単独測位については、手法の一つである StarFire を用いて、2012 年 10 月と 12 月に静止状態と移動状態両方の条件で観測データを取得して精度評価を行った。静止状態の観測は 10 月 24 日～28 日に行い、GIPSY-OASIS II ソフトウェア (以下 GOAII とする) によるこの期間の日ごとのスタティック測位解の平均値を基準位置とし、StarFire 受信機にリアルタイムで記録される座標値のばらつきや系統的誤差を調べた。その結果、系統的誤差は南北成分 1.4cm、東西成分 0.5cm、上下成分 1.2cm で得られ、GOAII の観測期間内における時系列データの標準偏差以下となり、良い一致を示した。また座標値の標準偏差は水平成分 1.8cm、上下成分 4.1cm となり、StarFire の公称精度 (水平成分: 5cm、上下成分 10cm) 以下の精度で得られた。ただし、これらの数値は 4 日間の観測データから得られたもので、長期的な安定性の評価はされていない点に注意する必要がある。この結果を Ohta et al.(2012) の RTK-GPS 測位の基線長依存性のグラフと比較すると、基線長が 500km 以上であれば、基線解析よりも StarFire が有効であると確認された。さらに、今後 12 月に行った移動状態の観測においても同様に精度評価を行い、StarFire の有効性について議論を行う予定である。

RTK-GPS 測位を洋上で行うための試験としては、衛星携帯電話による TCP/IP 通信を用いて長期間安定した通信が可能かどうかの評価を行った。衛星回線には静止衛星を経由した NTT・DoCoMo 社の帯域占有サービス (最大 32kbps) を用い、短・長基線での静止測位および船舶を用いた移動体測位によってその安定性を評価した。その結果、基本的には安定して RTK 解析が可能であるが、移動体の場合には通信が途切れ、測位解が得られないケースもあった。実運営上はそれらの対策が必要であると考えられる。

## マルチパスによる GPS 潮汐計 GPS tide gauge using multipath signatures

中島 悠貴<sup>1\*</sup>, 日置 幸介<sup>1</sup>  
Yuki Nakashima<sup>1\*</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学院自然史科学専攻

<sup>1</sup>Dept. Natural History Sci., Hokkaido University

海面高観測は、津波・地球温暖化の監視やジオイド高の推定において重要な役割を持つ。そのため、さまざまな行政・研究機関が験潮儀をもちいて観測をおこなっている。また近年では衛星に搭載された海面高度計も盛んに利用されている。

岩盤に固定された験潮儀で海面高を観測すると、観測量には純粋な海面高変動だけでなく地殻上下変動の成分が含まれ、験潮儀だけではその成分を取り除くことはできない。そのため純粋な海面高変動をはかる場合には、GPS 等を用いて地殻変動を別途求める必要がある。もしその GPS によって海面高観測もできれば、GPS 受信機ひとつで海面高変動と地殻変動を観測することが可能だ。そのため、より空間的に密な海面高変動観測網を展開できるかもしれない。

GPS のマルチパスとは、衛星から送信されたマイクロ波が地面や建物等による反射波と干渉することによって生じる現象全般を指す。地面や海面での反射によるマルチパスは SNR(signal-to-noise ratio; 信号対雑音比) や L4(Geometry-free な線形結合) の位相を周期的に変化させる。その周期から、GPS アンテナの反射面からの高さを推定することができる。これを応用して、いままでに積雪深 [Larson et al., 2009; Ozeki and Heki, 2011]・土壌水分 [Larson et al., 2008] などを観測した事例が報告されている。また、Larson et al. [2013] は、本研究と同様に GPS のマルチパスを利用して潮汐による海面高の変化が観測できることを示した。

本研究では、日本にある既存の測地 GPS 観測点をそのまま利用して海面高観測が可能であるかを検証した。2012 年 6 月から 7 月にかけて日本全国にある 39ヶ所の GPS 観測点で得た SNR から海面高を推定し、験潮儀による直接観測値と比較した。39ヶ所のうち 37ヶ所は、国土地理院が験潮データの補正のために験潮場に設置した GPS 観測点 (GPS-P 点) である。その結果、Larson et al.[2013] と比べて精度は劣るものの、海面高変動をとらえることができた。今回は、特に良好なデータが得られた沖縄本島の験潮所を中心に、GPS で計測した潮位の精度について報告する。

キーワード: GPS, GNSS, マルチパス, 海面高変動  
Keywords: GPS, GNSS, multipath, sea level change

## GEONET F3 解に含まれる大気遅延量及び大気遅延勾配のオフセット Offset of zenith tropospheric delays and tropospheric delay gradients in GEONET F3 solution

吉田 清人<sup>1\*</sup>, 日置 幸介<sup>1</sup>  
Kiyoto Yoshida<sup>1\*</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学院自然史科学専攻

<sup>1</sup>Dept. Natural History Sci., Hokkaido Univ.

国土地理院時報第 118 集, GPS 連続観測システム (GEONET) 解析結果に生じる人為的要因によるオフセットの補正手法について (岩下ほか, 2009) には, GEONET の定常解析結果に実際の地殻変動ではない, GPS 観測局のメンテナンス等的人為的要因によって生じる座標値のとび (オフセット) が示されている。同様に, 定常解析結果には大気遅延量, 大気遅延勾配にもオフセットがみられ, GPS 異機種間解析における系統誤差の補正方法について (越智, 畑中, 2010) において, L1 解及び L2 解の水平方向は数 mm 以内で一致するが, 鉛直方向は系統的なオフセットが生じ, 特に大気遅延量を推定する際にそのオフセット量も大きく変化すると示され, シミュレーションにより位相中心のずれやアンテナの位相パターンの違いがオフセットを生じる重要な原因であることが確認された。

本研究において, 異機種間における大気遅延量の系統誤差のみではなく, 同機種交換, レドーム, 架台調整等, 他のメンテナンスにおいてもオフセットを確認した。オフセット量は F3 解に含まれる大気遅延量の時系列を季節変化, 長期変化とともに最小二乗法により推定した。

また, F3 解において座標値, 大気遅延量とともに推定されている大気遅延勾配についてもオフセットが存在することを確認した。大気遅延勾配は方位角による大気遅延の差を表す。そのため, 大気遅延勾配のオフセットが起き得るのは, 1. 観測点周囲の大気の状態が定常的に変化すること, 2. アンテナの位相特性が方位角により変化すること, 3. メンテナンス, 及び地殻変動によりピラーの傾きが変化することなどが考えられる。

これらのオフセット量を推定, メンテナンス, 水準測量によるピラーの傾きの変化との関連を評価し, 安定した連続観測のために役立てることを目的とする。

キーワード: オフセット, 大気遅延, 大気遅延勾配

Keywords: offset, tropospheric delay, tropospheric delay gradient

## 南極昭和基地における重力とGPSデータを用いた周波数依存ラブ数・志田数の決定 Frequency dependent Love and Shida numbers determined from GPS and gravimetric data at Syowa Station, Antarctica

青山 雄一<sup>1\*</sup>, 土井 浩一郎<sup>1</sup>, 渋谷 和雄<sup>1</sup>

Yuichi Aoyama<sup>1\*</sup>, Koichiro Doi<sup>1</sup>, Kazuo Shibuya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research

南極昭和基地では、地圏変動モニタリングのため、様々な測地観測がなされてきた。本研究では、固体地球の外力(潮汐)に対する周波数応答特性を調べるため、2010年1月7日から3年間分の超伝導重力計による重力連続観測データ(SGデータ)と国際GNSS事業(International GNSS Service; IGS)のSYOG観測点のGPSデータを潮汐解析し、Love数・志田数( $h, k, l$ )を求めた。SGデータは、1分値にローパスフィルターを適用して、1時間データを作成し、BAYTAP (Tamura et al., 1991)を用いて、1/3日から半年周周期帯で潮汐解析を行った。一方、GPSデータは、30秒値をGPS Tools (Takasu and Kasai, 2005)で、精密単独測位(Precise Point Positioning; PPP)解析し、三次元変位を求めた。南北、東西、上下成分それぞれにSGと同様の特性を持つローパスフィルターを適用して1時間データを作成し、それぞれの成分に対して、BAYTAPを用いて潮汐解析を行った。SGとGPS三次元データから得られた、潮汐定数と位相値から、分潮毎にLove数と志田数を求め、海洋潮汐荷重を補正した後、国際地球回転事業(International Earth Rotation Service; IERS)で使用されている理論値と比較した。結果、日周潮、半日周潮帯では、Love数 $h, k$ ともに、理論値と良い一致が見られ、特に、日周潮帯では、核共鳴周波数近傍のLove数の発散も再現している。長周期帯に関しては、理論値よりも小さな値が得られている。志田数に関しても、概ね理論値と調和的であるが、長周期では小さい値を示している。

キーワード: ラブ数・志田数, 潮汐解析

Keywords: Love and Shida numbers, Tidal analysis

## 精密水準測量による東濃地震科学研究所周辺域における上下変動 (2004-2012年)

## Vertical Deformation Detected by Precise Leveling around Tono Research Institute of Earthquake Science, Gifu 2004-2012

木股 文昭<sup>1\*</sup>, 田中 俊行<sup>1</sup>, 宮島力雄<sup>1</sup>, 浅井 康広<sup>1</sup>, 本多 亮<sup>1</sup>, 石井 紘<sup>1</sup>

Fumiaki Kimata<sup>1\*</sup>, Toshiyuki Tanaka<sup>1</sup>, Rikio MIYAJIMA<sup>1</sup>, Yasuhiro Asai<sup>1</sup>, Ryo Honda<sup>1</sup>, Hiroshi Ishii<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科学研究所

<sup>1</sup> Tono Research Institute of Earthquake Science, ADEP

### Introduction

Precise leveling network was established in the west part of Mizunami in March 2004, as a part of projects of Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES), to research the underground water flow, strain accumulation, ground deformation and gravities changes and their relations in shallow crust. Around TRIES, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has started the 1,000m shaft excavation project in April 2004. Precise levelings are carrying out once or twice every year until October 2012. Leveling route is about 10 km length with 10 benchmarks in 2004 and 50 in 2012. Closer errors of leveling are less than about 1 mm.

### Vertical deformation

During the survey period of 8 years and 8 months from February 2004 to October 2012, subsidence is distinguished, and the maximum reached about 2 cm in October 2012. Generally, benchmarks detected 1-2 cm subsidences are locating close to the shaft excavation site and on its south side area. As it is referred a 2km away benchmark, the subsidence of 2 cm supports ground tilt of 10 micro-radian. It is suggested that it is not the slant quantity of influence upon the building now.

### Groundwater level

Groundwater levels are monitored in observation wells of TRIES and JAEA, located at 100 m or 300 m south from the shaft excavation site. Drawdown of water head amounting to 70 m was detected in December 2010. When shaft reached at 120m depth, the groundwater inflow due to the shaft excavation suddenly increased to 300 ton/day. The groundwater level decreased approximately by 30m at the same time. The groundwater level was almost recovered to its level of before the shaft excavation when drainage was temporarily stopped in June 2005, but it decreased by resume of drainage again. After the shaft reached at 500m depth, the quantity of groundwater inflow is ranging around 700 ton/day. The groundwater risings due to the occurrences of the earthquake are observed. 13 m and 3 m rises were observed by 2011 M 9.0 Tohoku earthquake and in M 5.7 Mizunami earthquake on December 14, 2011. The groundwater level is descending after the earthquakes slowly.

### Subsidence and ground water drawdown

The groundwater level decreased with rates of 10-30 m/year for the period in June 2005 to June 2007, and subsidence with rates up to 2-5 mm/yr was observed at the benchmarks locating close to the shaft excavation site and on its south side area. On the other hand, the observed subsidence is relaxed, when a groundwater drawdown is decreasing to less than 10 m/yr. After the co-seismic groundwater rises observed in March and December 2011, additionally, slight uplifts were observed in February 2012. The maximum subsidence was observed at the benchmarks in the south side of the shaft excavation site, not at the benchmarks close to the shaft excavation site.

On the south side of the shaft excavation site, 160,000m<sup>3</sup> of soil was cut and covered according to the construction of a park in 2004. Therefore it is considered that the influence of the construction is included in observed ground deformation in a part. The deformation by the construction should be discussed precisely in the next subjects.

### Distribution and mechanism of subsidence

Distribution of subsidence is the important information to consider its mechanism. However, it is not able to clarify its spatial distribution of the subsidence yet, because benchmarks are limited to the shaft excavation point neighborhood. Authors set up benchmarks to the neighboring area newly in 2012 to clarify distribution of the subsidence more precisely.

キーワード: 上下変動, 精密水準測量, 地下水位変動

Keywords: vertical deformation, precise leveling, groundwater level

SGD21-09

会場:301B

時間:5月23日 11:15-11:30

## VLBI2010 ~ 新たな VLBI 観測局の整備 ~ VLBI2010 – Newly Established VLBI Station –

栗原 忍<sup>1\*</sup>

Shinobu Kurihara<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院

<sup>1</sup> Geospatial Information Authority of Japan

国際 VLBI 事業 (IVS) は、“Design Aspects of the VLBI2010 System (Petrachenco et al., 2009)”の中で新たな測地 VLBI 観測の標準仕様をまとめた。口径 12m 級、12 度/秒 (AZ) の高速駆動が可能なパラボラアンテナ、2 ~ 14GHz 広帯域受信、1 チャンネルあたり 1GHz 帯域幅でのサンプリングなど、これまでの測地 VLBI とは大きく異なる仕様となっている。国土地理院では、アンテナ、フロントエンド、周波数変換装置、サンブラ・データストレージ、水素メーザの整備を進めている。発表では、整備の進捗状況等について報告する。

キーワード: 測地 VLBI, VLBI2010, 全地球測地観測システム, 国際 VLBI 事業

Keywords: Geodetic VLBI, VLBI2010, GGOS, IVS

## 国内 VLBI 観測のシミュレーションによる評価 Evaluation of domestic VLBI observation using simulation

高島 和宏<sup>1\*</sup>

Kazuhiro Takashima<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院

<sup>1</sup> Geospatial Information Authority of Japan

### 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。そのため、地震等により局所的に変動が大きくなった地域では「座標補正パラメータ (PatchJGD)」の提供、プレート運動等による広範囲な経年変動に対しては、「セミ・ダイナミック補正」を行なっている。また、平成 23 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う変動については、測地成果 2011 (元期 2011/5/24) を公表し測量成果改訂を行った。このような背景から、グローバル観測結果に基づいて世界測地系の中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ためには、VLBI と GPS のように、独立した複数の観測技術により相互チェックを行うことが求められる。

また、VLBI に関しては、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 (以下「VLBI2010」と呼ぶ) への移行が始まっており、国土地理院においても VLBI2010 に対応した観測施設を茨城県石岡市に設置することが決まった。そこで、本研究では国内 VLBI 観測局 (北海道新十津川、鹿児島県始良、小笠原村父島) に関して、VLBI2010 対応も含めた将来計画策定の基礎となる技術指針をとりまとめることを目標とし、多様な観測条件下における達成可能な精度について、シミュレーション技術により評価を実施した。

### VLBI 観測シミュレーションの概要

VLBI シミュレーターを整備し、観測する準星の組み合わせと記録する周波数配列の組み合わせなど、多様な観測条件設定におけるシミュレーション観測データの生成を行った。その際、考える全ての条件設定の組み合わせ数は膨大であるため、VLBI2010 仕様を効果的に取り入れることを念頭におき、従来仕様である各国内 VLBI 観測局設備に対し、どの箇所をアップグレードするのが費用対効果が高くなるかを見積もりを行った。想定した主な設備更新は、アンテナ駆動系 (駆動速度の向上)、アンテナ口径 (受信感度の向上)、信号処理装置 (記録速度・帯域の向上) の 3 点とした。国内の VLBI 基準局は、従来仕様の「つくば 32m 観測局」と従来仕様及び VLBI2010 仕様の双方対応となる予定の「石岡 13m 観測局」の 2 通りについて評価を行った。

### VLBI シミュレーターの整備

VLBI シミュレーターの整備において、VLBI2010 や国内 VLBI 観測局への拡張対応が容易であることを条件として、最適なソフトウェアの選定を行い、オーストリア国ウィーン工科大学が開発した VLBI 解析ソフトウェア「VieVS」に組み込まれている「Vie-SIM」モジュールを用いることとした。本シミュレーターは、国土地理院の通常業務で用いている VLBI データベース形式「MarkIII」ではなく、「NGS カードファイル」と呼ばれる形式のデータを入出力に用いており、既存の国内 VLBI 観測ファイルをシミュレーション観測データと同一条件で「VieVS」により解析可能とするため、この形式に変換する仕組みを構築した。

多様な観測条件の組合せについて、効率良くシミュレーションを実施し、データを管理するためにリレーショナルデータベースとネットワーク共通型自己記述式データ形式 (NetCDF) を用いた「統合基線解析アプリケーション」を整備した。

### まとめ

今回整備した VLBI シミュレーターにより、国内 VLBI 観測網における観測局位置の精度を見積り、その評価を実施した。本予稿執筆時点では、設定した観測条件の組合せ全ての解析が完了していないが、本講演ではそれらの評価結果を報告する予定である。また、評価結果から今後の国内 VLBI 観測のあり方について検討する際の技術指針を提示する予定である。

### 謝辞

本研究には、ウィーン工科大学開発の VLBI 解析ソフトウェア「VieVS」<http://viewvs.hg.tuwien.ac.at/> を使用させて頂きました。心より感謝いたします。

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SGD21-10

会場:301B

時間:5 月 23 日 11:30-11:45

キーワード: 超長基線測量, 超長基線電波干渉法, シミュレーション, 国際 VLBI 事業, 国内 VLBI 観測, 電波望遠鏡

Keywords: VLBI, VieVS, simulation, VLBI2010, NetCDF, IVS

SGD21-11

会場:301B

時間:5月23日 11:45-12:00

## サブ cm 級レーザ測距衛星 (LARES および STARLETTE) の光学応答と重心補正值 Optical responses and centre-of-mass corrections for the sub-cm laser ranging targets LARES and Starlette

大坪 俊通<sup>1\*</sup>, Robert A Sherwood<sup>2</sup>, Graham M Appleby<sup>2</sup>

Toshimichi Otsubo<sup>1\*</sup>, SHERWOOD, Robert A<sup>2</sup>, APPLEBY, Graham M<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 一橋大学, <sup>2</sup>NERC Satellite Geodesy Facility

<sup>1</sup>Hitotsubashi University, <sup>2</sup>NERC Satellite Geodesy Facility

LARES 衛星および STARLETTE 衛星の光学応答特性 ("Satellite Signature" 効果) について報告する。より大型の衛星, 例えばあじさいや LAGEOS については, 反射鏡の奥行き方向の並びによる反射波形の広がりが見られ, すでに Otsubo and Appleby (2003, JGR) などにより, それぞれ 5 cm および 1 cm ほどの重心補正值システム依存性があることが知られている。近年の測距精度の高まりと繰り返し率の高まりのため, 小型の衛星についてもその効果が無視しえなくなっている。本研究では, イギリス Herstmonceux 局のデータを用いて, LARES 衛星は 128 ~ 135 mm, STARLETTE 衛星は 75 ~ 82 mm の幅で, 重心補正值が観測システムによって変わりうることを明らかにした。特に STARLETTE 衛星の値は, 現在標準値として採用されている 75 mm が一般に小さすぎることを示しており, 地球基準座標系のスケールや地球重力場 0 次項 (GM) の決定に影響を与える。

キーワード: 宇宙測地, 衛星レーザ測距

Keywords: space geodesy, satellite laser ranging

## Spin parameters of LARES spectrally determined from Satellite Laser Ranging data Spin parameters of LARES spectrally determined from Satellite Laser Ranging data

Daniel Kucharski<sup>1\*</sup>, Toshimichi Otsubo<sup>2</sup>, Hyung-Chul Lim<sup>1</sup>  
Daniel Kucharski<sup>1\*</sup>, Toshimichi Otsubo<sup>2</sup>, Hyung-Chul Lim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, <sup>2</sup>Hitotsubashi University, Tokyo

<sup>1</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, <sup>2</sup>Hitotsubashi University, Tokyo

Satellite Laser Ranging (SLR) is a powerful technique able to measure spin rate and spin axis orientation of the fully passive, geodetic satellites. This work presents results of the spin determination of LARES - a new satellite for testing General Relativity. SLR passes measured during one year from the launch were spectrally analyzed. Our results indicate that the initial spin frequency of LARES is  $f_0=86.906$  mHz (RMS=0.539 mHz). A new method for spin axis determination, developed for this analysis, gives orientation of the axis at RA=12h22m48s (RMS=49m), Dec=-70.4o (RMS=5.2o) (J2000.0 celestial reference frame), and the clockwise (CW) spin direction. The half-life period of the satellite's spin is 214.924 days and indicates fast slowing down of the spacecraft.

LARES has been placed on a similar orbit to Ajisai, but demonstrates different spin dynamics. The spin behavior of the two geodetic satellites Ajisai and LARES will be compared in this presentation.

キーワード: LARES, Satellite Laser Ranging, Spin

Keywords: LARES, Satellite Laser Ranging, Spin

## c5++を用いた観測レベルの宇宙測地統合解析：統合パラメータの推定方法とメリット

### Combination of space-geodetic techniques on the observation level: estimation strategies for common parameters

ホビガー トーマス<sup>1\*</sup>, 大坪 俊通<sup>2</sup>

Thomas Hobiger<sup>1\*</sup>, Toshimichi Otsubo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 一橋大学

<sup>1</sup>NICT, <sup>2</sup>Hitotsubashi Univ.

“c5++”というマルチ宇宙測地解析ソフトウェアが開発されてきた。ひとつのソフトウェアパッケージとしての機能だけでなく、個々の地球物理・数値計算などのモジュールには最新モデルを取り込んでおり、それらを組み合わせて多様な用途に応えることができる。Global Geodetic Observing System (GGOS) のコンセプトでは、VLBI、SLR、GNSSなどの宇宙測地技術の全ての観測技術を、観測データレベルで統合解析することを目指している。多くの現用解析ソフトウェアは観測データレベルで統合解析をサポートしていないのが現状である。しかし、c5++を用いれば、観測レベルでの宇宙測地技術の統合解析が可能になる。さらに、local tieを観測データとして取り込みつつ、同じ地球物理モデルでマルチ技術解析を可能にする。GNSSとVLBIの場合は大気遅延とクロックのパラメータも統合解析が可能になる。しかし、VLBIとGNSSの間のオフセットも考えなければならないので、統合パラメータの推定方法を詳しく発表する。

キーワード: VLBI, GNSS, GGOS, 宇宙測地学, 統合解析

Keywords: VLBI, GNSS, GGOS, Space Geodesy, Combined Analysis

## GEONETにおける大気擾乱の影響評価システムの構築 Diagnosis system of troposphere-induced positioning errors for GEONET

石本 正芳<sup>1\*</sup>

Masayoshi Ishimoto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院

<sup>1</sup> GSI of Japan

国土地理院では、GEONETの観測データを速やかに解析することにより地殻変動の監視を行っている。しかし、特に内陸の浅い地震や火山活動等の地殻変動の監視においては、時間・空間スケールの小さな大気擾乱による見かけの変動が疑われる場合がある。このような場合、現状ではデータの蓄積を待って判断を行っているため、速やかに地殻変動情報の提供する上で問題となっている。そのため、このような小スケールの大気擾乱による誤差の可能性の高低を判断可能とするためのシステムの開発に取り組んできた。

これまでに、気象庁のメソモデルを初期値・境界値とした高分解能数値気象モデルを生成し、そのデータから小スケールの大気擾乱による見かけの変動を推定する手法を構築した。この手法による推定値が、GEONETの定常解析で除去できない小スケールの大気擾乱によるみかけの変動を再現でき、誤差の発現機構も再現できる場合があることを確認した(日本測地学会第116回講演会)。しかし、この手法では大気擾乱による測位誤差が再現できる場合や誤った推定をする場合があることから、適切に大気擾乱の影響を判断するためには、推定値に対する信頼性の情報が必要である。

そこで、本研究では、まず推定値と観測値との適合性を定量的に評価する手法を構築した。次に、この評価手法を用いて、GEONETの定常解析結果に有意な地殻変動が認められない時期のデータを用いて、様々な気象条件における推定値と観測値との適合性を調査した。その結果、特定の条件において適合性が高くなることが明らかになったため、この結果を電子基準点毎に各気象条件における推定値の信頼度としてとりまとめた。この信頼度を付与した推定値を、地震時に大気擾乱の影響が疑われる事例について適用した結果、大気擾乱の影響について有効な判断が可能であることが確認された。

本報告では、以上の結果と、この結果に基づいて構築したGEONETにおける大気擾乱の影響評価システムの概要について報告する。

## バングラデシュにおける大気水蒸気変動の検出と陸水荷重変化による地表変動の推定

### Seasonal variation of atmospheric water vapor and hydrologic loading effect on ground deformation in Bangladesh

田中 幹人<sup>1\*</sup>, 田部井 隆雄<sup>2</sup>, 村田 文絵<sup>2</sup>  
Mikito Tanaka<sup>1\*</sup>, Takao Tabei<sup>2</sup>, Fumie Murata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高知大学大学院, <sup>2</sup> 高知大学理学部  
<sup>1</sup>Kochi University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Kochi University

バングラデシュは世界で最も降水量が多い国の1つであり、北東部では年間降水量 5000 mm を記録する。国土の大部分はガンジス川、ブラマプトラ川、メグナ川がベンガル湾に注ぐデルタ地帯に位置し、雨期前後の不安定な大気によるサイクロンや、大量の降水に続く河川のオーバーフローによる災害が発生している。さらに、このような季節的な陸水荷重の増減に伴う地表上下変動が確認されている。本研究では、バングラデシュにおける GPS 固定連続観測データから可降水量 (GPS-PW) を算出し、大気水蒸気量の季節変動を考察する。さらに、GPS 座標時系列から求めた地表変動と陸水荷重変化との関係を議論する。

Dhaka と Sylhet において、2011 年 4 月から 8 月まで約 100 日間の GPS 観測を行った。解析には GIPSY-OASIS II Ver.6.0 の精密単独測位法を用い、日々の座標解 3 成分と 5 分ごとの天頂湿潤遅延 (ZWD) を推定した。どちらの観測点でも、ZWD は 6 月中旬を境にその前後で異なる特徴を示した。前半では 1 か月あたり約 0.15 m の増加を示し、後半では約 0.4m のレベルを維持した。また、前半では振幅が大きく波長が短い数時間スケールの変動が顕著であるが、後半では振幅が小さく波長が長い 10~20 日周期の変動が卓越する。これらはそれぞれ、気象擾乱が激しいプレモンスーン季と、水蒸気の絶対量は多いが時間変動は穏やかなモンスーン季の特徴を示していると解釈される。ZWD から GPS-PW への変換には係数 0.16 を使用し、1 時間平均値を算出して、高層ゾンデ観測から得られる可降水量 (sonde-PW) と比較した。sonde-PW の算出には、Sylhet においては 5 月上旬の集中観測データ、Dhaka においてはバングラデシュ気象局による定常観測データを用いた。Sylhet では GPS-PW と sonde-PW は概ね一致し、両者の差の RMS は全体量の 7 % 程度であった。Dhaka では GPS-PW と sonde-PW の時間変化はほぼ一致したが、系統的に sonde-PW が 10~15mm 大きく算出された。Dhaka のゾンデ観測値には 100% を超える湿度が示される日が多くあり、湿度センサーにウェットバイアスが存在することが過大評価の原因であると考えられる。

約 100 日間の GPS 座標時系列には Sylhet で約 20mm、Dhaka で約 30mm の沈降が認められた。先行研究によって、Sylhet と Dhaka において陸水荷重の季節的増減による両振幅 60mm の上下年周変動が検出されており、本観測でもこの変動の一部を捉えたと考えられる。季節変動をより長期の定常変動と分離するため、UNAVCO が計 11 点で実施した 2007 年約 300 日間の GPS 連続観測のデータを解析した。全期間の座標時系列から各成分の平均変動速度を推定し、定常変動と仮定する。5~8 月期の変動速度から定常変動速度を差引くことで、季節変動を抽出した。約 100 日間に水平面内では南方向に約 10mm の変位が、上下方向では最大約 20mm の沈降が認められた。この沈降量から、Becker and Bevis (2004) の上下変位と面荷重の関係式を用いて、季節的な荷重分布を推定した。全観測点を含む 600km 四方の範囲を正方形で 9 分割し、各ブロックの荷重量を同時推定した。推定値は約 2500~4500Pa となり、面積を考慮すれば総質量は約 37~67GT となる。先行研究では季節的に 50GT の質量増加があるという結果が得られており、本研究の結果はこれと調和的である。これらの値は、バングラデシュ全土を覆う滞留水の厚さが 26~46cm 増加することに匹敵する。今後、より正確な定常変動と詳細な荷重分布を得るためには、さらに長期かつ稠密な GPS 観測データが必要である。

キーワード: GPS 気象学, バングラデシュ, 陸水荷重  
Keywords: GPS Meteorology, Bangladesh, hydrologic loading

## 時空情報正当性検証における相関処理技術の開発 Development of the correlation processing technology in space-time information justification verification

梶原 透<sup>1</sup>, 武藤竜洋<sup>1</sup>, 高橋 富士信<sup>1\*</sup>, 市川 隆一<sup>2</sup>, 高島 和宏<sup>3</sup>, 大坪 俊通<sup>4</sup>, 小山 泰弘<sup>2</sup>, 関戸 衛<sup>2</sup>, 岳藤一宏<sup>2</sup>, ホビガートーマス<sup>2</sup>

Toru Kajiwar<sup>1</sup>, Tatsuhiko Muto<sup>1</sup>, Fujinobu Takahashi<sup>1\*</sup>, Ryuichi Ichikawa<sup>2</sup>, Kazuhiro Takashima<sup>3</sup>, Toshimichi Otsubo<sup>4</sup>, Yasuhiro Koyama<sup>2</sup>, Mamoru Sekido<sup>2</sup>, Kazuhiro Takefuji<sup>2</sup>, Thomas Hobiger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学, <sup>2</sup> 情報通信研究機構, <sup>3</sup> 国土交通省国土地理院, <sup>4</sup> 一橋大学

<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology, <sup>3</sup>Geospatial Information Authority of Japan, <sup>4</sup>Hitotsubashi University

近年、GPS 携帯電話やスマートフォンなどの情報端末の普及により、位置情報の活用が広がってきている。それに伴い、位置情報に一定の信頼性・正当性が求められるケースも増えてきている。そこで、位置情報とその位置情報を取得した時刻を合わせた四次元の「時空情報」の正当性を検証できるシステムの開発が現在行われている。また、時空情報正当性検証システムはデータ取得とデータ後処理の2グループに分かれて研究・開発が行われている。本研究は、後者のデータ後処理技術についての研究である。

時空情報正当性検証はGNSS、地上デジタル放送、準星等の電波を2地点で受信することによって行う。2地点とは、正当性検証を利用するユーザ局と、精密位置が分かっている基準局のことである。正当性検証には、最低4つの電波源が必要となる(四次元情報のため)。本研究では同一周波数帯に多数存在し、かつ地域に縛られず受信可能なGNSS衛星の電波の到達時間差を求め、遅延時間を距離に換算し、理論値と比較することにより、正当性検証を行うことができる。

本研究では、短基線と長基線それぞれに対応した処理手法の開発を行った。短基線には、遅延時間と変化率のサーチ範囲が小さいという特徴があるため、従来のVLBI型相関処理よりも効率のよい2D-FFTを利用した粗決定処理手法の開発を行った。本処理手法では、一度の処理で全衛星の相関ピークを観測可能となっている。ただし、本処理手法は基線長200Km以下程度の場合しか適用できない。長基線に関しては、短基線の粗決定処理をそのまま適用するとピーク幅が広がるといった問題が起こるため、その補正を行いつつ高速で結果を出す粗決定処理手法を別途開発した。本処理手法は短基線と異なり一度の処理で一衛星の相関ピークしか観測することはできないが、短基線の粗決定とほぼ同等の遅延時間精度を確保することができた。また、粗決定は遅延時間のサーチ単位がbitで制限される等の弱点を持つため、より精密な補正を行いつつ、細かい粒度で遅延時間をサーチでき、かつ長時間の積分も可能な精決定処理手法の開発も行った。精決定によって、粗決定から精度を大きく改善することができた。これらの処理には処理時間短縮のためにGPUの導入も行った。

短基線には、伝搬経路が酷似しているといった特徴がある。この場合、高精度な位相遅延を決定することができる。そこで、本研究では短基線における遅延時間決定精度を大幅に向上するため、位相遅延の決定法の開発も行った。さらに、位相遅延の精度を向上する手法の開発も行った。最終的に、位相遅延によって、低仰角の衛星であってもピコ秒、高仰角ならばサブピコ秒程度の遅延時間精度を実現することができた。

長基線では、伝搬経路が大きく異なるために位相遅延を決定することは難しい。そこで、本研究では周波数帯域を合成して精度を向上するバンド幅合成という技術に着目し、GNSS衛星がいくつかの周波数帯を持つことを利用して、長基線であっても高精度な遅延時間を実現できる処理手法の開発も行った。その結果より、位相遅延と同等とはいかないまでも、精決定からは大きく精度を改善することができた。

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。

キーワード: VLBI, GNSS, GPS, QZS, 時空情報, 認証

Keywords: VLBI, GNSS, GPS, QZS, Space-time information, Attestation

## 月レーザ測距データ精密解析のためのソフトウェアの開発 Development of software for precise LLR data analysis

長澤 亮佑<sup>1\*</sup>, 大坪 俊通<sup>1</sup>

Ryosuke Nagasawa<sup>1\*</sup>, Toshimichi Otsubo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 一橋大学

<sup>1</sup>Hitotsubashi University

月レーザ測距データを用いて月の軌道運動ならびに回転運動の決定を行うべく、ソフトウェアの開発を行っている。研究の初期段階として、月レーザ測距観測モデルを最新の物理モデルを組み合わせで構築した。まず、月の軌道は、NASA ジェット推進研究所 (JPL) による月惑星暦 DE421 を使用した。モデルの構成要素は、地上局とリフレクタの位置に関するものと、レーザ光の伝播遅延に関するものに分けられる。前者には軌道暦から取得した月の軌道と秤動、地球回転、および地球と月の固体潮汐を考慮した。後者にはレーザ光が往復する間に生じる光行差、大気遅延、および相対論効果による光差を考慮したほか、軌道暦と観測値との時空の相違も考慮し、変換時に生じる相対論効果を補正した。軌道暦の読み出しを始め、要素の計算には宇宙測地解析ソフトウェア c5++ (大坪ほか、本講演会、2011) のモジュールを用いた。また、観測値は Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) にて公開されている Normal Point データを取得し、1996 年 6 月から 2011 年 12 月までの 2029 ポイントを使用した。

各観測値に対してモデルによる予測値を求めたところ、残差の平均は約 0.18 m、標準偏差は約 0.09 m であった。残差を見る限りではモデルに一層の改良の余地があると思われるが、そもそも DE421 が内包する誤差の程度が不明である。そこで次なる段階として、今後は月の軌道運動と回転運動のパラメータを推定することで解析精度の向上を目指す予定である。

本発表では、初期に行ったモデルと実データとの比較、およびその後のソフトウェア開発の構想について報告する。

キーワード: 月レーザ測距, 解析ソフトウェア, 軌道暦

Keywords: lunar laser ranging, analysis software, ephemeris

## 円環外核の運動の励起

## Excitation of the motion of a cylindrical outer core

角田 忠一<sup>1\*</sup>

Chuichi Kakuta<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> なし

<sup>1</sup> none

Wen(2006) は中部 Africa 下層の内核表面で 1993 年-2003 年 の P 波比較から、2003 年に内核半径が 0.98 から 1.75 km 増加したことを示した。今回は内核表面の発熱を伴う変形による外核の流体運動および回転軸のまわりの赤道面の運動をしらべる。外核を回転軸のまわりのうすい円環とし、内核表面の変形を 1 次の球関数  $Y_{11i}$  ( $i=1, \cos \theta; i=2, \sin \theta$ ) の非対称モードとし、変形が進行波として 24 年の周期変化と考える。外核の流体運動は Smylie and Rochester (1981) の SSA(Sub-seismic Approximation) を採用する。この近似では発散は 0 でないが、圧力変化の重力方向の成分のみが発散に寄与する。うすい外核表面 (CMB) の垂直変位、 $U_r$  は内核境界 (ICB) における値と等しいとする。外核の東半球で上昇したとすれば東半球の密度が上昇し、円環外核の重心は  $2U_r$  東半球に移動する。また軸非対称な回転方向の層流は 1 次 ( $Y_{11i}$ ) の密度分布と結合して 2 次の回転軸のまわりの角運動量を発生する。この大きさは円環の主慣性能率からなる角運動量の  $10^{-10}$  の大きさである。また 2 次の変動量には既知の赤道楕円形状の中心が地球重心から移動するため、内核と外核の回転軸まわりの秤動の発生もふくまれる。

キーワード: 外核, うすい円環外核, 内核, 密度分布, 角運動量, 秤動

Keywords: outer core, thin cylindrical outer core, inner core, density distribution, angular momentum, libration