

神岡における長基線レーザーひずみ計の開発 Long-baseline laser strainmeter in Kamioka

高森 昭光^{1*}; 新谷 昌人¹; 森井 互²; 内山 隆³; 大橋 正健³; 寺田 聡一⁴

TAKAMORI, Akiteru^{1*}; ARAYA, Akito¹; MORII, Wataru²; UCHIYAMA, Takashi³; OHASHI, Masatake³; TELADA, Souichi⁴

¹ 東京大学地震研究所, ² 京都大学防災技術研究所, ³ 東京大学宇宙線研究所, ⁴ 産業技術総合研究所

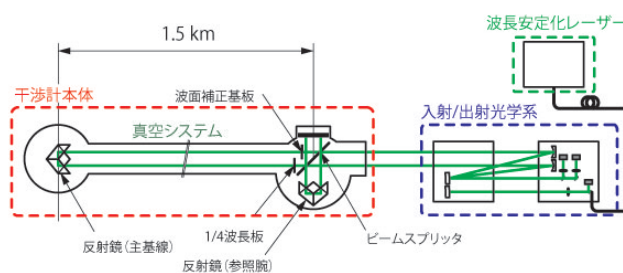
¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ³Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, ⁴National Institute for Advanced Industrial Science and Technology

現在、東京大学宇宙線研究所を中心として、レーザー干渉計による重力波天文学の創設を目指す「KAGRA 計画」が進められている。著者らはその一環として、岐阜県飛騨市の神岡鉱山地下トンネルに 1.5 km の基線長を持つレーザーひずみ計の建設に取り組んでいる（左図）。この規模の長基線レーザーひずみ計は国内初の取り組みであり、完成すれば世界最長クラスの観測装置となる。基線長を長くすることによって、従来の 100 m クラスの装置よりもひずみ感度を 10 倍以上引き上げることが可能である。これによって、断層活動によるひずみの蓄積や地球内部振動のより詳細な観測が可能になるものと期待される。

ひずみ計の基本設計は従来の 100 m クラスの装置と同様、ヨウ素の吸収線を利用した波長安定化レーザーを長さの基準とした非対称マイケルソン干渉計である（右図）。しかしながら、装置の規模が拡大したことによって、光学素子のサイズや精度に対して技術的要求はより困難なものとなる。本発表では、開発中の装置の概要と開発状況について報告する。

キーワード: レーザー干渉計, ひずみ計, 神岡

Keywords: laser interferometer, strainmeter, Kamioka



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 その2 Development of software for precise LLR data analysis, Part 2

長澤 亮佑^{1*}; 大坪 俊通²; 関戸 衛³; 花田 英夫⁴

NAGASAWA, Ryosuke^{1*}; OTSUBO, Toshimichi²; SEKIDO, Mamoru³; HANADA, Hideo⁴

¹ 総合研究大学院大学, ² 一橋大学, ³ 情報通信研究機構, ⁴ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

¹ Graduate University for Advanced Studies, ² Hitotsubashi University, ³ National Institute of Information and Communications Technology, ⁴ RISE Project Office, National Astronomical Observatory

月の軌道運動および回転運動, ならびに潮汐変形の決定を目的として, 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を行なっている。

研究の初期段階として, 最新の物理モデルを組み合わせた月レーザ測距観測モデルを構築した。モデルの構成要素には月の軌道運動および秤動をはじめ, 地球回転, 地球と月の固体潮汐, またレーザ光の伝播遅延として光行差, 大気遅延, 相対論効果などを考慮した。月の軌道暦は NASA ジェット推進研究所による月惑星暦 DE430, その他の各種物理モデルは IERS Conventions (2010) に準拠したものを使用している。軌道暦の読み出しを始め, 各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。

観測値には Apache Point, Grasse, Matera, McDonald の4つの観測局で取得された normal point データのうち, 1996年6月から2013年7月までの3577ポイントを使用した。この観測値をモデルによる計算値と比較したところ, 残差の平均値は約 5.7 cm, 標準偏差は約 4.8 cm であった。

本発表では, 初期に行ったモデルと実データとの比較についての詳細, ならびに現在のソフトウェア開発状況について報告する。

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

SLR 衛星の光学応答に敏感な地球のスケールパラメータ Scale parameters of the Earth sensitive to the optical response of spherical SLR targets

大坪 俊通^{1*}; 松尾 功二²; Sherwood Robert A³; Appleby Graham M³; Neubert Reinhart⁴
OTSUBO, Toshimichi^{1*}; MATSUO, Koji²; SHERWOOD, Robert a³; APPLEBY, Graham m³; NEUBERT, Reinhart⁴

¹ 一橋大学, ² 京都大学, ³ NERC SGF Herstmonceux, UK, ⁴ GFZ Potsdam, Germany

¹ Hitotsubashi University, ² Kyoto University, ³ NERC SGF Herstmonceux, UK, ⁴ GFZ Potsdam, Germany

kHz レーザ測距技術などの進展により、今では SLR (衛星レーザ測距) による地上局・衛星間の測距精度はミリメートルの域に達している。このなかで、球形の SLR 衛星の大きさに起因する誤差が、高精度化を妨げる最大の要因になっている。あじさい・LAGEOS・ETALON についてはすでに Otsubo and Appleby (JGR, 2003) での研究があるが、本研究ではより小さな STARLETTE・STELLA・LARES に適用した。衛星の光学応答を Herstmonceux 局・Potsdam 局の実データであてはめるなどの解析を行った結果、STARLETTE・STELLA 衛星の重心補正值標準値は 3 mm 小さすぎたことが判明した。最大で、地球基準座標系に対しては、0.5 ppb、重力パラメータ GM に対しては 1.7 ppb の影響を与える量である。

長期にわたる SLR 観測方法の変化は、それらのスケールパラメータに系統誤差を与える可能性がある。検出器に入る光子の数が減ると、検出のタイミングが後ろにずれ、そして重心補正值は小さくなるはずである。これを考慮せずに解析を行うと、特に GM に対して無視できないレベルのインパクトがある。

キーワード: 宇宙測地, 衛星レーザ測距, 地球基準座標系

Keywords: space geodesy, satellite laser ranging, terrestrial reference frame

VLBI 周波数比較への応用と GALA-V システムの開発 (III) VLBI application for Frequency Transfer and Development of GALA-V System (III)

関戸 衛^{1*}; 岳藤 一宏¹; 氏原 秀樹¹; 宮内 結花¹; 堤 正則¹; 長谷川 新吾¹; ホビガー トーマス¹; 市川 隆一¹; 小山 泰弘²

SEKIDO, Mamoru^{1*}; TAKEFUJI, Kazuhiro¹; UJIHARA, Hideki¹; MIYAUCHI, Yuka¹; TSUTSUMI, Masanori¹; HASEGAWA, Shingo¹; HOBIGER, Thomas¹; ICHIKAWA, Ryuichi¹; KOYAMA, Yasuhiro²

¹ 情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター 時空標準研究室, ² 情報通信研究機構 国際連携推進室

¹National Institute of Information and Communications Technology, Space-Time Standards Laboratory, ²National Institute of Information and Communications Technology, International Relations Office

NICT は、遠隔周波数比較技術の一つとして V L B I を使った周波数比較技術の開発を進めている。その重要な要素である移設可能な小型広帯域の V L B I 局は、次世代の測地 VLBI 技術の国際標準仕様として各国で開発がすすめられている VGOS (VLBI2010 Global Observing System) 仕様に部分準拠した広帯域の VLBI システム (Gala-V) として開発を進めている。このシステムは周波数標準の比較を目的としているが、もちろん測地観測も同様に可能である。

[大型アンテナの広帯域フィード開発]

各国で建設がすすめられている VGOS システムでは、2-14GHz の広帯域観測のためにビーム角の広いフィードを使用しており、これに対応したリングフォーカスと呼ばれる特別な光学系を採用している。これは3オクターブに迫る広い周波数帯域に感度を持つフィードは一般にビーム角が広いためであり、このため従来の広帯域フィードは、既存のカセグレンアンテナへの搭載が困難であった。我々は修正カセグレン方式の34m アンテナに搭載可能な新しい広帯域フィードを独自開発しており、6.4-15GHz が観測可能なフィード試作器を2013年末に34m アンテナに搭載し、6.7GHz, 12.2GHz のメタノールメーザの同時観測に成功した。

[ゼロ冗長周波数配列—ダイレクトサンプリング]

NICT の開発する Gala-V システムでは、2-14GHz の帯域から、1 GHz 帯域幅の4つのバンドをゼロ冗長配列となる周波数間隔で取得する。これにより不定性 (Ambiguity) のない遅延分解関数がえられ、従来より1桁高い精度の遅延計測が可能となる。Gala-V システムでは従来のアナログ周波数変換方式に加えて、高速サンプリングを使って周波数変換なしにデータを取得するダイレクトサンプリングを使い、デジタルフィルタで特定の周波数帯域を取得する方式を試験的に採用している。ダイレクトサンプリング方式が確立すれば、システムに必要な機材・コストが簡略化・削減できる。

[広帯域信号合成技術の開発]

VGOS システムでは、2-14GHz の広帯域の信号を位相合成して高精度の遅延を計測する。従来にはない超広帯域の信号を合成するため、広帯域の安定した位相校正信号と、電離層による非直線性の位相変動を推定しながら、群遅延を高精度に求める新しい処理ソフトウェアが必要となる。

キーワード: 超長基線電波干渉計, VGOS, 周波数比較

Keywords: VLBI, VGOS, Frequency Comparison

石岡 VLBI 観測施設の整備 ～アンテナの完成と試験・調整～ Ishioka VLBI Observing Facility - Telescope Completion and Setting up the System -

栗原 忍^{1*}; 福崎 順洋¹; 黒田 次郎¹; 川畑 亮二¹; 若杉 貴浩¹

KURIHARA, Shinobu^{1*}; FUKUZAKI, Yoshihiro¹; KURODA, Jiro¹; KAWABATA, Ryoji¹; WAKASUGI, Takahiro¹

¹ 国土交通省国土地理院

¹GSI of Japan

国土地理院は、国際 VLBI 事業 (IVS) が推進する次世代 VLBI 観測システム (VGOS) に対応した新しい VLBI 観測局の整備を進めてきた。2014 年 3 月までに茨城県石岡市に 13.2m の主鏡を持つ VLBI アンテナが完成し、観測の運用に向けてアンテナからデータ取得装置までのシステムの試験・調整作業が進められている。発表では、完成した VLBI 観測施設と作業の進捗状況について報告する。

キーワード: 国際 VLBI 事業, 次世代 VLBI 観測システム

Keywords: IVS, VGOS

マルチ GNSS による高精度測位技術の開発—統合解析の実現に向けて— Development of a new precise positioning technique using multi-GNSS signals

古屋 智秋^{1*}; 酒井 和紀¹; 万所 求¹; 辻 宏道¹; 山口 和典¹; 宮川 康平¹; 矢萩 智裕¹; 畑中 雄樹¹; 宗包 浩志¹; 川元 智司¹

FURUYA, Tomoaki^{1*}; SAKAI, Kazuki¹; MANDOKORO, Motomu¹; TSUJI, Hiromichi¹; YAMAGUCHI, Kazunori¹; MIYAGAWA, Kohei¹; YAHAGI, Toshihiro¹; HATANAKA, Yuki¹; MUNEKANE, Hiroshi¹; KAWAMOTO, Satoshi¹

¹ 国土交通省国土地理院

¹GSI 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、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。

平成 25 年度は、受信機の各衛星系回路間の遅延差に起因して発生する受信機ハードウェアバイアス（ISB）について複数の受信機・観測条件で検証を実施し、異なる衛星系間でも位相差を取る解析（統合解析）の実現に向けて ISB の補正方法を検討した。検討の結果、GPS-GLONASS 間では温度やアンテナ等の観測条件の違いで ISB が大きく変動し、GPS-準天頂衛星間、GPS-Galileo 間では安定していることが判明した。また、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 v2.4.2(Takasu, 2013) をベースに、Galileo や 3 周波解析が可能な測量用解析ソフトウェア（GSILIB）を開発した。

また、準天頂衛星を含むマルチ GNSS の観測が可能な受信機を利用して、日本全国 8 地区（苫小牧、つくば、長崎、糸満、東京、大阪、甲府、徳島）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、マルチ GNSS の効果や課題を評価した。特に東京地区においては、観測条件の厳しい複数の箇所で観測を実施し、都市部におけるマルチ GNSS の可能性を評価した。

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。また、平成 25 年度は、ISB の補正方法の開発・検討にあたっては日立造船株式会社・東京海洋大学、GSILIB の開発にあたっては三菱スペース・ソフトウェア株式会社、試験観測にあたっては株式会社パスコが国土地理院の外注作業により実施した。

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

キーワード: GNSS, 測量, ISB

Keywords: GNSS, Geodetic survey, ISB

GEONET 測位解の品質と利用上の留意点について Notes on the quality of GEONET coordinate solutions

今給黎 哲郎^{1*}; 加川 亮¹; 畑中 雄樹¹; 宗包 浩志¹

IMAKIIRE, Tetsuro^{1*}; KAGAWA, Akira¹; HATANAKA, Yuki¹; MUNEKANE, Hiroshi¹

¹ 国土地理院

¹ GSI of Japan

国土地理院が運用し公開している GEONET の測位解は、地殻変動やテクトニクスの研究にとって基本的なデータとして広く活用されており、利用者は GNSS 観測や基線解析を行うことなく、測位解を利用して地殻変動・テクトニクス等の議論を行うことも可能となっている。しかしながら、GEONET の測位解には、アンテナ等の機器交換や観測点環境の変化、気象擾乱の影響など、GPS (GNSS) 測位に特有なノイズ・バイアス等、観測・解析の過程で品質に影響する誤差が混入する可能性があるため、その利用にあたっては、これらに留意する必要がある。講演では、これらのノイズ・バイアスの統計的な評価結果について概要を報告するとともに、国土地理院による地殻変動監視における測位解の品質の吟味方法について紹介する。

キーワード: GEONET, GNSS 測位, データ品質

Keywords: GEONET, GNSS positioning, Data quality

冬季実験データを用いた GNSS アンテナへの着雪による測位誤差評価 Positioning error estimation due to snow accumulation on GNSS antenna using winter experimental data

吉原 貴之^{1*}; 本吉 弘岐²; 佐藤 威²; 山口 悟²; 斎藤 享¹

YOSHIHARA, Takayuki^{1*}; MOTOYOSHI, Hiroki²; SATO, Takeshi²; YAMAGUCHI, Satoru²; SAITO, Susumu¹

¹ 独立行政法人電子航法研究所, ² 独立行政法人防災科学技術研究所

¹Electronic Navigation Research Institute, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

GPS など衛星航法システム (GNSS) を用いた精密測位において、GNSS アンテナに付着した雪 (着雪) によって測位解に誤差が生じることは早くから指摘され、知られている [1]。この影響はアンテナへの着雪の状態と衛星配置で時々刻々と変化するものと考えられるが、定量的な評価は重要である。本研究では、このような GNSS アンテナへの着雪の影響について、GNSS 受信データにおける受信強度低下、伝搬遅延を定量的に把握し、もたらされる位置決定誤差の評価が可能な観測データを取得する冬季実験を実施した。冬季実験は独立行政法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター露場内で、気象観測機器 (気圧、気温、湿度、風向風速、降水量、積雪深等) から約 50m 離れた地点に GPS アンテナを設置し、アンテナへの着雪の様子を定点巡回カメラで 10 分毎に撮影して 2011 年 / 2012 年冬季及び 2012 年 / 2013 年冬季の 2 回実施した。着雪の GNSS 受信データへの影響の評価方法として、GNSS アンテナに付着した雪の落下に伴う受信データの変動を定量的に調査した [2]。その結果、2011 年 / 2012 年冬季実験データからアンテナ上に 40cm 程度の高さまで成長した着雪が落下した際に、受信強度 (C/N0) が数 dB 変動するとともに、搬送波位相観測値のステップ状の変動から着雪により GPS 衛星視線方向に 4cm 程度の伝搬遅延が生じていたことが明らかとなった。発表では、これら実験データを基にした着雪の成長と測位誤差の関係を示すとともに、GPS 衛星毎の伝搬遅延と衛星配置の関係から導かれるシミュレーションによる検証結果を示す予定である。また、2012 年 / 2013 年冬季には着雪の影響を軽減する対策としてアンテナレドームに撥水塗料を塗布したが、この検証結果についても紹介する。

References

[1] R. Jaldehag, J. Johansson, J. Davis and P. Elosegui, "Geodesy using the Swedish permanent GPS network: Effects of snow accumulation on estimates of site positions", *Geophys. Res. Lett.*, vol.23, No.13, pp.1601-1604, June 1996.

[2] T. Yoshihara, H. Motoyoshi, T. Sato, S. Yamaguchi and S. Saito, "GAST-D integrity risks of snow accumulation on GBAS reference antennas and multipath effects due to snow-surface reflection", *Proc. ION ITM 2013*, no.A1-5, pp.112-120, San Diego, CA, January 2013.

キーワード: GNSS, 着雪, 位置誤差, 精密測位, 伝搬遅延, GPS

Keywords: GNSS, snow accumulation, positioning error, precise positioning, propagation delay, GPS

沿岸部における GPS 連続観測への海面高の長周期変動成分の影響 Periodic displacement on continuous GPS observation in coastal area due to long term sea level elevation

大市 一芳^{1*}

OICHI, Kazuyoshi^{1*}

¹ 海上保安庁海洋情報部

¹ Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

海洋情報部では 1999 年から南関東の当庁所管験潮所等に設置している GPS 固定点で地殻変動監視観測を継続的に実施しており、下里本土基準点に設置した GPS 固定点との長基線解析により地球重心を基準とした精密位置決定を実施しているが、いくつかの観測局においては解析結果に顕著な年周変動が見られる。一方、この地域においては海上保安庁や気象庁の設置した験潮所が海面変動の連続観測を実施しており、毎時データが日本海洋データセンターにおいて公開されている。この GPS 解析結果の変動成分に対し、験潮所の海面観測によって得られた海面高の上下動から長周期成分を抽出して相関関数を求め、沿岸部における荷重変化の GPS 観測局に対する影響の評価を試みたのでこれを報告する。

2002 年以降、海洋情報部では伊豆諸島海域の GPS 固定局について 30 秒間隔の観測値と IGS 最終暦を使用して Bernese による下里水路観測所の GPS 局との基線解析を行い、地心座標系における 24 時間平均の精密位置を継続的に求め、同海域における地殻変動を監視し防災のための基礎情報として蓄積している。しかしながら、GPS の解析結果には定常的な地殻変動以外の成分が含まれており、特に伊豆大島局については南北方向の年周変動が顕著である。この変動は同島に設置された国土地理院の 4 箇所の電子基準点の位置変動と同期的であり、およそ一年の周期で見掛け上伊豆大島全体が膨張と収縮を繰り返している様子が分かる。

この歪みの主要因として局地的な荷重の変化が考えられるが、沿岸部であるため潮汐等の海水の移動による成分が大きいと予想できる。当該観測局の GPS による解析位置は日平均値であるため、潮汐の主要成分である日周期および半日周期の成分の影響は無視できるが、年周期などの長周期の成分については十分に考慮されていない。また、近傍の験潮所における海面高観測によると、年周期の変動も数十 cm 程度の振幅を持っており、沿岸部における長周期の海水荷重の変動は大きいと期待される。

GPS による地殻変動監視から年周変動成分を取り除くため、海面高の変動に伴う荷重変動に着目して解析を試みた。解析は、伊豆大島局、三宅島局、神津島局、八丈島局の 4 箇所の GPS 局における 2002 年以降の日平均精密位置の系列を対象とした。このうち、三宅島局、神津島局、八丈島局は験潮所に併設されているため、局位置における海面高変動との相関関数を求めた。伊豆大島局については灯台に併設であるため、同島内に設置された気象庁の岡田験潮所における海面高変動との相関関数を求めた。

キーワード: GPS, 潮汐観測, 地殻変動, 海面変動, 年周変動

Keywords: GPS, tidal observation, crustal deformation, sea level change, annual oscillation

50Hz サンプリングのGNSS 観測によって取得された地震波動について Seismic waves detected by 50Hz sampled GNSS observations

加藤 照之^{1*}; 三浦 哲²; 生田 領野³
KATO, Teruyuki^{1*}; MIURA, Satoshi²; IKUTA, Ryoya³

¹ 東京大学地震研究所, ² 東北大学大学院理学研究科, ³ 静岡大学理学研究科

¹Earthq. Res. Inst., the University of Tokyo, ²Grad. Sch. Sci., Tohoku University, ³Faculty of Science, Shizuoka University

高頻度のGNSS観測を行うことで地震波動を取得したりそこから地震の破壊過程などを明らかにする研究が行われるようになった (e.g., Larson et al., 2003; Miyazaki et al., 2004; Yokota et al., 2009; Ohta et al., 2012). GEONETでも大部分の観測点で1Hzサンプリングのデータが取得されるようになり、今後このような高頻度サンプリングの観測研究が活発化することが期待される。1Hz程度ではそれほど問題にはならないが、さらに5Hz, 10Hzと、より高頻度のサンプリングを行った場合、GNSS受信機特性による変位の振幅や位相にずれが生じることが知られている (e.g. Ebinuma and Kato, 2012)。これらのことに注意しつつ観測を行う必要がある。

我々は、高頻度サンプリングが可能な商用のGNSS受信機を用いて50Hzでの観測を実施してきた。これまでに、観測点近傍で発生した大きな地震に伴うデータを数回取得してきたが、その中で地震動と考えられる波動を捉えることができたので紹介する。GNSS受信機はTrimble社製Net R8型受信機を3台用いた。これら3台のうち1台を2011年10月に静岡大学構内に設置し、残りの2台は2012年3月から、2011年東北地方太平洋沖地震の余震活動の活発な茨城・福島県地域の上遠野及び大田原に設置した。観測は50Hzのデータを2週間程度のチェーンメモリ方式によって取得しつつある他、30秒毎の観測も実施している。3点での観測開始以来茨城県北部や福島県浜通り地方等で震度5弱以上の地震が発生した際にいわき市上遠野及び鹿島市大田原の両観測点については研究室から受信機に付設したルータを介して受信機メモリに直接ログインして50Hzサンプリングデータを回収した。静岡大学の観測点では手動によりデータを受信機からダウンロードする方式をとった。これまでに数回の震度5弱以上の地震によるデータを取得することができた。これらの地震前後の記録をRTNetソフトウェアによって解析している。

これらの地震データのうち、2013年9月20日2時25分(JST)頃に福島県浜通りで発生した地震(震源:北緯37.1度, 東経140.7度; M5.9; 深さ約20km; いずれも気象庁による)時の変動を捉えることに成功した。この時の最大震度はいわき市で震度5強であった。軌道暦はIGS最終暦を用いた。震源から約106kmのほぼ南に位置していた大田原、及び約308km南西に位置していた静岡大学をそれぞれ基準点として、震源のほぼ直上に位置していた上遠野観測点の座標変化を算出した。大田原—上遠野の基線においては3成分共明瞭な地震時の振動と考えられる波形が抽出された。基線が長い分静岡大学基準の記録の方がやや明瞭さを欠き、上下成分は不鮮明ではあるが、水平の2成分では明瞭な振動が捉えられている。

これら3観測点のうち、上遠野及び大田原は小学校の屋上にアンテナが設置されており、静岡大学ではかつて光波測量等に使われた観測棟にアンテナが設置されている。近傍に設置された強震動記録との比較などをおこないつつ、建物の振動の影響などを詳細に検討したいと考えている。さらにはGNSS受信機特性を考慮した振幅・位相特性の補正方法についても検討を進めていく必要がある。

キーワード: GNSS, 高頻度サンプリング, GPS, GPS地震学, 50Hz

Keywords: GNSS, high-frequency sampling, GPS, GPS seismology, 50Hz

キネマティック PPP データによる噴煙柱検出の試み Detection of eruption column by using the kinematic precise point positioning

太田 雄策^{1*}; 井口 正人²; 植木 貞人¹; 出町 知嗣¹
OHTA, Yusaku^{1*}; IGUCHI, Masato²; UEKI, Sadato¹; DEMACHI, Tomotsugu¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター, ² 京都大学防災研究所

¹RCPEVE, Tohoku University, ²DPRI, Kyoto University

We investigate the ability of kinematic precise point positioning to detect volcanic plumes at Minami-dake of Sakurajima Volcano. In Houlié et al. [1], the authors processed the GPS data obtained during the eruption of Miyakejima volcano, occurred in 2000, and found anomalous values in the ionosphere-free linear combination of the L1 and L2 phase measurements (LC). They related these anomalous values to the path delay effects caused by the presence of a hot volcanic plume; by applying techniques of seismic tomography. Another test was carried out during the eruption of Mt. St. Helens on March 9, 2005, and again the GPS signal showed a clear signature of the volcanic plume presence [2].

In this study, we describe the July 24, 2012 activity at Minami-dake of Sakurajima Volcano. We analyzed the data from 18 continuous GPS stations (3 GEONET sites and 15 Kyoto University sites), which located on the volcano flanks. For the GPS analysis, we used GIPSY-OASIS II version 6.1.4 software [3]. We estimated the post-fit phase residual in the ionosphere-free linear combination for each pair of GPS satellites and ground stations for the detection of eruption column. We applied absolute IGS phase center corrections for satellite and receiver antennas. The wet zenith tropospheric delays and its gradient at all the GPS sites were estimated at all processing epochs (every 30 seconds) under the assumption of a random walk stochastic model. Firstly, we analyze the all of the GPS data in July 21, 22 and 23, 2012 for the reference. Obtained post-fit phase residual of the reference days showed the noise-level for the path delay effects caused by the volcanic plume. This reference post-fit phase residual contained many noise sources such as multipath effects, local atmospheric disturbance, and so on. The noise level of the post-fit phase residual strongly depends on the each GPS satellite and ground station pair. Finally, we analyzed the data of the July 24, 2012. The post-fit phase residual clearly shows large disturbance just after the eruption. For example, the phase residual between SVN34 satellite and GEONET 0720, which located in the east coast of Sakurajima, suddenly increased just after the eruption. The obtained residual amount reached 80mm. It is clearly larger than the noise level measured on the reference days. Furthermore, other GPS satellite and ground station pairs also clearly showed significant amounts of disturbance. These results suggest that the eruption column moved to the westward by the wind after the eruptive event.

[1] Houlié et al. GRL, 2005. [2] Houlié et al. Eos Trans, 2005. [3] Lichten and Border, JGR, 1987.

東メコン地域に於ける次世代航空保安システムへの移行に係る空港座標測量手法 Airport survey method for transition to the new CNS/ATM systems in east Mekong area

中川 雄二^{1*}; 岡田 薫²; 島田 誠一³; 里村 幹夫³; 新出 陽平¹; 伊藤 広和¹; 請井 和之¹
NAKAGAWA, Yuji^{1*}; OKADA, Kaoru²; SHIMADA, Seiichi³; SATOMURA, Mikio³; SHINDE, Yohei¹; ITOH, Hirokazu¹
; UKEI, Kazuyuki¹

¹ 株式会社 日豊, ² 独立行政法人国際協力機構, ³ 防災科学技術研究所, ⁴ 神奈川県温泉地学研究所

¹ Nippo Co., Ltd., ² Japan International Cooperation Agency, ³ NIED, ⁴ Hot Springs Res. Inst, Kanagawa Pref.

独立行政法人国際協力機構（JICA）の案件である「東メコン地域次世代航空保安システムへの移行に係る能力開発プロジェクト」（2011年1月～2015年12月）の企画競争に於いて、株式会社日豊が2011年5月から足掛け2年、6度に渡って採用された空港座標測量関係の業務を紹介する。

人工衛星技術を活用した航空機の航法及び航空管制に係る新技術である次世代航空保安システムの導入が1991年より国際民間航空機関（ICAO）によって推進され各加盟国は新システムへの移行が求められている。この要求に答えるにはWGS84座標系の空港座標が必要である。今回のプロジェクトでは、ラオス、カンボジア、ベトナムに於いて測量を実施し、その手法を技術移転した。

空港座標測量の内容は空港内の滑走路両端、航空無線施設、管制塔や仏塔等の飛行障害物を測量することである。しかし、上記3ヶ国には公表されている正確なWGS84座標系の基準点がない為、一次及び二次基準点を空港内に設置し、一次基準点はGPS観測を3日間行い、周辺国のIGS基準点からバランスを考慮して5、6点を選択し長基線解析（Bernese）した。二次基準点は一次基準点を与点としたGPS測量により座標を確定した。次にこれらの基準点から座標が必要な箇所をトータルステーションにより測量した。測量成果は現地滞在中のプロジェクト期間内に提出する必要がある衛星の迅速歴を用い、帰国後Gamitによる最終精密歴による解析で現地の結果を照査した。測量手法や測量成果の計算方法、精度の検証方法、データベース管理方法などの手法と技術移転の内容について述べる。

キーワード: WGS84, GPS, 次世代航空保安システム, 空港座標, 東メコン

Keywords: WGS84, GPS, CNS/ATM, Airport coordinates, East Mekong area

レーザースキャナーによる室野泥火山の上下変動の測定 Vertical deformations revealed by laser scanning surveys in the Muro no mud volcano

高橋 温志^{1*}; 福田 洋一¹; 楠本 成寿²
TAKAHASHI, Atsushi^{1*}; FUKUDA, Yoichi¹; KUSUMOTO, Shigekazu²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 富山大学理学部

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Department of Earth Science

新潟県十日町市にある室野泥火山において、泥火山の活動に伴う地表面の変動を面的にとらえることを目的とし、TOPCON社製 Imaging Station IS-301 を用いた調査を行った。IS-301 は標的プリズムを精度よく測定するトータルステーションの機能に加え、地表面の3次元位置情報を自動的に取得するスキャナーモードを搭載している。室野泥火山では、富山大学により61点の水準点が設置されており、これまでも定期的な水準観測が実施されている。今回は、2013年6月と10月の二度の測定を行い、スキャナーモードによる測定に加えて、水準点でのトータルステーション機能による測定も行い、精度評価もあわせて行った。

スキャナーモードの測定で得られた2回の点群データから、まず、格子内のデータを平均する方法と、誤差関数を重みとして内挿する2通りの方法を用いて、それぞれ格子状の値を計算し、2回の測定値の差から変動量を算出した。その結果、内挿によるデータの差分として領域の一部で同心円状の隆起を示すシグナルがとらえられた。次にこの隆起を説明するために茂木モデルを用いてフォワード計算を行ったところ、最大で約1.5cm程度の隆起が予測され、これは、最近傍の水準点での測定値と良く一致した。点群データは個々の測定精度は劣るが空間解像度は優れており、隆起の様子を面的にとらえることができるため、隆起の変動源の推定といった目的に有用であることが示された。

キーワード: トータルステーション, レーザースキャナー, 泥火山, 上下変動, 茂木モデル

Keywords: LaserRangeFinder, LaserScanningSurvey, Mud Volcano, Vertical Deformation, Mogi Model

丸い地球の準静的内部変形—きわめて高い次数での漸近展開 Asymptotic solutions to the quasi-static spheroidal and toroidal deformation of the SNREI earth

大久保 修平^{1*}; 高木 悠¹
OKUBO, Shuhei^{1*}; TAKAGI, Yu¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

[1] はじめに

点荷重や点震源によって生じる変形（グリーン関数）は、測地学的にも地震学的にも重要な役割を果たしてきた。例えば、球対称地球の表面に置かれた点荷重で生じる「地表」変形（Farrell, 1972）は、地殻変動連続観測や重力観測において、海洋潮汐荷重の補正などに活用されている。また点震源によって生じる、球対称地球の「表面」変形グリーン関数（Sun and Okubo 1992）は、巨大地震にともなう地殻変動や重力場変動の解析に活躍している。これらの表面変形に対するグリーン関数を計算するには、球面調和関数展開の次数 n が ∞ に近づくときの、「表面」でのスフェロイダル及びトロイダル変形（ラブ数）が必要となり、それについては Okubo (1988) によって与えられている。

一方、表面での変形だけではなく、地球内部に生じる応力や歪を計算するには、地球内部の変位、応力、ポテンシャルの球面調和展開係数（いわゆる y 関数）をきわめて高い次数（次数 $n > \text{数千} \sim \text{数万}$ ）で求める必要がある。

[2] 手法

自己重力を考えた均質球の変形に対しては、変形場を球面調和関数展開を用いて、スフェロイダル場とトロイダル場に分けて議論することができる。それらの解は、Love (1911) が一般解を与えており、それは Takeuchi and Saito (1972) によってまとめられている。要点をいえば、動径距離 r における y 関数の一般解は、球ベッセル関数 $[j_n(k_n r), n_n(k_n r)]$ とべき級数 $[r^n, r^{-(n+1)}]$ とを用いた形で表示できる。第1種及び第2種ベッセル関数の引数 $k_n r$ は、次数 n に概ね比例して大きくなる量であり、ここに漸近展開を施して、適当な境界条件を課せば解くことができる。

地表で収束する解としては（潮汐変形解、荷重変形解、シア変形解）があり（Saito 1974）、それぞれに対して応力、ポテンシャルの条件が定まっている。一方、これと同じ境界条件を満たしつつも、地球中心に向かって発散するような第2種解もある。第2種解は、点震源で生じる地球内部変形を求めるときに必要なもので、無視することはできない。

[3] 結果

以上の手順にもとづいて、Okubo (1988) の理論を一部手直しして、スフェロイダル変形の一般解6種、トロイダル変形の一般解2種を導くことができた。講演では、さらにこれらの解の応用範囲について議論する予定である。

キーワード: 内部弾性変形, グリーン関数, SNREI モデル, 漸近展開

Keywords: Internal elastic deformation, Green's function, SNREI earth, Asymptotic expansion

同一基線における GNSS 測量機及び測距儀による観測距離の比較 Evaluation of uncertainty in distance measurement by GNSS surveying instrument and EDM

吉田 茂^{1*}; 佐藤 雄大¹
YOSHIDA, Shigeru^{1*}; SATO, Yudai¹

¹ 国土交通省国土地理院

¹ GSI of Japan

国土地理院では、GNSS 測量機を用いた距離観測において、国際標準とのトレーサビリティを確立するための研究を実施している。距離（長さ）の基準は光の速さを元に定義されており、国際標準も光の速さで決められている。トレーサブルな測距をおこなうには、国際標準と関連づけられた光波測距儀（EDM）を使用すればよい。しかしながら、近年、あらゆる測量に使用されている GNSS 測量機は、観測距離に国際標準とのトレーサビリティが確保されていない。このため、今回の研究は、同一基線において GNSS 測量機と測距儀による観測を実施し、測定された距離を比較することで、GNSS 測量機における観測距離にトレーサビリティを持たせることを目標としている。

観測方法は、まず、長さの国際標準にトレーサブルな EDM を使用してトレーサビリティを持つ基線を作り、次に、その場所で GNSS 測量機を使用した観測を行い、EDM で得られた値と比較して拡張不確かさを求めることで、GNSS 測量機における観測距離にトレーサビリティを持たせることとした。研究のために、2km の基線を坂東市と常総市の境界を流れる利根川支流飯沼川の河川管理用道路に設置した。

EDM のトレーサビリティは「気象条件が変化しない屋内において 200m まで」保証されているので、できるだけその条件に近づけようと、2km の基線を分割し、それぞれの部分で気象補正を考慮した測距をおこなった。その結果から、部分ごとの最良推定値及び合成不確かさを求めたうえで、最終的に 2km 基線全体の拡張不確かさを求めた。

GNSS 測量機による観測は、各観測点で 6 時間の観測を行った。このうち、2km 基線全体に相当する基線で 3 回得られた観測距離と、EDM 観測で得られた最良推定値を元に、比較と拡張不確かさの推定をおこなった。

その結果、今回の基線の全長は、1,999.9828m、EDM による拡張不確かさは、 $1,999.9828 \pm 0.0014\text{m}$ 、GNSS 測量機による拡張不確かさは、 $1,999.9828 \pm 0.006\text{m}$ と算出、2km 基線におけるトレーサビリティの付与は問題ないと判断した。

キーワード: GNSS 測量機, 光波測距儀 (EDM), 不確かさ, トレーサビリティ

Keywords: GNSS surveying instrument, EDM, Uncertainty, Traceability

松代の石英管伸縮計で観測されている東北地方太平洋沖地震後の東西方向の伸び続ける変化について

Changes of E-W observed by the Quartz-tube Extensometer in the Matsushiro extending after the 2011 Tohoku Earthquake

橋本 徹夫^{1*}; 舟越 実¹

HASHIMOTO, Tetsuo^{1*}; FUNAKOSHI, Minoru¹

¹ 気象庁精密地震観測室

¹ Matsushiro Seismic Observatory JMA

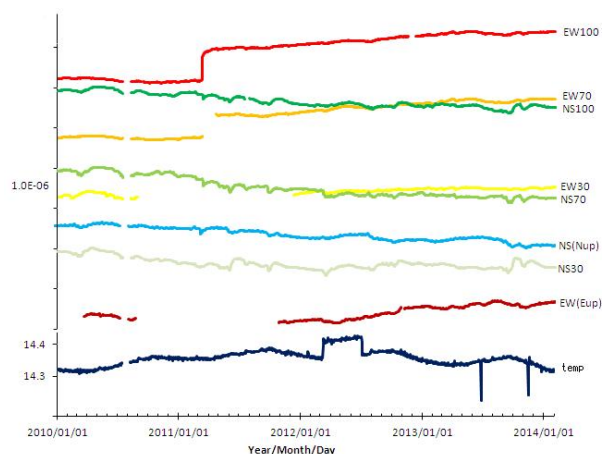
松代の伸縮計に、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の際には、コサイスマックステップとして 5.8×10^{-7} の東西方向の伸びが観測された。その後、1 ヶ月間ほど、余効変動と見られるうえに凸の伸びの 0.4×10^{-7} の変動が観測されており、さらにその後の 2011 年 10 月ごろから、揺らぎがあるものの伸び続ける変動が観測されており、 0.5×10^{-7} の変動となっている。同様の傾向が、松代や神岡の超伝導重力計に観測されている（今西、私信）ことを考慮すると、この伸び変動は局所的なものではなく、実際の地殻変動を観測しているものと思われる。

図に 2010 年からの伸縮計、傾斜計、坑道内の気温、および、伸縮計の補助観測点の変化を示す。気温は、この期間で、およそ 0.03°C の上昇があるが、石英管の温度感度が 5.4×10^{-7} であることを考慮すると、伸び変化に気温の影響はほとんど現れていないと思われる。また、複数観測点で伸び続ける現象が見られていることも、実際の変化を見ていることを示している。さらに、傾斜計においては、日が仕上がりの変化が続いている。伸縮計において、地震の波動（図には表示されていない）からその後の余効変動に続く、地殻変動を一貫して統一的な計測器として捉えることができた。この伸び現象は、地質学的な隆起現象の一環を示しているのかもしれない。

謝辞：東京大学地震研究所の今西祐一准教授から、松代と神岡の超伝導重力計の重力値が東北太平洋沖地震以後、減り続けていることをご教示いただきました。

キーワード: 伸縮計, 傾斜計, 余効変動, 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋地震

Keywords: extensometer, tiltmeter, aftereffect, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake



円環外核赤道の扁平率 Equatorial flattening of the cylindrical outer core

角田 忠一^{1*}
KAKUTA, Chuichi^{1*}

¹ なし

¹ none

Zhong et al.(2007) は Pangea 超大陸形成 (330 Ma) 間もなくアフリカ大陸の半球が出現し、低温の下降流を生じ、他方太平洋半球は高温上昇流を生じ、赤道帯に次数 1 の構造を形成したことを示した。最近の研究から CMB(core mantle boundary) 付近で OC(outer core) は mantle から軽元素が流入し、安定成層を形成し、超断熱温度勾配は $1 \times 10^{-3} \text{K m}^{-1}$ となり、また熱伝導率は $1 \times 10^{-3} \text{K m}^{-1}$ となり、熱流束は 100mW m^{-2} 以上となる。一方 mantle の CMB 付近では高温部 (perovskite:pv) および低温部 (post-perovskite:ppv) で熱流束は $100 \text{mW m}^{-2}(\text{pv})$, $50 \text{mW m}^{-2}(\text{ppv})$ となり、低温部では OC からの熱放出が考えられる。OC うすい円環として、自転軸のまわりに回転する流体とする。流体は低周波の運動を示すとし、その水平方向の圧力変化は密度変化に影響を及ぼさないとする近似 (Subseismic Approximation; Smylie and Rochester, 1981) を適用する。OC の熱流束は CMB 付近で中心距離増加方向に指数関数として減少するモデルを考える。これからポテンシャルの 1 次変化を求める。ポテンシャルの方位方向の変化は赤道扁平率の変化を表す。その最大値は CMB における平均重力ポテンシャルに対し、CMB において 1.1×10^{-5} の変化 (扁平率) を示す。この値は Szeto and XU(1997) の求めた OC の赤道扁平率変化 6×10^{-6} と比較できる。

キーワード: うすい円環外核, 熱流束, マントル内の熱流束, ポテンシャル, ポテンシャル変化, 外核の赤道扁平率

Keywords: thin cylindrical outer core, heat flux, heat flux in the mantle, potential, variation of potential, equatorial flattening of core

A bias correction method for improving regularized solution in linear inverse ill conditioned models

A bias correction method for improving regularized solution in linear inverse ill conditioned models

SHEN, Yunzhong^{1*}; XU, Peiliang²; LI, Bofeng¹
SHEN, Yunzhong^{1*}; XU, Peiliang²; LI, Bofeng¹

¹1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

¹1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Geodetic downward continuation and inverse problems are often ill conditioned, and regularization is used for deriving stable and better solutions. However, the regularized estimates of parameters and residuals are well known to be biased. Theoretically the biases of the estimated parameters and residuals can only be computed with the true values of parameters. Since we do not know the true values of parameters in practice, we attempt to improve the regularized estimates by using the regularized estimates themselves to replace the true parameters for estimating the biases and then removing the computed biases from the regularized estimates. Furthermore the biases are also removed from the residuals, and then the variance of unit weight of the observation noises is estimated with the bias-reduced residuals. We derive the analytical conditions for bias correction and show that the bias-corrected regularization performs better than the ordinary regularization in terms of mean squared errors. However, for estimating the variance of unit weight, the biases still need to be full removed from the residuals. We then present the numerical examples of gravity downward continuation to demonstrate the performance of our bias correction method for improving regularized solution. The results show that our bias correction method can successfully reduce the absolute biases of the regularized estimates, and improve the accuracies with more than 5 per cent. Moreover, by removing the biases from the residuals, the derived variance of unit weight is almost unbiased.

キーワード: Linear ill-conditioned model, Regularization solution, Bias correction, Gravity downward continuation, Variance of unit weight

Keywords: Linear ill-conditioned model, Regularization solution, Bias correction, Gravity downward continuation, Variance of unit weight