

「地球規模の測地基準座標系（GGRF）」推進のための国連ロードマップ

A Roadmap for enhancement of Global Geodetic Reference Frame

*宮原 伐折羅¹*Basara Miyahara¹

1.国土交通省国土地理院

1.GSI of Japan

国連総会は、2015年2月26日、地球規模の測地基準座標系（GGRF）が社会、経済、科学に不可欠な基盤インフラであることを認めて、決議「持続可能な開発のための地球規模の測地基準座標系」を採択した。この決議は、測地学の分野で地球規模の連携した取り組みを行う重要性を初めて認めた国連総会決議で、加盟国に連携してGGRFの構築、維持を行うことを求めている。決議では、ロードマップを作成して決議を実行すること、途上国の技術、能力開発を強化すること、各国が責任を持って自国の測地観測を改善することなど、6つの決議文が採択された。決議は、国連地球規模の地理空間情報管理に関する専門家委員会（UNCE-GGIM）が設置した作業部会によって作成され、第4回のUNCE-GGIM会合、国連経済社会理事会で承認されたのち、フィジーを提案国として日本を含む52カ国の共同提案で総会に提出された。国土地理院は、当初から作業部会に加わり、決議案の作成に貢献するとともに、決議後は、GGRFを確実に構築・維持するため、ロードマップの作成に参加している。ロードマップでは、確実なGGRFの構築と維持に対して、現状でどのような課題があるかを分析するとともに、その課題を解決する方策を提案し、その先にどのような改善が行われ、さらに良いGGRFが構築されるのか、将来の展望を示している。作成したロードマップは、2016年8月にニューヨークで行われるUNCE-GGIMの第5回会合に提出され、議論ののちに採択されることが想定されている。発表では、決議の背景と意義を確認するとともに、GGRFの維持に向けたロードマップの概要を報告する。

キーワード：地球規模の測地基準座標系、国連総会決議、全球統合測地観測システム

Keywords: global geodetic reference frame, the United Nations General Assembly resolution, Global Geodetic Observing System

石岡測地観測局の最新状況

Status Report on the Ishioka Geodetic Observing Station

*若杉 貴浩¹、石本 正芳¹、川畑 亮二¹、福崎 順洋¹、和田 弘人¹

*Takahiro Wakasugi¹, Masayoshi Ishimoto¹, Ryoji Kawabata¹, Yoshihiro Fukuzaki¹, Kojin Wada¹

1.国土交通省国土地理院

1.GSI of Japan

国土地理院は、茨城県石岡市に新たなVLBIアンテナを含む測地観測局を整備している。既に整備が完了しているVLBIアンテナ及びGNSS連続観測点等に加え、2016年2月末に観測局舎が完成し重力観測点の使用が可能となる予定である。本発表では、これらを含めた石岡測地観測局の現況について報告を行う。また、これまでに実施した石岡VLBIアンテナを用いた観測結果についても報告する。

衛星レーザー測距観測網の拡充： 新たな局はどこに？

Satellite laser ranging network: Where should a new station be placed?

*大坪 俊通¹、松尾 功二²、山本 圭香³、青山 雄一⁴、ホビガー トーマス⁵、関戸 衛⁶、久保岡 俊宏⁶*Toshimichi Otsubo¹, Koji Matsuo², Keiko Yamamoto³, Yuichi Aoyama⁴, Thomas Hobiger⁵, Mamoru Sekido⁶, Toshihiro Kubooka⁶

1.一橋大学、2.国土地理院、3.宇宙航空研究開発機構、4.国立極地研究所、5.チャルマーズ工科大学、6.情報通信研究機構

1.Hitotsubashi University, 2.Geospatial Information Authority of Japan, 3.Japan Aerospace Exploration Agency, 4.National Institute of Polar Research, 5.Chalmers University of Technology, 6.National Institute of Information and Communications Technology

現在、衛星レーザー測距のために運用されている観測局の数は 40 程度で、必ずしも地球上に均一に分布しているわけではない。GGOS の推進する地球基準座標系の高精度化のため、新たな観測局を追加すると仮定して、どの場所が効率的であるか、シミュレーション解析を行った。まず、天候や人的リソースに依存していることを考慮して、既存の観測局の実績から、現実的な測距データ生産率を導き、シミュレーションデータを作成した。扱った衛星は、LAGEOS-1, -2, Ajisai, LARES, Starlette, Stella の 6 つである。次いで、宇宙測地解析ソフトウェア c5++ を用いて、既存の観測網に対して、地球上のどこかに 1 つの新観測局を置くような設定でシミュレーション解析を行った。新観測局の存在しない場合に対する推定誤差の改善率を指標にした。その結果、概して南半球の空白域を埋めることが重要であることが確認され、さらに、求めたい測地パラメータによって、最適な場所が異なることがわかった。例えば、地球重心の X 成分・Y 成分には南半球高緯度域が有効であるのに対し、Z 成分には低緯度域のほうが有効であった。

キーワード：宇宙測地学、GGOS、衛星レーザー測距、精密軌道決定、地球基準座標系、重力

Keywords: Space Geodesy, GGOS, Satellite Laser Ranging, Precise Orbit Determination, Terrestrial Reference Frame, Gravity

経験的加速度の時間変化で探る衛星の摂動

Orbital perturbation of geodetic satellites detected by the time variation of empirical acceleration

*服部 晃久¹、大坪 俊通²

*Akihisa Hattori¹, Toshimichi Otsubo²

1.一橋大学社会学部、2.一橋大学

1.Hitotsubashi University, Faculty of Social Sciences, 2.Hitotsubashi University

1 cm を下回る精度のレーザー測距データを用いて行われる精密軌道決定において、人工衛星に及ぼされる力、その個々のモデル自体はそこまで精微なレベルに達しておらず、未だ原理がよく解明されていない部分も残る。

モデルの精度は軌道決定の精度に直結するものであり、これを補う目的で、未知の加速度要因が吸収されるような簡単な経験的加速度を加速度モデルに組み込み、解析後の残差を小さくすることが一般的に行われている（大坪ほか 2014）。

現在の加速度モデルでは経験的加速度に吸収させている、まだモデル化されていない加速度要因を特定・分離し、モデル化することは、測地学的・地球物理学的な意味付けを行う上で有効である。事実、LAGEOS-1 ではこの経験的加速度の分析の中から熱力学的なモデルが発見されている（Scharrooほか 1991）。

一橋大学・情報通信研究機構・Chalmers工科大学が共同で開発・運用を行っている宇宙測地解析ソフトウェア“c5++”では、along-track（人工衛星の進行する）方向・cross-track（人工衛星の軌道面に直交する）方向・radial（動径）方向の3方向それぞれについて、定数項および周期項の経験的加速度パラメータを推定することが可能である。

“c5++”を用いて、AJISAI・LAGEOS-1・LAGEOS-2・LARES・STELLA・STARLETTE の6つの測地衛星において、それぞれで過去5年間の経験的加速度を推定した。推定した経験的加速度は、along-track 方向の定数項1変数・along-track 方向の周期項2変数・cross-track 方向の周期項2変数の計5つのパラメータである。解析後の残差の RMS は、LAGEOS-1・LAGEOS-2 では 7-10 mm、その他の低軌道衛星では 20-40 mm 程度である。

経験的加速度の大きさについては、LAGEOS-1・LAGEOS-2 では、along-track 方向の定数項が 0-10 pm/s²、周期項が 0-200 pm/s²、cross-track 方向の周期項が 0-1 nm/s² であった。その他の低軌道衛星では、along-track 方向の定数項が 0-2 nm/s²、周期項が 0-2 nm/s²、cross-track 方向の周期項が 0-10 nm/s² であった。

これらの経験的加速度パラメータを5年分蓄積し、その時間変化を周波数解析などを通して分析した。一例として、AJISAI の along-track 方向の周期項は、衛星軌道面と太陽がなす角の絶対値と相関が高いことがわかった。このような経験的加速度の系統的な時間変化及びこれらの要因として考えられる摂動について議論する。

キーワード：衛星レーザー測距、経験的加速度

Keywords: satellite laser ranging; SLR, empirical acceleration

GNSS連続観測システム (GEONET) 解析固定点座標算出手法の改良

Improvement of an Estimation Method of GEONET Fixed Point Coordinates

*鎌苅 裕紀¹、山尾 裕美¹、畑中 雄樹¹

*Yuki Kamakari¹, Hiromi Yamao¹, Yuki Hatanaka¹

1.国土交通省国土地理院

1.GSI of Japan

国土地理院が提供する日々の座標値 (F3) は、国際地球基準座標系ITRF2005に準拠して算出された、観測日におけるGEONET観測点の座標値であり、国内の地殻変動監視等に利用されている。座標値の推定は、24時間分の観測データとIGS最終暦等を用いてBernese v5.0で行っており、茨城県つくば市の観測点「つくば1」を固定点としている。(中川ほか、2009)。固定点の座標値は、別途日本周辺のIGS局を含めたGAMIT/GLOBKによる解析(以下、「固定点解析」という。)により決定しており、その際に特定のIGS局の位置をITRF2005の元期の座標値と速度から観測日の座標値を計算したもので拘束している。

しかし、IGS局の移設や2011年3月の東北地方太平洋沖地震による余効変動の影響等から、固定点解析において拘束しているIGS局(以下、「拘束点」という。)の数は当初と比較し、6割程度となっている。そのため、現行の固定点解析では、拘束点数が少ないことにより、特定の拘束点が欠測や機器交換等により解析から除外されると、その影響を大きく受け、安定した座標解が得られないことがある。

このような拘束点の欠測等による影響を緩和し、F3解を安定的に提供できるようにするため、拘束点とするIGS局の再選定を行い、新たに選定した20点程度のIGS局を解析の拘束点として算出した「つくば1」の座標値の安定性を評価した。その結果、欠測などに伴う拘束点の減少による影響が緩和され、安定した座標解が得られることを確認した。

キーワード：GEONET、GNSS

Keywords: GEONET, GNSS

点震源によって生じる丸い地球の内部変形グリーン関数：成層構造を持つ地球モデルの高い次数での漸近解

Green function for internal deformation due to a point dislocation in a spherical earth: asymptotic solution at the higher degree for a stratified earth model

*高木 悠¹、大久保 修平²

*Yu Takagi¹, Shuhei Okubo²

1.東京大学大学院理学系研究科、2.東京大学地震研究所

1.School of Science, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

点荷重や点震源によって生じる地球の変形（変位や歪など）を表すグリーン関数は、測地学的、地震学的に重要な役割を果たしてきた。例えば、Farrell (1971) によって求められた点荷重による「地表」のグリーン関数は、海洋潮汐によって生じる重力や歪変化を補正するのに使われている。また、Sun & Okubo (1993)によって求められた点震源による「地表」のグリーン関数は、巨大地震によって「地表」に生じる変位や重力変化を解釈するのに役立っている。さらに、点震源による「内部」のグリーン関数が求められれば、クーロンの静的応力や歪の蓄積などの推定に用いることが出来る。これらのグリーン関数を求めるためには、球面調和関数の次数 n が「数千から数万」もの高い次数の解まで計算する必要がある。そのため、次数 $n \rightarrow \infty$ の解の振舞いを表す「漸近解」を求めることが有効になる。点荷重による「地表」の漸近解はFarrell (1972) によって、点震源による「地表」の漸近解はOkubo (1988) によって求められたが、点震源による「内部」の漸近解は一様球の場合にしか得られておらず（大久保 & 高木, 2014 JpGU）、成層構造を持つ場合の解を求める必要がある。

自己重力を伴う球対称地球の場合、変形場はスフェロイダルモードとトロイダルモードに分離して、それぞれのモードは6変数と2変数の連立常微分方程式で表される。成層構造における漸近解は、「成層構造の解」=「(i)一様球の解」+「(ii)弾性定数等の物性が半径方向に変化することの効果」と考えて求めた。(i)の項は既に得られているので（大久保 & 高木, 2014 JpGU）、それを基に(ii)の効果を取り入れる。(ii)の効果は、全地球にわたる積分として表されるが、次数 n が非常に大きい場合には、震源と変形を求めようとする深さの周囲のみ考えれば十分である。

上記の考えに基づいて、より簡単なトロイダルモードについて漸近解を求め、数値計算で $n=100,000$ まで計算した結果と比較したところ、次数 n が大きくなるにつれて数値解が漸近解に近づいていくという期待通りの結果が得られた。

本講演では、トロイダルモードに加えて、スフェロイダルモードについても漸近解を示すとともに、漸近解の有効性について議論する予定である。

キーワード：グリーン関数、点震源、内部変形、成層構造、漸近解

Keywords: Green function, point dislocation, internal deformation, stratified earth, asymptotic solution

係留ブイを用いた GPS/A 海底地殻変動観測の誤差伝播の評価

Evaluation of the error propagation in GPS/A measurement using a moored buoy

*今野 美冴¹、木戸 元之^{1,2}、太田 雄策¹、高橋 成実^{3,4}、福田 達也⁴、越智 寛⁴、日野 亮太¹*Misae Imano¹, Motoyuki Kido^{1,2}, Yusaku Ohta¹, Narumi Takahashi^{3,4}, Tatsuya Fukuda⁴, Hiroshi Ochi⁴, Ryota Hino¹

1.東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知観測研究センター、2.災害科学国際研究所、3.防災科学技術研究所、4.海洋研究開発機構

1.Reserch Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions Graduate School of Science, Tohoku University, 2.International Research Institute for Disaster Science, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 4.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

【研究背景・目的】東北大学、JAMSTEC、JAXA は、係留ブイを用いた津波・海底地殻変動モニタリングシステム (Takahashi et al., 2014) の共同開発を進めており、東北大学は GPS/A 観測を担当している。将来巨大地震が発生すると予想される紀伊半島沖熊野灘で現在 3 回目の試験観測を実施している。係留ブイ GPS/A 観測の目標測位精度は、巨大地震に伴う地殻変動を即時把握できるよう 1 m と設定している。本観測システムのブイは、強潮流域で連続観測できるよう水深の 1.5 倍程度の長さの索で係留されているため、(1) 定点保持が難しく、(2) 海底局アレイ中心に必ずしも位置しない。これらは、最終的に推定するアレイ重心位置に (1) アレイ形状 (各海底局間の相対的な位置関係) 誤差の影響が観測位置に依存した系統的な誤差として表れる、(2) データに含まれる誤差がアレイ中心で測位した場合の数倍以上拡大されて表れる、と考えられるが、このような状況の誤差伝播評価を行った例はない。そこで、本研究では係留ブイ GPS/A 観測を想定した条件で数値実験を行い、測位結果への誤差伝播量を見積もった。また、数値実験結果を第 2 回試験観測 (2014) の測位結果と比較検討し、測位精度向上策を提言した。

【数値実験】係留ブイ GPS/A 観測における誤差要因には、海上局位置推定誤差、姿勢推定誤差 (位置に変換すると海上局位置水平成分誤差)、走時検出誤差、アレイ形状誤差が考えられる。このうち、海上局位置水平成分の誤差はアレイ重心位置に等倍で反映される。そこで、誤差伝播が未解明な以下 1-3 の誤差を与え、係留ブイ振れ回り幅を想定した海上局位置でのアレイ重心位置を推定した。これを 10 回試行した平均値と、初期値として用いるアレイ形状の重心を原点とし、各誤差を与えて推定したアレイ重心位置の原点からのずれ量を誤差伝播量とした。アレイ形状には 2014 年船舶キャンペーン観測で取得したデータを用いて推定した個々の局位置を用いた。個々の局位置の推定精度は、走時残差から水平 15 cm、上下 25 cm 程度だと考えられる。原点を中心にした 10 km 四方に 100 m 間隔で海上局位置を配置し、疑似データを作成した。第 2 回試験観測の海上局位置は、精密暦を用いた後処理キネマティック精密単独測位 (PPP) 解析 (GIPSY-OASIS II, ver. 6.3) により推定したので、測位精度は水平 ~2 cm、上下 ~4 cm 程度 (太田・他, 2006) と考えられる。最終的に以下の 3 通りの誤差を与えた。

1. 海上局位置上下成分推定誤差: 各海上局位置で独立に、4 cm (1 σ)。
2. 走時検出誤差: 各海上局位置および各海底局で独立に、相関ピーク読み違いを想定した ± 0.1 ms、および分解能限界の ± 0.01 ms。
3. アレイ形状誤差: 各海上局位置で独立に、個々の局位置に水平成分 15 cm、上下成分 25 cm (1 σ)。

【数値実験結果】各誤差要因の誤差伝播量は最も大きくなる領域で 1. ~ 20 cm, 2. ~30 cm, 3. 0.5--2 m となった。誤差伝播量が最も大きくなる領域は、GPS 測位で用いられる幾何的精度劣化率が高い領域と概ね一致した。誤差要因として与える量を半分にすると、誤差伝播量も半分になった。

【議論】第 2 回試験観測では、約 4 カ月間に渡り週に 1 回連続 11 回の音響測距 (ショット間隔約 1 分) を実施した。測位精度 1 σ (東西/南北) は、解析可能なデータが揃った 13 週全体で 0.7/1.0 m であった。観測期間全体の測位結果は、系統的な誤差が大きい 5, 7 週目を除き 誤差要因 1-3 の誤差伝播の和により説明可能であり、最も大きな誤差要因はアレイ形状誤差であることがわかった。数値実験では、各海上局位置での統計的な誤差伝播量を調べるためにアレイ形状に関しては 3 の条件としたが、実際の誤差は一意である。アレ

イ形状誤差を全ての海上局位置で共通にして数値実験を行うと、アレイからやや離れた場所に局所的に大きな誤差伝播が表れることから、5, 7 週目の海上局位置はそのような領域にあったと考えられる。係留ブイ GPS/A 観測の測位精度 1 m を達成するためには、誤差量と誤差伝播量の線形性から、アレイ形状誤差を数 cm オーダーで推定すればよいと考えられる。第 2 回試験観測の海上局位置は後解析で推定したので、今後長期間のリアルタイムキネマティック PPP の精度および確度を把握する必要がある。

【結論】本研究で実施した係留ブイ GPS/A 観測の誤差伝播に関する数値実験は、第 2 回試験観測結果のばらつきの特徴と概ね整合的であり、最も大きな誤差要因がアレイ形状誤差であることが明らかになった。また、係留ブイ GPS/A 観測の測位精度を向上させるためには、正確な局位置推定が最も重要であり、次にリアルタイムキネマティック PPP の測位精度評価とその向上が必要であることを示した。

謝辞：本研究で使用したデータは、文部科学省の受託研究「海底地殻変動観測技術の高度化」、および JST 戦略的イノベーション創造プログラム（レジリエントな防災・減災機能の強化）の研究の一環で得られたものです。記して感謝いたします。

キーワード：海底地殻変動、係留ブイ、GPS/A 観測

Keywords: Seafloor crustal deformation, A moored buoy, GPS/Acoustic measurement

単一GPSアンテナとMEMSジャイロによる地殻変動観測ブイの姿勢モニタリング
Monitoring of moored buoy attitude by single GPS antenna and rate-gyro

*本荘 千枝¹、木戸 元之¹、太田 雄策²、今野 美冴²

*Chie Honsho¹, Motoyuki Kido¹, Yusaku Ohta², Misae Imano²

1.東北大学災害科学国際研究所、2.東北大学大学院理学研究科

1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University

【研究目的】東北大学と海洋研究開発機構（JAMSTEC）は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と共同で、津波と地殻変動のリアルタイム観測を目的とした係留ブイシステムの開発を進めている（戦略的イノベーション創造プログラム「レジリエントな防災・減災機能の強化」）。東北大学では、本システムのうちGPS音響結合方式の地殻変動観測を担当している。現システムでは、音響測距時のトランスデューサーの位置を正確に把握するため、ブイ最上部に4基のGPSアンテナを一辺が1mの正方形形状に設置し、メインアンテナの位置情報と共にGPSジャイロによる姿勢情報を得ている。4アンテナシステムの消費電力は約6Wと、光ファイバージャイロ等と比べてはるかに省電力であるが、長期係留に向けてさらなる省電力化が望まれている。そこで本研究では、1基のGPSアンテナ位置と加速度・角速度データから姿勢モニタリングする手法を考案した。試験係留時に冗長系として収録していたMEMSジャイロ（消費電力1W未満）の加速度・角速度データを用いて、本手法で得られる姿勢の精度を検証し、実運用に向けた課題を検討した。

【解析方法とデータ】用いる観測方程式は、(1) 3軸角速度と姿勢角（方位角・ピッチ角・ロール角）変化率の関係式、(2) GPSアンテナ速度の変化量が、加速度の積分量と回転による速度の変化量の和に等しいという関係式の2つである。各姿勢角の時間変動を3次B-スプライン関数で基底展開し、展開係数を非線形最小二乗法で解いた。用いたデータは、MEMSジャイロ（Xsens社、MTi-G）による加速度・角速度データ（10 Hz）と、キネマティックPPPにより解析したGPSアンテナ位置データ（1 Hz）を時間微分して得たアンテナ速度である。2014年に紀伊半島沖で実施した試験係留では、約20分間の計測を週一回、4ヶ月間にわたり定期的に行ったが、このうち、GPSデータとMEMSジャイロデータの両者がほぼ欠損なく取得された8回分（各19分間）を解析した。それとは別に、GPSジャイロデータ（JAVAD社、Sigma-Q）を用いた真の姿勢角時間変動の推定も行い、これからのずれを誤差として結果の精度を検証した。これは、GPSジャイロデータ（2.5 Hz）の単なる補間に代わり、MEMSジャイロの角速度データを併用することで、GPSジャイロデータの誤差を考慮した姿勢角時間変動の推定を行ったものである。この解析で推定されたGPSジャイロデータの誤差は公称精度とほぼ等しい0.2°、MEMSジャイロの角速度データの誤差は公称精度よりやや大きい0.6°/sであった。

【結果】本手法で得られた姿勢角の誤差は、全8回 各19分間のRMSで、方位角0.5°、ピッチ角1.3°、ロール角1.0°であった。これは、現状のGPSアンテナとトランスデューサーの配置（水平距離1.5m、鉛直距離5.5m）では水平方向に9cm、鉛直方向に3cmのトランスデューサー位置誤差に相当する。最大姿勢誤差はRMS値の2～3倍程度になることを考えると十分な精度とは言えない。しかし、この誤差には独立した二つの要因がある。一つは、MEMSによる姿勢角が基準とする座標系（MEMSジャイロ内センサーの3軸で定義）と、GPSジャイロが基準とする座標系とのずれ、つまりMEMSジャイロの取付角が厳密にゼロでないことによるもので、姿勢角誤差のバイアスとして現れる。実際に、8回の観測にほぼ共通した値のバイアス誤差があり、ここから推定した取付角は方位角・ピッチ角・ロール角で-0.1°、-1.3°、-1.0°であった。もう一つは、このMEMSジャイロ取付角を考慮してもなお残る誤差で、これがデータの精度も含めた本手法の限界と考えてよい。取付角補正後の誤差は、方位角は0.5°、ピッチ角・ロール角は大幅に減少し0.4°であった。ピッチ角・ロール角の誤差のほとんどは角速度データの誤差に起因する。実際、角速度の精度が一桁良い上位機種

のMEMSジャイロ（Xsens社、MTi-G700）を用いて、船舶による同等な試験観測を行い、本手法により姿勢角推定を行ったところ、GPSジャイロによるピッチ角・ロール角（精度0.005-0.030°）との差がRMSで0.03°という極めて良い結果を得た。一方、方位角に関しては、GPSアンテナ速度データの精度の影響が大きく、センサ性能の向上により誤差が0.5°からどの程度改善するかは不明である。しかし、トランスデューサー位置の算出や、それに続く海底局の位置決定の過程において、方位角誤差の影響はピッチ角・ロール角のそれに比べて小さいことを考える

と、方位角誤差 0.5° は十分に実用的な精度である。

【結論】単一アンテナシステムによる姿勢角の精度は、方位角は 0.5° 、ピッチ角・ロール角は高精度のMEMSジャイロを用いれば 0.03° と十分に実用的な値である。但し、GPSアンテナやトランスデューサーの位置を定めるブイ座標系と、MEMSジャイロ座標系とのずれ（MEMSジャイロ取付角）は、測距時のトランスデューサー位置の算出にそのまま姿勢誤差として影響するため、この取付角をどう推定、又は測定するかが実運用に向けた課題である。

キーワード：GPS音響結合方式海底測位、MEMS角速度・加速度センサ

Keywords: GPS/Acoustic seafloor positioning, MEMS gyroscope/accelerometer

近接設置した海底局からの音波の走時差を用いた局所地殻変動計測 —日本海溝断層地形の挙動のモニタリング—

Detecting localized seafloor deformation using traveltime difference of acoustic signals of transponders nearby --Observation in the Japan Trench--

*木戸 元之¹、芦 寿一郎²、辻 健³、富田 史章⁴

*Motoyuki Kido¹, Juichiro Ashi², Takeshi Tsuji³, Fumiaki Tomita⁴

1.東北大学 災害科学国際研究所、2.東京大学 大気海洋研究所、3.九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所、4.東北大学大学院 理学研究科

1.International Research Institute for Disaster Science, Tohoku University, 2.Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, 3.International Institute for Carbon-Neutral Energy Research, 4.Graduate School of Science, Tohoku University

沈み込み帯の海溝軸に近い領域には、地質学的な時間スケールで何度も繰り返される地震発生サイクルにより形成された断層地形が多く見られる。これらの断層が、地震発生サイクルの中のどのようなタイミングで運動するかについては、実データが無くあまり把握されていない。そのような海底での断層運動を計測する手段として、海底間音響測距が一般的に用いられる。しかし、同手法は海底に設置した機器同士の音響通信が必要であり、設置する地形によっては音響パスを確保することが著しく困難なことも多い。そこで、我々は海底間同士の通信の必要のないGPS音響測距 (GPS/A) 観測のレイアウトを工夫し、短基線の相対変位を検出できるような手法を考案した。さらに、日本海溝沿で、バックスラストと解釈されている断層地形で、考案した観測手法に基づく観測を開始した。

海底間音響測距の繰り返し観測精度は、基線長にほぼ比例し、概ね1cm/km程度である。一方で、GPS/A観測の個々の海底局の位置決め精度は数~10cm程度である。GPS/A観測の精度低下の主な要因は、海中音速の時空間変化、キネマティックGPS測位精度、音響波形の走時読み取り誤差である。GPS/A観測に用いる海底局を、断層をまたいで対で設置し、海上で収録するそれぞれの音響波形同士の走時差を読み取ることにより、波形の歪みが相殺され読み取り誤差は無視できる量となる。また、海中音速の影響も、パスが異なる海底付近の基線長部分に限定されるため、その殆どが相殺できる。さらに、走時差を見ているためGPS測位の絶対位置の誤差は無関係となり、送信時刻は共通なので受信時刻差の0.1s程度の時間内での相対位置誤差のみとなる。これらのことを勘案すると、基線100-300mの海底局同士の相対位置を1cm程度の精度で計測できる見込みがある。一般的な海底間音響測距と比較して、以下の長所がある。海底同士での音響パスの確保は必要ないので設置が容易である。2局のみで3次元の相対変位を計測できる。一方、短所としては、キャンペーン観測である（連続データではない）、実用精度を得るには基線を100-300m程度以下にしないといけない。

2015年9月のKH15-02白鳳丸航海で、3台のGPS/A用海底局を、日本海溝沿い北緯38.171度、東経143.550度、水深3500m付近の断層崖の上部と下部に設置した。海底間音響測距と違い崖の斜面に設置する必要はないが、基線をなるべく短くするように、崖の上部と下部の平坦面の端を目視で確認しながら設置するため、船からの遠隔作業および映像の伝送が可能なNSSシステムを利用した。設置直後および2ヶ月後に、初回の観測を実施し、繰り返し観測精度を確認するためのデータを得た。断層崖の挙動をモニタリングするためには、今後定期的にキャンペーン観測を実施していく必要がある。

講演では、今回提案した観測手法で各種誤差が相殺される原理を説明し、想定される誤差要因に対し、相殺できない分を定量評価する。また、定量評価の結果と、初回の観測で得られた繰り返し観測精度の実測値との比較を行う。

キーワード：音響測距、GPS音響結合方式、バック・スラスト、海底測地

Keywords: Acoustic Ranging, GPS/A, Back Thrust, Seafloor Geodesy

RTKLIBとMADDOCAを用いたリアルタイム水蒸気解析実験

An Experiment of Real-time Water Vapor Analysis using RTKLIB with MADDOCA

*小司 禎教¹、佐藤 一敏²

*Yoshinori Shoji¹, Kazutoshi Sato²

1.気象研究所気象衛星・観測システム研究部第2研究室、2.国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
1.The Second Laboratory of Meteorological Satellite and Observation System Research Department,
Meteorological Research Institute, 2.Japan Aerospace Exploration Agency

人工衛星を用いた測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) から、リアルタイムに水蒸気情報を解析する試みについて、現状を紹介する。

2015年8月現在、気象庁では観測後20-30分遅れで、GEONETからPWVを解析している。本稿では、こうした数十分遅れで値を算出する解析を、準リアルタイム(NRT: Near Real-time)解析と呼び、リアルタイム(RT:

Real-time)解析と区別する。災害をもたらすような局地豪雨は、数分から数十分という短時間に急激に発達する積乱雲によってもたらされる。水蒸気は積乱雲の発達にとって、それを駆動する燃料の役割を担うため、積乱雲の発達に伴う水蒸気変動を解明するためには、より高速かつ高頻度なGNSS解析が求められる。

本発表では、現在気象庁で行われているNRT解析の概要、RT解析を可能とする技術革新、RT解析実験の概要とこれまでに国土地理院のGEONETや船舶に搭載したGNSSアンテナを用いた実験の結果を紹介する。

当研究では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が、開発する複数GNSS対応高精度軌道時刻推定ツールMADDOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration Orbit and Clock Analysis,

https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html)により解析されたリアルタイムの軌道情報を利用している。MADDOCA軌道情報には、世界各地に展開された観測網MGM-Net (Multi GNSS Monitoring Network) (2015年8月10日現在53観測点) で観測されるGPS、GLONASS、及び準天頂衛星(QZSS)の補正情報が含まれている。

キーワード：GNSS、水蒸気リモートセンシング

Keywords: GNSS, Water vapor remote sensing

準リアルタイムGPS PPPによる時刻・周波数比較

Near-Real-Time GPS PPP for Time and Frequency Transfer

*瀧口 博士¹、後藤 忠広¹、市川 隆一²*Hiroshi Takiguchi¹, Tadahiro Gotoh¹, Ryuichi Ichikawa²

1.情報通信研究機構電磁波計測研究所、2.総務省

1.Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, 2.Ministry of Internal Affairs and Communications

GPSによる時刻・周波数比較にはいくつかの方法があるが、最も高精度な方法は搬送波位相(carrier phase)を用い、精密単独測位(Precise Point Positioning; PPP)を行う方法で、GPS CP、或いは、GPS PPPと呼ばれる。PPP解析では、高精度な暦(GPS衛星の軌道や時計情報)が必要であるため、解析を行うに

は、IGS(International GNSS Service)の速報暦の場合約17時間、精密暦の場合2週間程度、暦が提供されるのを待つ必要があった。他の時刻比較法(GPS P3や衛星双方向)では、ほぼリアルタイムで時刻比較結果が得られる為、この点がGPS PPPの短所であった。しかしながら近年、リアルタイムポジショニングの需要の高まりから、IGS内でReal-Time Serviceが立ち上がり、GPSデータやGPS衛星の軌道・時計情報のリアルタイムストリーミングが開始されている。このサービスで提供されているGPS衛星の軌道・時計情報(これ以降、リアルタイム暦)は、IGSの速報暦と比較して、軌道でRMS 5 cm以下、衛星時計でRMS 300 psが達成されている。従来から、速報暦より提供が早く、精度もリアルタイム暦より高精度である、超速報暦が3~9時間後に提供されている。しかしながら、時刻比較で使用される事は稀である。リアルタイム暦は、精度は超速報暦に劣るものの、リアルタイムで得られるという点が重要で、例えばタイムリンクのモニタリングなど、最終的な時刻比較とは異なる目的に使用できる可能性がある。そこで本研究では、このサービスを用いたGPS PPPで、どの程度の時刻比較結果が得られるのか検証を行った。

検証は、タイムリンク、解析方法(ソフトウェア; c5++、及び設定)を共通にし、速報暦とリアルタイム暦、それぞれを用いて解析を行った結果を比較した。その為、リアルタイム暦を用いた解析は、リアルタイムで行う事はせず、速報暦同様、24時間分のデータを記録し、clk/sp3ファイルに変換して解析を行った。今回、リアルタイム暦として、提供元が異なる、2つの暦を使用した。一つ目は、IGS RTS提供の物(IGSリアルタイム暦)で、NRCANとBKGおよびESA/ESOCのサポートにより、ストリーミング(Ntrip protocol)で配信されている。それぞれのリアルタイム解析センターで、独自に解析・配信が行われているが、今回は、BKGのIGS03(GPSとGLONASSの補正情報)を使用した。BKG Ntrip Client(BNC)を用い、リアルタイムでIGS03およびRTCM3EPH01(放送暦)を受信し、clk及びsp3ファイルに変換した。もう一つは、JAXAが開発を行っている、複数GNSS対応高精度軌道時刻推定ツール「MADOCA(Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis)」で作成された物(MADOCA暦)を使用した。MADOCA暦は、測位衛星の軌道等がストリーミング配信、ftp、将来的にはLEX(L-band experimental)信号で提供されている。今回は、ftpで取得可能な、1日毎のsp3を使用し、clkファイルは、IGSリアルタイム暦の物を使用した。

情報通信研究機構小金井本部と未来ICT研究所間、及び小金井本部と標準電波送信所(おたか山及び、はがね山)間のGPSリンクで、24時間データを1日毎に、2015年2月からの9ヶ月分解析して検証した。結果、リアルタイム暦(IGSおよびMADOCA共に)で求めたリンク間の時刻差変動は、速報暦、および衛星双方向で求めた結果と良い一致を示した。速報暦とIGSリアルタイム暦の差は、RMSで約100 ps、速報暦とMADOCA暦の差は、RMSで約200 psであった。この差は、定常的にモニタリングを行っているタイムリンクにおいて、何らかの影響で変化が起こった事を読み取るには十分小さい。この事から、リアルタイム暦(IGSおよびMADOCA共に)を用いたGPS PPPは、タイムリンクの高頻度モニタリングには十分使用可能であると言える。講演では、上記リアルタイム暦の検証について述べると共に、実際にタイムリンクのモニタリングを行う際の解析戦略について提案する。

謝辞: 本研究では、IGS提供の速報暦及びリアルタイム暦を使用した。また、JAXA提供のMADOCA暦も使用した。解析には、c5++を用いた。ここに記して感謝の意を表す。

キーワード：GPS、単独測位、時刻・周波数比較、リアルタイム
Keywords: GPS, PPP, Time and Frequency Transfer, real-time

KAGRA地下サイトに建設された1.5kmレーザー歪計の設計と運用

Design and operation of a 1.5-km laser strainmeter installed in the KAGRA underground site

*新谷 昌人¹、高森 昭光¹、森井 互²、三代 浩世希³、大橋 正健³*Akito Araya¹, Akiteru Takamori¹, Wataru Morii², Kouseki Miyo³, Masatake Ohashi³

1.東大地震研、2.京大防災研、3.東大宇宙線研

1.ERI, Univ. Tokyo, 2.DPRI, Kyoto Univ., 3.ICRR, Univ. Tokyo

Laser interferometers are widely used for precise measurement such as experimental physics, engineering, and metrology. Laser strainmeters in geophysical observations are one of such applications that require high displacement resolution and long-term accuracy.

In Kamioka underground site (Gifu Prefecture in Japan), a 100-m-long laser strainmeter was constructed in 2003. It proved to be sensitive enough to detect Earth's strain in a wide range of frequencies (seismic to geodetic time scale) with high resolution ($\sim 10^{-10}$ in strain) [1-3]. However, local disturbances by groundwater affected the strain measurement at very low frequencies [4]. A scaled-up interferometer is expected to improve the strain resolution by having a longer baseline and reduce local effects by spatial averaging.

A large-scale gravitational-wave detector, KAGRA, has been constructed in the new tunnel [5]. Along the KAGRA detector, a 1.5-km baseline laser interferometer has been installed for the purpose of geophysical strain observation. The laser strainmeter is formed by an asymmetric Michelson interferometer with two retro-reflectors each of which is installed in the vacuum chamber of each end. A frequency-doubled Nd:YAG laser with wavelength of 532 nm and frequency stability of $\sim 10^{-13}$ is used as a light source. The optical path of the interferometer is kept below ~ 0.1 Pa in 400-mm-diameter vacuum tubes.

For long-term continuous observation with both KAGRA detector and the laser strainmeter, several kinds of sensors are arranged to monitor the environment along in the tunnel, and their data together with the ones from KAGRA and the strainmeter are recorded by a networked data acquisition system.

Scientific targets, design of the instrument, its construction and operation will be presented.

References

- [1] S. Takemoto et al., A 100 m laser strainmeter system installed in a 1 km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan, *Journal of Geodynamics*, 38, 477-488, 2004.
- [2] S. Takemoto et al., A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains, *Journal of Geodynamics*, 41, 23-29, 2006.
- [3] A. Araya et al, Analyses of far-field coseismic crustal deformation observed by a new laser distance measurement system, *Geophys. J. Int.*, 181, 127-140, 2010.
- [4] A. Araya et al., Broadband observation with laser strainmeters and a strategy for high resolution long-term strain observation based on quantum standard, *J. Geod. Soc. Japan*, 53, 81-97, 2007.
- [5] Y. Aso et al, Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector, *Phys. Rev. D*, 88, 043007, 2013.

キーワード：歪計、レーザー、地殻変動、KAGRA、神岡、重力波

Keywords: strainmeter, laser, crustal deformation, KAGRA, Kamioka, gravitational wave