

## GEONET新解析戦略（F4）の検討 ～解析のマルチGNSS化に向けた取り組み～

### Development of New GEONET Analysis Strategy: Incorporating GLONASS Observations Data

\*高松 直史<sup>1</sup>、阿部 聡<sup>1</sup>、石川 典彦<sup>1</sup>、山口 和典<sup>1</sup>、鎌苅 裕紀<sup>1</sup>、川元 智司<sup>1</sup>、檜山 洋平<sup>1</sup>、畑中 雄樹<sup>1</sup>、辻 宏道<sup>1</sup>

\*Naofumi Takamatsu<sup>1</sup>, Satoshi Abe<sup>1</sup>, Norihiko Ishikawa<sup>1</sup>, Kazunori Yamaguchi<sup>1</sup>, Yuki Kamakari<sup>1</sup>, Satoshi Kawamoto<sup>1</sup>, Yohei Hiyama<sup>1</sup>, Yuki Hatanaka<sup>1</sup>, Hiromichi Tsuji<sup>1</sup>

1. 国土交通省国土地理院

1. GSI of Japan

Geospatial Information Authority of Japan (GSI) has been operating CORS system involving over 1300 GNSS stations, called GEONET (GNSS Earth Observation Network System), since 1996. The daily coordinates for each station are estimated by Bernese GNSS software to monitor the crustal deformation in Japan. The analysis strategy was updated three times. Current version is called F3, which was established in 2009. We are now developing new strategy (F4), because the software, reference frame, and other physical models used in F3 have been obsolete. Major topics of F4 development are 1) Updating reference frame, 2) GPS and GLONASS integration, 3) Improvement of the troposphere model, and 4) Stabilizing the daily coordinates of the reference station (TSUKUBA-1) for the whole GEONET analysis.

In this paper, we focus on the topic 2: GPS and GLONASS integration. Only GPS was used for F3 or older strategies. However, the receivers and antennas in GEONET were already updated into the multi-frequency type in 2013, preparing for the multi-GNSS environment. Furthermore, the final orbit for GLONASS provided by IGS has reached almost the same accuracy in comparison with the one for GPS (according to IGS web site, ~3cm for GLONASS and ~2.5cm for GPS). Such circumstances enable us to process GLONASS data by Bernese software. We process GPS and GLONASS data independently to estimate the ambiguities, and then combine the solutions with normal equations. The result based on GLONASS observations data shows the apparent fluctuation with the period of 8 days that was not found on the GPS result. Such a phenomenon is significant for the stations apart from the reference station. Several IGS analysis centers using GLONASS observations reported the same phenomenon that seemed to be caused by the GLONASS constellation geometry (Ray et al., 2013, Rebischung et al., 2016). We discuss the method to suppress the apparent 8-day fluctuation in our presentation.

キーワード : GEONET, GNSS, F4, ITRF2014, GLONASS

Keywords: GEONET, GNSS, F4, ITRF2014, GLONASS

# 高感度地殻歪観測を基にした地球の内部進化と自転効果の解明

## Elucidation of the internal evolution and rotation effect of the Earth based on high sensitive observations of earth strain

\*花田 英夫<sup>1</sup>、大江 昌嗣<sup>2</sup>、三浦 哲<sup>3</sup>

\*Hideo Hanada<sup>1</sup>, Masatsugu Ooe<sup>2</sup>, Satoshi Miura<sup>3</sup>

1. 国立天文台RISE月惑星探査検討室、2. 奥州宇宙遊学館、3. 東北大学理学研究科

1. RISE Project, National Astronomical Observatory, 2. Oshu Space and Astronomy Museum, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

地球の内部には半径の約半分を占める流体核があり、独自の回転や対流運動を行っている。その運動は、流体核とマントルとの境界（CMB）の形、密度分布、温度分布、磁場、粘性等と関係しているといわれるが詳しいことはわかっていない。それを調べる一つの方法が、自由コア章動（FCN）という、流体核が引き起こす地球全体の回転運動を観測することである。これは、流体核の軸とマントルの軸がずれることによって起こる自由運動であり、その周期が地球に対して約1日と、潮汐の1日周期と非常に近いので、共鳴現象によって振幅が増大される。もし両者が一致すれば、とんでもなく大きな変動になると考えられる。

この流体核によって引き起こされる地軸の運動は、緯度観測所の木村榮が発見し世界を驚かせたZ項の原因としても知られていて、これまで、電波を用いた超長基線干渉計（VLBI）による観測データを解析し、宇宙空間に対する地球の自転軸の運動としてFCNの周期を求め、CMBの形がわずかに南北につぶれていることを発見した例はあるが、その振幅が小さいことから、FCNを自転軸が異なる流体核の突き上げによって起こるマントル上部の地表面の歪み変化として高精度に観測した例はほとんど無い。もし、地上でこのFCNの効果を観測すれば、CMBの形以外に、核の密度構造、CMBでの電磁氣的、力学的な結合強度など、他の観測では困難な貴重なデータを得ることが可能であると理論的に予測される。

このFCNに近い潮汐の成分(分潮)は、現在 $\phi_1$ と $\phi_2$ である。しかし、これらはFCNの周期から少し離れていて、大きな振動にはなっていない。しかし、地球潮汐の周期は地球の自転速度が変れば変化するが、FCNの周期は、地球自転速度だけでなく流体核の力学的扁平率と自転速度の複合作用で変わる。従って、潮汐とFCNの角速度の差は、地質年代的に無視できない変化を示す。この変化を具体的に見るために、これまでの地球自転進化モデルの情報をもとに、年代的な変化を見積もってみた。

潮汐の角速度は地球自転速度だけを変え、太陽と月の軌道運動は不変とした。FCNの角速度では流体核の力学的扁平率が自転速度の2乗に比例して変わると仮定した。地質年代での自転速度の変化は、大江・安部(全地球史解説、2002年)の結果から12億年前までの値を用いた。

図はこの計算から得られた結果で、横軸は現在からの時間(1000万年単位)、縦軸は現在の平均太陽時1時間を基準とする角速度とし、潮汐成分のそれぞれ、 $K_1$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ から自由コア章動 $N_1$ の角速度を引いたものをプロットしている。図から、およそ2.8億年前に $\phi_1$ と $N_1$ が重なり、およそ12.5億年前に $\phi_2$ と $N_1$ が重なることが分かる。これらの時点で、大きな振動が起こると考えられる。ここで用いた地球自転速度の変化モデルは、大陸移動のような現象は含まれておらず、氷河の消長と同様、これらも地球自転に大きな影響を与えていたことが考えられるが、地球では潮汐の作用だけでもこれだけ自転周期が変わり、しかも、FCNの効果が大きな作用を持ち得た年代があったことは確かであろう。

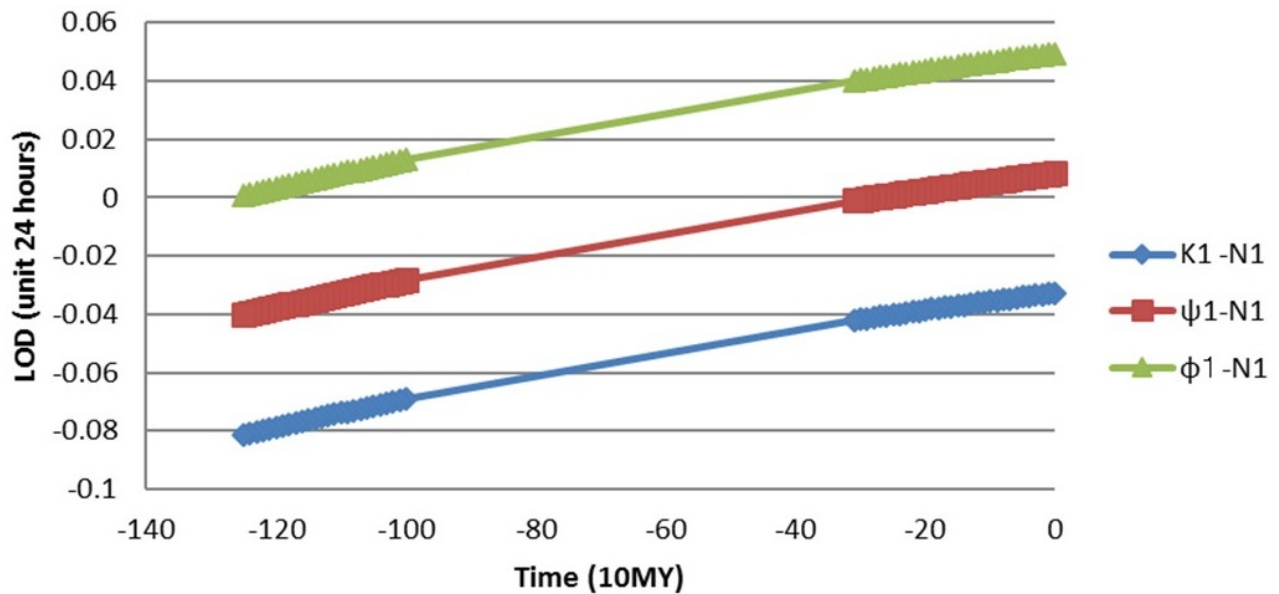
最近、地球の氷河の消長による地質学的データから、自転速度変動が地球磁場の強度変化が強い相関関係を示すことが明らかになった（宮腰・浜野、2013）。シミュレーション解析によって地球自転の約2%の速度変動が、約20～30%の磁場強度変化を引き起こすというものである。ここで述べた流体核共鳴によって増幅さ

れるFCNを観測すれば、その周期や振幅から、磁場変動に結びつく流体核の物理的な性質がさらに明らかになる可能性があり、人類の将来の環境にも大きく影響する、自転速度の減速、磁場の消失や反転の予測、その物理機構の解明にも貢献できると思われる。

現在、長基線の光ファイバー干渉計を利用して地殻歪みを高感度に計測することを計画している。

キーワード：自由コア章動、流体核共鳴、地殻歪み、光ファイバー干渉計

Keywords: Free Core Nutation, Fluid Core Resonance, Earth strain, Optical Fiber Interferometer



## On the Interpretation of oceanic variations in terms of ocean bottom pressure

\*村本 智也<sup>1</sup>、伊藤 喜宏<sup>1</sup>、稲津 大祐<sup>2</sup>、Henrys Stuart<sup>3</sup>、Wallace Laura<sup>3</sup>、Bannister Stephen<sup>3</sup>、望月 公廣<sup>5</sup>、日野 亮太<sup>4</sup>、鈴木 秀一<sup>4</sup>

\*Tomoya Muramoto<sup>1</sup>, Yoshihiro Ito<sup>1</sup>, Daisuke Inazu<sup>2</sup>, Stuart Henrys<sup>3</sup>, Laura Wallace<sup>3</sup>, Stephen C Bannister<sup>3</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>5</sup>, Ryota Hino<sup>4</sup>, Syuichi Suzuki<sup>4</sup>

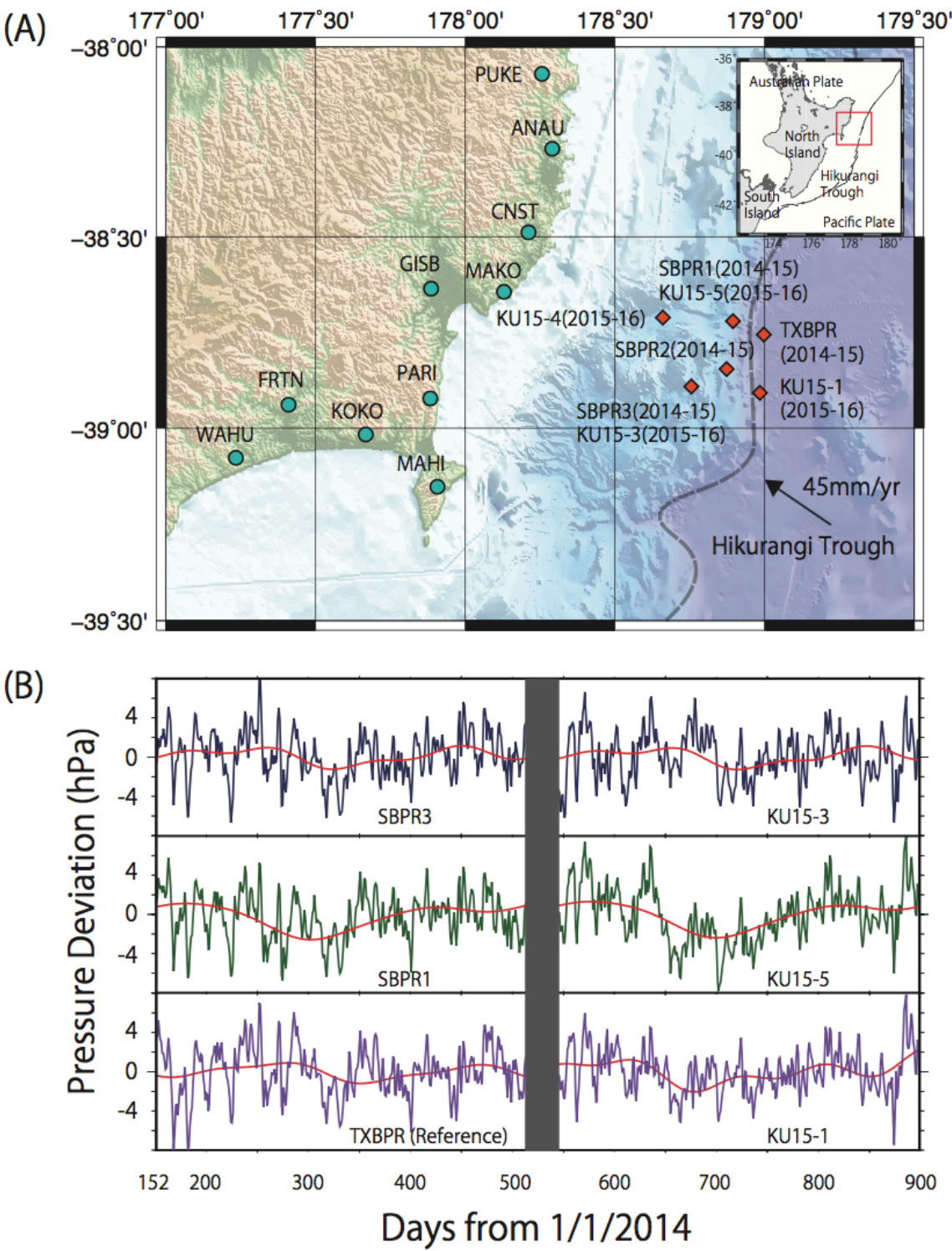
1. 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター、2. 東京海洋大学学術研究院海洋環境学部門、3. GNS science、4. 東北大学大学院理学研究科、5. 東京大学地震研究所地震予知研究センター

1. Research Center for Earthquake Prediction, Disaster prevention research institute, Kyoto University, 2. Department of Ocean Sciences, Faculty, Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. GNS science, 4. Graduate School of Science, Tohoku University, 5. Earthquake Research Prediction Center, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

SSE is the phenomenon that rupture progress slowly compared with regular earthquake. Many examples are reported all over the world. (e.g. Yoshioka et al., 2004) Also, this phenomenon was observed before 2011 Tohoku earthquake. It is thought that deformation in the SSE area at the time of the main shock contribute to tsunami damage. (e.g. Ito et al., 2013) In general, the detection of SSE on the subduction zone, especially at the shallower part is difficult using only GNSS data. Therefore, the study for the sea floor crustal deformation observation and monitoring are receiving attention recently. Among them, the observation using Ocean Bottom Pressure Recorder is useful for observing crustal deformation due to SSE at a point where it can observe pressure change including vertical crustal deformation component in high resolution continuously. On the other hand, to extract the pressure change due to crustal deformation from Ocean Bottom Pressure Record, it is essential to understand exactly what caused the observed pressure change.

In this study, we consider about the factor of sea floor pressure change, especially temporal variation of several months to annual cycle from observed data. In this study, we use observed pressure records which spanned from June 2014 to June 2016 at off the coast of north island in New Zealand and Kumanonada using independent type Ocean Bottom Pressure Recorders. By using Baytap-G, we calculated the tidal component and subtracted it from the raw data. Then, we calculated sea-level anomaly (non-tidal oceanic variation) driven by air pressure and wind using barotropic ocean model. Comparing with Ocean Bottom Pressure Record after removing tidal component and calculated sea-level anomaly using ocean model, we found that there is a long-term component included in the Ocean Bottom Pressure Record that cannot be expressed by calculating ocean model. This long-term component's amplitude is about 1.5hPa and has about a 90-day cycle. In evaluating the pressure change derived from crustal deformation due to SSE, the amplitude of this component we detected in this study cannot be ignored. In this study, we consider the origin of this long-term component from multiple viewpoints such as gravity observation satellite GRACE or tide gauge record etc. As a result, we found that there is a "Fluctuation" which can be approximated as summation of harmonic mode. After subtracting the long-term component we identified in this study, we detected crustal deformation due to SSE at off the coast of north island in New Zealand. Then, we estimated fault slip due to the SSE from vertical displacement observed by Ocean Bottom Pressure and horizontal displacement observed by GNSS.

キーワード：海底圧力、非潮汐海洋変動、ヒクラング沈み込み帯、熊野灘、スロースリップイベント、ゆらぎ  
Keywords: Ocean bottom pressure, Nontidal oceanic variation, Hikurangi subduction zone, Kumanonada, Slow slip event, Fluctuation



## GPS Data, Analysis Methods and Products from the EarthScope Plate Boundary Observatory and Other Regional Networks: Spanning the Geodetic Temporal Spectrum from Decadal Time Series and Velocity Fields to Real-Time Data Streams

\*David A Phillips<sup>1</sup>, Thomas Herring<sup>2</sup>, Timothy Melbourne<sup>3</sup>, Mark Murray<sup>4</sup>, Michael Floyd<sup>2</sup>, Walter Szeliga<sup>3</sup>, Robert King<sup>2</sup>, Christine Puskas<sup>1</sup>, Glen Mattioli<sup>1</sup>, David Mencin<sup>1</sup>, Kathleen Hodgkinson<sup>1</sup>, Charles Meertens<sup>1</sup>

1. UNAVCO, 2. Massachusetts Institute of Technology, 3. Central Washington University, 4. New Mexico Institute of Mining and Technology

We present an overview of 1) GPS data, analysis methods, and derived products from the EarthScope Plate Boundary Observatory (PBO) and other large scale regional networks including decadal position time series, velocities, and other parameters for 2000+ continuously operating GPS stations distributed throughout a quadrant of Earth's surface encompassing the high Arctic, North America, and Caribbean, and 2) high-rate real-time GPS/GNSS data streams available from 700+ stations operated by UNAVCO. All 2000+ station data are freely and publicly available as RINEX files. This continent-spanning distribution represents an essential contribution to the current high-precision global geodetic coverage, with a rich data set collected over more than a decade.

The Geodesy Advancing Geosciences and EarthScope (GAGE) Facility, operated by UNAVCO, provides a diverse suite of geodetic data, derived products and cyberinfrastructure services to support community Earth science research and education. GPS derived products are generated by two Analysis Centers, at Central Washington University (CWU) and the New Mexico Institute of Mining and Technology (NMT), and an Analysis Center Coordinator at the Massachusetts Institute of Technology (MIT). GAGE GPS data analysis involves formal merging within a Kalman filter of two independent, loosely constrained solutions: one is based on precise point positioning using GIPSY/OASIS (v6.x) software at CWU and the other is based on a network solution from double-differencing produced with the GAMIT (v10.60) software at NMT. The primary data products are station position time series that show motions relative to a North America reference frame called NAM08 (IGb08 rotated to a fixed North America Plate), and secular motions of the stations represented in the velocity field. The position time series contain a multitude of signals in addition to the secular motions. Examples of time series displacements due to geophysical phenomena such as coseismic and postseismic signals, as well as seasonal signals associated with hydrologic processes, are presented. Examples of displacements resulting from anthropogenic phenomena and site maintenance events are also shown.

Position time series, and the signals they contain, are inherently dependent upon analysis parameters, such as network scaling and reference frame realization. The estimation of scale changes (a common practice) has large impacts on vertical motion estimates. Reference frames and realizations evolve through time, and on 29 January 2017 (GPS week 1934 day 0), the IGS switched its operational products to use the IGS14 system, replacing the current IGb08 system. For GAGE, our plan is to reprocess all data from all 2000+ stations and release a full set of time series in NAM14 and IGS14 reference frames when the reprocessing is complete.

UNAVCO also provides high-rate (1 Hz), low-latency (<2s) data streams from 700+ GPS/GNSS stations

from the PBO, COCONet (circum-Caribbean), and TLALOCNet (Mexico) networks as well as networks in Nepal and Tanzania funded by the U.S. National Science Foundation. Some of these stations have been augmented with accelerometers to facilitate studies of broadband waveforms. Beyond increasing uses for science and engineering, real-time GPS/GNSS data streams have the potential to significantly enhance Hazard Early Warning applications.

Keywords: Geodesy, GPS/GNSS Networks, GPS/GNSS Data Analysis, Hazard Early Warning, Plate Tectonics, Deformation

## Coastal Sea Level Variations Derived from GNSS SNR Data –A Case Study in Taiwan

## Coastal Sea Level Variations Derived from GNSS SNR Data –A Case Study in Taiwan

\*Lee Chi-Ming<sup>1</sup>、Kuo Chung-Yen<sup>1</sup>、Sun Jian<sup>2</sup>、Tseng Tzu-Pang<sup>3</sup>、Chen Kwo-Hwa<sup>4</sup>、Shum CK<sup>2</sup>、Yi Yichan<sup>2</sup>、Ching Kuo-En<sup>1</sup>

\*Chi-Ming Lee<sup>1</sup>、Chung-Yen Kuo<sup>1</sup>、Jian Sun<sup>2</sup>、Tzu-Pang Tseng<sup>3</sup>、Kwo-Hwa Chen<sup>4</sup>、CK Shum<sup>2</sup>、Yichan Yi<sup>2</sup>、Kuo-En Ching<sup>1</sup>

1. National Cheng Kung University, Taiwan、 2. Ohio State University, Columbus, USA、 3. National Central University, Taiwan、 4. National Taipei University, Taiwan

1. National Cheng Kung University, Taiwan、 2. Ohio State University, Columbus, USA、 3. National Central University, Taiwan、 4. National Taipei University, Taiwan

Global sea level rise has caused many disasters, damaging the lives and property of numerous human beings, especially in low-lying coastal regions. Therefore, understanding and monitoring coastal sea level changes are of great importance for human society. The traditional method to measure coastal sea level is using tide gauges; however, the records consist of vertical land motions and sea level variations that are difficult to separate. Recently, Global Navigation Satellite System (GNSS) reflected signals are widely used for determination of soil moisture, snow depth and sea surface height. On the other hand, GNSS Reflectometry (GNSS-R) technique based on the analysis of Signal-to-Noise Ratio (SNR) data has a great potential to derive local sea level height variations. Taiwan is an island and most populated cities are located near the coasts, where sea level rise has a significant impact. Therefore, accurate estimation of sea level changes around Taiwan is extremely important. In this research, we aim to assess the feasibility of GNSS-based tide gauges in Taiwan and develop a procedure to improve the accuracy of the sea level variations derived from GNSS SNR data. The procedure contains (a) constraints of GNSS station azimuth angles and elevation angles (b) sea level variations derived from all satellites using the dominant frequency of detrend SNR data by Lomb Scargle Periodogram (LSP) (c) constraint of sea level heights using tidal harmonic analysis (d) inverse modeling of detrended SNR data through nonlinear least squares adjustment. In this study, GNSS SNR data from Kaohsiung, Suao and TaiCOAST sites were used for retrieval of sea level changes and the results were compared with co-located or nearby tide gauge records. For comparison, standard deviation of differences between tide gauge and GNSS-derived sea level and correlation coefficient of the two time series were used for assessing the GNSS-derived result and the adaptability of the processing system.

キーワード : GNSS-R、 SNR、 Lomb Scargle Periodogram、 Sea Level Variation

Keywords: GNSS-R, SNR, Lomb Scargle Periodogram, Sea Level Variation



## The Retrieval of Multi-Mission Altimetry Heights by Combined Retracking Procedure near Coastline around Taiwan

\*Kao Huan Chin<sup>1</sup>, Chung-Yen Kuo<sup>1</sup>, Ting-Yi Yang<sup>2</sup>, C.K. Shum<sup>2,3</sup>, Yu chan Yi<sup>2</sup>

1. Department of Geomatics, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 2. Division of Geodetic Science, School of Earth Sciences, Ohio State University, Columbus, USA, 3. State Key Laboratory of Geodesy & Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan, China

Satellite radar altimetry has been successfully applied to accurately map global sea surface topography with weekly to monthly sampling during the past 2–3 decades and progressively extended the applications for interdisciplinary field like geophysics, climate and earth science. However, retrieving accurate measurements over the non-ocean surfaces remain a challenge by reason of variable land contamination adjacent to the desirable targets. For solving the problems of complicated waveforms from diverse surfaces, the recently launched advanced altimeters, including SARAL/Altika (Ka-band altimeter), CryoSat-2 (SAR Interferometric Radar Altimeter, SIRAL), Sentinel-3 (SAR altimeter) and Jason-3, were expected to improve the drawback of satellite altimetry in variable surfaces like coastal and land regions by the developed instruments and higher spatial resolution data. In this study, the multi-mission altimetry data including Envisat, SARAL/Altika, CryoSat-2 and Jason-2 are used. The complex returned waveforms over land surface or near coast are to be retracked by respective optimal waveform retracking algorithms pertaining to each altimeter system. In order to make more efficient retracking work and eliminate the serious contamination waveforms, we will build an innovative waveform classification method to exactly classify the ocean and non-ocean waveforms based on its physical property over seacoast region before retracking. Eventually, the retrieved heights will be validate with available *in situ* measurements to demonstrate interdisciplinary scientific applications over or near Taiwan.

Keywords: Satellite altimetry, waveform retracking, waveform classification, SARAL/Altika, CryoSat-2, Envisat

# 「地球規模の測地基準座標系（GGRF）」の強化にむけた国連の活動

## Activities of the United Nations for the enhancement of Global Geodetic Reference Frame

\*宮原 伐折羅<sup>1</sup>

\*Basara Miyahara<sup>1</sup>

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。決議に基づき、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がロードマップを作成し、ロードマップは、2016年8月には、第6回のUNCE-GGIM会合において承認された。ロードマップでは、決議で示された5つの項目、測地インフラ、基準・標準、教育・能力開発、広報・アウトリーチ、ガバナンスに関して、確実なGGRFの構築と維持を行ううえで、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ている。UN-GGIM第6回会合では、作業部会をUN-GGIMのもとに公式の準委員会（sub-committee）として昇格し、引き続き、ロードマップの推奨項目を実施するための実施計画を作成することを承認した。今後は、ロードマップの5項目について、準委員会が実施計画の作成を継続し、GGRFの維持に向けた連携が行われる予定である。国土地理院は、作業部会のメンバーとしてロードマップの作成に貢献するとともに、引き続き順位委員会に参加して実施計画の作成に貢献していく。発表では、持続可能なGGRFの構築に向けた国連の活動の状況を報告する。

キーワード：地球規模の測地基準座標系、国際連合、GGRFロードマップ

Keywords: Global Geodetic Reference Frame (GGRF), the United Nations, GGRF Roadmap

## 迅速・高精度なGNSS定常解析システムの構築に関する予備研究 Preparatory research on the development of rapid and accurate GNSS routine analysis system

\*中川 弘之<sup>1</sup>

\*Hiroyuki Nakagawa<sup>1</sup>

1. 国土交通省国土地理院

1. GSI of Japan

国土地理院は、GEONETで取得されるGNSSデータを定常的に解析し、日本全国の地殻変動を監視しており、その結果は、地震調査委員会、地震防災対策強化地域判定会においては地震本震やその後の余効変動による地殻変動データ、断層モデルを提供し地震活動の評価等に利用されているとともに、火山噴火予知連絡会においても活火山の山体の変化の監視や、噴火時の噴火活動の推移監視における基礎的な資料として活用されている。

しかし地殻変動の監視においては、現在の定常解析の性能をもってしても迅速性や時間分解能が不十分な場合もある。現状では、もっとも迅速なQ3解でも解析結果が得られるのがデータ取得後3時間後である。例えば、平成28年4月14日夜に発生した熊本地震においては、地殻変動情報が得られたのは翌15日の朝になった。地震調査委員会の臨時会は通常大地震発生の半日後には開催されるため、場合によっては地殻変動情報が提供できず、地震像の把握が遅れる可能性があった。

また、現状では、もっとも時間分解能が高い解もQ3解であるが、それでも時間分解能は6時間である。熊本地震では14日のM6.5の地震の3時間後に同等の規模の余震が発生しており、余震による地殻変動も生じていると考えられたが、15日午後の臨時会に提出した地殻変動情報においては、M6.5の地震による地殻変動と余震による地殻変動を分離できず、地震像の把握に支障があった。さらに、火山において噴火直前の山体膨張と、噴火後の収縮を監視するにも、現状の定常解では時間分解能が不足しており、火山活動の評価に支障をきたす可能性がある。

現状の定常解析よりも迅速性・時間分解能を向上させ、かつ精度の劣化をきたさない解析法として近年注目されているのが精密単独測位(Precise Point Positioning; PPP)と呼ばれる手法である。これは、GNSS衛星の精密な軌道および時刻情報を用いて、各観測局で単独測位を行うものである。PPPを用いれば、格段に少ない計算負荷で、1エポックごとの位置を算出できることが特徴である。特に、近年、衛星毎に異なる位相端数バイアス(Fractional Cycle Bias; FCB)と呼ばれる補正情報を追加することで、PPPにおいて波数の整数不確定性を決定する(Ambiguity Resolution; AR)ことが可能となり(PPP-AR法)、相対測位に匹敵する精度を出せる可能性が高くなった。さらにPPP-AR法には、超巨大地震で広域な地殻変動が発生した場合についても、電子基準点の変位を直接に算出でき固定点が不要であるという利点もある。

このような背景のもと、国土地理院では、PPP-AR法をベースに現在の定常解析よりも迅速・高精度なGNSS解析手法を開発し、将来のGEONET定常解析を想定してこれを実装したプロトタイプシステムを開発することとする特別研究を、2017年度より3年計画で開始した。この研究では、GEONETの1秒値データを用いて、定常的かつ安定的に、1秒間隔で水平方向のばらつき約1cmの解を、データ収集の約2時間後までに算出することを目標としている。

本講演では、現在検討中の解析システムの構成および、これまでに実施した予備研究の結果を紹介する。

キーワード：GNSS、PPP-AR、GEONET定常解析、GEONET

Keywords: GNSS, PPP-AR, GEONET routine analysis, GEONET

# 高精度衛星測位の適用範囲拡大のための技術開発—都市部における実証実験—

## Technical development for expanding availability of GNSS precise positioning in urban environment

\*酒井 和紀<sup>1</sup>、古屋 智秋<sup>1</sup>、檜山 洋平<sup>1</sup>、畑中 雄樹<sup>1</sup>、山尾 裕美<sup>1</sup>、鎌苅 裕紀<sup>1</sup>、佐藤 雄大<sup>1</sup>、辻 宏道<sup>1</sup>

\*Kazuki Sakai<sup>1</sup>, Tomoaki Furuya<sup>1</sup>, Yohei Hiyama<sup>1</sup>, Yuki Hatanaka<sup>1</sup>, Hiromi Yamao<sup>1</sup>, Yuki Kamakari<sup>1</sup>, Yudai Sato<sup>1</sup>, Hiromichi Tsuji<sup>1</sup>

1. 国土地理院

1. Geospatial Information Authority of Japan

国土地理院では、平成27年度より、国土交通省総合技術開発プロジェクト「3次元地理空間情報を活用した安全・安心・快適な社会実現のための技術開発」（平成27～29年度）に取り組んでいる。このうち、「屋外3次元空間における高精度衛星測位の適用範囲拡大のための技術開発」として、衛星測位の精度に悪影響を及ぼす高層ビル等によるマルチパスについて、ソフトウェア的な対策により影響を軽減するための技術開発を行っている。

平成27年度は、マルチパスの影響を軽減する手法に関する先行研究の調査を行い、それらの効果や課題等の観点から、下記の4つの手法を選定し、改良を加えた検証用プログラムを開発した。

- 1) 上空写真による衛星選択
- 2) 3次元建物情報から生成したスカイプロットによる衛星選択
- 3) ドップラー観測量に基づく位相差を用いた品質検定
- 4) ドップラー観測量に基づく速度を用いた精度改善

平成28年度は、兵庫県神戸市の衛星測位が困難な都市部において、様々な衛星配置における検証を目的とし、4点の観測点において12時間観測を実施した。また、様々な遮蔽状況における検証を目的とし、23点の観測点において5分間観測を実施した。これらの観測から得られたデータに対し、平成27年度に選定した各手法を適用することで、様々な観測条件における手法の評価を行った。

本発表では、平成28年度までに得られた成果及び今後の計画について報告する。

キーワード：GNSS測位、マルチパス、都市部

Keywords: GNSS positioning, multi-path, urban environment

# ITRF2014基準座標系とIGS14アンテナ位相特性によるGEONET観測網の解析

## Analysis of GEONET network data applying ITRF2014 reference frame and IGS14 antenna PCV model

\*島田 誠一<sup>1</sup>

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

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科 株式会社日豊

1. Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo Nippo Co. Ltd.

2016年秋の測地学会において著者は、ITRF2014座標系において日本周辺のIGS観測点の座標系がどのように表現され、ITRF2008座標系からどのように変更されたのかについて、ITRF2014座標系によるGEONET観測点のpreliminaryな解析結果とともに紹介した。

一方、IGSは2017年1月29日（1934GPS週）から、基準座標系をITRF2008からITRF2014座標系に切り替える（IGSMail-7399）。正確にはITRF2014座標系に基づいたIGS14という独自の座標系を採用する。また同時に、受信機及び衛星のアンテナ位相特性をIGS08からIGS14に切り替える。

今回の変更により、主に衛星アンテナの位相中心の変更により、0.4ppb程度のスケール変化が生じる。また、多くの受信機アンテナのキャリブレーションをやり直したことによる位相中心の変更から、上下成分で10mm、水平成分で5mm程度の座標値解のオフセットが生じるといわれている（King, 私信）。

IGSはかつて、2011年4月11日（1632GPS週）から基準座標系をITRF2005からITRF2008に切り替えたときにも、受信機及び衛星のアンテナ位相特性をIGS05からIGS08へと切り替えた。このときにも、主にアンテナ位相中心の違いによって、約1ppbのスケール変化とともに、座標値解に上下成分で3mm、水平成分で1.2mm程度のオフセットが生じた（IGSMail-6354）。一方、GAMIT/GLOBKプログラムによる関東・東海地域のGEONET観測点の解析では、2ppb程度のスケール変化と、上下成分で2mm、水平成分で3mm程度の座標値解のオフセットが生じた（島田, 2011, 2012）。グローバルネットワークの解析とGEONET観測網の解析とで結果が異なるのは、GEONET観測点が独自のレドームを採用しているために、アンテナ位相特性は国土地理院が独自に試験観測結果から求めたものであるうえに、国土地理院はIGS05位相特性しか求めているので、著者が独自に、国土地理院が求めたIGS05位相特性とIGSが求めているIGS05位相特性とIGS08位相特性との差から、簡便にGEONET観測点のIGS08位相特性を推定して用いている影響があると考えられる。

本研究では、IGS14への切り替えが行われる2017年1月29日前後各4週間のGEONET観測点の解析から、GEONET観測点の座標値解のスケール変化及びオフセットを明らかにする。

キーワード：ITRF2014、IGS14 PCVモデル、GEONET

Keywords: ITRF2014, IGS14 PCV model, GEONET

# Soft Computing and Conventional Interpolation Methods in Geoid Modelling: A Case Study in Istanbul

\*Muge Albayrak<sup>1</sup>, M. Tevfik Ozludemir<sup>1</sup>, Orhan Akyilmaz<sup>1</sup>, Kerem Halicioglu<sup>2</sup>

1. Istanbul Technical University, 2. Bogazici University

Geoid is the fundamental geodetic infrastructure for rational use of Global Navigation Satellite System (GNSS) technology. For this reason, definition a "cm geoid" is an actual subject in all countries. Development of geoid modelling is based on geodetic, gravimetric and astrogeodetic techniques, which are maintained using the geopotential models produced by the combination of gravity measurements, astrogeodetic vertical deflections, GNSS/Levelling data, satellite gravity data, satellite altimetry data and the combination of these data. GNSS/Levelling geoid determination has great importance with regard to the transformation of GNSS-derived ellipsoidal height ( $h$ ), into the orthometric height ( $H$ ), which is used in engineering projects and determined by levelling. Instead of levelling, which is an expensive and time-consuming method, orthometric heights can be calculated by using a well-defined geoid models. These geoid models enable us to compute the geoid height ( $N$ ), which is the difference between ellipsoidal and orthometric height values ( $N=h-H$ ). Then orthometric heights can be computed using these geoid heights and known ellipsoidal heights. Therefore, this will reduce the measurement work in the basic land surveying to a great extent and make economic contribution. In geoid modelling several methods can be employed. Such a geoid model has been developed for the metropolitan area of Istanbul city. In this context, Istanbul GPS Triangulation Network (IGN) and the Istanbul Levelling Network (ILN) provided reliable data, ellipsoidal and orthometric heights, respectively. This study focuses on the development of Istanbul geoid model with soft computing techniques and its comparison with conventional interpolation algorithms used for modelling. For this purpose, geoid heights in Istanbul metropolitan area have been computed by soft computing methods, namely Adaptive Network based Fuzzy Inference System (ANFIS) and Artificial Neural Networks (ANN) and modeled by twelve different interpolation methods. For computations and modelling in the study area, homogeneously distributed 1005 model and 178 test points were selected. These are the common points in IGN and ILN whose latitude, longitude, ellipsoidal heights and orthometric heights are known to construct ANFIS and ANN models in Istanbul. To construct these models in model and test points, latitude and longitude are taken as inputs and geoid heights are taken as outputs. The results obtained from ANFIS and ANN methods are quite satisfactory. The model derived orthometric heights were compared with the known orthometric heights for model and test points. The standard deviation has been obtained in ANFIS as  $\pm 4.3\text{cm}$  and  $\pm 4.0\text{cm}$  for model and test areas, respectively. On the other hand, the standard deviation in ANN model are  $\pm 4\text{ cm}$  and  $3.1\text{ cm}$ , for model and test areas, respectively. In addition, conventional interpolation methods as modified Shepard's method, radial basis function, Kriging, Nearest neighbor, minimum curvature, inverse distance to a power and local polynomial yield better results than ANFIS and ANN in model and test areas. The others interpolation methods such as polynomial regression, moving average, triangulation with linear interpolation, natural neighbor and data metrics yield worse results than ANFIS and ANN in each area.

Keywords: geoid modelling, soft computing, interpolation methods



## ジオイド高とCMB付近の温度変化

## The Geoid High and Temperature Variations near the CMB

\*角田 忠一<sup>1</sup>\*Chuichi Kakuta<sup>1</sup>

1. なし

1. none

Anderson(1982)はAfrican super plumeにおいてPangea大陸(330Ma)の形成後にジオイドが40m上昇したことを示し、その下方からの熱流を示唆した。熱流束は地球の熱放出に関係し、内核の成長にも関係している。内核の年齢は2.7Ga (Hale,1987;Kumazawa et al.,1994)と言われて来たが、1Ga付近との指摘がある(Labrosse et al.,2001)。若い年齢は内核の不連続層 235 km および375 km から現在の内核境界までの形成時間がPangea大陸等の形成に近い時間を示す。今回はPangea大陸が形成された後、核-マントル境界(CMB)を通して核からの熱流束の影響がマントルのジオイド高に影響を及ぼしているかどうかをしらべる。この問題は周期的なsupercontinent cycleがCMBにおける活動で起こることは不可能であるとされている(Phillips and Banga,2007)が、内核の成長を考慮して再考を試みる。Phillips and Bungeが述べるように、CMBからの熱流束変化の影響は小さいがマントル内の1/e 減衰率の作用は大きく、マントル下層の対流構造に依存する。Andersonの述べたジオイド高を生ずる減衰率は約1/500kmと考えられる。Anderson(1982)はAfrican super plumeにおいてPangea大陸(330Ma)の形成後にジオイドが40m上昇したことを示し、その下方からの熱流を示唆した。熱流束は地球の熱放出に関係し、内核の成長にも関係している。内核の年齢は2.7Ga (Hale,1987;Kumazawa et al.,1994)と言われて来たが、1Ga付近との指摘がある(Labrosse et al.,2001)。若い年齢は内核の不連続層 235 km および375 km から現在の内核境界までの形成時間がPangea大陸等の形成に近い時間を示す。今回はPangea大陸が形成された後、核-マントル境界(CMB)を通して核からの熱流束の影響がマントルのジオイド高に影響を及ぼしているかどうかをしらべる。この問題は周期的なsupercontinent cycleがCMBにおける活動で起こることは不可能であるとされている(Phillips and Banga,2007)が、内核の成長を考慮して再考を試みる。Phillips and Bungeが述べるように、CMBからの熱流束変化の影響は小さいがマントル内の1/e 減衰率の作用は大きく、マントル下層の対流構造に依存する。Andersonの述べたジオイド高を生ずる減衰率は約1/500kmと考えられる。

キーワード：ジオイド高、Pangea 超大陸、マントル熱流束

Keywords: geoid high, Pangea supercontinent, heat flow in the mantle



# 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 ( I )

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

\*新谷 昌人<sup>1</sup>、高森 昭光<sup>1</sup>、森井 互<sup>2</sup>、三代 浩世希<sup>3</sup>、大橋 正健<sup>3</sup>

\*Akito Araya<sup>1</sup>, Akiteru Takamori<sup>1</sup>, Wataru Morii<sup>2</sup>, Kouseki Miyo<sup>3</sup>, Masatake Ohashi<sup>3</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 京都大学防災研究所、3. 東京大学宇宙線研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo

Laser interferometers are widely used for precise measurement in experimental physics, engineering, metrology, etc. In geophysics, as one of its applications, laser strainmeters are used for measuring deformation of the ground based on accurate wavelength of a highly frequency-stabilized laser. The advantages of the laser strainmeter over conventional strainmeters using mechanical references are high resolution with a long baseline, resonance-free response with optical reference, and low-drift detection using absolutely stabilized laser wavelength.

A laser strainmeter with a baseline of 100m was constructed in Kamioka underground site (Gifu Prefecture in Japan) and has been operated since 2003. The observation results were reported in Refs. [1-4].

Construction of a new laser strainmeter, having a longer baseline (1.5km), was reported in [5]. The strainmeter is located in a new tunnel for the large-scale gravitational-wave detector, KAGRA [6]. Along one of the arms of the KAGRA detector, the laser strainmeter is formed by an asymmetric Michelson interferometer with two retro-reflectors and other optics in vacuum. A frequency-doubled Nd:YAG laser, emitting wavelength of 532nm and frequency stabilized at a level of  $\sim 10^{-13}$ , is used as a light source. Fringe signals are converted to displacement between the retro-reflectors with a separation of 1.5km using a quadrature fringe detection [7].

A test run of the new laser strainmeter started in August 2016, and strain data were obtained. Earth tides were clearly observed and were almost consistent with theoretical waveforms, except for slight reduction in amplitudes likely due to topographic effect [2]. Strain detectability was estimated to be  $\sim 10^{-12}$ , which is better than the 100-m strainmeter. Estimated performance of the 1.5-km laser strainmeter in comparison with the 100-m strainmeter and other conventional strainmeters will be presented based on the results of the test run.

[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] A. Araya et al., Design and operation of a 1.5-km laser strainmeter installed in the KAGRA underground site, in abstract of Japan Geoscience Union Meeting 2016, SGD23-12, 2016.

[6] Y. Aso et al, Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector, *Phys. Rev. D*, 88, 043007, 2013.

[7] P. L. M. Heydemann, Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers, Appl. Opt., 20, 3382-3384, 1981.

キーワード：歪計、レーザー、地殻変動、K A G R A、神岡、重力波

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

## はやぶさ2クロスオーバー解析のシミュレーション (2)

### Simulation study for crossover orbit analysis of Hayabusa2 (2)

\*山本 圭香<sup>1</sup>、松本 晃治<sup>1</sup>、大坪 俊通<sup>2</sup>、並木 則行<sup>1</sup>、はやぶさ2 アストロダイナミクスチーム

\*Keiko Yamamoto<sup>1</sup>, Koji Matsumoto<sup>1</sup>, Toshimichi Otsubo<sup>2</sup>, Noriyuki Namiki<sup>1</sup>, Hayabusa2 Astrodynamics Team

1. 国立天文台、2. 一橋大学

1. National Astronomical Observatory of Japan, 2. Hitotsubashi University

The asteroid explorer “Hayabusa2” launched in 2014 is currently sailing towards the target asteroid, Ryugu, and will arrive there in the middle of 2018. Hayabusa2 will stay there for one and a half years, and perform various observations.

For mapping of acquired observation data, precise orbit determination of Hayabusa2 is very important. Further, Ryugu’s geodetic parameters, which will be simultaneously estimated with Hayabusa2 orbit, are also required to be determined in high precision for understanding of Ryugu. However, such precise determinations are difficult by using radiometric tracking data only, because of current limited knowledge of Ryugu’s ephemeris and physical parameters. To overcome this problem, in Hayabusa2 mission, crossover orbit analysis using laser altimeter (LIDAR) data between Hayabusa2 and Ryugu is planned, in addition to radiometric tracking data analysis.

In this study, we performed offline simulation of Hayabusa2 orbit analysis. We developed a simulation program for Hayabusa2 orbit analysis, including crossover orbit analysis. Test data of Hayabusa2 orbit, Ryugu ephemeris, and Ryugu shape model were also created for the simulation. From these test data, input observation data to the simulation program were prepared. After adding some errors to Ryugu ephemeris and the observations, recovery of “true” Hayabusa2 orbit from these data sets were simulated in the following order: 1) Hayabusa2 orbit determination with range and range rate observations from ground tracking stations to Hayabusa2, 2) Determination of Hayabusa2 orbit with respect to Ryugu center by crossover orbit analysis using LIDAR-observed ranges between Hayabusa2 and Ryugu, 3) improvement of Ryugu ephemeris using 1) and 2) results, 4) improvement of Hayabusa2 orbit by performing 1) again with updated Ryugu ephemeris, and 5) iteration of 1) to 4). We discuss how much the precision of determined Hayabusa2 orbit changes by changing error magnitudes of each observations and Ryugu ephemeris.

キーワード：はやぶさ2、軌道解析シミュレーション

Keywords: Hayabusa2, Orbit Analysis Simulation