

平成 30 年 5 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03713

研究課題名(和文)複合測地データを活用した震源断層即時推定システムの開発

研究課題名(英文)Development of rapid coseismic fault model estimation system based on the multiple geodetic data

研究代表者

太田 雄策(Ohta, Yusaku)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50451513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：リアルタイムGNSSおよび地殻変動連続観測記録を複合利用することによって、M7を超える地震の規模およびその断層面の広がりをも即時予測するプロトタイプシステムの開発を行った。具体的にはキネマティックGNSS解析の高精度化手法の提案およびアンテナ可動台を用いたキネマティックGNSS解析の系統的精度評価を行った。また、断層モデル推定の不確実性をMCMCを用いて評価する手法について検討を行った。さらにボアホールひずみ計を用いた地震規模即時推定手法の高度化を行った。さらにこうした個別の成果を活用し、地殻変動連続観測データ流通・解析システムの開発および運用を実施した。

研究成果の概要(英文)：We developed the prototype system of rapid coseismic fault model estimation for the large earthquake whose magnitude is more than 7 based on real-time GNSS and strain meter. We showed the method for the high precision kinematic GNSS analysis and investigated the precision of kinematic GNSS time series using developed precise movable table for GNSS antenna. We also investigated the uncertainties estimation of the rapid coseismic fault model estimation using GNSS data based on MCMC approach. Furthermore, we improved the method for rapid coseismic fault model estimation based on borehole strain meter. Finally, we have started operation the prototype system of the distribution and its analysis of crustal deformation continuous observation data.

研究分野：測地地震学

キーワード：GNSS 地殻変動連続観測 断層モデル即時推定 津波

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

### 1. 研究開始当初の背景

プレートが沈み込む海溝では、特にプレート境界において巨大地震がたびたび発生し、それによって励起された津波によって大きな被害が生じる。そのため、地震発生後、迅速に津波規模および到達時刻の即時予測を行うことは防災・減災の観点からも極めて重要である。

近年、GNSSを高いサンプリングでリアルタイムに解析することで、地震規模を即時的に推定する手法の開発が進められている。本研究課題の研究代表者である太田は巨大地震の地殻変動とその量を1秒毎のリアルタイムGPS解析から自動で検出、推定しさらに地震規模を即時に推定するアルゴリズムを開発した。同アルゴリズムは国土交通省国土地理院によって開発されているリアルタイムGNSSデータにもとづいた地震規模即時推定システム(REGARDシステム)に組みこまれ、実際の地殻変動監視に活用されている。一方、リアルタイムGNSSデータによって海溝型地震規模を即時推定するためには地震規模(マグニチュード7以上)の制限があり、リアルタイムGNSS解析の高精度化が継続して必要な状況にある。

一方、研究分担者である大久保は直接変位( $u$ )を計測するGNSSだけではなく、変位の空間微分( $du/dx$ )である「ひずみ」を計測するひずみ計によっても、震源断層の広がりや即時推定できる可能性があることを示した。これらひずみ計は、リアルタイムGNSSでは感度を持たないような比較的小規模の海溝型地震(マグニチュード7.0以下)においても、その地震規模の即時推定に使用可能であると考えられる。すなわち、両センサーは感度、観測点数の観点から相補的な関係にあり、両者を組み合わせることによって、より確度・精度の高い地震規模・断層面即時把握システムを構築することができる。

### 2. 研究の目的

上記の研究開始当初の背景に基づき、本研究における目的を以下の通り設定した。すなわち、リアルタイムGNSSおよび地殻変動連続観測記録(主としてひずみ記録)を複合利用することによって、比較的小規模の海溝型地震を含む地震の規模および、その断層面の広がりを即時予測するプロトタイプシステムの開発を行う。そして同目的を達成するために必要なGNSSリアルタイム解析の高精度化、ひずみ計等地殻変動連続観測データの感度・安定性評価を行う。

### 3. 研究の方法

上記で述べた研究目的を達成するために、本研究ではリアルタイムGNSS解析の高精度化に関する研究とひずみ計を主とした地殻変動連続観測データの高度利用に関する研究に大別して研究を実施した。以下に各項目における研究実施方法について示す。

### (1) リアルタイムGNSS解析の高度化

#### ① 対流圏遅延推定時の最適ハイパーパラメータ探索

キネマティックGNSS解析においては、状態空間モデルによって未知パラメータ(座標値、対流圏遅延量、およびその空間的な勾配量)の同時推定を行う場合が多い。この時、対流圏遅延量やその空間的な勾配量はランダムウォーク的な確率過程に支配されているとし、さらに仮定した確率過程をコントロールするプロセスノイズ(以下、PNと表記)の値を解析者が仮定して解析を行う。PNは、未知数(本研究では対流圏遅延に関連したパラメータ)が次の時間エポックでどの程度動きうるかを規定する。一方、各未知パラメータを正確に分離して推定するためには、仮定するPNが実際の気象条件等に合致する必要があるが、その仮定方法は解析者に一任されている。すなわち解析者が仮定するPNの値で得られる座標時系列の値が大きく変わる。

そこで本研究ではキネマティックGNSS解析時の対流圏遅延推定に係るPNの最適値の探索を試みた。用いたデータは国土地理院が運用するGEONETであり、キネマティックGNSS解析のソフトウェアとしてはGIPSY-OASIS Ver.6.3を用いた。対流圏遅延推定のための確率過程にはランダムウォークを仮定し、そのPNを変化させ、最も座標値の分散が小さくなる値を最適PN値として、その空間、時間方向の特徴について検討を行った。

#### ② 精密可動台を用いたリアルタイムキネマティックGNSS解析の客観精度評価

キネマティックGNSSの精度評価を客観的に行うことを目的として、3軸で稼働する精密可動台を開発した。開発した3軸精密可動台は船上等の移動体における変動も含めて再現を可能にするために、水平方向の移動軸( $x$ 軸)に加え、回転軸( $\theta$ 軸)および傾斜軸( $\alpha$ 軸)が可動可能であり、最小可動時間間隔は10Hzである。これら開発した可動台を用いて、リアルタイムキネマティックGNSS解析の精度評価を行った。

#### ③ リアルタイム推定された断層モデルの不確実性定量評価

現在、国土地理院と東北大学で共同開発されている電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)では、地震を引き起こした断層の推定を、プレート境界におけるすべり分布もしくは1枚矩形断層を用いることで行っている。この内、1枚矩形断層推定は内陸地震など、断層幾何が明瞭ではないイベントに対して有用な断層推定手法であるが、その一方で断層幾何と断層面上のすべりを同時に解くために推定における非線形性が強く、そのため得られる結果が断層パラメータに与える初期値に大きく依存すること、それに伴って断層推定の誤差を定量的に評価することが難しいという問題点が存在する。そのため本項

目では1枚矩形断層モデル推定の不確実性を定量評価することを目的として、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov Chain Monte Carlo methods: 以下, MCMC) を用いた1枚矩形断層推定時の誤差の定量評価を行った。用いたデータは2011年東北地方太平洋沖地震であり、GEONET観測点における地震にともなう永久変位(3成分)を用いた。サンプリング手法にはMCMCの一種であるメトロポリス・ヘイスティング法を用いた。サンプリングされた事後確率分布を用いて断層パラメータの推定結果とした。マルコフ連鎖の長さは $1 \times 10^7$ として、初期値依存部分を除去するためのBurn-inは10%とした。

## (2) 地殻変動連続観測データの高度利用に関する研究

### ① ボアホールひずみ計を用いた地震規模即時推定手法の開発

産総研では東海・紀伊半島・四国地方においてボアホールひずみ観測網を展開している。これらのひずみ計は全て水平4成分のひずみセンサーを有しており、4種類の主ひずみを観測することができる。センサー近傍のローカルな現象や、装置内部の機械的飛びなどが発生した場合、この4種類の主ひずみはそれぞれ大きく異なる値を示す。一方で、十分に遠方のソースの場合、4種類の主ひずみは整合的な値となる。つまり、4種類の主ひずみが整合的な観測点のデータのみを使用すれば、地震時の断層モデルや震源規模推定の精度が大幅に向上することが期待される。こうした特性を考慮し、開発した手法を2011年東北地方太平洋沖地震および同地震の最大余震に適用し、その性能評価を行った。

さらにひずみ地震動記録を周波数領域で解析する手法 (Fourier Strain Analysis; FSA) を開発し、FSAによって分離した、震源の影響強く含む周波数成分を時系列変動として再合成することで、地震の震源時間関数 (モーメント解放の時間発展) を求めることを試みた。同手法についても2011年東北地方太平洋沖地震をその対象とした。

### ② 地殻変動連続観測データ流通解析システムの開発および運用

ひずみ計や傾斜計などのセンサーは極めて高感度であるために、地震や火山活動による地殻変動成分の抽出には地球潮汐等による変動を取り除く必要が生じる。また、観測値に適当な座標変換や行うことで、変形力源の探索が容易になる。これらの機能を新たに開発して解析システムに実装し、実際の地震・噴火イベントに適用した。さらに地殻変動連続観測データを利用した即時予測を災害軽減につなげるために必要となる課題について検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) リアルタイムGNSS解析の高度化

#### ① 対流圏遅延推定時の最適ハイパーパラメータ探索

日毎の最適PNを、1日毎のGNSSデータのキネマティックGNSSデータ解析をさまざまなPNの値で計算を多数行い、座標値の擾乱がもっとも小さい (座標時系列の標準偏差がもっとも小さい) ものとして探索した。その結果、特に対流圏遅延の勾配量推定用のPNにおいて、顕著な年周変化のパターンが確認できた。この結果は、各観測点における最適PNの値を日付の関数として経験的に定義できる可能性を示唆する重要な結果である。これらの成果はEPS誌にHirata and Ohta (2016)として出版済みである。

#### ② 精密可動台を用いたリアルタイムキネマティックGNSS解析の客観精度評価

開発したキネマティックGNSS解析客観精度評価用精密可動台を用いて、リアルタイムキネマティック解析の精度評価を行った。洋上の係留ブイを模した動きを1軸に与え、それをリアルタイムキネマティックGNSS解析で再現できるかを検証した。リアルタイム解析には静止衛星から補正情報を得るStarFireおよびTrimble CenterPoint RTXの2種類を用いた。その結果、両解析とも与えた動きを良く説明するものの、その残差を見るとノイズ特性には大きな違いが認められ、標準偏差で確認するとTrimble CenterPoint RTXでは10mm以下で与えた動きと一致していることが明らかになった。このように開発した精密可動台を用いることでGNSS解析の精度および確度を定量的に評価する技術を確立することができた。

#### ③ リアルタイム推定された断層モデルの不確実性定量評価

図1に2011年東北地方太平洋沖地震を対象として、MCMCによって推定された断層パラメータのうち、断層面積と断層面上のすべり量の相関を示す。得られた結果を見るとすべり量と断層面積に明瞭なトレードオフが確認され、陸上GNSS永久変位データのみでは断層モデルを一意に確定できないことが明らかになった。その一

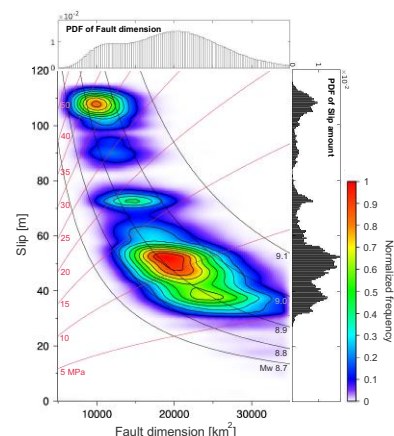


図1: MCMCによって推定された事後確率分布に基づく断層面積とすべり量の相関図。最大頻度で正規化した。図中黒線が地震規模を、赤線で断層面上の応力降下量をそれぞれ示す。

方で、断層面積と断層すべりで規定される地震規模(モーメントマグニチュード)は8.8~9.0の範囲でほぼ一定であり、地震規模推定は一定の確度で実施できていることが確認できた。一方で、これらの断層面積とすべり量のトレードオフを回避するためには、例えば取りうる応力降下量の値など、適切な先験情報を事前分布の形で与えるなどの対策が必要なることを示唆する結果であり、引続き検討が必要であることを明らかにした。本研究の成果は2018年4月現在、査読付き論文誌に投稿済みである。

## (2) 地殻変動連続観測データの高度利用に関する研究

### ① ボアホールひずみ計を用いた地震規模即時推定手法の開発

ボアホールひずみ計を用いた地震規模即時推定手法を2011年東北地方太平洋沖地震およびその最大余震に対して適用した。その結果、発震の約7分後(観測点にP波が到達してから約5分後)には適切な震源規模

(Mw8.7)が推定されることが分かった。また、同地震の最大余震においても、適切な震源規模が推定可能であることが分かった(図2)。当該の結果は、2018年4月現在、査読付き論文誌に投稿済みである。

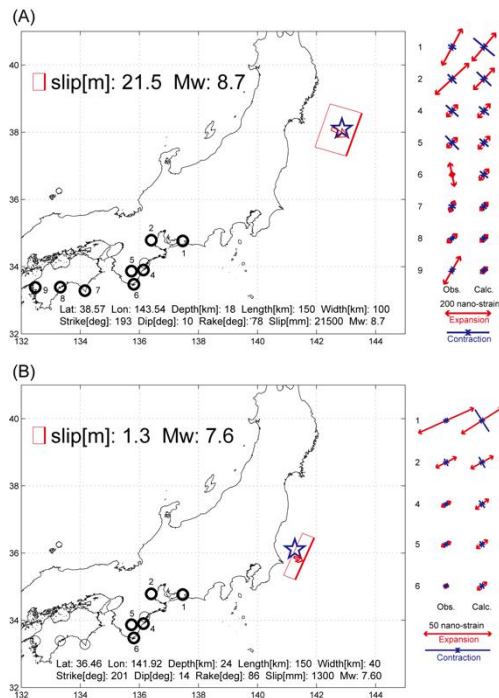


図2: (A) 2011年東北地方太平洋沖地震の推定断層モデル(赤色矩形)。右側は、各観測点における主ひずみの観測値と計算値の比較。(B) 2011年3月11日15:15に発生した東北地方太平洋沖地震の最大余震の推定断層モデル。

さらに、ひずみ地震動記録を周波数領域で解析する手法(Fourier Strain Analysis; FSA)を開発し、FSAによって分離した、震源の影響強く含む周波数成分を時系列変動として再合成することで、地震の震源時間関数(モーメント解放の時間発展)を求め、地震規模(スカラーモーメント)の推定に利用できる

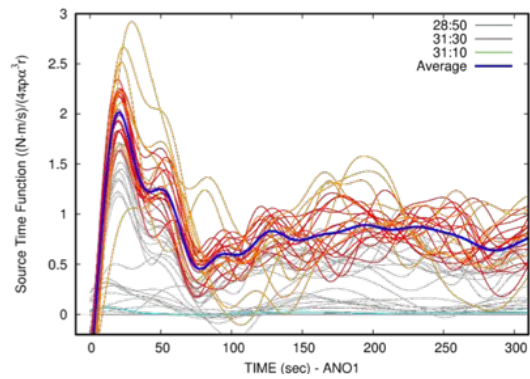


図3: FSAによって推定した2011年東北地方太平洋沖地震の震源時間関数。横軸は時間発展を示し、縦軸は地震モーメント解放率(ただし、伝播の影響は規格化)を示す。

ことを示した(図3)。具体的には2011年東北地方太平洋沖地震の際に産業技術総合研究所ボアホールひずみ計(ANO1)で得られたひずみ地震動記録にFSAを適用し、震源時間関数を推定した。その結果、地震モーメントの解放が地震発生後25秒にピークをもち少なくとも80秒程度継続していたことが明らかになった。更に150秒以降にも解放率の高まりが確認できた。これらの成果はひずみ計が大地震の地震規模および断層面の推定に活用可能であることを示す結果と考えられる。

### ② 地殻変動連続観測データ流通解析システムの開発および運用

開発した地殻変動連続観測データ流通解析システムを用いて過去に発生した津波荷重によるひずみ・傾斜変化データの解析を実施した。北海道大学のえりも観測所で観測された2011年東北地方太平洋沖地震および2010年チリ地震津波のデータを解析し、潮位波形とひずみ・傾斜波形がほぼ位相遅れなく関連していたことを明らかにした(図4)。

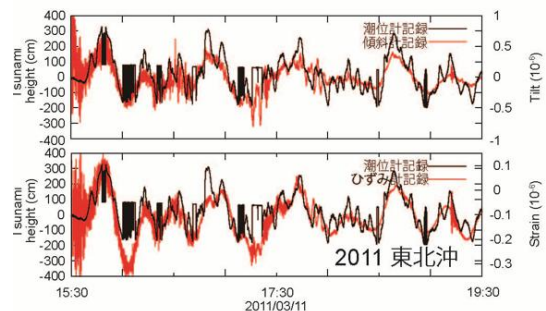


図4: 北海道えりもで観測された2011年東北地方太平洋沖地震津波の潮位記録と傾斜・ひずみ計の記録。

さらに地殻変動連続観測データを利用した即時予測を災害軽減につなげるために必要となる課題について検討を行った。現在、リアルタイムデータが流通しているのは大学等の限られた機関だけである。南海トラフ沿いでは、国において異常な現象の発現に連動した防災対応が検討されているが、その中でひずみ計は重要な観測項目とされている。地震発生時の即時震源断層推定手法の高度化に加



え、地震発生前や発生後に予見されるゆっくりすべりなどの多様な現象を把握する手法の開発が今後必要になる。ひずみ計や傾斜計は、数日から1週間程度の短周期領域ではいまだGNSSより高感度な特性を持ち、プレート境界での固着状態把握に必要な不可欠なセンサーであることから、関係機関のリアルタイムデータに基づく多様な研究開発と実証試験が今後必要と考える。

これらの成果によって、目的である複合測地データの利用によって比較的小規模の海溝型地震を含む地震の規模およびその断層面の広がりを即時予測するシステムの、基盤技術の開発を大きく進めることができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計13件) 【全て査読有り】

- (1) Ohta Y., T. Inoue, S. Koshimura, S. Kawamoto, and R. Hino, Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting, *J. Disaster Res.*, 13, No.3, 2018.
- (2) Kido, M., M. Imano, Y. Ohta, T. Fukuda, N. Takahashi, S. Tsubone, Y. Ishihara, H. Ochi, K. Imai, C. Honsho, and R. Hino, Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation, *J. Disaster Res.*, 13, No.3, 2018.
- (3) Kawamoto S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoroki, and T. Nishimura, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, *J. Disaster Res.*, 13, No.3, 2018.
- (4) Musa, A., O. Watanabe, H. Matsuoka, H. Hokari, T. Inoue, Y. Murashima, Y. Ohta, R. Hino, S. Koshimura, and H. Kobayashi (2018), Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *J. Supercomputer.*, doi:10.1007/s11227-018-2363-0, 2018.
- (5) Kawamoto S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoroki, T. Nishimura, T. Furuya, Y. Sato T. Yahagi, and K. Miyagawa, REGARD, A new GNSS based real-time finite fault modeling system on GEONET, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2016JB013485, 2017.
- (6) Hirata Y. and Y. Ohta, Spatial and temporal characteristics of optimum process noise values of tropospheric parameters for kinematic analysis of Global Navigation Satellite System (GNSS) sites in Japan, *Earth, Planets Space*, 68:203, doi: 10.1186/s40623-016-0578-y, 2016.
- (7) Kawamoto S., Y. Hiyama, Y. Ohta and T. Nishimura, First Result from the GEONET Real-time Analysis System (REGARD): the Case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, *Earth, Planets Space*, 68 (190), doi:10.1186/s40623-016-0564-4, 2016.

- (8) 古屋敬士, 越村俊一, 日野亮太, 太田雄策, 井上拓也, 緊急地震速報を用いた二段階多数津波シナリオ解析による最悪シナリオ即時推定, *土木学会論文集B2* (海岸工学), 72(2), doi:10.2208/kaigan.72.I\_307, 307-312, 2016.
- (9) 井上拓也, 太田雄策, 越村俊一, 日野亮太, 川元智司, 檜山洋平, 道家友紀, GNSSによるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, *土木学会論文集B2* (海岸工学) 72(2), doi:10.2208/kaigan.72.I\_355, 355-360, 2016.
- (10) 太田雄策, リアルタイム・キネマティックGNSSデータ解析の高度化およびそれにもとづく巨大地震の震源断層即時推定手法に関する研究, *測地学会誌*, 62(1), 1-19, 2016.
- (11) Ohta, Y., and M. Iguchi, Advective diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: a case study of the vulcanian eruption on July 24, 2012, *Earth, Planets and Space*, 67(1), 157, doi:10.1186/s40623-015-0324-x, 2015.
- (12) Kawamoto S., K. Miyagawa, T. Yahagi, M. Todoroki, T. Nishimura, Y. Ohta, R. Hino, and S. Miura, Development and assessment of real-time fault model estimation routines in the GEONET real-time processing system, *International Association of Geodesy Symposia*, doi:10.1007/1345\_2015\_49, 2015.
- (13) Ohta Y., T. Kobayashi, R. Hino, T. Demachi and S. Miura, Rapid coseismic fault determination of consecutive large interplate earthquakes: The 2011 Tohoku-Oki sequence, *International Association of Geodesy Symposia*, 467-475, doi:10.1007/1345\_2015\_109, 2015.

〔学会発表〕 (計21件)

- (1) Yusaku Ohta, Progress report on seafloor geodetic observation in Japan, 米国コロラド, UNAVCO Science Workshop 2018, 2018年3月27日.
- (2) Yusaku Ohta, Satoshi Kawamoto, and Ryota Hino, Possibility of the real-time dynamic strain field monitoring deduced from GNSS data: case study of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, 米国ニューオーリンズ, AGU Fall meeting 2017, 2017年12月13日.
- (3) Yusaku Ohta, How the real-time GNSS can contribute to near field tsunami early warning?, 京都大学(京都市), ICG-12, 2017年12月3日
- (4) Yusaku Ohta, Future prospect of the rapid coseismic fault model estimation using the real-time GNSS data, 仙台国際センター(仙台市), World OSAI Forum 2017, 2017年11月27日
- (5) 田中優介, 太田雄策, 宮崎真一, GNSS搬送波位相から直接断層すべりを推定する

- 手法の, 2016年熊本地震への適用, 瑞浪市総合文化センター(瑞浪市), 日本測地学会第128回講演会, 2017年10月6日.
- (6) 高松直史, 川元智司, 宮川康平, 阿部聡, 太田雄策, 西村卓也, GEONETリアルタイム解析システムREGARDによるリアルタイム断層推定, 瑞浪市総合文化センター(瑞浪市), 日本測地学会第128回講演会, 2017年10月6日.
- (7) Akiko Horiuchi, Ryota Hino, Yusaku Ohta, Hiroaki Tsushima, Near-field tsunami forecasting from offshore pressure data in association with the earthquake early warning, 神戸国際会議場(神戸市), IAG-IASPEI 2017, 2017年8月4日.
- (8) Yusaku Ohta, How the real-time GNSS can contribute to near field tsunami early warning in association with other geophysical measurements, 仙台, 2017 GNSS Tsunami Early Warning System Workshop, 2017年7月25日.
- (9) Yusuke Tanaka, Yusaku Ohta, Shin'ichi Miyazaki, Estimation of the coseismic slip history deduced from the "GNSS carrier phase to fault slip" approach -The case of 2016 Kumamoto earthquake-, 幕張メッセ(幕張市), JpGU-AGU meeting 2017, 2017年5月22日.
- (10) Satoshi Kawamoto, Yohei Hiyama, Satoshi Abe, Naofumi Takamatsu, Yusaku Ohta, Takuya Nishimura, Masaru Todoroki, REGARD: GNSS-based rapid finite fault modeling system, 幕張メッセ(幕張市), JpGU-AGU meeting 2017, 2017年5月20日.
- (11) Satoshi Itaba, Quasi real-time estimation of the moment magnitude of large earthquake from static strain changes, 米国サンフランシスコ. AU Fall Meeting 2016, 2016年12月15日.
- (12) Yusaku Ohta, Misae Imano, Motoyuki Kido, Development of the triaxial precise movable table for the precision and accuracy assessment of the kinematic GNSS time series, 米国サンフランシスコ. AGU Fall Meeting 2016, 2016年12月15日.
- (13) 大久保慎人, 板場智史, 太田雄策, 周波数領域でのひずみ解析による地震規模即時推定に向けた解析手法の改良, 日本測地学会第126回講演会, 奥州市文化会館Zホール(岩手県奥州市), 2016年12月1日.
- (14) 太田雄策, GNSSを用いた地震・津波規模即時予測手法のレビュー, リアルタイム測地データによる地震・津波規模即時予測に関する研究集会, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年11月22日.
- (15) 大久保慎人, 板場智史, 太田雄策, 周波数領域でのひずみ解析と地震の即時規模推定に向けた解析, リアルタイム測地データによる地震・津波規模即時予測に関する研究集会, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年11月22日.
- (16) 板場智史, 静的歪変化を用いた地震規模即時推定, リアルタイム測地データによる地震・津波規模即時予測に関する研究集会, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年11月22日.
- (17) 高橋浩晃, 動的波形による地震規模即時推定&実装への課題, リアルタイム測地データによる地震・津波規模即時予測に関する研究集会, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年11月22日.
- (18) Yuichiro Hirata and Yusaku Ohta, Verification of the optimum tropospheric parameters setting for the kinematic PPP analysis, 米国サンフランシスコ. AGU Fall Meeting 2015, 2015年12月18日.
- (19) 平田雄一郎, 太田雄策, 日野亮太, キネマティックPPP再解析データから抽出した2011年東北地方太平洋沖地震直後の余効変動の時空間的特徴, 日本測地学会第124回講演会, 九州大学西新プラザ(福岡市), 2015年10月16日.
- (20) 大久保慎人, 太田雄策, 高橋浩晃, 山口照寛, 地殻変動連続観測記録を利用する即時地震断層推定手法開発に向けた試み, 日本測地学会第124回講演会, 九州大学西新プラザ(福岡市), 2015年10月16日.
- (21) 太田雄策, リアルタイム・キネマティックGNSSデータ解析の高度化及びそれに基づく巨大地震の震源断層即時推定に関する研究, 日本測地学会第124回講演会, 九州大学西新プラザ(福岡市), 2015年10月15日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 雄策 (OHTA Yusaku)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 50451513

### (2) 研究分担者

高橋 浩晃 (TAKAHASHI Hiroaki)  
北海道大学・理学研究院・教授  
研究者番号: 30301930

### (3) 研究分担者

大久保 慎人 (OKUBO Makoto)  
高知大学・教育研究部自然科学系理工学部  
部門・准教授  
研究者番号: 50462940

### (4) 研究分担者

板場 智史 (ITABA Satoshi)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員  
研究者番号: 90589285