

## (1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

## (2) 研究課題（または観測項目）名：

海陸測地データを活用したプレート境界面すべり即時把握能力の向上とそれにもとづく津波即時推定手法の高度化

## (3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

イ. 津波の即時予測手法

## (4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 計画を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

## (5) 総合的研究との関連：

## (6) 本課題の5か年の到達目標：

GNSSデータや海底水圧計など、海陸の測地データを活用したプレート境界面におけるすべりの即時的な把握能力向上を目指した技術開発およびそれにもとづく津波即時推定手法の高度化を行う。

プレート境界すべりの時空間把握（地震間、地震時、地震後）を即時的に行い、その推移予測を行うことは、地震発生予測を行う上で基盤となる技術である。特に陸上GNSSに代表される測地観測データや、繰り返し地震等の地震学的データによる日～月～年単位でのプレート間カップリング状態の把握はこれまでに数多くの成果を挙げている。しかしそれらの結果を推移予測に活用していくためには、推定精度および時間分解能の向上が必須である。特に高い時間分解能を持つGNSSでは、主として対流圏遅延等の影響によって数十分～1日程度の時間帯域における精度劣化が大きく、こうした時間帯域の地殻変動把握の障害となっている(例えば、Hirata and Ohta, EPS, 2016)。また海底における圧力観測は上下地殻変動場を連続的に把握できるという点で大きな利点を持つが、センサー固有のドリフトが大きく、特に数ヶ月以上の時定数を持つような地殻変動場、例えば地震間のひずみ蓄積や地震後の余効変動等の把握に困難性が存在する。

一方、より短い時間帯域の現象である地震時の断層すべりの即時推定に関しては、国土地理院と東北大学が開発を進めているリアルタイムGNSSを用いた地震時断層即時推定システム（REGARD, Kawamoto et al., JGR, 2017）の運用がすでに開始されており、実際の地震規模推定等に活用されている。しかしREGARDでは陸上GNSSによって得られた永久変位データのみを用いていることから震源域から遠く離れた海溝軸近傍での断層すべりを高い精度で推定することが難しく、推定誤差の定量的な把握が難しいという問題点がある。

こうした背景を受けて、本研究課題では様々な時間帯域(年, 月, 日, 分)におけるプレート間カップリングを、海陸測地データ(GNSSおよび海底圧力計)観測・解析の高度化にもとづいてシームレスに把握する能力の向上を目指す。また、そうした精度向上と並行して、リアルタイムGNSSによって推定されるプレート境界型地震および海域で発生する地震の断層モデルが持つ不確実性を定量的に明らかにする手法を確立する。同手法については、国土地理院と東北大学が共同開発しているREGARDへの実装を目指す。さらに、S-netやDONET等の沖合津波観測で実際に観測される津波記録を用いて、陸上GNSSから即時的に推定される断層モデルが持つ不確実性を低減させる統合インバージョン手法(例えばtFISH/RAPiD, Tsushima et al., GRL, 2014)の高度化を併せて行う。申請者らは、スーパーコンピュータを利用したリアルタイム津波浸水被害予測技術の高度化に取り組んでおり、即時的に得られる断層モデルのリアルタイム浸水予測の精度向上における優位性を実証するとともに、それら断層モデル等の不確実性が沿岸津波波高および津波浸水予測に与える影響を併せて検討し、それら不確実な情報をどのように災害情報に結びつけるべきかについて検討を進める。

#### (7) 本課題の5か年計画の概要：

**平成31年度：**キネマティックGNSSの感度が大きく低下する時間帯域における対流圏遅延と地殻変動場の高い精度の分離を目指し、搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法による1日以下の時間窓におけるモニタリング能力の精度検証を行う。また海底水圧計の長期ドリフトの室内実験での把握実験を行う。また実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる観測機材の開発を開始する。さらにリアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量把握をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発を行う。

**平成32, 33, 34年度：**搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法による1日以下の時間窓におけるモニタリング能力の向上のために、対流圏遅延推定のためのハイパーパラメータ等の最適化を行う。室内実験での海底水圧計の長期ドリフトの把握結果を基に、実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる観測機材の開発を継続し、実海域での試験観測を行う。実海域での試験観測は主としては、根室沖のS-net観測点近傍で行う(根室沖における海底測地観測に関する研究課題と密接に連携)。MCMC法で与えられた断層モデルの不確実性を沖合津波観測データで更新していく手法の高度化のための開発を行い、数値実験や既往地震等によってその性能を定量的に評価する。さらにこれら不確実な情報の災害情報への活用について特に津波浸水被害に着目して検討を行う。

**平成35年度：**搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法による地震現象モニタリング能力の定量評価を行う。海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる観測機材による既設海底水圧計等のドリフト推定を試みる。断層モデルの不確実性の災害情報へ活用する方策を特に津波浸水被害に注力してまとめる。

#### (8) 令和3年度の成果の概要：

##### ・今年度の成果の概要

リアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発および同技術の国土地理院リアルタイム地殻変動監視システム(REGARD)への技術移転を進めた。これまで本課題の枠組みにおいて、リアルタイムGNSSデータを用いた断層モデル推定における推定不確実性を得るための手法として、実装および実行速度が高速なメトロポリスヘイスティング(M-H)法を活用した技術開発を進めてきた。このうち、1枚矩形断層を推定するアルゴリズムとして”Real-time automatic uncertainty estimation of the coseismic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE)”を開発(Ohno, Ohta et al., EPS, 2021)し、同技術の国土地理院REGARDシステムへの技術移転を実施している。現在、同手法は実際のREGARDシステム中で実際のリアルタイムGNSSデータを入力とした試験運用を行っており、その中でいくつかの中規模地震(2021年2月13日福島沖地震の地震(Mj7.3)、2021年3月20日宮城県沖の地震(Mj6.9)、2021年5月1日宮城県沖の地震(Mj6.8))において実際の推定結果が得られた。このうち、2021年2月13日福島沖地震の地震(Mj7.3)の結果については、R2年度報告で既に報告した。ここでは2021年3月20日に発生した宮城県沖の地震(Mj6.9)に対してRUNEを適用した結果を図1に示す。結果として変位場がきわめて小さい(1-2cm)にも関わらず、比較的高いVRで断層モデルを推定することに成功した。この結果は、現行のREGARD内部における矩形断層モデル推定アルゴリズムを、MCMCを活用したRUNEによって将来的に置換できる可能性を示唆する重要な成果である。

国土地理院REGARDシステムに技術移転を実施したRUNEでは、一般的なM-H法を用いている。一方M-H法では、未知パラメータに対して微量の摂動を与えるというアルゴリズム上の制約等から、十分な事後確率分布(PDF)を得るまでに非常に長いマルコフ連鎖を必要とする。これらM-H法に対して、ハミルトニアンモンテカルロ法(HMC法)は短いマルコフ連鎖で十分な精度のPDFを得られることが指摘されていた。しかし、HMCを断層推定に適用した事例は存在しない。そのため、R3年度はHMCによる1枚矩形断層推定アルゴリズムの開発を実施した。HMC法を2016年熊本地震時のリアルタイムGNSSデータに適用し、M-H法で得られたPDFと比較した結果を図2に示す。同図によって、HMC法の結果とM-H法の結果はほぼ完全に一致し、HMC法で断層推定が可能であることが明らかになった。また、収束までに必要としたマルコフ連鎖の数を比較したところ、M-H法と比較して数%程度の連鎖数で必要なPDFが得られることが明らかになった。

海底水圧計に含まれる長期ドリフトをゼロ点(圧力の印加がない状態での出力)でのドリフト実測値より把握するA-0-A方式による海底水圧観測システムの開発を進めた。開発した試験機と既存のケーブル式水圧計との比較を行うことを目的とし、2020年9月6日にDONET 2C-10ノードのごく近傍に同観測システムを自由落下で設置し、2021年8月17日に音響通信による錘切離によって回収した。その結果、ゼロ点を測定する頻度を徐々に減少させる機構を含め、必要なデータを全て取得することに成功した。図3にA-0-A方式によるドリフト補正を含めた圧力時系列の結果を示す。A-0-A適用後の水圧時系列を見ると、長期的ドリフトを減少させることに成功した。

GNSS搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法(Phase to Slip, PTS)の高度化に関する研究を継続した。GNSSによる測位では、観測点周辺の環境に応じたマルチパスによってGNSS衛星の周回周期で繰り返されるノイズが生じる。同ノイズは、PTSによる断層すべり時系列においても表出する可能性が考えられるため、1日前の同時帯のPTSによる断層すべり時系列を用いるSidereal Filterと呼ばれる手法の適用を行った。その結果、最大で30-40%程度ノイズレベルを低減できることが明らかになった。

近年の位置情報サービスの高度化にともない、携帯電話事業者による独自のGNSS観測網の展開が急速に進んでいる。このうち、ソフトバンク株式会社は、2020年9月以降、3300点を超える独自のGNSS観測網を日本全国に展開している。一方で、同観測網を用いた地殻変動場の把握はこれまでに行われていない。こうした観点から、当初予定には無かったが、同観測網データの地殻変動解析への応用可能性を検証するための評価を実施した。検証対象の一つとして2021年2月13日に福島沖で発生したM7.3の地震による地震時地殻変動場の計算を行った。図4に地震時水平変位場を示す。GEONETおよびソフトバンクによるGNSS観測網の変位場は基本的に整合的であり、民間GNSS観測点によって地殻変動場の議論が可能であることを示唆する結果となった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況

本課題で開発を行ったリアルタイムGNSSによる1枚矩形断層推定アルゴリズム(“Real-time automatic uncertainty estimation of the coseismic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE)”, Ohno, Ohta et al., EPS, 2021)は現在、国土地理院のREGARDシステムへの組み込みを念頭においた実データによる試験が実施されている。REGARDは、GNSSデータを用いて巨大地震発生時の地震規模や断層面の広がりや即時的に推定するシステムであり、気象庁が実施する津波予測の支援を念頭に置いている。そうした観点からも、本課題で開発したRUNEが国土地理院REGARDシステムで試験運用されていることは、開発した技術の速やかな社会実装という観点からもその貢献度は大きいと考えられる。

(9) 令和3年度の成果に関連の深いもので、令和3年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Ohno, K., Y. Ohta, S. Kawamoto, S. Abe, R. Hino, S. Koshimura, A. Musa, and H.

Kobayashi, 2021, Real-time automatic uncertainty estimation of coseismic single rectangular fault model using GNSS data, Earth Planets Space, 73, 127, doi:10.1186/s40623-021-01425-0

Ohta, Y. and M. Ohzono, 2022, Potential for crustal deformation monitoring using a dense cell phone carrier global navigation satellite system network, Earth Planets Space, in press

Ohno K., Y. Ohta, R. Hino, S. Koshimura, A. Musa, T. Abe, H. Kobayashi, 2022, Rapid and quantitative uncertainty estimation of coseismic slip distribution for large interplate earthquakes using real-time GNSS data and its application to tsunami inundation prediction, Earth Planets

・学会・シンポジウム等での発表

山田大介, 太田雄策,2021,単一矩形断層推定に関するハミルトニアンモンテカルロ法の適用可能性,日本地球惑星科学連合2021年大会,SSS05-05

田中 優介, 太田 雄策, 宮崎 真一,2021,GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する手法で得られた, 2011年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべり,日本地球惑星科学連合2021年大会,SGD01-11

山田大介, 太田雄策, 大野圭太郎,2021,ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定と

メトロポリス・ヘイスティング法との比較,日本地震学会2021年度秋季学術大会,S23-03

田中 優介, 太田 雄策, 宮崎 真一,2021,PTS解析による地震時の動的な破壊過程から初期余効すべりまでの連続的な推定 ~2011年東北地方太平洋沖地震の事例~,日本地震学会2021年度秋季学術大会,S03P-01

太田雄策, 日野亮太, 佐藤真樹子, 鈴木秀市, 大塚英人, 梶川宏明, 小島時彦,2021,非定常地殻変動の把握を目指したA-0-A方式による深海対応海底水圧計ドリフト補正システムの開発 (第4報),日本測地学会第136回講演会,06

山田太介, 太田雄策,2021,ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較,日本測地学会第136回講演会,16

太田雄策, 大園真子,2021,民間GNSS観測網を用いた地殻変動モニタリングの可能性,日本測地学会第136回講演会,28

Taisuke Yamada, Yusaku Ohta,2021,Efficient estimation of the fault model using the GNSS data based on the Hamiltonian Monte Carlo approach,AGU Fall Meeting 2021,NG15B-0430

Yusaku Ohta,2022,Development of the low-cost GNSS receiver and data logger system for the geodetic purpose,AGU Fall Meeting 2021,G32B-07D

太田雄策, 大園真子,2022,民間GNSS観測点を用いた地殻変動即時把握の可能性,令和3年度東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」

Yusaku Ohta,2022,Application of GNSS for real-time prediction of geohazards and its transformation to disaster information,Geospatial Capacity Development Conference on GNSS applications and DRR

Ohta Y., R. Hino, M. Sato, S. Suzuki, H. Otsuka, H. Kajikawa, T. Kobata,2022,Development of long-term drift elimination system of OBP for deep-sea observation by "A-0-A" approach,Ocean Science Meeting 2022

(10) 令和3年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：ソフトウェア開発（解析）

概要：迅速に断層モデルの推定不確実性を含めて推定するリアルタイムMCMC解析コード (RUNE) を開発した

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定） 国土地理院へはコード提供済み。HKD\_06の課題へも成果を活用すべくコード開発を継続中。

(11) 令和4年度実施計画の概要：

ハミルトニアンモンテカルロ法 (HMC法)を用いた震源断層推定手法をすべり分布推定に拡張するとともに、推定時のすべりの平滑化を制御するパラメータも同時推定する手法の開発を進める。PTSを用いた2011年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべりの時空間発展から断層面における摩擦パラメータの抽出を試みる。令和3年度に開始した民間GNSS観測点の活用による地殻変動把握とその精度評価について継続して実施し、その有効性を明らかにする。

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

太田雄策（東北大学大学院理学研究科）,日野亮太（東北大学大学院理学研究科）,越村俊一（東北大学

災害科学国際研究所)

他機関との共同研究の有無：有

国土交通省国土地理院測地観測センター,産業技術総合研究所計量標準総合センター

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：太田雄策

所属：東北大学大学院理学研究科

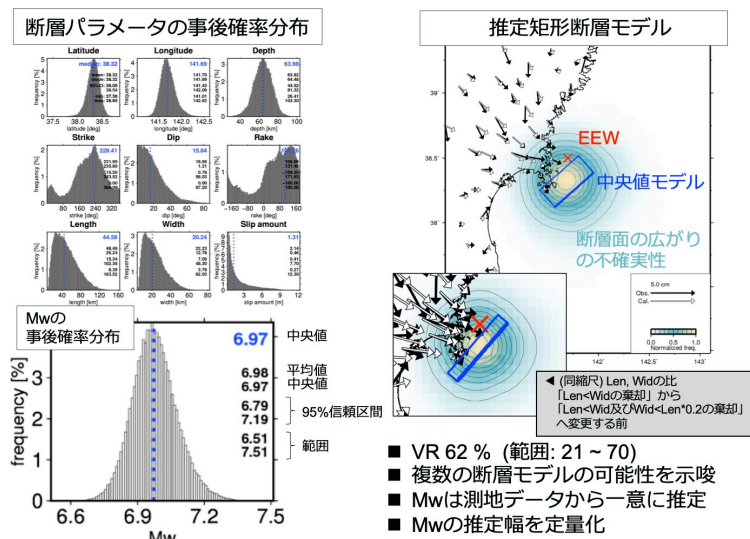


図1

2021年3月20日宮城県沖の地震(Mj6.9)に対してリアルタイムMCMC手法であるRUNEを適用した結果。

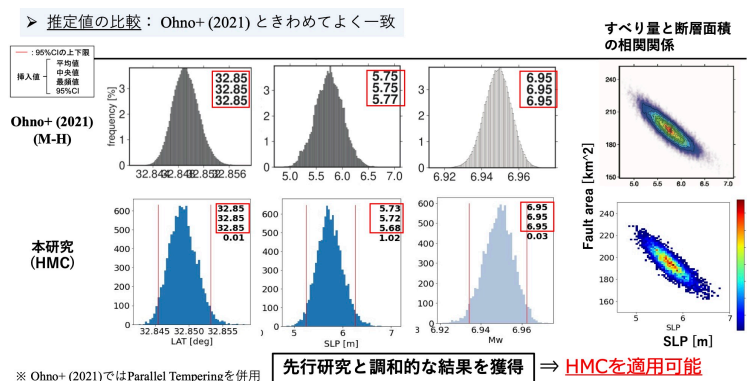


図2

2016年熊本地震時のGNSSデータにハミルトニアンモンテカルロ法(HMC)を適用した結果をメトロポリス・ヘイスティングス(M-H)法と比較した結果。

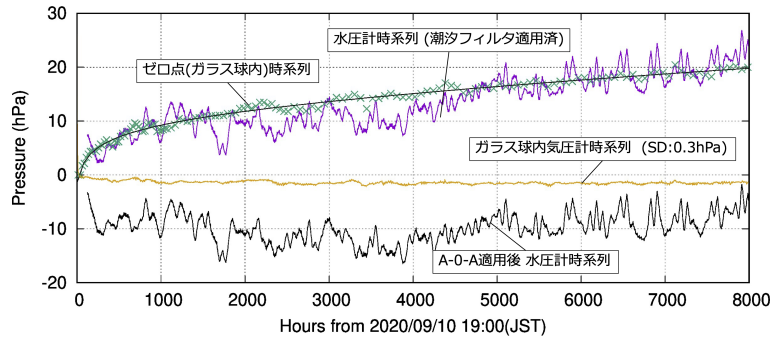


図3

南海トラフ2C-10ノード近傍水深約1800m地点におけるA-0-A海底水圧観測システムによって得られた圧力時系列。圧力変化の相対成分のみに着目して表示している。潮汐フィルタを適用した水圧計時系列、ゼロ点であるガラス球内(おおむね大気圧)の計測時系列、同時系列に対して指数と線形を重ね合わせた関数を当てはめた結果、ガラス球内の気圧計時系列、およびA-0-A方式を適用した後の水圧計時系列をそれぞれ示す。

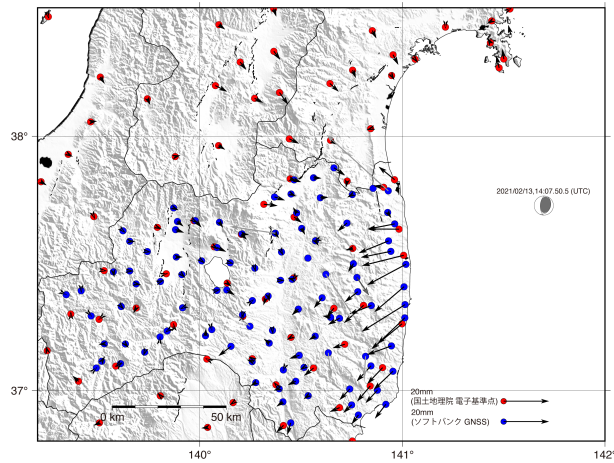


図4

民間GNSS観測網とGEONETで捉えられた2021年2月13日の福島沖地震による水平地殻変動。