令和６年度年次報告

課題番号：HKD_04

（1）実施機関名：

北海道大学

（2）研究課題（または観測項目）名：

（和文）測地・地下構造データに基づく内陸地震・火山活動地域の地殻変形のモデル化
（英文）Crustal deformation modeling in inland seismic and volcanic areas based on geodetic and subsurface structural data

（3）関連の深い建議の項目：

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
エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解とモデル化

（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
イ. 内陸地震
5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究
(3) 千島海溝沿いの巨大地震
(4) 内陸で発生する被害地震
6 観測基盤と研究推進体制の整備
(1) 観測研究基盤の開発・整備
イ. 観測・解析技術の開発

（5）本課題の５か年の到達目標：

稠密かつ複合的測地観測による詳細な地殻変動場の時空間把握と、地球電磁気(MT)観測、地震活動把握等による詳細な地下構造推定を行い、実際の地下構造、実測された地表変動に基づいて当該地域の力学モデルの構築を行う。モデルから応力・ひずみ集中のメカニズムや火山性変動源の挙動を定量化し、内陸地震活動と火山活動の個々の現象理解に加え、地震と火山のテクトニックな相互作用について検討する。また、広域変動場に含まれるこれらの影響を定量的に推定することで、千島海溝沿いプレート間固着の推定精度の向上にも貢献し、あわせて沈み込み帯における長期的なプレート収束と火山フロント周辺部の内陸変形の関係についても検討を試みる。

（6）本課題の５か年計画の概要：

5年間継続して行う観測の計画として、時空間的な地殻変動の把握を行うためには継続的な測地観測が必要である。そのためGNSS、重力、水準測量による多項目測地観測を年に1回程度、繰り返し観測として実施し、少なくとも1年間毎の高空間分解能での地殻変動場の把握を行う。周辺で連続観測を行っているGNSS、水位、地震観測を継続し、高時間分解能での地殻活動を監視する。これらの観測結果は構築していくモデル化の中で随時取り入れる。あわせて、過去に阿寒・屈斜路地域で行ってきたMT探査を拡張し、個別に行われてきた周辺の探査地域とのギャップを埋める観測を実施することで、より広域の地下比抵抗構造を把握し、地震活動や地殻変動と比較する。

1年目の令和6(2024)年度は、広域・大局的な変形モデルの構築を行う。外力は太平洋プレートの収束、プレート間固着の影響を測地データから見積もる。先行研究等を参考に、前弧、火山フロント、背弧といった大まかな地下構造の不均質性を与え、屈斜路カルデラでひずみ集中域の形成に必要なパ

ラメータについて検討する。

2年目の令和R7(2025)年度は、大まかなモデルでは説明しきれない地殻変動について、有限要素法を用いてより細かい空間スケール、つまりカルデラ特有、火山地域特有の地下構造の不均質分布を考慮した説明を試みる。地下構造の設定には、MT観測、地震活動の情報を用いる。また、独立して火山性地殻変動源の存在・活動を仮定したモデルによる地殻変動についても見積もり、それぞれ時空間発展を含めてどのように振る舞うか確認する。

3年目の令和R8(2026)年度は、実際の地形やより細かい地下構造（粘弾性構造）が、どれくらい地表変位や地下のひずみ、応力分布に影響を与えるのかを見積もり、どの程度考慮が必要なのか、具体的には剛性率や粘性係数などの物性についてのパラメータ値の振れ幅や、空間分解能の感度の範囲などを検討する。また、これまでの計算で得られたひずみ・応力分布が、他の内陸地震発生域、活火山地域と同程度かどうか、先行研究の情報などを元に検討する。

4年目の令和R9(2027)年度は、2021年後半から2023年中頃まで発生した膨張の非定常地殻変動について火山性変動源を仮定したモデル化を行い、その説明を試みる。またそれが定常変動時のどの部分が変化して、非定常変動を発生しているのかについても検討する。

最終年度であるR10(2028)年度は、これまでの計算結果をまとめ、定常時のひずみ集中の原因、現在のひずみ・応力分布、また非定常地殻変動の様子を明らかにし、構築した力学モデルから今後のこの地域のひずみ集中および火山活動の推移、地震と火山の相互作用について検討する。

（7）令和６年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

【北海道東部における広域的な変形の見積もり】

1年目の目標に掲げた北海道東部の広域・大局的な変形モデルの構築に必要な、外力となるプレート運動の影響を定量化するため、GEONETおよびソフトバンク独自基準点におけるGNSS観測点の太平洋プレートの収束方向（N66°W）への変位速度を求め、海溝軸直交方向を横軸とする速度プロファイルを作成した。厚岸～屈斜路カルデラ～稚内を通過する速度プロファイルから、屈斜路カルデラの周辺、火山地域を除いた約200 kmにおける範囲の広域的な変形（ひずみ）速度は定常的に短縮を示し、その値は約-1.4×10^{-7}/yrとなることが分かった（図1）。この変形速度は、2003年十勝沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震による地震時、地震後の一時的な擾乱を除き、大きく変化しないことも分かった。また、ソフトバンク独自基準点が加わったことにより、観測点分布が稠密となった2021年以降の速度プロファイルから前孤、火山フロント、背孤側での変形速度の空間的な違いを調べたが、顕著な違いは確認できなかった。

北海道東部の広域応力場の空間分布を詳細に調べるために、利用可能な震源メカニズムを用いて推定したところ、全体の57%の地震がN60°W-N80°W方向にP軸を示し、広域的にはGNSS観測から推定されるプレート収束方向とほぼ同じ方向で整合することが分かった。ただし、屈斜路カルデラ周辺の地震はP軸の向きがばらつき、周辺と異なる応力場になっている可能性が示唆された。

以上のことから、1年目の目標としていた広域変形モデル構築のための、広域からの外力となる変形速度やその向きを、測地、地震のデータを通して定量的な値として決定することができた。

【屈斜路カルデラ周辺の膨張性の非定常地殻変動の変動源推定】

2021年半ばから2023年半ばまで屈斜路カルデラ周辺で発生した膨張性の非定常地殻変動について、北海道大学、GEONET、ソフトバンク独自基準点からなる超稠密GNSS観測網のデータを解析して、変動源の推定を行った。広域変動場を差し引いて非定常地殻変動シグナルを抽出し、そのデータに対して、MCMCを使った変動源推定プログラム（RUNE, 例えばOhno et al., 2024）を適用して、変動源推定を行った。茂木モデル、楕円体モデル、シルモデルの3つを仮定したところ、いずれも観測値を概ねよく説明するが、茂木モデルが最適となった（図2）。推定変動源の深さは約5 kmに求まり、体積変化量は1.1×107 m3となる。これは、1993-1995年に発生した膨張イベントとほぼ同じ場所で若干小さい規模で発生しており、普段定常的に収縮場である屈斜路カルデラの地下が、時々繰り返して膨張イベントを生じる可能性を示唆する。また、この変動源はマグマ溜まり本体ではなく、その最上部、電気比抵抗の低比抵抗領域の最上端部（本多・他、2012）、脆性-塑性境界（高橋・他、2017）で発生していると推察される。

なお、この推定は本課題の4年目で実施する予定であったが、データセットおよび推定手法が整理できたことから、前倒して今年度実施した。また本内容をまとめて論文として投稿し、現在査読中である

（Ohzono et al., EPS, in review）。

【繰り返し多項目測地観測による屈斜路カルデラ周辺の地殻の挙動検出】
GNSS観測のほか，屈斜路カルデラ周辺では水準測量，繰り返し相対重力観測を実施した。水準測量は屈斜路湖畔沿い約15 kmの路線で2023年9-10月，2024年9月に実施し、今年度初めて約1年間の上下変動を得た。膨張変動はほぼ終息したタイミングではあるが、推定震源域の近傍では、4 mmの隆起が発生していたことが明らかになった（図3）。繰り返し相対重力観測は、屈斜路カルデラ、阿寒カルデラ周辺において、前計画から観測方法の改良等検討しながら実施している。近年の屈斜路カルデラ周辺の重力値の時間変化はほぼなく、安定していることが分かった。膨張変動から見積もられる重力変化は、誤差の範囲内であるため、これに対応する重力変化のシグナルも捉えられていない。

【謝辞】 本研究では国土地理院のGEONETデータを使用しました。本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは「ソフトバンク独自基準点のデータの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式会社およびALES株式会社より提供を受けたものを使用しました。RUNEは「火山活動監視のための観測データ及びGNSSリアルタイム解析技術の相互利用に関する協定」で使用しているものです。記して感謝申し上げます。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
内陸地震発生領域であり、火山地域でもある北海道東部屈斜路カルデラ周辺において、近年の火山活動に伴う地殻変動を稠密GNSS観測網から検出し、変動源を定量的に求めたこと、またその変動源の位置が1990年代の膨張イベントとほぼ同じであるのを特定したことで、この地域の数十年といった時間スケールでの火山活動の理解するためのひとつの情報を得た。今後の収縮過程に対する測地学的モニタリングを継続することで、その時空間変化を捉え、カルデラや火山地域特有の地下の粘弾性構造の把握、その構造に起因するひずみ・応力蓄積過程、内陸地震活動についての力学モデル構築を進展させることで、地震と火山の相互作用について、災害の軽減に貢献するための、現象解明が進むと期待できる。

（8）令和６年度の成果に関連の深いもので、令和６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

・学会・シンポジウム等での発表

大園真子・高橋浩晃・太田雄策，2024, 超稠密GNSS観測網が捉える 屈斜路カルデラ周辺の非定常地殻変動，JpGU2024，MTT37-P05

大園真子・高橋浩晃・奥山哲・太田雄策・大野圭太郎，2024，超稠密GNSS観測網による屈斜路カルデラ周辺の非定常地殻変動，日本火山学会2024年度秋季大会，A1-08

大園真子・太田雄策・大舘未来・高橋浩晃，CSESSの稠密GNSS観測網でみる全国地殻ひずみ分布概観，日本測地学会第142回講演会，35

Hashimoto, T., J. Pan, A. Suzuki, M. Takada, K. Okada, R. Tanaka, M. Tamura, 2024, Conductivity anomalies in the deep subsurface of central Hokkaido, 26th EM Induction Workshop, 4P52

Inoue, T., T. Hashimoto, R. Tanaka, Y. Yamaya, H. Ichihara, and K. Aizawa, 2024, The magma plumbing system of Mt. Meakandake imaged by broadband magnetotelluric survey, 26th EM Induction Workshop, 4P18

（9）令和６年度に実施した調査・観測や開発したソフトウエア等のメタ情報：
項目：地震：地殻変動：GNSS観測
概要：屈斜路カルデラ周辺においてキャンペーンGNSS観測を実施した.
既存データベースとの関係：

調査・観測地域：北海道弟子屈町屈斜路カルデラ
調査・観測期間：2024/9/9-2024/9/17
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：地震：地殻変動：水準測量
概要：屈斜路カルデラ湖畔沿いにおいて水準測量を実施した.
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：北海道弟子屈町屈斜路カルデラ
調査・観測期間：2024/9/9-2024/9/13
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：地震：地殻変動：重力測定
概要：道東地域において繰り返し相対重力観測を実施した.
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：北海道弟子屈町，釧路市，厚岸町等
調査・観測期間：2024/9/-2024/9/
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

（10）令和７年度実施計画の概要：

1年目に計画していた広域・大局的な変形モデルの構築が完了しなかったので、引き続き継続する。与える外力（太平洋プレートの収束）について今年度定量化できたため、実際のモデル計算にこの値を使用する。有限要素法を用いて、一様均質媒質から、先行研究に基づく前孤、火山地域、背孤の弾性-粘弾性構造の不均質構造等を与えたものを検討し、地表で観測される地殻変動場、ひずみ場と計算結果を比較する。また2年目では、より細かい空間スケールでのモデル化を進めることとしている。火山地域、カルデラ地域特有の地下の不均質構造を考慮したモデル化を実施し、広域・大局的なモデルに組み込むことを検討する。

地殻変動モニタリングのための多項目測地観測（GNSS、水準、相対重力など）を継続して実施する。また、モデル構築に必要な地下構造の情報について、先行研究や関係者から情報を得て、それらを取り入れることを検討する。

（11）実施機関の参加者氏名または部署等名：

大園 真子（北海道大学大学院理学研究院）,高橋 浩晃（北海道大学大学院理学研究院）,橋本 武志（北海道大学大学院理学研究院）
他機関との共同研究の有無：有
岡 大輔（北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所）

（12）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：北海道大学大学院理学研究院
電話：
e-mail：m.ohzono@sci.hokudai.ac.jp
URL：

（13）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大園真子
所属：北海道大学大学院理学研究院

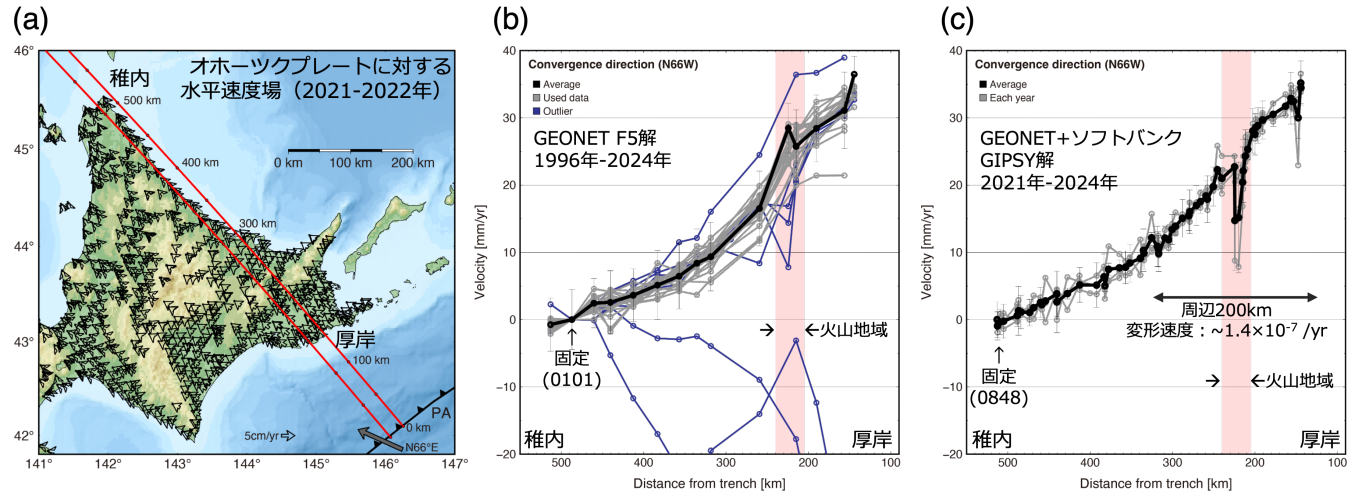

図1．水平変位速度場とプレート収束方向の速度プロファイル
(a) 速度場の例（ベクトル）とプロファイルの測線（赤線で囲んだ地域の20 km）。プレート運動モデルGSRM v1.2 (Kreemer et al., 2014) を使って、プレート運動の影響を除いている。(b) 1996年から2024年までのGEONET F5解による1年ごとの変位速度のプロファイル（灰色）と、その平均（黒）。青線は地震時・地震後の影響を受けた期間のプロファイルで、平均の算出に使用しなかったもの。(c)　2021年から2024年までのGEONETおよびソフトバンク独自基準点の1年ごとの速度プロファイル（灰色）とその平均（黒）。日座標値は東北大学のルーチン解析（Gipsy-X Ver.2.2による精密単独測位解）による。

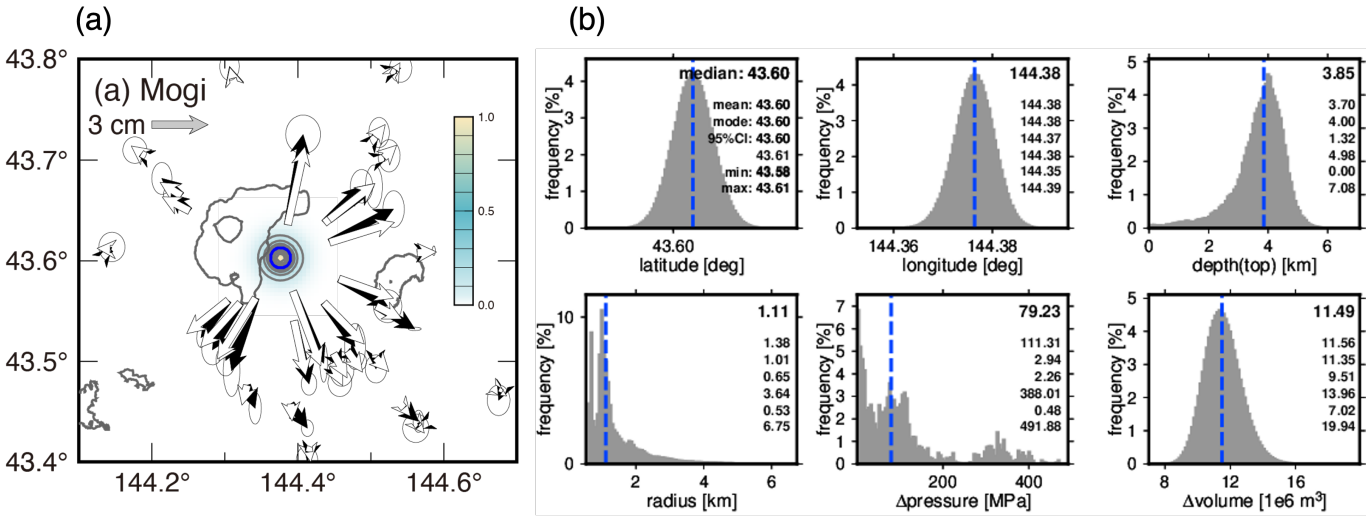

図2．稠密GNSS観測から推定された2021-2023年の膨張変動源の推定結果。
（a） 水平変位の観測値（黒）と計算値（白）。RUNEによって推定された茂木モデルの位置（中央値），範囲をカラーコンターで示す。(b) 推定された各パラメターの頻度分布。青の破線が中央値を示す（Ohzono et al., EPS, in review）。

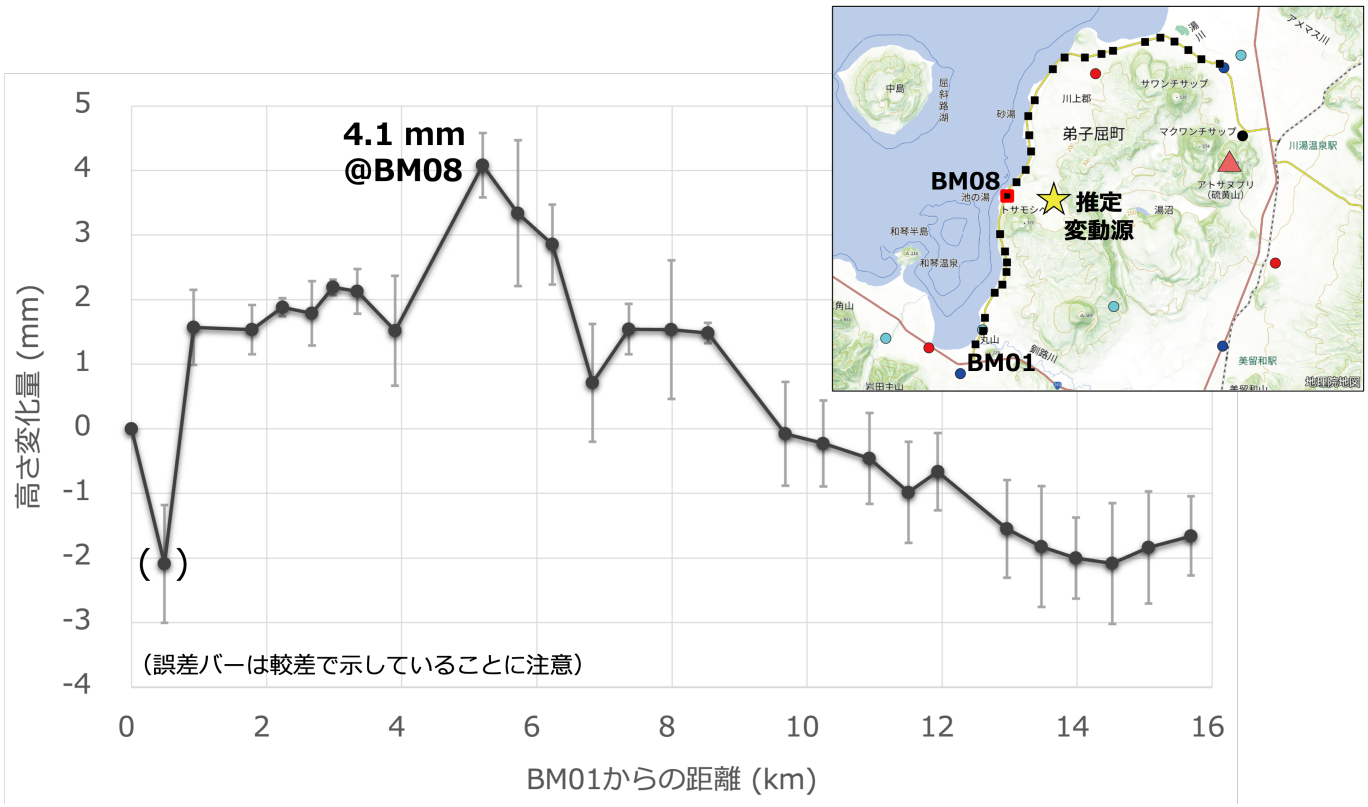

図3. 2023年9-10月および2024年9月の水準測量から得られた上下変動分布。
右上図の黒い四角がベンチマークとなっている。星は図2で求めた推定変動源の位置に対応する。