

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03794

研究課題名(和文)地震学的手法によるグリーンランド氷床の底部融解の準リアルタイム検出

研究課題名(英文) Quasi-realtime detection of basal melting of the Greenland Ice Sheet by seismological methods

研究代表者

豊国 源知 (Toyokuni, Genti)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：90626871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：北極グリーンランドでは、氷床上の苛酷な環境のため、本格的な地震観測網が長らく展開されていなかった。本課題では新設された地震観測網「GLISN」で得られた地震波形やP波到着時刻データを解析し、本地域下の地殻・マントル構造や、氷床全体の地震波減衰定数を初めて明らかにした。主要な成果は、グリーンランド直下に、核-マントル境界からマントル遷移層まで上昇するホットプルームを発見し「グリーンランドプルーム」と命名したこと、さらにそれが、大西洋中央海嶺に沿って分布する活火山や氷床底部融解への熱の供給源である可能性を指摘したことである。これらを含む一連の成果は4篇の論文として国際誌に掲載された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

グリーンランドとその周辺地域では、氷床の底部融解やスバル諸島西部の特異的な高地殻熱流量、大西洋中央海嶺に沿った活発な火山活動といった現象が知られていたが、これらの間の関連は不明であった。本課題の一連の研究によって、これらはグリーンランドプルームとその支流の活動として統一的に説明が可能となった。特に氷床の底部融解に伴う海水準変動や火山活動による環境変化は我々の生活とも密接に関わる問題であり、その根源となるメカニズムを提唱したことは学術的・社会的意義が極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：In Greenland, located in the Arctic, a steady seismic network had not been deployed for a long time due to the harsh environment on the ice sheet. In this study, we analyze the seismic waveform and P-wave arrival-time data obtained by the newly established seismic network "GLISN", and revealed for the first time the 3-D crust and mantle structure beneath this area, as well as the seismic attenuation (Q factor) of the entire ice sheet. The main achievement is the discovery of a hot mantle plume rising from the core-mantle boundary to the mantle transition zone beneath Greenland, named "Greenland Plume", which may be a heat source for basal melting of the ice sheet and active volcanoes distributed along the Mid-Atlantic Ridge. A series of our achievements have been published as four international papers.

研究分野：地震学

キーワード：グリーンランド 地震波トモグラフィー 地震波形解析 ホットプルーム 地殻 マントル

1. 研究開始当初の背景

北極圏に位置するグリーンランドは安定陸塊として知られており、地表には先カンブリア時代からの岩石が産出する。一部地域に温泉が分布しているものの活火山はなく、島の80%が氷床と呼ばれる厚い氷に覆われていることから、グリーンランドの地下は冷たく静的と考えられてきた。一方、そのすぐ東側には、プレート発散境界である大西洋中央海嶺が存在し、これに沿ってアイスランドやヤンマイエン島の活火山や、スバルバル諸島の地熱地帯が分布している(図1)。アイスランドやヤンマイエン島の火山は、それぞれアイスランドプルーム、ヤンマイエンプルームと呼ばれるホットプルームによって形成されていることから、グリーンランドがどのようにホットプルームと共存しているのかについて長年議論が行われていた。

この問題は地球環境変動とも密接に関わる。グリーンランド氷床は近年の気温上昇に伴う融解が指摘されている。仮に氷床全部が融解した場合、海水準が7m以上上昇すると試算されており、北半球に暮らす我々の生活にも深刻な影響を及ぼす。ところが最近の研究によると、融解の一部はグリーンランドを乗せたプレートが8~2千万年前にアイスランドプルームの上を通過したことによる残留熱のため、氷床底部から進行している可能性が高い(例えば、Rogozhina et al., 2016, NatGeo)。従って正確な海水準変動の予測のためには、高精度な地下構造解析に基づく地殻・マントルを含めた熱的過程の理解が不可欠となる。

北極圏はアメリカ、カナダ、ロシアや北欧諸国が取り巻いており、東西冷戦の戦場になるなど国際的な緊張関係に晒されてきた。近年はアメリカや中国の資源開発競争の場ともなっている。このため国際協力による地球物理観測はほとんど行われておらず、南極や他の地域と比べて地下構造の研究が大幅に遅れていた。こうした経緯から2009年に、11ヶ国の共同プロジェクトである地震観測網「Greenland Ice Sheet Monitoring Network (GLISN: グリスン)」が発足し、現在34観測点の運用とデータ即時公開が行われている(図1)。氷床上には4観測点が置かれているが、このうち3観測点(DY2G, ICESG, NEEM)は日米合同観測隊によって新設されたものである。本課題代表者らは2011~2018年に、毎年現地へ赴きこれらの観測点の設置と保守を行ってきた。2014年には世界初となる氷床からの広帯域・3成分・連続地震波形データのリアルタイム転送に成功するなど、氷床上の観測に対する日本の貢献は極めて大きい。

地面は波浪や人間活動等によって絶えず振動しているため、2観測点で得られた雑微動記録を同じ時間窓で切り出して相互相関を取ると、観測点間を伝播する微弱な表面波の情報が含まれる。連続データを用いて、大量の異なる時間窓から得られた相互相関波形を重合すると、表面波の信号が強められ、2観測点を結ぶ測線下の表面波位相速度等の情報を抽出できるようになる。このような手法は「地震波干渉法」と呼ばれ、自然地震の発生状況に左右されずに地下構造が調べられるという特色を持つ。また観測点配置は固定されているので、十分に長期間の連続データがあれば、地下構造の時間変化の検出も可能である。

本課題代表者らは、GLISN観測網の16点で得られた4.5年間の連続上下動記録に地震波干渉法を適用した(Toyokuni et al., 2018, PEPI)。これはグリーンランド氷床上の全観測点に本手法を用いた初めての研究例であった。相互相関波形の3ヶ月移動平均をとってレイリー波位相速度の変化を調べると、氷床上の観測点を含む測線では、明瞭な季節・経年変化が発見された。さらに、氷床底部が凍結している測線では、夏季に位相速度が増加するのに対し、氷床底部が融解している測線では、夏季に位相速度が減少するという真逆のパターンが発見された。大気圧と積雪荷重はどちらも夏季に高いことから、氷床底部が凍結している測線では、氷床の圧密で地震波速度が増加するのに対し、氷床底部が融解している測線では、圧力融解に伴う融解水の増加で地震波速度が減少すると考えられる。よって表面波の位相速度変化をリアルタイムで観測できれば、氷床底部の温度状態をリアルタイムで検出できる可能性が見いだされた。

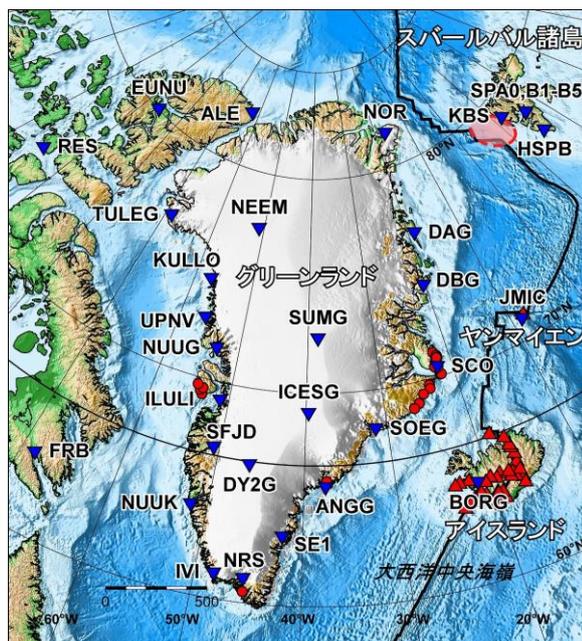


図1. グリーンランドとその周辺地域. グリーンランド内の白色部分が氷床. ▼は GLISN 観測網の地震観測点, ▲は活火山, ●は温泉. 赤点線で囲まれた領域は地熱地帯.

2. 研究の目的

本課題では上記の予備的研究を拡張し、リアルタイム転送された最新のデータを逐次加えることで、氷床底部の状態を時間差 10 日程度の準リアルタイムで検出することを当初目的とした。ところが GLISN 観測網のメンテナンス予算の大部分を担っている NSF の予算が 2019 年に停止されたうえ、2020 年からのコロナ禍でさらに現地での機器保守が困難となり、DY2G 観測点は 2019 年から、ICESG と NEEM 観測点は 2020 年からデータ転送が停止したままである。このため本課題では、下記の 2 つを新たな目的とした。

[目的 1]: グリーンランドとその周辺地域下の地殻とマントル構造を地震波トモグラフィー法で解析し、地表から核-マントル境界に至るまでの大規模な熱的過程について考察する。

[目的 2]: 地震波干渉法によって得られた 2 観測点間の相互相関波形は、抽出が十分に高精度で行われていれば、2 観測点間を伝播する表面波の理論グリーン関数と一致するはずである。これを利用し、観測波形と高度な波形計算手法で得られた理論波形とを比較することで、グリーンランド氷床全体の地震波減衰定数 (Q 値) を明らかにする。

3. 研究の方法

3-1. 地震波トモグラフィー

地震波トモグラフィー法は、大量の地震波到着時刻のデータを解析することで、地球内部の 3 次元地震波速度構造を求める手法である。原理は医療分野の CT スキャンと類似している。本課題では、地殻～上部マントルに感度を持つリージョナルトモグラフィー法 (Zhao et al., 1994, JGR; Zhao et al., 2012, GJI) と、上部～下部マントルに感度を持つグローバルトモグラフィー法 (Zhao et al., 2017, SciRep) の両方を用いて、高精度な P 波速度構造推定を行った。また地震波速度が方向によって異なる「地震波速度異方性」も解析できる最新の異方性トモグラフィー法 (Wang & Zhao, 2008, PEPI; 2013, GJI) も適用した。GLISN 観測網を含む全世界の観測点で取得されて公開されている大量の到着時刻データに加え、波形データから新たに到着時刻を読み取ることでデータ量を増やして解析を行った。

3-2. 理論地震波形計算

本課題では最新の 3 次元地震波伝播モデリング手法「Quasi-Cartesian FDM」(Takenaka et al., 2017, EPS) を用いて、高精度な理論地震波形計算を行った。このプログラムでは地球の曲率、地下の任意の 3 次元密度・地震波速度・減衰構造、地形、および海水層を考慮することができる。本課題ではグリーンランドを 3 つの小領域に分割し、スーパーコンピュータを用いた並列計算を行うことで、極めて現実に近い地震波伝播をシミュレーションした。

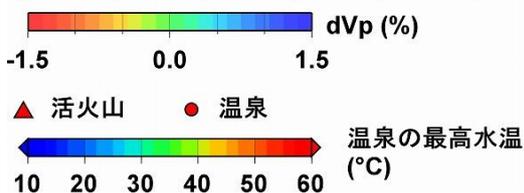
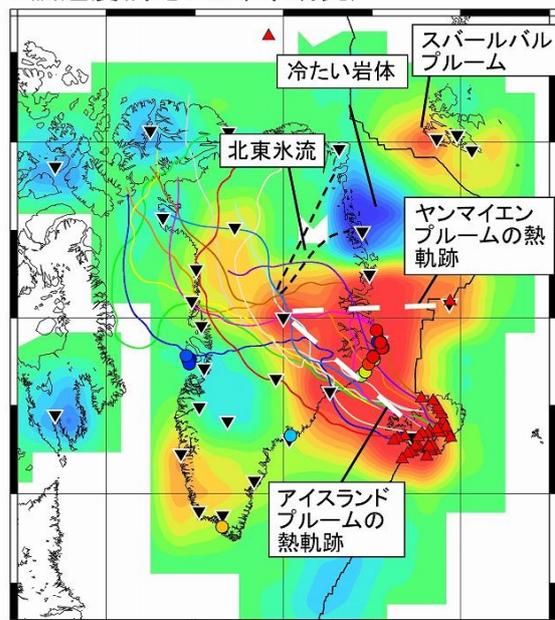
4. 研究成果

4-1. グリーンランドと周辺地域下の地殻・上部マントル P 波速度構造 (Toyokuni, Matsuno, & Zhao, 2020a, JGR)

これまでのグリーンランド全域を対象とした地殻・マントル構造の研究例は、主に表面波を用いた浅部構造の推定がほとんどであった (例えば, Darbyshire et al., 2018, GJI)。また研究ごとに結果のばらつきが大きいことから、深部構造も含めた統合的なモデルの構築が望まれていた。本課題代表者らは GLISN 観測網の P 波到着時刻データをリージョナルトモグラフィー法で解析することで、地表～深さ 700 km までの地殻・マントルの P 波速度構造について次のような成果を得た。

- ① グリーンランド氷床直下の地殻内に、グリーンランドを乗せたプレートが 8~2 千万年前にアイスランドプルームの上を通過したことに伴う熱軌跡に対応する低速度域を見いだした。類似した特徴は先行研究でも指摘されていたが、本研究で初めて、低速度域が地殻内の高温域と一致することが確かめられ、熱軌跡であることが明確となった。さらにこれまで未知であったヤンマイエンプルームの熱軌跡も発見した (図 2)。
- ② グリーンランド氷床が底部で大規模に融けている地域は、①の 2 つの熱軌跡の交点に位置していることがわかった (図 2)。交点では他の地域よりも地殻の温度が上昇していると考えられることから、特異な氷床底部融解を引き起こすメカニズムが初めて明らかとなった。
- ③ スパールバル諸島西部直下の上部マントルにホットプルームを発見し、「スパールバルプルーム」と命名した。この発見により、従来謎であったこの地域の高い地熱の原因が判明した。
- ④ スパールバル諸島南部の上部マントルに、大規模な冷たい岩体を発見した。これは 4.9~3.9 億年前に閉じたイアペタス海の海底を構成していた海洋性リソスフェアの残骸と考えられる。大西洋中央海嶺の海嶺軸は、この岩体を避けるように屈曲していることから、この岩体は大西洋中央海嶺の拡大様式にも影響を与えたものと推察される。

P波速度(深さ5 km, 本研究)



地殻熱流量(先行研究)

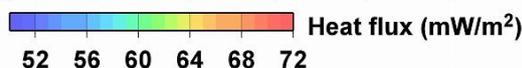
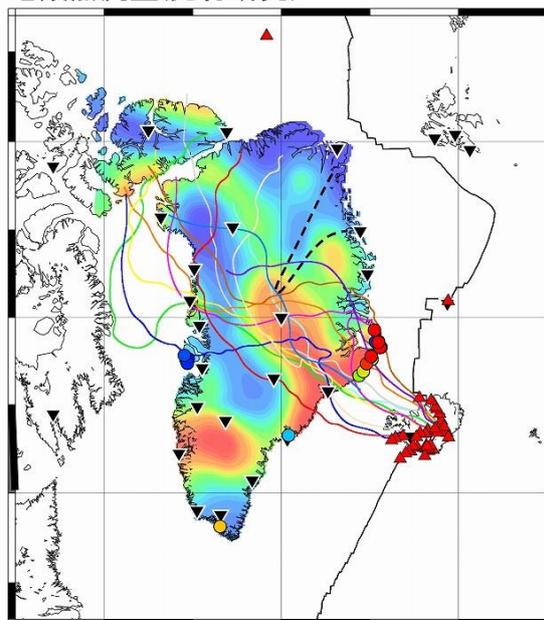


図2. 本課題で得られた地殻内のP波速度構造(左)と先行研究(Martos et al., 2018, GRL)による地殻熱流量(右)の比較. 左図の赤色の低地震波速度域の分布が, 右図の赤色の高地殻熱流量域とよく一致している. 左図の白点線は, 低地震波速度域をなぞって得られるアイスランドプルームとヤンマイエンプルームの熱軌跡, 黒点線で囲まれた地域は, 氷床の底部融解による流れが存在する地域(北東水流)で, その水源は2つの熱軌跡の交点に位置している. ▲は活火山, ○は温泉. 温泉の色は最高水温を表わしており, 低地震波速度・高地殻熱流量域には高温の温泉が分布していることがわかる. 色付きの実線は, 様々な先行研究で推定されたアイスランドプルームの軌跡.

4-2. グリーンランドと周辺地域下の全マントルP波速度構造(Toyokuni, Matsuno, & Zhao, 2020b, JGR)

本課題ではさらに, 最新のグローバルトモグラフィ手法(Zhao et al., 2017, SciRep)を適用することで, グリーンランドとその周辺地域下の深さ300~2889 kmにおける全マントルP波速度構造(上部マントル~核-マントル境界)を推定した. これにより次のような成果を得た.

- ⑤ グリーンランド直下の核-マントル境界からマントル遷移層の底(深さ660 km)まで上昇するホットプルームを発見し, 「グリーンランドプルーム」と命名した(図3).
- ⑥ ヤンマイエンプルームとスバルバルプルームが, 上部マントルにおけるグリーンランドプルームの支流であることを明らかにした(図3). 上昇するグリーンランドプルームの流れは, ④の岩体によって一部遮られ, スバルバル諸島には火山ができなかったと考えられる.
- ⑦ アイスランドプルームは, グリーンランドプルームと2箇所, 西ヨーロッパの別のプルームと1箇所で繋がっていることが判明した. 熱いマントル物質の供給ルートが複数存在することで, アイスランドには周辺の他の地域に比べて圧倒的多数の火山が存在するものと思われる.

上記①~⑦の知見は従来の予想を覆し, グリーンランドの地下が熱的に活発である様子を明らかにした. また周辺地域の熱的活動は, グリーンランドプルームとその支流の活動によって統一的に説明できる可能性も浮上した. これらの結果はグリーンランド氷床の融解メカニズムや地球環境変動とも大きく関わるため, 4-1と4-2の2編の論文は, 研究が社会に及ぼした影響度を示す指標「Altmetrics」で「Journal of Geophysical Research: Solid Earth」誌に発表された1,664篇の論文のうち, 歴代4位と17位(2021年2月時点)を記録した.

4-3. グリーンランドと周辺地域下の P 波異方性構造 (Toyokuni & Zhao, 2021, ESS)

地震波速度異方性は、地震波速度が方位によって異なる現象である。マンツルの流動に伴う鉱物の結晶の選択配向や、マンツルプルームの形状等で引き起こされるので、異方性構造はマンツルの動的状態を知る手掛かりとなる。異方性トモグラフィーは、この地震波速度異方性をトモグラフィー的に 3 次元で明らかにする手法である。本課題代表者らは、最新の異方性トモグラフィー法 (Wang & Zhao, 2008, PEPI; 2013, GJI) に、4-1 で使用した到着時刻データをさらにアップデートして与えることで、グリーンランドと周辺地域下の地表～深さ 750 km の異方性構造を初めて明らかにした。

得られた異方性のパターンはアイスランドプルームの上昇に伴う理論予測とよく一致し、他の研究で指摘されていたアイスランド下のマンツルの background flow の存在も確かめられた。プレート沈み込み帯や大陸衝突帯における異方性トモグラフィーの研究事例は数多いが、ホットプルームに関連した研究例はごく僅かしかなく、本研究が先駆的な研究事例となった。

4-4. グリーンランド氷床の地震波減衰推定 (Toyokuni, Komatsu, & Takenaka, 2021, JGR)

本課題代表者らの先行研究 (Toyokuni et al., 2018, PEPI) では、地震波干渉法を用いて観測点間を伝播するレイリー波の波形を抽出し、その位相速度変化を調べた。しかし地震波干渉法は、「観測点間の常時微動記録の相互相関波形は、長期間平均すると、一方の観測点を発振点、もう一方の観測点を受振点としたグリーン関数に近似される」という仮定に基づいた手法である。そこでグリーンランドにおける相互相関波形にこの仮定が成り立つかどうかを、高精度な理論グリーン関数との比較から検証した。理論グリーン関数の計算には 3-2 で述べた Takenaka et al. (2017, EPS) の手法を用いた。結果として、観測された相互相関波形と理論グリーン関数は、エネルギーが最大となる 0.1-0.3 Hz の帯域で非常によく一致し、本地域における観測相互相関波形がグリーン関数に近似されることが初めて実証された。

さらにシミュレーションでは、パラメータを様々に変えて複数回の計算を行うことができるため、相互相関波形の特徴を最もよく説明する氷床の Q 値をグリッドサーチ的に求めた。結果として、氷床の P 波の Q 値 (Q_p) と S 波の Q 値 (Q_s) は、 $10 \leq Q_p, Q_s \leq 50$ となり、氷床が非常に高減衰であることが実測された。氷床の高減衰は、氷河の末端等で行われたローカルな観測で示した研究例が散見されるだけであり、伝播距離数 100 km を超えるような長距離の伝播で確認した例は本研究が初めてである。また周囲に比べ比較的低減衰の領域の存在も明らかとなった。Q 値は氷床内部の温度状態や構造を反映しており、周囲に比べ低減衰の領域は、氷床が大規模に融解・再凍結して、気泡の混じらない氷が発達している場所と推察された。

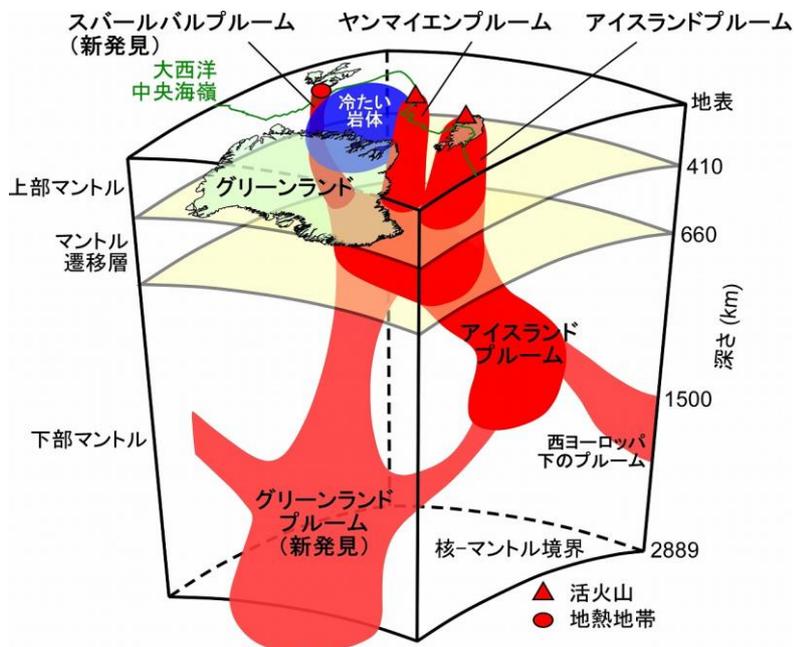


図 3. 本課題で発見されたグリーンランドプルーム、スパーバルプルーム、グリーンランド北東沖の冷たい岩体と、既知のアイスランドプルーム、ヤンマイエンプルームとの相互関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Toyokuni, G., Matsuno, T., & Zhao, D.	4. 巻 125(12)
2. 論文標題 P wave tomography beneath Greenland and surrounding regions: 1. Crust and upper mantle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB019837
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020jb019837	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toyokuni, G., Matsuno, T., & Zhao, D.	4. 巻 125(12)
2. 論文標題 P wave tomography beneath Greenland and surrounding regions: 2. Lower mantle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB019839
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020jb019839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toyokuni, G. & Zhao, D.	4. 巻 8
2. 論文標題 P-wave tomography for 3-D radial and azimuthal anisotropy beneath Greenland and surrounding regions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth and Space Science	6. 最初と最後の頁 e2021EA001800
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021EA001800	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toyokuni, G., Zhao, D., & Chen, K. H.	4. 巻 312
2. 論文標題 Structural control on the 2018 and 2019 Hualien earthquakes in Taiwan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 106673
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pepi.2021.106673	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Toyokuni, G., Komatsu, M., & Takenaka, H.	4. 巻 126
2. 論文標題 Estimation of seismic attenuation of the Greenland Ice Sheet using 3 D waveform modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2021JB021694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB021694	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takagi, R., Toyokuni, G. & Chikasada, N.	4. 巻 224(3)
2. 論文標題 Ambient noise correlation analysis of S-net records: extracting surface wave signals below instrument noise levels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1640-1657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa548	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao, D., Toyokuni, G., & Kurata, K.	4. 巻 225(1)
2. 論文標題 Deep mantle structure and origin of Cenozoic intraplate volcanoes in Indochina, Hainan and South China Sea	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 572-588
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa605	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toyokuni, G, H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs, and D. Zhao	4. 巻 277
2. 論文標題 Changes in Greenland ice bed conditions inferred from seismology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Earth Planet. Inter.	6. 最初と最後の頁 81-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2017.10.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Toyokuni, G., Matsuno, T. & Zhao, D.
2. 発表標題 P-wave tomography beneath Greenland and surrounding regions
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyokuni, G., Kanao, M. & Tsuboi, S.
2. 発表標題 Seismic observations in Greenland by a joint USA and Japanese GLISN team (2011-2019)
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 豊国源知・趙大鵬
2. 発表標題 グリーンランドとその周辺地域下のP波鉛直異方性および方位異方性トモグラフィ
3. 学会等名 可聴下波動伝播特性による極域の多圏融合物理現象解明に関する研究集会 - I
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhao, D., Hua, Y. & Toyokuni, G.
2. 発表標題 Seismic imaging of the Tohoku megathrust zone using S-net and Hi-net data
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katayama, Y., Zhao, D. & Toyokuni, G.
2. 発表標題 Whole-mantle P-wave tomography beneath East Asia
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takagi, R., Ishigami, A., Toyokuni, G., Azuma, R. & Yamamoto, M.
2. 発表標題 Seismic velocity structure along the Japan trench inferred from ambient noise and teleseismic surface waves observed by S-net
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 趙大鵬, Hua, Y., 豊国源知, Yu, Z.
2. 発表標題 S-netデータによる東日本前弧域の不均質構造と地震発生機構
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山悠, 趙大鵬, 豊国源知
2. 発表標題 S-net観測網を用いた東北日本前弧域の3次元S波速度構造
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsuno, T., G. Toyokuni, and D. Zhao
2. 発表標題 P-wave tomography beneath Greenland
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyokuni, G., H. Takenaka, M. Komatsu, R. Takagi, M. Kanao, and S. Tsuboi
2. 発表標題 Q-factor estimation for Greenland ice sheet using 3-D seismic waveform modeling
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyokuni, G., M. Kanao, S. Tsuboi, and Y. Tono
2. 発表標題 Seismic observations in Greenland by a joint USA and Japanese GLISN team (2011-2018)
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松野貴也・豊国源知・趙 大鵬
2. 発表標題 グリーンランドにおけるP波走時トモグラフィ
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyokuni, G., T. Matsuno, and D. Zhao
2. 発表標題 P-wave tomography beneath Greenland
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kanao, M., G. Toyokuni, and S. Tsuboi
2. 発表標題 A decade of scientific contribution to the Greenland Ice Sheet Monitoring Network (GLISN)
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Arctic Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 豊国源知・松野貴也・趙 大鵬
2. 発表標題 グリーンランドとその周辺地域下のP波トモグラフィ
3. 学会等名 可聴下波動伝播特性による極域の多圏融合物理現象解明に関する研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toyokuni, G., R. Takagi, H. Takenaka, M. Kanao, S. Tsuboi, and Y. Tono
2. 発表標題 Changes in surface-wave phase velocities below the Greenland Ice Sheet measured from three-component ambient noise correlation method
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toyokuni, G., D. Childs, M. Kanao, Y. Tono, and S. Tsuboi
2. 発表標題 Seismic observations in Greenland by a joint USA and Japanese GLISN team (2011-2017)
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 豊国源知・竹中博士・小松正直・高木涼太・金尾政紀・坪井誠司
2. 発表標題 3次元理論地震波形計算によるグリーンランド氷床のQ値の推定
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 豊国源知
2. 発表標題 グリーンランドGLISN観測の現況
3. 学会等名 可聴下波動伝播特性による極域の多圏融合物理現象解明に関する研究集会IV
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊国源知
2. 発表標題 GLISN関連の研究の進捗状況：地震波トモグラフィーによる予備的成果
3. 学会等名 可聴下波動伝播特性による極域の多圏融合物理現象解明に関する研究集会IV
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

グリーンランドの地下深くに隠されていた「熱い流れ」
<https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20201207-11336.html>
Newly Discovered Greenland Plume
https://www.tohoku.ac.jp/en/press/greenland_plume_drive_thermal_activities.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------