

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17742

研究課題名(和文) グリーンランドで観測される地震波形与える氷床の影響の解明

研究課題名(英文) Study for estimating the influence of the Greenland ice sheet on observed seismograms

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年は南極・グリーンランドともに氷床上での地震観測が行われているが、理論的に氷床が観測波形に与える影響を調べた研究はなかった。我々は局地的な地震波伝播を効率良くモデリングできる数値計算手法を開発し、現実的な氷床モデルを用いた理論地震波形計算を行った。その結果、氷床内部にS波がトラップされて形成される地震波相「Le波」の存在が理論的に予測された。また氷床底部に感度を持つ表面波を観測することで、その位相速度の季節・経年変化のパターンが、氷床底部の温度状態(凍結か融解か)の違いによって逆転する可能性を見出した。この結果は、氷床底部からの氷の融解を直接的にモニタリングできる可能性を秘めており興味深い。

研究成果の概要(英文)：We calculate regional synthetic seismograms for a realistic structure model beneath Greenland, including surface topography and ice sheet thickness, for observations of the multinational Greenland Ice Sheet monitoring Network (GLISN). In our computations for a realistic ice sheet model, the near-surface seismic source produced a very characteristic wave train with a group velocity smaller than the S-wavespeed in the ice, considered to be an ice-sheet guided S wave, developed by the superposition of post-critical reflections between the free surface and the ice bed. We named this wave "Le". Furthermore, we observed seasonal/long-term changes in Rayleigh-wave phase velocities at the bottom of the ice sheet, and found that the patterns of the velocity changes could be opposite due to difference in ice bed conditions (frozen or thawed). These results might be useful to directly obtain meltwater amount at the ice sheet base.

研究分野：地震学

キーワード：グリーンランド氷床 地震観測 地震波伝播モデリング 理論地震波形計算 地震波干渉法 表面波位相速度変化 圧力融解 GLISN

1. 研究開始当初の背景

グリーンランドや南極の氷床上では、過酷な環境における観測点の設置・維持、データ転送の難しさから、最近まで稠密な地震観測網が展開されてこなかった。しかし南極大陸では、国際極年 (IPY2007-2008) に伴うプロジェクト (例えば AGAP, POLENET) によって、航空機を用いた機動観測が採り入れられ、内陸氷床上に 100 点程度の地震観測点が展開された (例えば, Kanao et al., 2013, *IJG*)。一方グリーンランドでも、2009 年に国際共同観測の「グリーンランド氷床モニタリング観測網 (Greenland Ice Sheet Monitoring Network; 略称 GLISN)」計画が発足し、2011 年以降、氷床上 4 点を含む 34 点の地震観測点が稼働している。特に日米合同観測隊によって新設された氷床上の 3 観測点 (DY2G, ICESG, NEEM) は、氷床が地震波形に与える影響や、氷床の内部構造を調べるための貴重なデータをもたらす。本課題代表者は 2011 年以降、毎年現地へ赴きこれらの観測点の保守を行ってきた。2014 年以降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を続けており、氷床上の観測に対する日本の貢献は極めて大きい (図 1)。

南極やグリーンランドにおける観測地震波形は、内陸部では厚さ 3 km 程度の氷床の影響を受け、沿岸域では海洋や、急激な地形変化の影響を受けるため、通常的地域には見られない特徴を有する。氷床に関連した特徴的な波形の観測事例は、1960 年代の論文で報告された (Robinson, 1968, *JGR*)。このような観測地震波形を解釈する際には、岩石の物性に加えて、氷床・地形・海洋・大気の影響を正確に考慮できる地震波伝播の数値モデリングが不可欠である。しかし本課題開始時点では、氷床の影響を数値計算等で理論的に取り扱った研究は行われていなかった。

本課題代表者はこれまで、全地球を伝搬する地震波を精度と効率よく計算することができる数値計算手法の開発を目指し、球座標系での差分法を用いたプログラム開発を行ってきた。この計算手法では地球中心と震源とを結ぶ軸の周りに軸対称な構造を仮定して、地球の 2 次元断面上のみで 3 次元の地震波を計算するため、3 次元の地球モデルをフルに取り扱う場合の 1 万~10 万分の 1 に計算時間やメモリを節約することが可能である。本プログラムは、研究開始当初の時点で、地球の任意の構造断面、任意のモーメントテンソル点震源、非弾性減衰、地球中心、および地球の物質の自己重力の効果を考慮することができた (例えば, Toyokuni et al., 2005, *GRL*; Toyokuni & Takenaka, 2006, *EPS*; Toyokuni & Takenaka, 2012, *PEPI*)。

2. 研究の目的

しかし氷床に起因する観測地震波形を説明するためには、計算領域をグローバルから

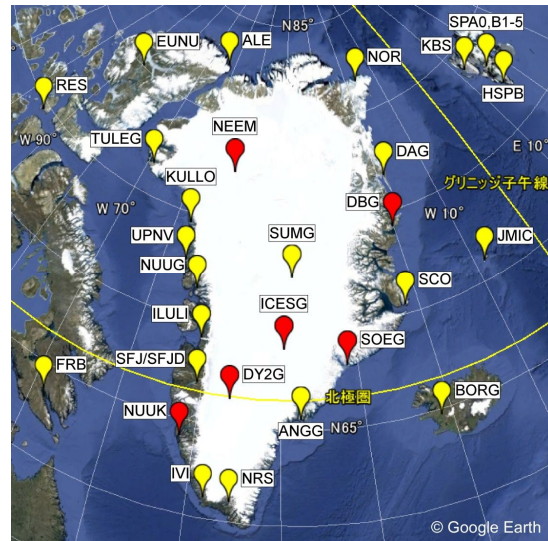


図 1: GLISN 地震観測点の分布。赤色は日本隊が設置・メンテナンスを行っている点。黄色はその他の点。

ローカルにして高周波まで計算すること、氷床や海陸境界などの任意の地形を導入すること、海洋・大気の影響を考慮することが必要である。本課題の第一の目的は、こうした計算プログラムの拡張を行い、氷床の影響を受けた地震波動場の特徴を、理論的に調べることである。

また、南極やグリーンランドはローカルな地震活動度が小さいため、氷床の影響を受けた地震波形の観測例もあまり蓄積されていない。波浪等によって常時励起されている微弱な表面波情報を抽出すれば、地震活動度が小さい領域でも効果的に地震波形の情報を得ることができる。本課題の第二の目的は、GLISN 観測網のデータを用いて、氷床を伝播する表面波の観測波形を抽出することである。

3. 研究の方法

3-1. 理論地震波形計算

地震波伝播シミュレーションでは、ある地下構造モデルと震源モデルを与えて、地震波伝播の支配方程式を数値的に解くことで、任意の地点で観測される地震波形を理論的に予測する。モデリング手法には様々なものが存在するが、計算精度と効率の良さを併せ持っている手法は少ない。「軸対称 2.5 次元モデリング」は、その代表的な手法である (Toyokuni et al., 2012, *InTech*)。この手法では、震源を通る鉛直軸の周りに構造の軸対称性を仮定することで、3 次元の空間の広がりの効果を 2 次元断面に落とし込んだのち、その断面内において、面内運動 2 成分と、面外運動 1 成分の、3 次元の波動伝播を計算する。「波動場 3 次元、構造 2 次元」という意味で、「2.5 次元」という呼称が用いられている。計算は断面上だけで行うので計算資源を節約でき、計算時間やメモリは 3 次元でフルに計算する場合の数千~数万分の 1 で済む。

また 3 次元の波動場が得られるので、観測地震波形と直接比較できるというメリットを持つ。計算では最初に回転対称軸を与える必要があることから、座標系としては球座標系と円筒座標系が利用される。

我々はこれまで、地球や他の天体の全球地震波伝播をシミュレーションするため、球座標系を使ったプログラム開発を行ってきた。これを地球表層のローカルな領域のみに特化したプログラムに拡張するため、以下のよう円筒座標系を導入した。

円筒座標系(z, r, ϕ)において、 z 軸を鉛直下方、 r 軸を水平方向にとって、方位角を ϕ で表すと、 $r=0$ を対称軸とした zr 断面上で 2.5 次元計算が可能となる。 zr 座標は、 r 軸が $r=0$ で反転することを除けば 2 次元デカルト座標系と同じ扱いができるので、地表面を $z=0$ とおいた矩形断面上で計算が行える。矩形断面では地表の曲率を考慮できないので、シミュレーションの対象としては、地表を平面として取り扱える、局地的(伝播距離 ≤ 1000 km)な地震波伝播が適している。

円筒座標系を用いた 2.5 次元計算は、1960 年代から局地的な地震波伝播シミュレーションに活用されてきたが、上述の r 軸が反転する問題は、Takenaka et al. [2003, *GRL*] が通常の円筒座標領域 ($-\infty < z < \infty, 0 \leq r < \infty, -\pi \leq \phi \leq \pi$) の代わりに「準円筒座標領域」($-\infty < z < \infty, -\infty < r < \infty, -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$) を導入することで初めて解決された。準円筒座標領域を用いると、構造断面は $\phi=0$ における 1 枚の矩形のみで表され、この面には任意の不均質構造モデルが入力できる。座標軸の取り方を変えるだけなので、従来の軸対称モデリングのメリットは保存したまま、非対称な構造モデルが取り扱える。Takenaka et al. [2003, *GRL*] は爆破地震探査を想定した研究であったことから、計算では軸対称な震源のみを扱っていた。本課題ではこの手法をさらに拡張し、断層を含む任意の震源メカニズムと地形・海洋・大気の導入を行った [Toyokuni et al., 2015, *Polar Science*]。これにより、氷床を含む現実的な不均質構造断面での地震波伝播モデリングが可能となった。

氷床が観測地震波形に与える影響を調べるため、本課題では以下の 4 つの計算を実行した。(1) FLAT2.0-0: 氷床が厚さ 2 km 一定の水平成層構造と仮定し、震源を氷床直下に置く；(2) FLAT0.5-0: 氷床が厚さ 0.5 km 一定の水平成層構造と仮定し、震源を氷床直下に置く；(3) TOPO-0: 現実的な地形・氷床厚分布を用い、震源を氷床直下に置く；(4) TOPO-5: 現実的な地形・氷床厚分布を用い、震源を氷床下 5 km に置く。構造モデルや詳細な震源位置は表 1 と図 5 に示した。計算は水平 (r) 700 km、鉛直 (z) 150 km の構造断面を、14000×3000 の空間差分格子に分割して行った。格子間隔は水平・鉛直ともに 0.05 km である。時間刻みは 0.0025 s とし、励起後 150 s まで計算した。震源にはピュア

な縦ずれ断層型のメカニズムを用い、震源時間関数として幅 2 Hz のベル型パルスを入力した。

3 - 2 . 表面波の観測波形の抽出

地震活動度が小さい地域でも地震波形を抽出する手法として近年注目されているのが「地震波干渉法」である。これは脈動等で励起された常時微動の連続波形が 2 観測点で得られている場合、2 観測点の波形の相互相関関数を長期間に亘ってスタックすることで、観測点間を常時伝播している微弱な地震波(主に表面波)の信号を強めて抽出する手法である。本課題の解析では、グリーンランド全域と周辺の島に分布した 16 観測点における 2011 年 9 月~2016 年 2 月の 4 年半の連続上下動記録を用いた。16 観測点のうち、氷床上に設置された地震計は 4 点である。各観測点における連続記録は、長さ 20 分のセグメントに分割し、イベント波形や異常値の除去、機器応答特性補正、白色化、二値化を施した。これらの前処理を行ったセグメントについて、観測点ペアごとに相互相関関数を計算した。セグメントごとの相互相関関数をスタックして日平均波形を得た後、さらに長期間の平均波形を得た [Toyokuni et al., 2018, *PEPI*]。

グリーンランド南東沖には世界的に見ても非常に強い脈動源が存在しているので、0.1-0.3 Hz の周波数帯を用いることで、ある程度時空間的に安定した励起源によるレイリー波の波動場を抽出できる。またこの周波数帯の表面波は、約 3~10 km の深さに感度を持つ。グリーンランド氷床は最厚部で 3 km 以上の厚さがあるので、氷床上の 4 点を含むペアについては、氷床と地殻との接触部分の情報抽出できる。氷床内部は気温、大気圧、積雪、気候変動等によって季節・経年変化していると考えられるので、本課題ではレイリー波位相速度の時間変化の検出も試みた。これは、10 日ずつずらしながら相互相関関数の 3 ヶ月平均波形を求めた後、4 年半の平均波形をリファレンスとして、各 3 ヶ月平均波形の位相ずれを検出し、それを観測点ペア直下の平均的なレイリー波位相速度変化に焼き直すことで行った [Toyokuni et al., 2018, *PEPI*]。

4 . 研究成果

4 - 1 . 理論地震波形計算

図 2 は、4 つのシミュレーションで得られた理論波形を、3 つの震央距離 ($\Delta=50, 100, 150$ km) について並べて表示した図である。以下ではこれらの理論波形計算の主な成果を抜粋して述べる。

FLAT2.0-0

氷床が厚さ 2 km 一定の水平成層構造と仮定し、震源を氷床直下に置いた場合、極めて継続時間の長い S 波後続波が現れた。氷床を

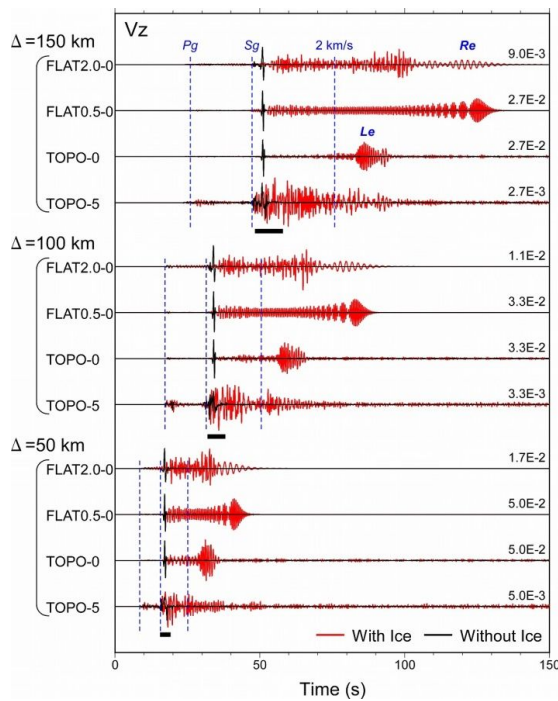


図 2: 4 つのシミュレーションによる、震央距離 $\Delta=50, 100, 150$ km の地表における上下動の理論波形。震央距離とシミュレーションの識別名はパネルの左に表示した。赤線は氷床あり、黒線は氷床なし。主要なフェーズ (Pg, Sg など) の到着時刻を青点線で示した。

入れない場合 (図 2 黒線), 地殻の中を通過した S 波 (Sg) と表面波による単純なパルスの到着後, 振幅はほぼゼロになっている。一方, 氷床を入れた場合 (図 2 赤線), Sg 到着後, 数 10 秒以上大振幅が継続する。大振幅の継続時間は震央距離に比例し, $\Delta=150$ km の地点では 80 s にも達している。

地震波伝播のスナップショットを確認すると, 氷床を入れた場合の継続時間の長い S 波後続波は, 氷床内部に地震波のエネルギーが強くトラップされることで起きる現象であることがわかる。氷床直下に与えられた震源から放出された地震波は, エネルギーの大部分が氷床に入射し, 薄く低地震波速度の氷床内部を多重反射しながら伝播する。氷床と基盤岩との境界が水平な場合, 全反射が卓越することで, 地震波のエネルギーは氷床から漏れ出しにくく, 継続時間の長い S 波後続波が形成される。

低地震波速度の層内で地震波がトラップされる現象としては, 地殻内部を多重反射する S 波である「Lg 波」がよく知られている。一方, 氷床内部の多重反射は, P 波の多重反射の観測事例が Robinson [1968, JGR] で示されているものの, 理論的研究は本研究が最初である。本課題では, 氷床を意味するドイツ語「Eisdecke」の頭文字から, 氷床内を多重反射する S 波を「Le 波」と命名した。同様に, 地殻表面を伝播するレイリー波は「Rg 波」と呼ばれることから, 氷床表面を伝播するレイリー波を「Re 波」と命名した。

TOPO-0

現実的な地形・氷床厚分布を用い, 震源を氷床直下に置いた場合は, 水平成層の場合と大きく異なる波形が得られた。S 波後続波の大振幅は Sg の到着からかなり遅れて現れるうえ, 継続時間は短く, 波群がコンパクトにまとまっている (図 2 赤線)。震源が浅いため, 地震波のエネルギーの大部分が氷床内に入射する点は FLAT2.0-0 と同じである。しかし地形や基盤岩の凹凸によって P 波から S 波, S 波から P 波への変換が起こり, エネルギーが分散されることに加え, 波の全反射が崩れてエネルギーは次々と地殻内に漏れ出していく。結果として, 氷床内をほぼ水平に伝播する波が選択的に残され, コンパクトな Le 波の波群が現れる。

氷床が観測地震波形に与える影響についての本格的な研究はほとんどなく, 試算が行われる場合も水平成層構造が用いられてきた。本課題では, 水平成層構造モデルと現実的な地形・氷床厚モデルによるシミュレーションを比較して, 構造や震源位置のわずかな違いが, 大きく異なる波形を生み出すことを明らかにした。シミュレーションの結果は次のようにまとめられる: (1) 震源が氷床直下にある場合, 氷床の影響が波形に強く表れる; (2) 氷床内部での多重反射による地震波エネルギーのトラップ機構と, 地形・基盤岩の起伏によるトラップ崩壊機構の複合度合いによって, 特徴の異なる波動場が形成される; (3) 氷床内にトラップされた S 波を「Le 波」, 氷床表面を伝播する表面波を「Re 波」と命名した [Toyokuni et al., 2015, *Polar Science*]。氷床上で得られたデータの普及に伴い, 氷床そのものの構造解析や氷床の影響の除去を目的として, 観測波形に氷床が与える影響の研究は重要な課題となりつつある。本研究は世界に先駆けて, 氷床に関連した地震波動場の理論的予測を行い, その端緒を開いた。なお本研究の計算は弾性波のみを扱っているが, 実際の氷床や岩石は完全弾性体からずれた性質を持つため, 波動場を減衰させる (= 非弾性減衰)。今後は氷床の非弾性減衰も考慮し, さらに多くの構造断面について大規模な計算を実行し, 観測波形と理論波形の直接比較を行っていきたい。

4 - 2 . 表面波の観測波形の抽出

GLISN 観測網の 120 観測点ペアに地震波干渉法を適用することで, ほとんどのペアで明瞭なレイリー波の波形を抽出することに成功した。さらにレイリー波位相速度の時間変化についても, 次のような興味深い結果を得た。(1) グリーンランド南西部の露岩域の観測点ペアについては, 夏場にレイリー波位相速度が減少しており, 先行研究 [Mordret et al., 2016, *SciAdv*] と調和的な結果が得られた, (2) 氷床上の観測点を含むペアについては, 夏期と経年で速度減少が見られるペア,

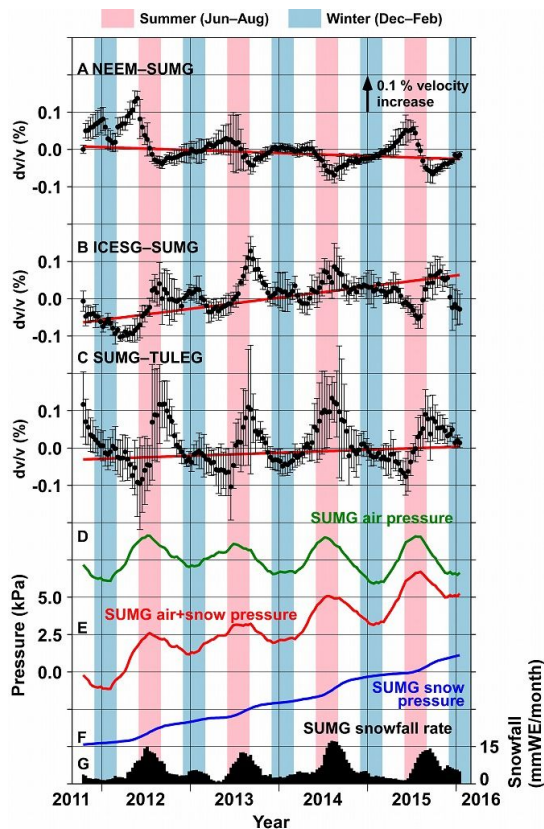


図 3：3 つの観測点ペアにおけるレイリー波位相速度変化(A～C)と、SUMG 観測点における大気圧変化(D)、積雪率(G)、積雪による圧力変化(F)、大気圧と積雪による圧力変化の和(E)との比較。青と赤の背景色は冬期(12～2月)と夏期(6～8月)を示す。A～Cの位相速度変化には2 エラーバーを付した。また回帰直線(赤線)の傾きが経年的な速度変化を示す。

夏期と経年で速度増加が見られるペア、速度の増減が見られないペア、がある、(3)レイリー波位相速度の季節・経年変化は、氷床上における大気圧の季節変化、および積雪による荷重の季節・経年変化と対応しているように見える(図3)。

一方で、大気圧変化と積雪の空間パターンはグリーンランド全域でほぼ一定であるので、これのみで(2)で挙げたようなレイリー波位相速度変化の複雑な空間パターンは説明できない。このような複雑なパターンが生じる要因としては、微動源の時空間変化による見かけの速度変化を検出している可能性、および氷床底部の温度状態(凍結か融解か)を反映している可能性、が考えられる。

微動源の時空間変化に起因する場合、速度変化に顕著な方位依存性が見られることと、観測点間距離が短いほど速度変化が顕著になる事が指摘されている。今回の結果は、方位角が5°以内のペアについても、全く異なる速度変化のパターンが見られること、観測点間距離と速度変化の程度に顕著な相関が見られないことから、見かけの速度変化を検出している可能性は少ないと思われる。

これに対し、温度シミュレーションから予

測された氷床底部の融解・凍結の空間パターン〔Rogozhina et al., 2016, *NatGeo*〕と速度変化のパターンは比較的良好に対応しているように見える。例えば、氷床底部が圧力融解していると考えられるNEEM-SUMGペアでは夏期に速度減少が見られるのに対し、氷床底部が凍結している場所に位置するその他のペアでは、夏期に速度増加が見られる。また融解域と凍結域とをまたぐペアでは速度変化が見られない。以上のことから、観測された速度変化を説明する次のようなモデルを提案した：氷床底部が圧力融解している場所に位置するペアでは、大気圧・積雪の増加に伴い圧力融解が進み、氷床底部で融解水が増加することでレイリー波位相速度は減少する。一方、氷床底部が凍結している場所に位置するペアでは、大気圧・積雪の増加に伴い氷床が圧密され、レイリー波位相速度は増加する。融解域と凍結域とをまたぐペアでは、2つの効果が相殺されて顕著な速度変化が見られない〔Toyokuni et al., 2018, *PEPI*〕。

グリーンランド北西部における氷床の圧力融解は、グリーンランドを乗せたプレートが約5000万年前にアイスランドのホットスポット上を通過したことによる残留熱に起因すると考えられている。氷床下河川による排水等を考慮すると、氷床底部における融解水と氷の存在度は平衡状態にあると考えられるので、短期的には氷床表面の新たな積雪による圧力増加の分だけ氷床底部で融解水が増えると思われる。このような考えに基づき、融解水によるレイリー波位相速度の低下を理論的に見積もると、NEEM-SUMGペアにおける夏期の0.1%程度の速度減少を説明することができる。

以上のようなモデルが正しいなら、地震波干渉法で氷床底部の状態をリアルタイムで検出できる可能性もある。今後は3成分の波形を用いるなどして、さらにモデルの検証を進めていきたい。

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2件)

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs, and D. Zhao, Changes in Greenland ice bed conditions inferred from seismology, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有, 277, 81–98, 2018.

DOI:10.1016/j.pepi.2017.10.010

Toyokuni, G., H. Takenaka, M. Kanao, S. Tsuboi, and Y. Tono, Numerical modeling of seismic waves for estimating the influence of the Greenland ice sheet on observed seismograms, *Polar Science*, 査読有, 9, 80–93, 2015.

〔学会発表〕(計 6 件)

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs, and D. Zhao, Seismological evidence for heterogeneous ice sheet basal conditions, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 20 May 2017

Toyokuni, G., D. Childs, M. Kanao, Y. Tono, T. Himeno, and S. Tsuboi, Seismic observations in Greenland by a joint USA and Japanese GLISN team (2011-2016), JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 20 May 2017

Toyokuni, G., D. Childs, M. Kanao, Y. Tono, T. Himeno, and S. Tsuboi, Seismic observations in Greenland by a joint USA and Japanese GLISN team (2011-2015), JpGU and AGU to Collaborate in JpGU Annual Meetings in 2016, 22 May 2016

Toyokuni, G., H. Takenaka, M. Kanao, S. Tsuboi, and Y. Tono, Seismic interferometry using broadband continuous seismic waveform data from the Greenland ice sheet, JpGU and AGU to Collaborate in JpGU Annual Meetings in 2016, 22 May 2016

Toyokuni, G., H. Takenaka, M. Kanao, S. Tsuboi, and Y. Tono, Ambient noise cross-correlation analysis using broadband continuous seismic waveform data from the Greenland ice sheet, The Sixth Symposium on Polar Science, 16 Nov 2015

Toyokuni, G., H. Takenaka, M. Kanao, S. Tsuboi, and Y. Tono, Seismic waveform modelings for estimating influence of the ice sheet on observed seismograms, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, 14 Dec 2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

豊国 源知 (TOYOKUNI, Genti)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：90626871