

jh170026 - NAJ

グリーンランド氷床モデルを用いた 3 次元理論地震波形計算

豊國 源知（東北大学）

概要 北極グリーンランドでは、2011 年から氷床上での本格的な地震観測がスタートした。申請者も観測隊の一員として、7 年間毎年現地で地震計のメンテナンス作業を続けてきた。現在はリアルタイムでのデータ転送も行われ、氷床の影響を受けた地震波形データが蓄積されている。本研究課題は、3 次元理論地震波形計算により、氷床の内部構造と観測地震波形との関係を明らかにすることを目的とした。まず各観測点間の連続記録の相互相関波形から表面波の波形を抽出した。次に氷床の地形や基盤岩地形を考慮した現実的な 3 次元地震波形計算を行い、理論地震波形を得た。観測波形と理論波形とを比較することで、以下のような成果を得た。①相互相関によって抽出された観測波形は、理論波形と十分よく一致しており、観測の精度が確かめられた。②氷床の減衰（Q 値）を変えて複数回計算を行うことで、(QP, QS)=(20,20)が最もよく観測波形を説明することが明らかとなった。氷床の高減衰が震央距離 100 km を超えるような長距離の伝播で初めて確認された研究例はこれまでになく、世界に先駆けた成果が得られた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学 サイバーサイエンスセンター
東京大学 情報基盤センター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

研究代表者：豊国源知（東北大・助教）：
コードの開発と演算の実行，結果の解釈
共同研究者：竹中博士（岡山大・教授）：
コードの開発
共同研究者：江川隆輔（東北大・准教授）：
高速化・最適化支援
共同研究者：小松一彦（東北大・助教）：
高速化・最適化支援

2. 研究の目的と意義

2009 年に、11 ヶ国の国際共同でグリーンランドとその周辺の島嶼地域に広帯域・リアルタイム

地震観測網を構築するプロジェクト「GreenLand Ice Sheet monitoring Network（略称 GLISN）」が発足した。2008 年以前には、厳しい気候条件や氷床へのアクセスの難しさによって、グリーンランドとその周辺の島々に置かれた地震観測点は 16 点しかなく、このうち氷床上の点はわずか 1 点のみであった。GLISN プロジェクトでは、航空機による機動的な観測によって、氷床上へ 3 点の観測点新設を含む、計 33 点の稼働に成功した。

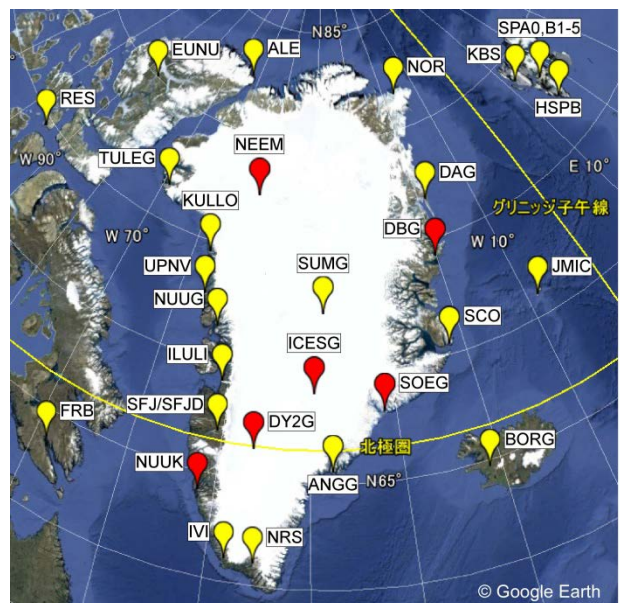


図 1：GLISN 地震観測点の分布。赤色は日本隊が設置・メンテナンスを行った点、黄色はその他の点。

日本は本プロジェクト発足当初からの参加国であり、本格的な観測がスタートした 2011 年から毎年観測隊を派遣して、観測網の構築とメンテナンスに携わっている。申請者も日本の観測隊メンバーとして、これまでの 6 年間に、氷床上の観測点 1 点（観測点コード ICESG）の新設、および他の氷床上の観測点 2 点（DY2G, NEEM）と露岩域の観測点 3 点（NUUK, SOEG, DBG）のメンテナンスを行ってきた（図 1）。プロジェクト全体でも氷床上の観測に携わっているのはアメリカと日本のみであり、氷床上の観測に対する我が国の貢献は極めて大きい。

氷床を通過した地震波の波形は、(1) P 波や S 波の立ち上がりが不明瞭、(2) 周期数秒で小振幅の鋸歯状の波が現れる、(3) S 波の後続波部分に大振幅の波群（点線枠部分）が現れる、といった特徴が見られることが知られている（Toyokuni et al., 2015）。氷床の影響を受けた地震波形を地下構造の解析等に利用する場合は、十分に氷床の影響を除去しないと精度良い解析は望めない。一方で、氷床による波形の大きな変形は、浅い地震の震源決定、氷床内部の構造とその時間変化の解析等に利用できる可能性も秘めている。本研究課題は、最も現実に近い理論地震波動場を計算できる 3 次元シミュレーションにより、氷床の影響を受けた地震波動場の生成メカニズムや氷床の内部構造を明らかにすることを目的とする。

本研究課題は、氷床によって励起された地震波形とその励起メカニズムを専門的に取り扱うものである。このような研究は南極とグリーンランドのどちらの氷床についても行われていなかった。一方、氷床によって波形が大きく歪められることは観測波形から明らかであり、この波形ノイズをどう対処するかは、氷床上での観測事例が増加するにつれて、データ解析に従事する全ての研究者が必然的に直面する課題である。

氷床により励起される波動場が注目されてこなかった背景には、これまで極地で地震観測・データ解析を行った研究者のほとんどが、波形ではなく走時をメインに利用してきたことがある。また

氷床は平面的で単調な分布をしているため、氷床を水平成層構造として扱えば簡単に波動場を再現できるという先入観が存在していた。氷床は地震波速度や密度が極端に小さく、僅かな形状の違いで観測波形は大幅に変化することから、水平成層構造で観測波形を説明するのが難しい。本課題はこのような氷床起源の波形に価値を見出し、励起メカニズムの解明から利用方法までを統一的に研究するものであり、独創的な着眼点を持っていると自負している。

最近申請者らは、氷床表面を伝播する地震波を解析することで、グリーンランド北西部の氷床が基底部で圧力融解を起こしている証拠を世界に先駆けて発見した（Toyokuni et al., 2017）。従来、地球温暖化による海面上昇の影響は、氷床表面の氷の融解を中心に見積もられてきた。地震学的観測と理論地震波形計算によって氷床基底部における融解を定量的に見積もることができれば、海面上昇の予測精度のさらなる向上が可能となる。これは 2015 年 10 月 16 日に全閣僚を構成員とする総合海洋政策本部によって決定された日本の北極政策（<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/arcticpolicy/>）における 2 つの課題（地球環境問題、科学技術）にまたがるテーマであり、極めて重要である。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

地震波形における氷床の影響は、高周波成分ほど顕著に現れる。3 次元構造モデル中を伝播する 3 次元地震波動場の計算を行う「3 次元モデリング」の場合、高周波まで計算を行うためには構造モデルを極めて細かいグリッドに分割する必要がある。特にグリーンランドは南北 2000 km、東西 1000 km もの広がりがあることから、例えば卓越周波数 5 s まで計算を行う場合、南北 4 千 × 東西 2 千 × 鉛直 6 百空間格子 × 2 万時間ステップという大規模な計算が必要となる。加えて構造モデル・震源位置・震源メカニズム等について比較検討を行うためには、少なくとも数 10 例の数値計算を行わなければならないため、当拠点で提供されている大規

模計算機環境が必須となる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本課題は継続課題ではないので該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

本課題の研究内容は、GLISN 観測網の地震計で得られる表面波観測波形の抽出、3 次元理論地震波形計算による表面波理論波形の合成、観測波形と理論波形との比較による地下構造の理解と考察に大別される。以下の各項で成果を報告する。

5-1. 観測地震波形の抽出

本課題前半ではまず、理論波形の比較対象となる観測地震波形の抽出を行った。3 次元計算は格子間隔 500 m 程度で行う予定であるため、この格子間隔でも十分な時空間分解能を持ち、かつ氷床の情報を効率的に抽出できる、周期帯域 3~10 s の表面波に着目することとした。通常表面波は地震イベントが発生しないと励起されないため、そもそも自然地震の少ないグリーンランドでは不向きである。そこで本課題では、雑微動記録を利用して表面波の波形を抽出した。

地面は自然のノイズによって絶えず振動しているので、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スタックすると、表面波の信号が強められ、片方の観測点を仮想的な震源、もう片方の観測点を仮想的な受信点とする表面波のグリーン関数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、地震イベント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。本研究では、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て、合計 90 ペアで安定したレイリー波のグリーン関数を得た (Toyokuni et al., 2017)。

5-2. 3 次元理論地震波形計算

3 次元計算に用いたスキームは、Takenaka et al. (2017)で提案された Quasi-Cartesian FDM である。これは差分法で 3 次元の地震波伝播をモデリングする手法の 1 つで、地球の曲率、地下の 3 次元密度・地震波速度・減衰構造、地形、海水を考慮して、現実的な理論地震波形を計算できる。本課題では現実的な氷床・基盤岩地形データ (ETOPO1) と、Crist1.0 モデルによる地殻・マントル構造を導入して構造モデルを作成した。ただ、グリーンランド全域を離散化すると格子点数が膨大になることから、主要な観測点が分布している 3 つの小領域 (Region1~3) 切り出し、重点的に計算を行った (図 2)。計算には東大情報基盤センター FX10 (216 ノード, 432 プロセッサ, 8 スレッド) と東北大学サイバーサイエンスセンター

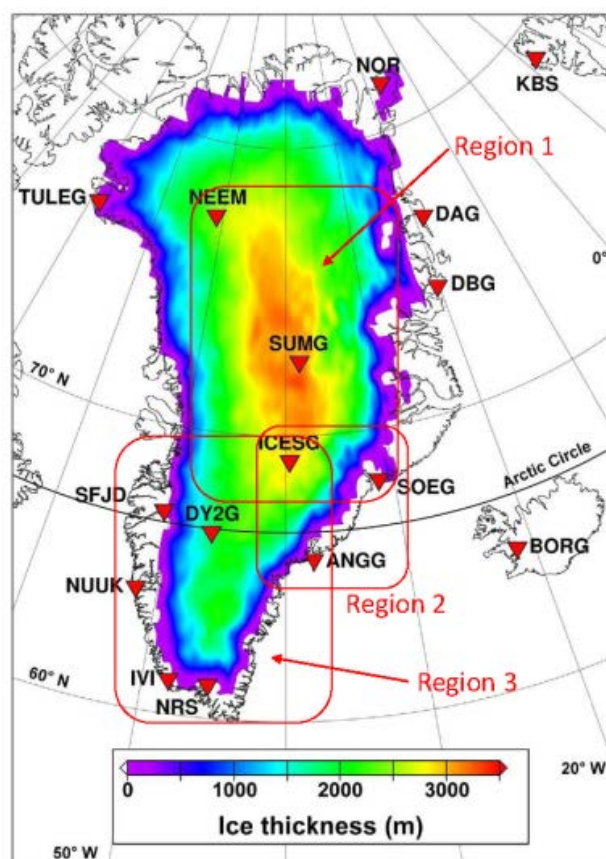


図 2 : 理論地震波形計算に用いた 3 つの小領域。赤三角は観測波形の抽出を行った点。背景の色は氷床の厚さを表す。

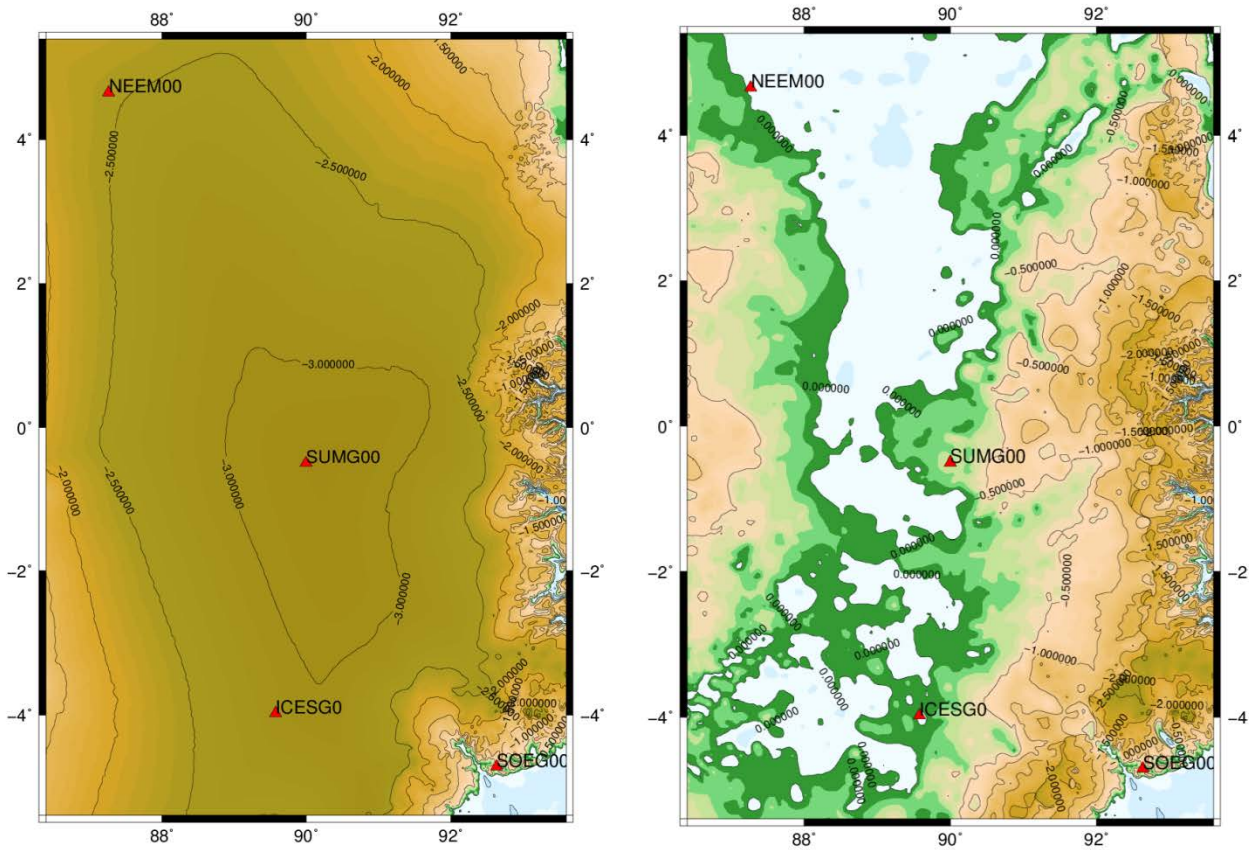


図 3 : Region1 の計算に用いた地表地形 (左) と基盤岩地形 (右). 理論地震波形計算に用いた 3 つの小領域. 赤三角は観測点かつ理論波形の加振を行った点.

表 1 : 3 次元計算の諸元 (Region1)

空間格子間隔	0.0036° × 0.0036° × 0.25 km
空間格子数	3001 × 2001 × 821
時間刻み	0.014 s
時間ステップ数	29001 (406 s 間)

表 2 : 3 次元計算の諸元 (Region2)

空間格子間隔	0.0018° × 0.0018° × 0.1 km
空間格子数	2501 × 2301 × 641
時間刻み	0.005 s
時間ステップ数	40001 (200 s 間)

表 3 : 3 次元計算の諸元 (Region3)

空間格子間隔	0.0036° × 0.0036° × 0.25 km
空間格子数	2701 × 2301 × 821
時間刻み	0.014 s
時間ステップ数	29001 (406 s 間)

SX-ACE を使い, MPI と OpenMP のハイブリッド計算で行った. 各小領域における計算諸元は表 1~3 に示した. また Region1 の計算に用いた地表地形と基盤岩地形を図 3 に示した. 5-1 で得られた観測波形は, 片方の観測点を仮想的な震源 (鉛直加振), もう片方の観測点を仮想的な受信点とするグリーン関数の波形であるので, 理論波形も各観測点にパルス幅 1 s のベル型関数を用いて鉛直加振を行い, 理論グリーン関数を得た. 計算は各小領域について, 氷床の減衰構造 (Q 値) を変えるなどして複数回行った.

5-3. 観測波形と理論波形の比較と考察

観測波形の抽出に用いた地震波干渉法は, 「観測点間の常時微動記録の相互相関波形は, 長期的に平均すると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. 本課題では, まずこの仮定が成り立つかどうかを, 理論グリーン関数と比較して検証した.

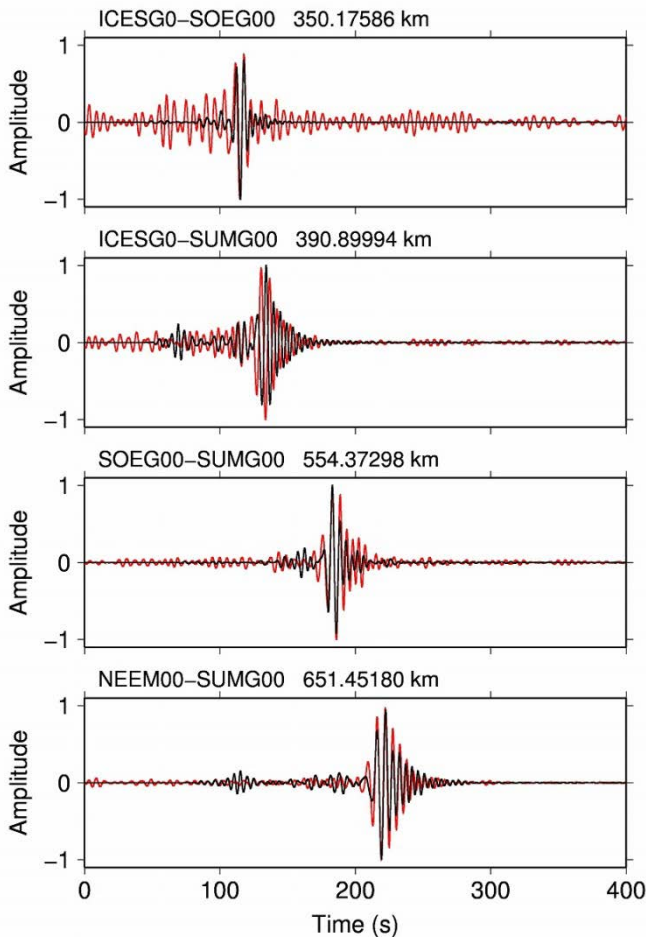


図 4：4 つの観測点ペアにおける観測波形（赤線）と理論波形（黒線）との比較。周期 5~10 s の帯域で比較。

図 4 は Region1 について得られた 4 つの観測点ペアにおける観測波形と理論波形との比較である。一番上のノイズが大きい観測波形以外は、全てのペアで波形の良い一致が見られることから、地震波干渉法で得られた観測波形は、グリーン関数に十分よく近似されていることが確かめられた。

さらに、氷床内部の Q 値を変えて複数回計算を行った結果、P 波と S 波の Q 値の組み合わせについて $(Q_P, Q_S)=(20,20)$ が最もよく観測波形を説明することが明らかとなった。氷床が高減衰であることを、末端の氷河等で行われたローカルな観測で示した研究例は散見される。しかし震央距離 100 km を超えるような長距離の伝播で確認された研究例はこれまでになく、世界に先駆けた成果が得られた。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

前項で示したように、本課題は順調に進行し、世界に先駆けた成果を得ることができた。今後成果をまとめ、国際誌へ投稿する予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs, and D. Zhao (2017) Changes in Greenland ice bed conditions inferred from seismology, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有, 277, 81–98. DOI:10.1016/j.pepi.2017.10.010

(2) 国際会議プロシーディングス

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*, MTT37-03, 2017.

Toyokuni, G., D. Childs, M. Kanao, Y. Tono, and S. Tsuboi, Seismic observations in Greenland by a joint USA and Japanese GLISN team (2011-2016), *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, MTT37-P03, 2017.

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs, and D. Zhao, Seismology reveals ice sheet basal conditions, *IAG-IASPEI*, J01-1-03, 2017.

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, and D. Zhao, Seasonal/long-term changes in Rayleigh-wave phase velocity at the bottom of Greenland ice sheet, *Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5)*, G04-O06, Abstract book, p.229, 2018.

(3) 国際会議発表

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, MTT37-03, Chiba, Japan, 23 May 2017.

Toyokuni, G., D. Childs, M. Kanao, Y. Tono, and S. Tsuboi, Seismic observations in Greenland by a joint USA and Japanese GLISN team (2011-2016), JpGU-AGU Joint Meeting 2017, MTT37-P03, Chiba, Japan, 23 May 2017.

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, D. Childs, and D. Zhao, Seismology reveals ice sheet basal conditions, IAG-IASPEI, J01-1-03, Kobe, Japan, 2 Aug 2017.

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, and D. Zhao, Seasonal/long-term changes in Rayleigh-wave phase velocity at the bottom of Greenland ice sheet, The Eighth Symposium on Polar Science, G04-O06, Tachikawa, Tokyo, Japan, 8 Dec 2017.

Toyokuni, G., H. Takenaka, R. Takagi, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, and D. Zhao, Seasonal/long-term changes in Rayleigh-wave phase velocity at the bottom of Greenland ice sheet, Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), G04-O06, Tokyo, Japan, 18 Jan 2018.

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, 2018 Taking the Temperature of the Antarctic Continent

Workshop (TACTical Workshop), Hobart, Tasmania, Australia, 21 Mar 2018.

(4) 国内会議発表

豊国源知, グリーンランドの 3 成分連続地震波形データを用いた地震波干渉法解析, 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-III, 立川市, 2018 年 3 月 27 日.

豊国源知, グリーンランド GLISN 観測の現況, 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-III, 立川市, 2018 年 3 月 28 日.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)