

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2012～2016

課題番号：24403006

研究課題名(和文) 広帯域地震観測によるグリーンランド氷河地震の発生過程の解明

研究課題名(英文) Broadband seismological observation in Greenland and study of Greenland icequakes

研究代表者

坪井 誠司 (TSUBOI, Seiji)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球情報基盤センター・部長

研究者番号：90183871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：研究計画期間中には、毎年夏季にグリーンランド氷床観測点ICESGで観測点維持作業を実施した。グリーンランド氷床上では冬季に太陽電池パネルを埋める程度の規模で降雪があり、観測を継続するための観測維持作業が必須となる。観測点では太陽電池パネルや衛星電話用のアンテナ等を十分高い位置に露出させ、観測を継続できるようにした。グリーンランド氷床で発生する氷河地震のメカニズムを研究するために、その背景にある氷河流動変動を解析するために広帯域地震計の上下動成分を用いた地震波干渉法解析を行い、冬季の積雪による圧力の増加が氷床底部の圧力融解を引き起こし、地震波速度の低下をもたらした可能性があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have maintained broadband seismograph station in Greenland to define the fine structure and detailed mechanisms of glacial earthquakes within the Greenland Ice Sheet. We have started to operate ICESG station since 2011. We have visited the station every summer and successfully retrieved one year of continuous records from the broadband seismometer. The observed three component seismograms demonstrate that the quality of this ice sheet station is good enough to record not only local earthquakes around Greenland but also teleseismic earthquakes. We use 4.5-year ambient noise surface wave data from seismic stations all over Greenland to detect both seasonal and long-term changes in seismic velocity beneath the inter-station transect lines. We find a clear summer/long-term velocity decrease beneath a line in the north-central inland of the ice sheet, which is considered as an increase of meltwater due to ice sheet pressure melting.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地震 極地 広帯域地震観測 グリーンランド氷床 氷床地震 地殻構造

1. 研究開始当初の背景

グリーンランドは北極圏に位置する地球上最大の島で、表面積の8割が氷床に覆われている。氷床の厚さは沿岸部で1500m、中央部では3000mに達し、中央部から沿岸部へ向けて流動している。このグリーンランド氷床、特にその縁辺部の流出に伴う特徴的な振動現象(氷河地震, Glacial Earthquake)を観測したという報告があった(Ekstrom et al, 2003, 2006, Science)。この地震は高周波(短周期)成分が少なく、明らかに通常の地震とは異なるメカニズムで発生したことを示している。Ekstrom et al (2003)はこの地震が氷床の崩落により励起されたと推定している。さらにEkstrom et al (2006)は、21世紀の最初の5年間の発生頻度が倍になっており、季節変動が見られることから、その活動は氷河の下を流れる水路の変動を反映しており、最近の気候変動による氷床の後退の速度変化が原因となっていることを示唆した。氷河地震は規模が小さく、グリーンランド島内で観測することが望ましいが、グリーンランドはその地理・気候的困難さから、地震観測点数が少ないという問題があった。このようなことから、グリーンランド氷床の氷河地震を継続的に観測するために、国際的なグリーンランド氷河地震観測計画 GLISN (GreenLand Ice Sheet monitoring Network)がアメリカの地震学者を中心に組織された。

2. 研究の目的

本研究計画で明らかにするのは、グリーンランド氷床で発生する氷河地震の発生メカニズムと地震活動の時間的推移である。氷河地震観測計画 GLISN は、既存の観測点も含めて23点の広帯域地震観測点を5年間にグリーンランド島内に構築しようとするものである。図1にはGLISNで計画している観測点分布図を示した。GLISN計画の取り決めから、日本の担当として氷床上の観測点の一つであるICESGに地震計を設置した。グリーンランド島内の地震観測点はFDSNの定常観測点を含め現在海岸地域を中心に9点が設置され、データを取得している。GLISN計画では、20点を越す観測点が設置されることになり、氷床内で発生する氷河地震の観測精度が格段に向上すると期待できる。5年間の研究期間は、十分な数の氷河地震を観測するために最低限必要であり、GLISN計画で設置される地震観測点で取得されるデータを共有することで、年間数個の発生が期待できる氷河地震の時系列変化を精密に同定できる。GLISN計画開始前のデータと合わせることで、全体として10年間程度の氷河地震活動についての情報が得られる。特にGLISN計画では多点における広帯域地震計の地震波形記録が得られるので、氷河地震発生メカニズムについてその発生位置と併せて詳細に決定することが可能となる。このよ

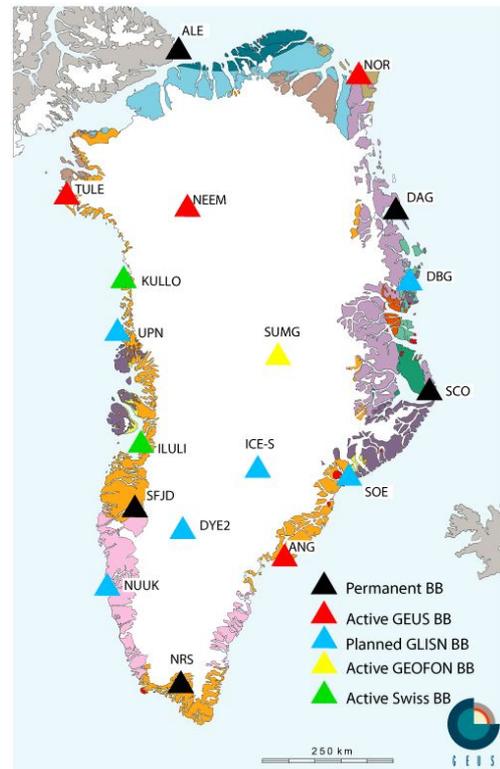


図1 GLISN 計画の観測点分布図

うなデータは、氷河地震の地震カタログとして集計し、たとえば、人工衛星などの氷床流動のデータと比較することで、氷床のダイナミクスとの関連を議論することが出来る。さらに、氷河後退の記録と比較や近年の気候変動データと照らし合わせ、氷河地震の発生頻度と気候変動との関連性について明らかにすることが出来る可能性がある。

3. 研究の方法

本研究計画では、国際的なグリーンランド氷河地震観測計画であるGLISN計画の研究者と協力して、グリーンランド氷床上に設置した広帯域地震観測点により、氷河地震の地震活動とその背景の氷河流動の解明を試みた。氷床上に設置した広帯域地震観測点は、毎年観測点維持のために現地で維持作業を行うことが必要であり、GLISN計画の海外研究者と共同で観測点の維持作業を行った。観測されたデータの解析は、研究代表者と研究分担者および、連携研究者で協力しながら解析した。氷床上では基盤岩上への地震計の設置は不可能なので、表面より1メートル程度氷床を掘り地震計と観測装置を埋設してある。グリーンランド氷床上の観測点では冬季の低温環境でも観測が滞りなく継続するために、防寒処理を施した地震計シェルターにより対処する。地震計と周りの氷床とのカップリングは、設置後すぐに凍結して地震計シェルターと氷床とが一体化されるので問題はなく、氷床中を伝播する地震波を記録することが出来る。電源は太陽電池を用い、衛星電

話回線を用いてデータを準リアルタイム伝送するための専用アンテナを設置した。衛星電話による通信回線費は GLISN 計画により賄われた。グリーンランドは冬季には日照がなく、夏季の間に太陽電池で発電して蓄電池に充電し、冬季の間の観測が継続できるように対処している。しかしながら、冬季の間の降雪により、太陽電池パネルが埋まってしまうので、翌年の観測を継続できるようにするために夏季に観測点で観測維持作業を行うことが必須となる。氷床中で発生する氷河地震の波形解析による地震発生メカニズム解析等については、理論地震波形との比較により解析を行った。

4. 研究成果

研究計画期間中には、毎年夏季にグリーンランド氷床観測点 ICESG で観測点維持作業を実施した。グリーンランド氷床上では冬季に太陽電池パネルを埋める程度の規模で降雪があることが通例であり、観測を継続するための観測維持作業が必須となる。図 2 上は、観測点維持作業を実施する前の ICESG 観測点の様子であり、太陽電池パネルなどが雪に埋もれる寸前となっていることが分かる。これを除雪して太陽電池パネルや衛星電話用のアンテナ等を十分高い位置に露出させ、観測を継続できるようにしたのが図 2 下である。グリーンランド氷床で発生する氷河地震の



図 2 ICESG 観測点維持作業の様子

メカニズムを研究するために、その背景にある氷河流動変動の原因を地震学的データにより検討した。具体的には、GLISN 計画を通してグリーンランドで観測された広帯域地震計の上下動成分を用いた地震波干渉法

解析を行った。地震波干渉法解析ではレイリー波を検出し、氷床と地殻を含むグリーンランドの浅部構造を調べることができる。解析には 2011 年 9 月 1 日～2016 年 2 月 29 日の 4.5 年間のデータを用いた。1000 km を越える長距離を伝播するレイリー波を検出するため、連続記録は長さ 1200 秒のセグメントに分割し、前処理として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。その後観測点ペアごとに相互相関関数を計算し、1 日ごとにスタックした。さらに時間変化を検出することを考えて 3 ヶ月毎にスタックした。

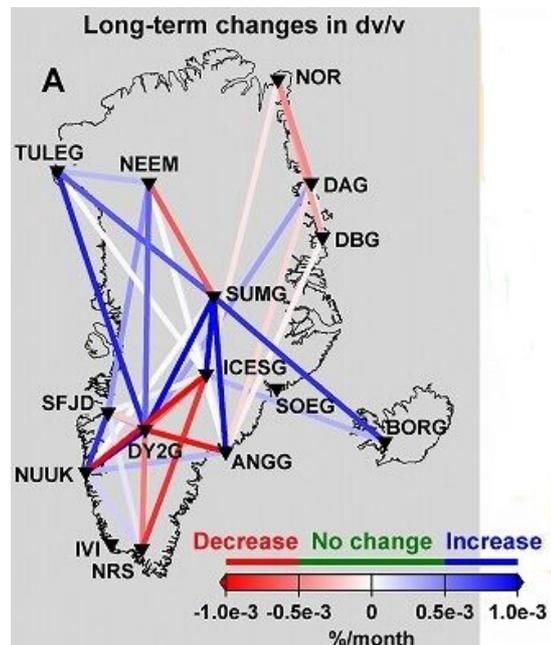


図 3 観測点ペア毎の地震波位相速度の時間変化 (Toyokuni et al., 2017)

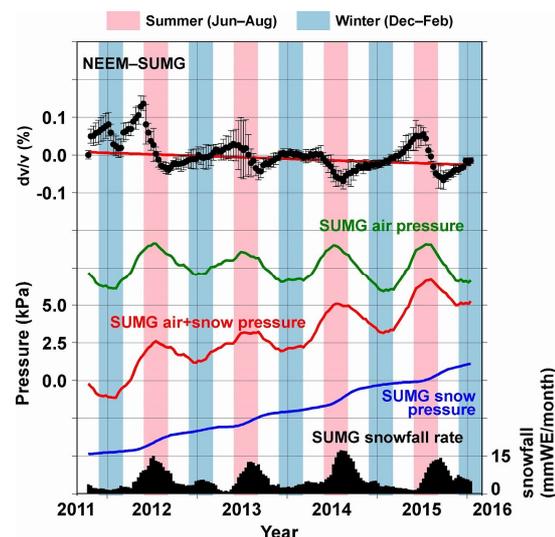


図 4 NEEM-SUMG ペアにおける地震波速度変化と他の観測との比較

スタックした観測波形にさらに 0.1-0.3Hz のバンドパスフィルターを適用し、レイリー波の位相速度の観測期間全体の平均値に対す

る相対変化を計算した。得られた結果を図 3 に示した。この結果で興味深い点は、例えば NEEM-SUMG ペアのように氷床中央部で長期的な地震波速度の減少が見られることである。このようなレイリー波は氷床底部の深さ程度の構造により影響を受ける。図 4 には、NEEM-SUMG ペアにおける地震波速度変化を同期間の他の観測データと比較した結果を示した。レイリー波が氷床底部の深さ程度の構造により影響を受けることから、この地域の地表で冬季の積雪による圧力の増加が氷床底部の圧力融解を引き起こし、結果として地震波速度の低下をもたらした可能性があることが分かった。氷床底部の力学的条件は氷床流動に大きな影響を及ぼし、氷床終端における氷河地震活動にも影響する可能性がある。地震波干渉法により表面波の速度変化を検出出来る可能性があることが分かったので、今後はより長期にわたる観測結果を基に氷床底部の力学的条件の時間変化を明らかにすることが必要である。

<引用文献>

- Ekström, G., M. Nettles, and V. C. Tsai, Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes, *Science*, 311(5768), 2006, 1756-1758, doi:10.1126/science.1122112.
- Ekström, G., M. Nettles, and G. A. Abers, Glacial earthquakes, *Science*, 302(5645), 2003, 622-624, doi:10.1126/science.1088057.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

- 坪井誠司、豊国源知、金尾政紀、東野陽子、姫野哲人、グリーンランド氷床モニタリング計画(GLISN)のグローバル地震学における意義、月刊地球、査読無、Vol. 37、2015、32 - 36 .
Genti Toyokuni, Hiroshi Takenaka, Masaki Kanao, Seiji Tsuboi, Yoko Tono, Numerical modeling of seismic waves for estimating the influence of the Greenland ice sheet on observed seismograms, *Polar Science*, 査読有, Vol. 9, 2015, 80-93,
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.12.001>
- M. Kanao, V. D. Suvorov, S. Toda, S. Tsuboi, Seismicity, structure and tectonics in the Arctic region, *Geoscience Frontiers*, 査読有, Vol. 6, 2015, 665-677,
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.11.002>
- J. F. Clinton, M. Nettles, ..., S. Tsuboi (14 名の 14 番目), Seismic network in Greenland monitors Earth

and Ice system, *EOS Trans. AGU*, 査読有, Vol. 95, 2014, 13-14.

[学会発表](計 22 件)

- 豊国源知、竹中博士、高木涼太、金尾政紀、坪井誠司、東野陽子、グリーンランド地殻浅部の経年的地震波速度変化、日本地震学会 2016 年度秋季大会, 2016 年 10 月 5 日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)
- Toyokuni G., H. Takenaka, M. Kanao, S. Tsuboi, Y. Tono, Seismic waveform modelings for estimating influence of the ice sheet on observed seismograms, AGU Fall meeting 2015, 2015 年 12 月 14 日, サンフランシスコ(米国)
- Toyokuni G., M. Kanao, Y. Tono, T. Himeno, S. Tsuboi, D. Childs, T. Dahl-Jensen, K. Anderson, Seismic observation on Greenland ice sheet by a joint USA and Japanese GLISN team, AGU Fall meeting 2014, 2014 年 12 月 15 日, サンフランシスコ(米国)
- Tsuboi S., M. Kanao, Y. Tono, T. Himeno, G. Toyokuni, D. Childs, T. Dahl-Jensen, K. Anderson, Continuous broadband seismic observation on the Greenland Ice Sheet under Greenland Ice Sheet monitoring Network, IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly, 2013 年 7 月 26 日, ヨーテボリ(スウェーデン)
- Tsuboi S. et al. (8 名の 1 番目), Continuous broadband seismic observation on the Greenland Ice Sheet under Greenland Ice Sheet monitoring Network, AGU Fall meeting 2012, 2012 年 12 月 3 日, サンフランシスコ(米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪井 誠司 (TSUBOI, Seiji)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球情報基盤センター・部長
研究者番号: 90183871

(2) 研究分担者

金尾 政紀 (KANAOK, Masaki)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号: 40233845

豊国 源知 (TOYOKUNI, Genchi)
東北大学・理学系研究科・助教
研究者番号: 90626871

東野 陽子 (TONO, Yoko)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・研究技術専任スタッフ
研究者番号: 90359183