

**【2-1605】永久凍土大規模融解による温室効果ガス放出量の現状評価と将来予測
(2016～2018 115,363千円)**

研究代表者 齊藤 和之 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)

1. 研究実施体制

- (1) 永久凍土大規模融解のメカニズムと脆弱性の現状評価
(国立研究開発法人海洋研究開発機構)
- (2) 巨大地下氷体および凍土堆積物中の有機炭素 (温室効果ガス) 量の把握
(北見工業大学)
- (3) 凍土動態を考慮した全球陸域統合モデルによる将来予測
(国立研究開発法人国立環境研究所)

2. 研究開発目的

永久凍土の融解に伴う温室効果ガス (GHG) 放出には、熱伝導が主体となる緩慢で可逆な「広域放出」、また高含氷永久凍土 (エドマ層あるいはエドマ) の急激・不可逆かつ大規模融解による一次放出 (氷中貯留GHGの直接放出) および二次放出 (堆積土中有機炭素の新規分解による放出) がある。本研究ではその実態や影響が不詳のエドマ融解による放出に着目し、現地調査に基づく現状評価と将来予測を行うことにより、上記3つの道筋の相対的な寄与を定量化するとともに、全球気候における永久凍土融解の影響理解の裾野を広げ、もって気候変動の安定化目標に関する議論や地球温暖化への適応策の検討に貢献することを大きな目標とする。

日本の研究隊による北極域調査研究には障壁が存在する。まず北極陸域は領土外であり、その研究活動に大きな制限がある。ロシアでは外国人の立入りや試料の輸送・保管、輸出等に制限があり、米国アラスカにおいても諸管轄機関からの許可が必要になる。さらに、現在の日本の研究予算制度には、欧米にあるような研究費と極地ロジスティクス費用を別に配分する制度が存在しない。そこで本研究では、このような課題を、研究組織を最小限にして予算を多く現地調査に充て、また国際的な共同研究の協力を得ることで克服し、最大規模の現地データ (表1) を取得する。地下氷と土壌有機炭素を大量に含む永久凍土が広く分布するアラスカと北東シベリアなどを対象に、衛星観測と現地調査によりエドマ層大規模融解過程の現状を面的・定量的に把握し、現地で試料を採取して融解前の永久凍土が含有する炭素 (氷中GHGや堆積土中有機炭素) を分析する。また、環北極域における土壌有機炭素や地下氷分布ならびにエドマ融解脆弱性を数理モデルから推定し、これら新たな知見を高度化した永久凍土融解過程とともに既存のモデルへ組み込んで将来予測と全球への影響評価を行う。

3. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

高含氷永久凍土（エドマ）融解が引き起こす急速かつ大規模な地盤沈下（サーモカルスト）で流動化する炭素総量の見積りには、沈下速度の現地真値による量的・面的把握、エドマ内貯留炭素（気相あるいは固相）量の実測が重要であり、全球規模の影響評価にはそれらに関する定量的な環北極域分布把握が必要である。本課題開始時には、これらの多くは未詳であった。

アラスカおよびシベリアでの現地測量とマイクロ波衛星観測により、沈下量把握手法として DInSAR の有効性を検証し、融解開始後長期にわたる沈下に関して定量的な計測値（最大約 6cm/年）と時空間分布に係る初の知見を得た。これらは今後増加が予測されるツンドラ火災の影響評価、永久凍土融解進行メカニズム理解の基礎であり、より現実的な融解過程を取入れた陸面過程モデル開発に応用される。

エドマ組成・貯留炭素量とその環北極域広域空間的分布を、多地点での採取・測定により明らかにした。エドマ氷のガス含有量ならびに温室効果ガス（メタン）濃度は平均値で前者は 100g 中 3~4cc、後者は 6300ppmv であった。また、メタン生成経路（二酸化炭素還元経路と有機酸発酵経路の寄与率）を今回初めて定量的に評価した結果は、独創性の高い研究成果である。

一方、それまで未詳であった環北極域におけるエドマとその融解脆弱性分布のために、概念的数理モデルを開発して土壤有機炭素 (SOC) と地下氷蓄積量を推定するとともに、高解像度の脆弱性分布を提示した。以上の知見は、エドマ融解と全球気候システムの相互作用を定量的に議論するための基礎となり、本研究においても将来予測のための入力・境界値データとして利用された。

簡略化されていた凍土過程の高度化により、より信頼性のある将来予測に必須な永久凍土動態の再現性が向上した。また、エドマ層の融解による一次放出・二次放出を簡易ながら定式化し、上述の観測・モデル結果を取り込んで定量化、今世紀末時点までの全球温度上昇への寄与、また既存研究との相対的比較を提示したことは大きな科学的成果である。

更に、本研究で得られた知見から新たな科学的課題として、エドマ中温室効果ガス濃度の由来・組成・環境・変遷とばらつきの関連解明、SOC 蓄積や凍土などの古環境復元への応用、攪乱発生や有機物分解過程などの含む全球気候モデル MIROC の高緯度域特性の理解と改良などが派生した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

巨大な地下氷の融解による大規模かつ不可逆的な地形変化（サーモカルスト）は、現在確実に進行中であり、本研究で得られた地表面攪乱によるサーモカルストの進行様式とその変化速度に関する知見は、攪乱因になる土地開発が今後も進むと考えられる北極陸域の資源開発と環境保全双方の計画に必要な不可欠な情報である。更に、この不可逆的变化は寒冷圏におけるティッピングエレメントであり、温室効果ガス放出という全球的な影響に加え、地盤沈下に伴う社会基盤、酪農業の阻害、生態系バランスの変化など現地生活の生活基盤や様式へ局所的な影響を与える。北極域における住民の生活を保護し、持続可能な産業活動を推進する方策を講じる上で、またより広域へ影響する変化を事前に捉え実影響を低減するために、広域的な永久凍土安定性の監視と迅速な状態変化の察知は重要である。本研究が進めた永久凍土動態のリモートセンシング技術は以上のような環境政策立案において活用されうる。また、数理モデルによる広域的な脆弱性分布をもとに攪乱発生の危険度や切迫度情報の提供は、攪乱対策あるいは緩和策や対応策の策定の支援あるいは促進となる。北極域の現地自治体や関連国に対して、我が国の北極・環境研究成果を通して環境保護・温暖化対応策あるいは持続的経済政策の策定に助言することは、我が国の研究レベルを国際的に示した国際貢献を訴えることになる。

本研究による成果の波及的応用として、国内の季節凍土・永久凍土エリアに対する地表面変位監視へ適用できる。大雪山系や富士山の高山風衝地では永久凍土が確認されており、国土の半分以上は季節的に凍結・融解を繰り返している。温暖化によってその凍結・融解サイクルとそれに伴う地表面の変位や地形の、また引いては植生の変化への適応を図るための手段として環境省適応課題に貢献しうる。

現地調査を通して本研究が提示したエドマ層の温室効果ガス含有量の現地真値、環北極域での一次放出・二次放出の将来予測や全球温度上昇への寄与の定量化などは、IPCCをはじめとする政府間機関による気候変動の評価に資するものである。本研究によって得られた成果論文は現在投稿のための作業を進めているが、次期 IPCC 報告書に貢献することが期待される。

また、雑誌やテレビからの取材を通して、永久凍土融解の問題に対する社会の興味が高まっていることを感じる。今後の論文を含む本研究の成果が、温暖化に対する国民の理解と関心を向上させ、持続的社会的構築や適応策の推進に対する一助となりうる。

4. 委員の指摘及び提言概要

サブテーマ3のモデル予測に向けて、サブテーマ1、2の成果が生かされている。まだ解明が進んでいない現象に関して、国際的な困難さに対応しつつアラスカ、シベリア等における多くの現地観測・現場サンプルの採取を行って新しい知見を入手し、多くの興味深い成果を得たことは高く評価できる。ただし、永久凍土の融解によるメタンと、融解土壌の分解による温室効果気体の放出プロセスに関してはさらなる解明が必要で

はないか。永久凍土大規模融解の影響を評価するうえで、サブテーマ1やサブテーマ2の現場調査によるデータの代表性についての評価も欲しい。本成果は、IPCC等へのインプットが重要であり、AR6等への貢献のため早急に多くの成果を国際誌に積極的に投稿して欲しい。

5. 評点

総合評点：A