

学 位 論 文 題 名

Estimation of Methane Emission from Natural
Wetlands in Siberian Permafrost Area

（シベリア永久凍土地帯における自然湿地からのメタン発生量の推定）

学位論文内容の要旨

大気中のメタンガスは顕著な温室効果気体として知られている。観測により、その濃度は過去200年程度の間で急激に増加してきたことが報告されている。メタンガス濃度の増加は、地表付近の気温を上昇させるため、将来の温暖化傾向を予測するためには、その発生源及び発生量を明らかにする必要がある。

本研究では、大気中メタンガスの発生源として自然湿地、特に永久凍土地帯の湿地に注目した。その理由は、メタン発生が永久凍土表層の融解に関連しているという点にある。永久凍土表層は夏に融解するが、この季節的融解層の厚さや地温は、気温変化に対して敏感に応答する。メタンはこの融解層内で生成され、大気へと放出される。その生成量は融解層の厚さ及び地温の影響を受けるため、気温変化に対し非常に敏感である。将来の温暖化に対し、正のフィードバック効果を持つ可能性があり、現在の発生量を把握することが必要とされている。

そこで、本研究では、大気中メタン収支に対する永久凍土上の湿地の寄与を明らかにすることを目的として、シベリアのツンドラ地帯及びタイガ地帯において、メタンフラックスの現場観測を行い、その観測結果に基づき、シベリアのツンドラ湿地からのメタン発生量を推定を行った。

本論文は7章からなり、第1章から第3章までは序論、第4章から第6章までが本論、第7章では結論を記述した。

第1章では、緒論として、本研究の目的と意義について述べ、高緯度の湿地からのメタン発生量に関するこれまでの研究例を概括した。

第2章では、メタンガスの大気中濃度の変動、その直接的・間接的な温室効果、及

び発生プロセスについてレビューを行った。湿地土壌内においてはメタンは微生物による有機物の分解によって生成され、微生物の活動は、温度や土壌水分等の環境の物理要素によって影響を受ける。

第3章では、研究対象地域としたシベリアの気候環境、永久凍土の分布、植生分布について触れ、観測を行ったツンドラ湿地、及びタイガ帯のアラスについて説明した。

第4章では、東シベリアのツンドラ湿地及びタイガ地帯のアラスにおいて行った観測とその結果について述べた。東シベリアには広大な自然湿地が分布しているが、これまで、メタン発生に関する現場測定の実例はほとんどない。本観測では、メタンフラックスの測定と併せて、地下水位、地温プロファイル、気象要素等の環境要素の測定も行った。ツンドラ湿地に関する観測は、レナ川河口付近のブイコフスキー半島、カラハリ島、ムスタハ島、及び比較のためにアラスカのフェアバンクスにおいて行われた。それぞれの場所で、地下水位の異なる2～4点の測定点（湿潤及び乾燥）を選んだ。ムスタハ島、フェアバンクスでの観測は、およそ1カ月間の定点観測であり、メタンフラックス及び環境要素の経時変化を得た。これらの観測の結果、シベリア、アラスカともに湿潤な点では、 10^1 [$\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$] オーダーでメタンが発生し、乾燥した地点ではほとんどメタンが発生していないことが分かった。タイガ地帯のアラスについては、レナ川中流域のヤクーツク周辺で多点的な観測が行われた。6カ所のアラスにおいて、アラス内の環境を水面、水草帯、湿地、草地の4つに分類し、それぞれにおいて5～10点のメタンフラックス測定を行った。フラックスの値は、各環境タイプにより異なり、水面、水草、湿地からは 10^2 [$\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$] オーダー、比較的乾燥した草地からは 10^1 [$\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$] オーダーであった。これらの値は、北緯60度以北の湿地としてはかなり大きく、アラスがメタンの発生源として重要であることを示唆している。

第5章では、観測結果に基づき、シベリアのツンドラ湿地からのメタン発生量を推定した。近年、高緯度地域の湿地からの年間メタン発生量の推定が行われているが、その多くは一地域における盛夏のメタンフラックスの測定値に、年間メタン発生日数と湿地面積をかけることによって算出されている。この方法では、メタンフラックスの季節変化や場所による条件の相違が明確でなかった。そこで、本研究では第4章で述べたメタンフラックスと環境要素の経時観測の結果から、フラックスを容易に測定できる物理量の関数として表し、この物理量の季節変化、場所による違いを求めるこ

とで、これまでよりも精度の高いメタン発生量の推定を行った。メタンフラックスを決定する要素として、ここでは“centimeter-degrees”という値を導入した。これは、融解深と地温との積として定義され、地表面温度、あるいは気温が与えられれば、一次元熱伝導モデルを用いて推定することが可能である。ムスタハ島、及びフェアバンクスの観測結果から、フラックスの値はcentimeter-degreesと相関が高く、この1次関数として表せることが示された。そこで、シベリアのツンドラ地帯を緯度2.5度、経度5度毎のグリッドに分割し、各グリッドの湿地面積及び気温の年変化を与え、それぞれの年間メタンフラックス及び年間メタン発生量を推定した。年間メタンフラックスはグリッドにより $0.9 \sim 14.3 [\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}]$ と、気温の違いを反映して大きく異なる結果が得られた。また、シベリアのツンドラ湿地全体からの年間メタン発生量は、 $1.0 [\text{Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}]$ と推定され、地球上の湿地全体からの発生量のおよそ1%にあたることが分かった。

第6章では、将来の温暖化に伴うツンドラ湿地からのメタン発生量増加の可能性について議論した。年間1%の割合で大気中の温室効果ガスが増加した場合、シベリア極域の年平均気温は70年後におよそ 3°C 上昇することが大気大循環モデルによって予測されている。この気温上昇のもとでは、カラハリ島の年間メタンフラックスは、 $4.1 [\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}]$ から $6.5 [\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}]$ へと増加することが見積もられた。この増加量は現在の値の約60%に相当し、ツンドラ湿地はメタン発生源として気候変動に対して、非常に敏感であることを示唆している。

第7章では、結論として以上述べてきたことをまとめた。本研究では、これまで測定例のほとんどなかったシベリアの自然湿地においてメタンフラックスの観測を行ったこと、ツンドラ湿地からのメタンフラックスをcentimeter-degreesの1次関数として表したこと、その関係を用いて、メタンフラックスの季節変化、場所により違いを考慮した上でメタン発生量の推定を行ったことが、成果として挙げられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 福 田 正 己
副 査 教 授 中 尾 欣四郎
副 査 教 授 小 林 大 二
副 査 教 授 太 田 幸 雄 (工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Estimation of Methane Emission from Natural Wetlands in Siberian Permafrost Area

(シベリア永久凍土地帯における自然湿地からのメタン発生量の推定)

近年地球の温暖化の主因として、大気中の温室効果ガス濃度の増加が注目されている。特にメタンガスはその温室効果への寄与度の大きいことで、濃度変動の的確な把握と地上での発生源の特定が急がれている。自然条件では、高緯度地域及び低緯度地域に遍在する湿地がその主な発生源である。高緯度地域では、シベリアを中心とする永久凍土地域で、夏季に形成される湿地で大量のメタンガスが発生している。しかし、シベリア永久凍土地域でのメタンガス発生の定量的観測とそれに基づく発生量見積もりについては、研究事例がほとんどなく、いわば学問的空白地域となっていた。

申請者は、東シベリアの永久凍土地域において27年にわたる、メタンガス発生量の現地観測を実施し、併せてアラスカにおいても併行して観測を行い、定量的でかつ詳細な観測結果を得た。現地での観測では、メタンガス発生量のみならず、発生に関わる物理要因としての各種気象観測を行い、ほぼ通年観測結果を得た。メタンガスはその嫌氣的な環境下で活性化するメタン生成菌による生成であり、シベリア永久凍土地域に広がる湿地はいわば理想的な発生条件となっている。

現地観測の結果から、ツンドラ湿地からのメタンガス発生量は、凍土上層の夏季融解層の厚みとそこの平均地中温度の積の一次関数で推定する経験式を新たに得た。

さらに、夏季融解層の厚さと平均温度を推定するために、潜熱の発生を考慮した一次元非定常熱伝導方程式を数値解から求める手法を開発した。レナ川河口地域での通年

観測結果と計算結果を比較することで、推定の精度を確認した。そこで、シベリア全域について入手可能な気象データを用いて、各地点ごとに凍土内に形成される夏季融解層とその平均地温分布の経時変化を算出した。その計算結果を先のメタンガス発生量推定の経験式に代入し、シベリア全域でのメタンガス発生量を得た。その結果、従来の推定値 (10×10^{12} g/y) は過大であり、その約10%程度であることが分かった。推定はシベリアの全域について経度 2.5° 、緯度 2.5° の格子毎に得られており、北から南に向かってメタンガス発生量の分布を初めて描くことが出来た。

また、気象要素を用いることで、メタンガス発生量の予測が可能なことから、現在の地球温暖化傾向が進行した場合、シベリア永久凍土地域でのメタンガス発生量の増加を算出することが出来た。等価CO₂濃度が倍増した場合には、シベリアツンドラ地域でのメタンガス発生量は約60%増加することが予測出来た。

以上の研究内容について、主査、副査及び専攻担当教官による審査を実施した。以下の点で、学位として相応しいとの判定がなされた。

(1) 従来の学問的空白域であった、シベリア永久凍土地域で初めて定量的なメタンガス放出量の長期観測を実施し、信頼に足りる充分なデータを得た。このデータ自身は前例のないもので、今後広く引用されるであろう。観測及び解析にあっても、その解析手法や新たな観測機器の開発など、自発的な研究指向で一環していた。

(2) 解析及びその検討では、メタンガスの発生量に関わる物理要素を抽出し、適切な処理によって、新たな発生量の予測経験式を導出した。これは、今後他の研究グループへ強い影響を与えるものと期待される。

(3) 予測式の妥当性を検討した上で、地球温暖化傾向のもとでのメタンガス発生量の増加とそれに寄与するシベリア永久凍土を定量的に検討した。

(4) 以上の研究成果における独自性と解析結果の応用性から判断して、学位に相応しいと判断するものである。