

## B-4 シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究

### (4) シベリア・ツンドラ地帯の凍土融解に伴う大気微量成分の放出に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 井上 元

環境庁 国立環境研究所 地球環境研究グループ温暖化現象解明研究チーム

井上 元、野尻幸宏、向井人史、曾 毅強、マクシュートフ

(委託) 北海道大学 低温科学研究所 福田正巳、仲山智子

東京工業大学 総合理工学部 秋山明胤

平成4 - 5年度合計予算額 25,681千円

(平成5年度予算額 13,006千円)

〔要旨〕 凍土地帯は全陸地面積の20-30%を占め、地圏・生物圏と大気の相互作用の場として無視できない。例えば、凍土の中には高濃度のメタンを含む気泡が含まれていることが観測された。この氷は南極のように積雪から氷になったものではなく、土壌中の水分が移動しつつ凍って出来たものと言ったことが分かった。同位体の分析などから、比較的気温の高かった時期にメタン生成細菌によってつくられ閉じ込められたものであり、有機物のクラッキングによって生成したものではないことが分かった。

ツンドラ地帯は樹木が生育せず水ごけなどが主たる植生であり、気温が低い水苔の活動期間も短い。夏期には炭素を固定している。固定された炭素の大部分は泥炭化するが、一部は二酸化炭素やメタンとして再び大気中に放出されている。メタンの発生量をツンドラ地帯（チクシ）とタイガ地帯（ヤクーツク）と比べてみると、前者は10-70 mg/m<sup>2</sup>/day で後者の200-2000 mg/m<sup>2</sup>/day の1/30程度であることが分かった。現在の発生量は小さいが、地球の温暖化により増加することが予想されるので、現状の把握と発生のパラメータ化を目指す観測研究を行なっている。

〔キーワード〕 シベリア、ツンドラ、凍土、メタン、温暖化

#### 1.序

凍土地帯は全陸地面積の20-30%を占めるが、凍土中に生成するアイスウェッジとよばれる土壌の少ない純粋の氷に近い部分には、高濃度のメタンを含む気泡が含まれていることが報告されている。この氷は南極のように積雪から氷になったものではなく、土壌中の水分が移動しつつ凍って出来たものと言われている。従って、ここに含まれる気泡は昔の大気を主成分とするものではなく、氷の生成時にメタン生成細菌によってつくられ閉じ込められたか、あるいは、地下の深いところで有機物の熱化学反応で生成し地上付近に染み出したところを氷に閉じ込められたものと考えられる。これらの成因を探ることは全体の推定含有量を評価する上で重要である。凍土地帯に蓄積されているメタンの総量を評価し、また、地球温暖化に伴い、その融解で大気中に放出されるメタンの総量を推定するためのフィールド観測が必要とされる。

ツンドラ地帯は樹木が生育せず水ごけなどが主たる植生である。気温が低い水苔の活動期間も短

いが、年間の生育量は2mmの厚さがあると言われている。固定された炭素の大部分は腐敗することなく蓄積され泥炭化すると言われているが、一部は二酸化炭素やメタンとして再び大気中に放出されると予想されている。これらの発生量は地球の温暖化により増加することが予想されるので、現状の把握と発生のパラメータ化を目指す観測研究が必要とされる。

## 2.研究目的

第一期の目的としては、研究フィールドの確定とそれに伴うインフラの整備、物資の輸送、研究者の居住・観測環境の整備を行なう、研究のカウンターパートとの関係を確立し、研究体制を整備する、予備的な観測を行ない研究の方向付けを行なうなどを直接的な目標とした。研究の中身としては次の3項目を目的とした。

2-1.凍土中の氷に含まれるメタン等温室効果気体の濃度測定

2-2.凍土地帯からのメタンフラックスの測定

2-3.フィールド適応型超小型ガスクロの開発と応用

## 3.研究成果

3-1.凍土中の氷に含まれるメタン等温室効果気体の濃度測定（北海道大学 福田正巳）

東シベリアの北極海沿岸の低地や、レナ河の中流域にはアイスコンプレックスが広く分布する。（注、アイスコンプレックスは土壤水分が凍結した凍土と、土壤成分の少ない氷の複合体である）これが露出している場所の多くでは、エドマの厚さは30-40mで、エドマの主要部分は大型のアイスウェッジである。

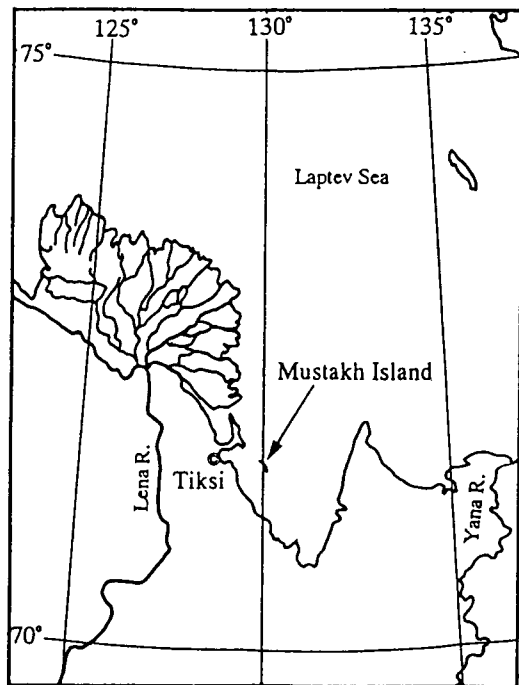


図1 ブイコフスキー半島とムスタフ島の位置。日本と同程度の経度で北極圏にあり、レナ河の河口にあたる。

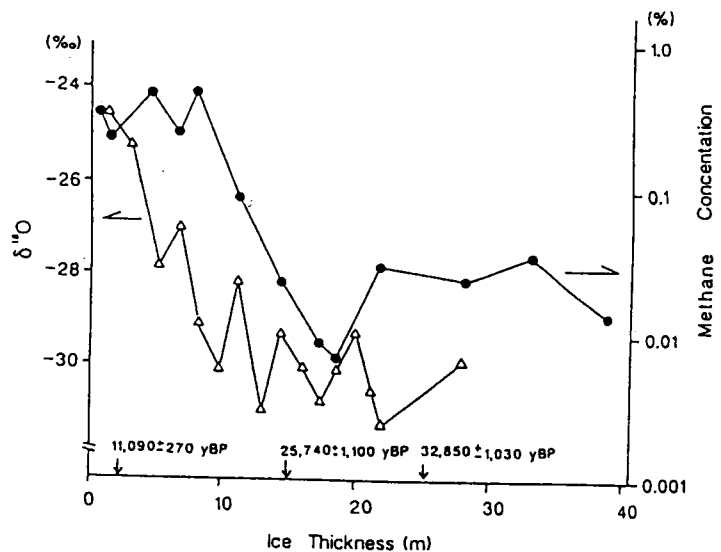


図2 ブイコフスキー半島で得られたアイスウェッジの中のメタンと $\delta^{18}\text{O}$ の垂直分布

(注、エドマは侵食を受けつつある凍土層で、ここに型のくさび型の氷が形成されている。) このアイスウェッジには多くの気泡があり、これにメタン等温室効果気体が高濃度で含まれている。これが融解してメタンが放出された場合、もしそれが厚い活動層に被われているならば、氷が融ける条件では活動層の温度も当然上がっているのでメタン酸化細菌の活動が活発で、ここを通り抜ける前に酸化されて地表には達しない。しかしながら、崖のような場所で露出しているならば、融けた氷に含まれているメタンは直接大気中に放出される。したがって、こうした露出した場所での氷に含まれるメタン濃度測定を先ず行う必要がある。

調査地点としては、レナ河河口にあるチクシ市に近いブイコフスキー半島の海岸沿いでエドマが露出している場所を選んだ。調査は1992年の夏に北海道大学低温科学研究所とロシア科学アカデミー永久凍土研究所によって行われた。図1にその場所を示す。

露出した場所から氷のサンプルは氷は3 mごとに、また、氷の周りの土壌も採取した。氷の垂直構造はこれがアイスウェッジとして形成された事を示している。垂直の構造に沿って多くの気泡が見られ、典型的な泡の直径は2-3mmで1-2cmの長さであった。氷はNaClの飽和水溶液中で溶かし、発生した泡をガラス容器に移し、日本に持ち帰り名古屋大学の協力で分析した。その結果を図2に示す。

### 3-2.チャンバー法によるメタン発生量の測定

メタンの発生量を直接測定する方法は、発生源に気密な箱を被せてその中のメタン濃度の増加速度を求める方法である。この方法を自然の湿原に適用するには、(1)周辺の環境を乱すと発生量に影響を与えるので、前もってアプローチや箱を被せるための枠を地面に埋め込まなくてはならない。(2)箱の中の気温の上昇はメタンの発生量に影響を与えるので、迅速にサンプルを採取するか、或は、気温の上昇を抑制する工夫が必要である。(3)試料気体は真空バイアル瓶に採取するのが経済性、操作性の点から最も適切である。(4)メタンの測定方法としては、FID-GCとマイクロキャピラリーのTCD-GCを用いた。分析センターを設けることが出来る場合は、前者が効率的であることが分かった。

ヤクーツクでの測定結果を表1に示す。

タイガでの測定結果の特徴点は次の点である。小さいアラスには水草帯がなく、湿地帯が広い。水面から乾燥帯からのフラックスはアラスの大小に依存せず同定度である。しかし、湿地からのフラックスは小さいアラスの方が大きい。ヤクーツク周辺の地理データとここで得られたデータから、全体のフラックスを推定する作業が進行中であるが、面積から考えると、湖の周辺にベルト状に存在する湿地よりもはるかに面積の大きい水面からのフラックスの方が、全体としては大きい可能性が強い。これらのアラスは凍土が解けてできた湖であり、その下には氷が存在し、地下への浸透を妨げていると言われている。そのため、湖底の温度が低くメタンの発生量は少ないことが予想されたが、結果的には非凍土地帯のそれと大きな差異が見られなかった。

表1 ヤクーツクの湖の各場所でのメタン発生量。

Site	Type	CH <sub>4</sub> flux mg/m <sup>2</sup> /day	Water depth cm	Air temp °C	Size of lake	Comments
RS1	Water surface	180			Small	水草帯なし
	Water surface	350				
	Wet area	340	-10	22.0		
	Wet area	510	-2			
	Wet area	900	0	17.4		
	Wet area	1020	-2			
	Wet area	1920	-5	17.6		
	Dry area	53	-39	21.0		
RS2	Water surface	830			Small	水草帯無し 小さな池が3つ 周囲は広い湿原帯
	Wet area	480	15	17.9		
	Wet area	670	16	17.3		
	Wet area	1040	8	17.4		
	Dry area	68	-7	14.1		
KYO	Water surface	260		20.6	Large	水草帯あり 水草帯5m 湿地帯5m
	Water plant area	300		20.5		
	Water plant area	380		23.2		
	Wet area	220	-7	20.9		
	Wet area	320	-15	19.3		
	Dry area	32	-24	21.2		
	Dry area	38	-30			
SC	Water plant area	110		21.9	Middle	水草帯あり
	Wet area	230	0	24.2		
	Dry area	0	-	24.3		
NGB	Water surface	130			Middle	水草帯あり
	Water plant area	360		21.9		
	Water plant area	400		21.5		
	Wet area	180	7	24.0		
	Dry area	78	-21	23.5		
BC	Water surface	3			Large	水草帯なし 牧草地 肥料が撒かれている
	Water surface	40				
	Wet area	9	-3	21.9		
	Wet area	12	-1	15.4		

ツンドラ地帯の代表点として選んだチクシ沖のムスタフ島は、全体がツンドラ湿地である。ここでチャンバー法により測定したメタン発生量を図3に示す。融解層は観測期間中を通じてまだ増加傾向にあり、ほぼ30cmであった。8月の後半には降雪もあり、気温は急激に低下している。水位は期間を通じてほぼ一定であり、地面近くまで水位がある。地温は日射など気象により大きく変動するが、この期

間、地温はまだ零度以上でありメタンの発生が継続していた。メタンの発生量の変動は地温と強い相関があるように伺われるが、全体としては地温が低下傾向にあるのに、メタンの発生量は依然として大きい。そのことは地温だけではなく、全体として増加傾向にある融解層の厚さにも関係していると考えられる。そこで融解層の圧さと地温（℃）との積とメタンのフラックスとの相関をとってみると（図4）相関係数は0.7であった。融解層の厚さと地温の積に対して、8月の後半のメタン発生量は大きく、システムテックなずれが見られる。メタンの発生量は一般的に現在のメタン細菌の活性度（成長=数の増加）だけではなく、現在の数に比例することが指摘されている。ツンドラ地帯では有機物の蓄積は十分あり、また、ツンドラ湿地の水位はメタンの発生に最適な状態に保たれているので、メタンの発生量は地温に深くかかわる。しかしながら、現在の活性度にかかわる地温だけでなく、メタン細菌の量も評価する必要がある。メタン細菌の量は融解層の厚さ（メタン細菌の存在する体積）とその密度に比例する。メタン細菌の密度は過去の細菌の活性度の積分で近似できるはずである。この仮説を証明するためにはメタンの発生の通年測定が必要である。

今回の測定で得られたタイガ地帯の湿原からのメタン発生量は200-2000mg/m<sup>2</sup>/dayであり、ツンドラ地帯のそれは10-70mg/m<sup>2</sup>/dayである。同一の水位条件の場所での値を比較すると30倍以上の差がある。この主たる原因は地温の差（15 vs. 3℃）と考えられ、気候変動の結果ツンドラ地帯でもメタンの発生量が増えることが予想される。

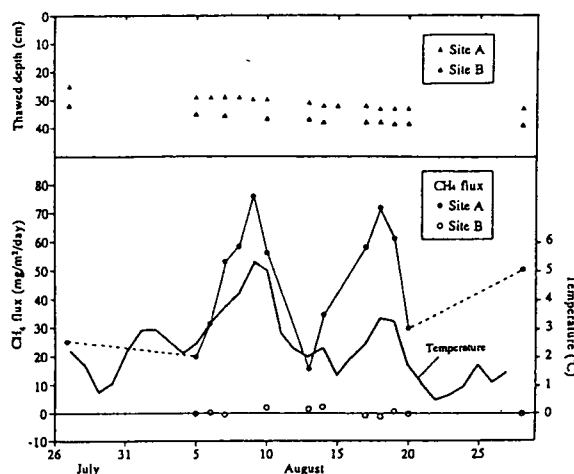


図3 ムスタフ島で観測された凍土の融解層の厚さ（上）、メタンのフラックス（下、○）と日平均地温（下）

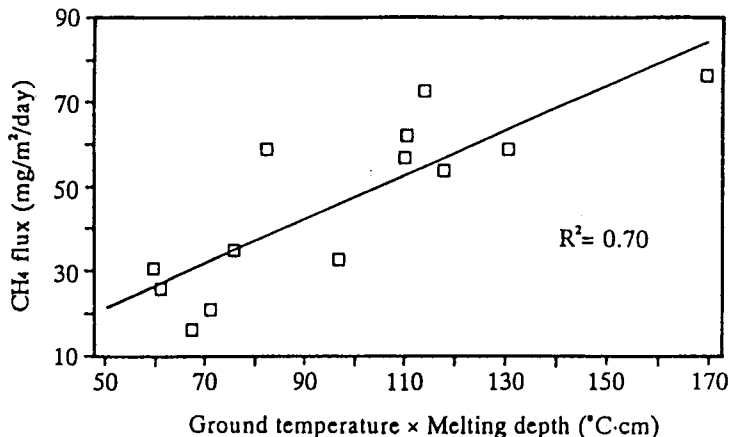


図4 地温（℃）と融解層の積に対するメタンの発生量の関係をしめす。直線は最小自乗法によるもの

### 3-3.フィールド適応型超小型ガスクロの開発（東京工業大学 秋山秋胤）

シベリア、特に北極海沿岸での調査は、物資の輸送や現地での分析などが極めて困難であり、南極観測などと同程度の大規模な支援が必要とされる。しかしながら、現状ではそのようなサポートは望めないため、最小限の装備を現地の研究スタッフの協力を得て運搬し、観測やサンプリングを行わざるを得ない。現地でしか測定できない物理計測機器を優先するため、化学的な分析はサンプルを持ち帰って行っているのが現状である。しかしながら、分析結果が全く分からないままサンプリングを行うことは調査の効率を著しく下げるし、また、運搬時の変質の恐れも否定できない。したがって、小型軽量の測定器の開発が強く望まれる。

開発に当たって目標として点は以下の通りである。

(1)個人が運搬できる重量であること。湿地を徒歩で運搬することを考えると20kg以下であることが望ましい。

(2)電力の消費が少なく、小型のバッテリーで稼働すること。

（現地では電力の供給は望めないため、自家発電を行うことになる。これは総重量を20kg程度増やすことになる。）

(3)ガスの消費が少ないこと。

（10 l 程度の高圧ガスは15kg程度の重量となる。）

(4)環境の変化に対し感度が安定であること。

（感度が不安定の場合、標準ガスを必要とし、高圧ガス容器を1本必要とする。）

これらの要請を満たすためには、半導体加工技術として進歩の著しいマイクロマシーニングの技術に応用したマイクロガスクロを利用することとした。これは試料注入バルブ、ガスクロカラム、熱伝導型検出器（TCD）をシリコンウエハのうえに集積する事により、デッドボリュームを少なくし、高速で分析できるようにしたものである。TCD検出器は一般にFIDやECDに比べ感度が低いため、他の検出器で測定できない不活性なガスにしか使用されて来なかった。本装置は検出器を超小型化したため、応答速度が速くなり高感度化した。しかしながら、市販のものは制御とデータ処理にラップトップパソコンを必要とし、総重量は数十kgであり、本目的には不十分である。従って、これを次のように大幅に改造した。

ガスクロと検出器のボードはそのまま利用するが、その制御とデータ収集には専用のCPUとICカードを使用する。充電型バッテリーを内部に装備する。キャリアーガスとしてはアクアラング用のヘリウム（約500g）を利用する。全体をクーラーボックスに入れ、現地で調達できる氷を入れることにより一定の温度を保ち感度を一定に保つ。

完成した試作品は、総重量が25kgで、二酸化炭素に対しては0.5ppm程度、メタンに対しても0.5ppm程度の誤差で測定できることが分かった。メタンについてはカラムの長さを増すことにより空気との分離を良くし、更に高精度にすることが可能であり、今後の課題である。

図5に二酸化炭素の較正直線を、図6に標準空気中の二酸化炭素の測定例を示す。図7にメタンの較正直線を示す。二酸化炭素の測定値は較正直線上に良く乗っているのに対し、メタンの測定値は直線的ではあるが測定毎の誤差に基づくバラ付きが見られる。もし、例えばチャンバー法でメタンのフラックスを測定する際に、チャンバー内のメタン濃度が大気中のバックグラウンド値の2、3倍上昇するならば、

必要な精度でメタンフラックスを測定することが可能である。

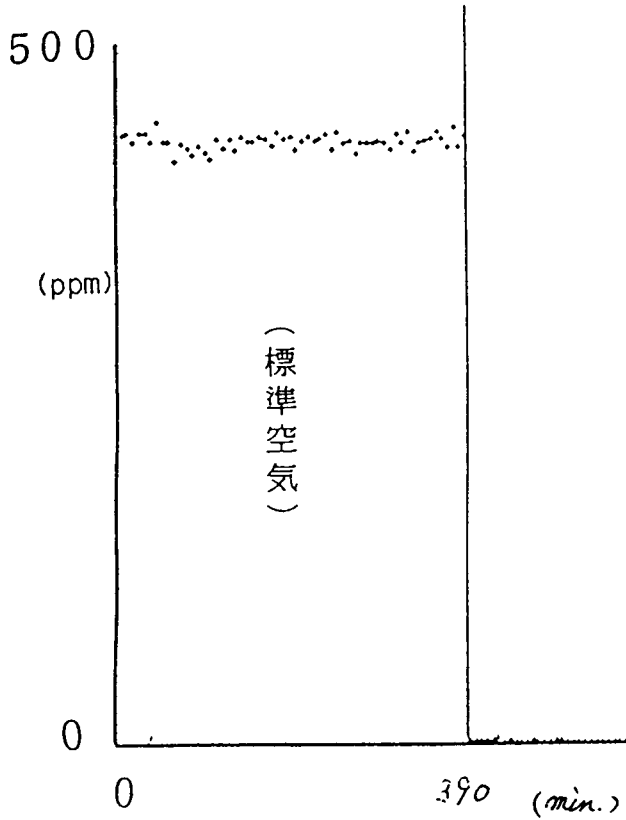


図5 ここで開発したガスクロによる二酸化炭素の測定値のバラ付きを示す。

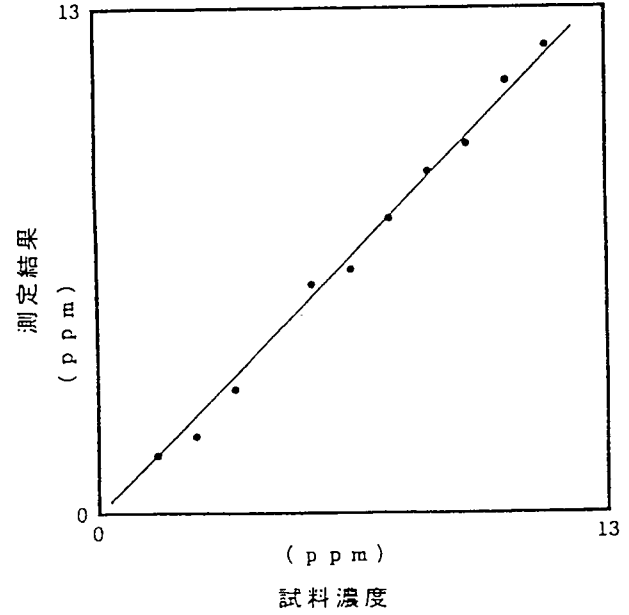


図6 メタンの標準ガスの測定結果

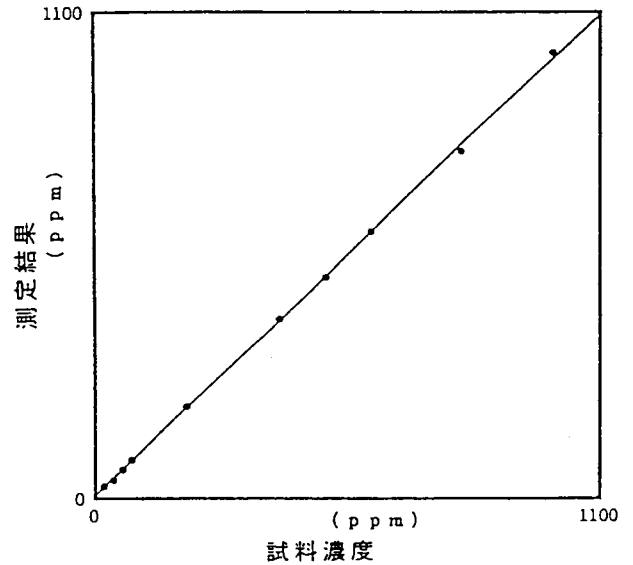


図7 二酸化炭素の標準ガスの測定結果

このガスクロを選定したことにより、当初の目的に加え、次のような新たな応用の可能性が見いだされた。一回の測定に必要なサンプル量が少ないので必要なサンプルの氷などの量が少なくて済み、同一のサイズのアイスコアの場合分解能が飛躍的に増加する。土壌の間隙にあるガスを分析する際、広い範

囲の空気を引き出すことがないので精度が大幅に向上する。測定時間が短いので、多数回測定を繰り返すことが可能で、総合的なS/NとしてはFIDに大きく劣らない可能性がある。

〔国際共同研究等の状況〕

日露環境保護協定 94-95年環境保護協力計画 シベリアにおける温室効果気体の航空機観測  
環境庁（国立環境研究所）－ロシア連邦科学アカデミー（凍土研究所）

ロシア側参加者 7名

日本側参加者 6名

毎年7-8月に共同観測を行なうほか、研究打ち合せ、研究成果発表のため研究者の派遣、招聘を相互に行なっている。

〔研究発表の状況〕

なし