

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

(1)シベリアの湿地における温室効果ガス発生量へのフィードバック

②凍土からのメタンの発生に対する温暖化影響

研究代表者 国立環境研究所 大気圏環境部 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	野尻幸宏、町田敏暢、S.マクシュート フ
大気圏環境部	上席研究官	井上元
	大気動態研究室	遠嶋康徳、高橋善幸、M.ソローキン

平成6－8年度合計予算額 41,818千円
(平成7年度予算額 12,893千円)

〔要旨〕 シベリアの大部分を占める凍土地帯は、アラスカやカナダの凍土地帯と異なり水の含有率が高いのが特徴である。①アイスコンプレックスと呼ばれる凍土が現在融解をつづけているので、その中に含まれるメタンが大気中に放出される量を見積もるための観測研究を行い、直接放出されるメタンの量は2～10Tg/年であることを明らかにした。温暖化の結果アイスコンプレックスの融解が加速される場合は、このプロセスも無視できない。②シベリアのツンドラ地帯でメタンの発生量を測定し、地温や融解深度とメタンの発生量の関係を明らかにした。メタン発生量はもっともメタンの発生の大きい時には80mg/m²/dayにも達するが、天候により大きく変動することが分かった。現在はメタンの発生時期が短いのでグローバルには小さい部分に過ぎないが、温暖化の結果地温が零度以上の期間が長くなれば温帯・亜寒帯域の湿原に劣らないメタン発生源になる可能性があることが分かった。③過去の山火事や森林伐採の結果、アイスリッチな凍土が融解し生成した凍土上の湖沼からのメタン発生量を測定した。湖沼の周辺状況により湖沼全体からのメタン発生量は大きく異なるが、直径100m程度の小さな湖沼では160mg/m²/day、500m程度の大きな湖沼では140mg/m²/dayであった。同位体分析の結果から二酸化炭素と水素からメタンの合成が起こっていると推定した。温暖化の結果凍土が融解しメタンが発生する可能性については、湖沼が出現した場合のメタン放出量の推定に必要なデータが得られるので、今後はアイスリッチな凍土の分布と、降雨量の変化に伴う火災の頻度の変化の推定が必要である。④湿原からのメタン発生量が温暖化によりどの様になるかを推定する上で、土壌内プロセスを理解することが重要である。現在溶存メタン濃度の測定や、これを決める因子についての研究が進行中である。

〔キーワード〕 永久凍土、メタン、フラックス、湿原、炭素同位体比

1.序

大気中メタンの発生源は人為発生源と自然発生源に大きく分類され、それぞれに含まれる多くのプロセスについて発生強度が評価されているが、自然起源からのメタン発生量の評価は其中最も不確定性が大きい。発生量の将来予測については、単位発生量の分かっている人為発生源については、経済・社会活動の規模拡大を予測し、既知の単位発生量をかけることにより可能である。しかしながら、自然発生源の将来の変動予測については、気候変動や開発などによる変動のメカニズムに係わる研究なくしては予測が困難である。

西シベリアには既に大湿原がありメタンの大きな発生源であるため、ここからの発生量が将来どのように変化するかは予測は重要である。一つの変動は人為的な乾燥化事業の影響であり、排水溝の敷設により乾燥化し森林や牧草地として利用する面積が増えてきていることである。もう一つは気候変動の影響であり、例えば、ツンドラ地帯の気温の上昇、また、東シベリアは凍土地帯であり脆弱な地質・植生であるため気候変動の結果大きな変動が起こることが懸念される。

将来予測を定量化するため、次の様な研究が必要である。

- ① メタンの発生量を経験的に気象パラメーターで記述し、気候モデルによる予測値を入力して推定する。
- ② 炭素や窒素など炭素固定→炭素 (CO_2 、 CH_4) 放出を支配する因子物質を押さえ推定する。例えば遠隔計測による植物のNPP推定と、嫌気性パラメーターによる CO_2/CH_4 比により、メタン発生量を推定。
- ③ 植物による光合成、植物体の分解、メタン生成の原料生成、メタン生成、メタン酸化と地表面輸送などのプロセスを詳細に研究し、メタン生成モデルを作る。その上でメタン生成量を支配する要因を解析し、リセン等で把握し易い量との関連づけをおこなう。
- ④ 古気候下でのメタン生成の推定
- ⑤ 過去に蓄積されたメタンの放出に関する研究

2.研究目的

気候変動モデルに組み込み、メタン発生を通じたフィードバック効果を評価することは重要であるが、それには膨大なプロセス研究とモデルを検証する広範囲で長期の観測実験が必要である。ここではその試みの一環として

- ① 過去に生成し、凍土に蓄積されたメタンの放出に関する研究
- ② アイスリッチな凍土が融解して生成したアラーズと呼ばれる凍土上の湖およびその周辺からのメタン生成量の測定
- ③ 土壌中のメタン生成と輸送に関する研究を行う。

3.観測・実験方法

3.1. レナ河デルタにおけるアイスコンプレックスに含まれるメタンに関する研究

最終氷河期に形成された凍土が高緯度のシベリアに広く分布している。アイスコンプレックスあるいはエドマと呼ばれる地下水が東シベリアの凍土には良く見られる。アイスコンプレックスの分布は図1に示すように東シベリアの河口付近やレナ川では中流域まで分布している。この中にはアイスウェッジと呼ばれる楔状の土砂を含まない氷がある。その厚さは平均40~50mである。その生成メカニズムは次のように考えられている。水分を含んだ土砂が凍る際、氷と土砂が分離することは良く知られている。厳寒期に更に冷却すると氷が収縮し縦に亀裂がはいる。春に地表部が融解しこの割れ目に水が流入し、亀裂を塞ぎ、楔は成長する。これを繰り返し楔が太ると同時に上部に土砂が堆積する度に情報にも成長する。実際楔の構造は中央部に向かってV字型に筋構造を持っている。この新たに流入する水は地表面で生成したメタンを含んでおり、時には植物の一部を含んでいる。

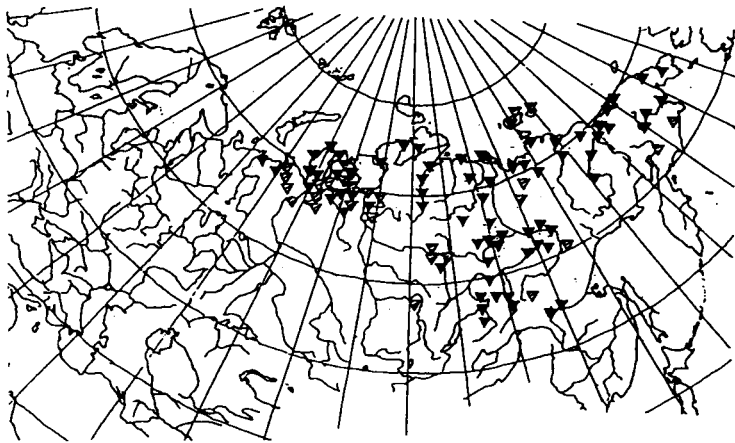


図1. アイスコンプレックスの分布

北極海に面した地域（チクシ）にはこのアイスウェッジが露出した場所があり、各高度で氷のサンプルを切り出すことが出来る。この氷に含まれている有機物の放射性炭素から年代同定を行うことが出来る。また、氷のサンプルを飽和食塩水に溶かし、生成する気体を採取して成分分析を行った。気泡の割合は体積比で10%にもものぼり、これに含まれるメタンの量は深度（年代）によって大きな変動をしめすが、35,000~25,000年前以降は0.1%を越える値となっている（図2）。安定炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ は-70‰であり、現在のツンドラ湿地に似通った高地下水位・嫌氣的な湿原でメタンが生成したものと考えられる。

アイスコンプレックスは最終氷河期に形成されたが、現在の気候はこれが更に成長する条件にはなく、逆に不安定で、ある速度で融解しつつある。地域と年によって大きく異なるが、海岸線のアイスコンプレックスの崖は4~6 m/yrのスピードで融解し崖は陸地側に後退しつつある。凍土が融解しアイスコンプレックスやアイスウェッジに含まれるメタンが放出されても、一般の凍土上には活動層と呼ばれる凍土が融解した層があり、上層部には有機物の堆積した層がある。放出されたメタンはこの層を通過す

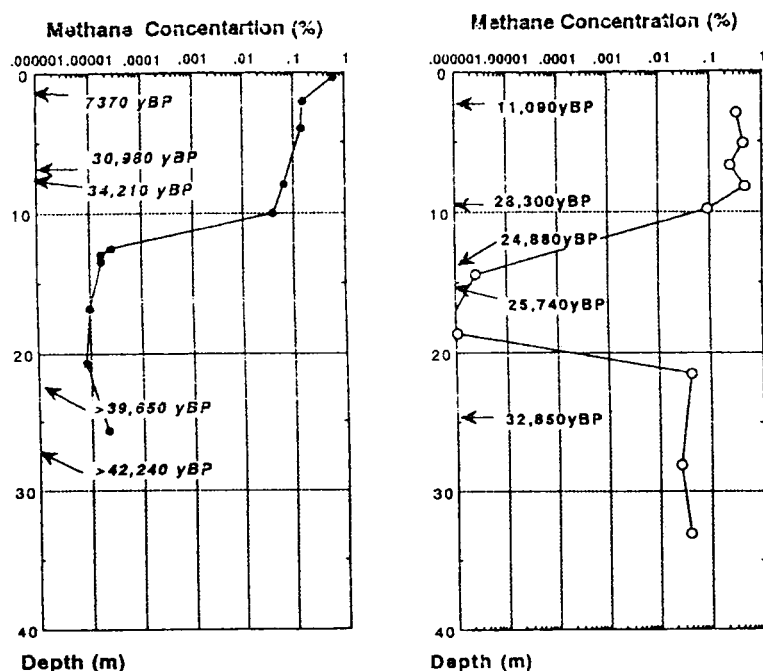


図2. (a) Bykovskyと (b) Lyakhovsky Island とで採取されたアイスウェッジに含まれるメタン濃度の深度分布と有機物中放射同位元素 (^{14}C) から推定された年代。

る際、嫌気的な条件がなくては途中で酸化されるため、大気中に放出されない。ツンドラ湿原からのメタン生成には、過去のメタンが放出されて出てくるものと、現在の有機物が分解されて生じたものがある。これらは別な研究として測定されている。これに対してアイスコンプレックスの崖が融解し後退する場合には、アイスコンプレックスから放出されるメタンは直接大気中に放出されるので、酸化を受けない。

次のような実測値からこのプロセスで大気中に放出されるメタンの総量を推定した。

① アイスコンプレックスのアイスウェッジや堆積物に含まれるメタン量

空気の泡の体積で1～3%

② アイスコンプレックスに含まれる空気の泡の割合

アイスコンプレックスの体積の10%

③ メタンを含むアイスコンプレックス層の厚さ

平均10～20m

④ アイスコンプレックスが露出している崖の後退する速度

4～6m/年

⑤ 海岸や河沿いにアイスコンプレックスが露出している崖の長さ

3,000～8,000km

これらの値からアイスコンプレックスが後退し直接大気中に放出されるメタンの総量は、2～10Tg/年である。

(この項は北海道大学低温科学研究所福田正己教授への委託である。)

3.2. ツンドラ湿地からのメタン発生量

2-1.のアイスコンプレックスが融解しているチクシ近郊のBykovsky 半島に近いMustakh 島(71° 30′)でツンドラ湿地からのメタン発生量を測定した。この島は7km x 0.5kmの平坦な島で、厚い凍土の上にある。(図3) 観測地点は地下水位は地表面近くスゲが生育している。チャンバー法により測定したメタン発生量と平均日地温との関係および凍土の融解深度を図4に示す。地温の高い日にはメタン発生量が大きい傾向があるが、例えば8月9日と8月18日を比較してみると、地温は18日の方が低くなっているにも係わらず、メタンの発生量はほぼ同じである。気温は8月中旬をピークとして下がり始めているが、融解深度はまだ更に深くなっており、メタンの発生量が低下しない理由はメタン生成細菌の活動している層の厚さが増しているためである可能性がある。0℃以上でメタン生成菌の活動が始まると

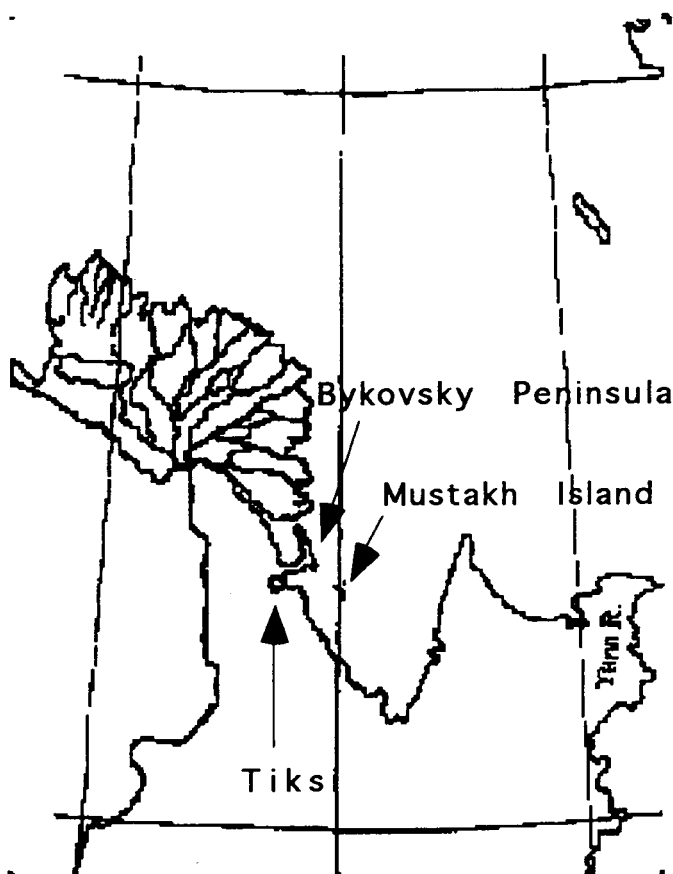


図3 ムスタフ島の位置

して、その活動は5℃までならば線形に活性化すると仮定すると、メタン生成量は融解層温度に融解深度をかけたものに比例すると考えられる。この値を横軸に、メタンのフラックスを縦軸にしてその関係を整理したものを図5に示す。1ヶ月のデータが良い相関を持っていることがわかる。

もう一つの解釈は、植物体が他の菌類により分解されメタン生成菌が使用できる物質になるには時間を要する。このため使用できる物質(アセチル基や水素など)の蓄積される夏の終わりが、地温は低下するが、もっともメタンが生成される時期になる可能性がある。

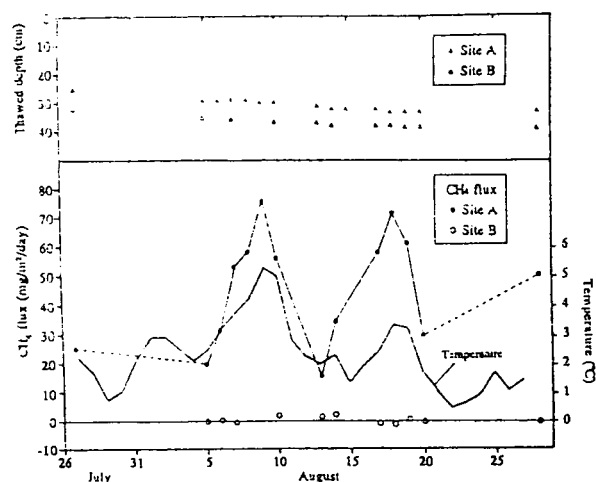


図4. メタンフラックス、融解深度と融解層全体の日平均地温

凍土が融解し過去生成し凍土に閉じこめられたメタンが主要なメタン源であるとする、メタン生成量は融解層が深くなる速度に比例するはずであるが、深層部では気温や日射の影響を直接受けないので温度の上昇や融解の進行は日変動しない。このことから凍土の融解によるメタン発生は主要な発生源ではない。

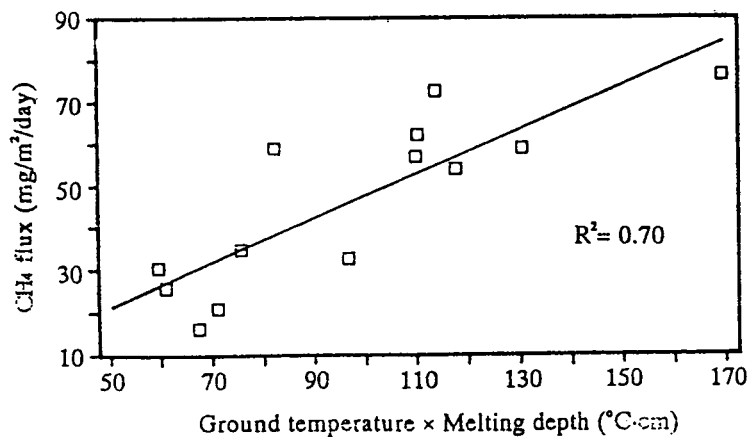


図5. メタンフラックスの（融解層の平均地温 x 融解層の厚さ）への依存性

（この項 北大低温研 中野智子ら）

3-3.凍土が融解して出来た湖沼からのメタンの発生

重要な温室効果気体であるメタンの自然放出源として、湿地(Wetland)は重要であり、主として熱帯地域と北半球高緯度地域に分布している。東部シベリアには永久凍土地帯が広く分布し、針葉樹林帯(Taiga)の中に数多くの湖沼群からなる湿地が存在する。永久凍土地帯の湖沼は、永久凍土の融解水により灌養されているといわれ、現地ではアラス(alas)と呼ばれる。このような湖沼は一般には浅く湖底まで混合するため、湖水は好氣的である。しかしながら、底泥は嫌氣的であって、かなり大きなメタン放出を示す。また、永久凍土地帯の氷そのものの溶解に伴い、含まれる気泡の発生があり得る。そのガスには高濃度のメタンを含むものがあり、大気メタン濃度を左右する量であるかどうかの問題になる。今後予想される地球の温暖化に伴う永久凍土地帯の応答は、世界の気候に大きなフィードバックとなる可能性がある。

3-3-1. 凍土地帯の湖沼におけるメタン生成と放出量

本研究では、東部シベリアの中心都市であるヤクーツク市周辺、レナ川左岸にあたる地域のアラスを1993年の7-8月に調査して、湖水表面とその周辺湿地からのメタン放出量を測定した。さらに、湖底から採取した気体の組成およびそのメタンと二酸化炭素の炭素同位体比を測定した。同様な調査をヤクーツクの対岸、レナ川右岸にあたる地域の湖沼群を含めて1994年7月に繰り返し、メタン放出量を測定した。(図6)

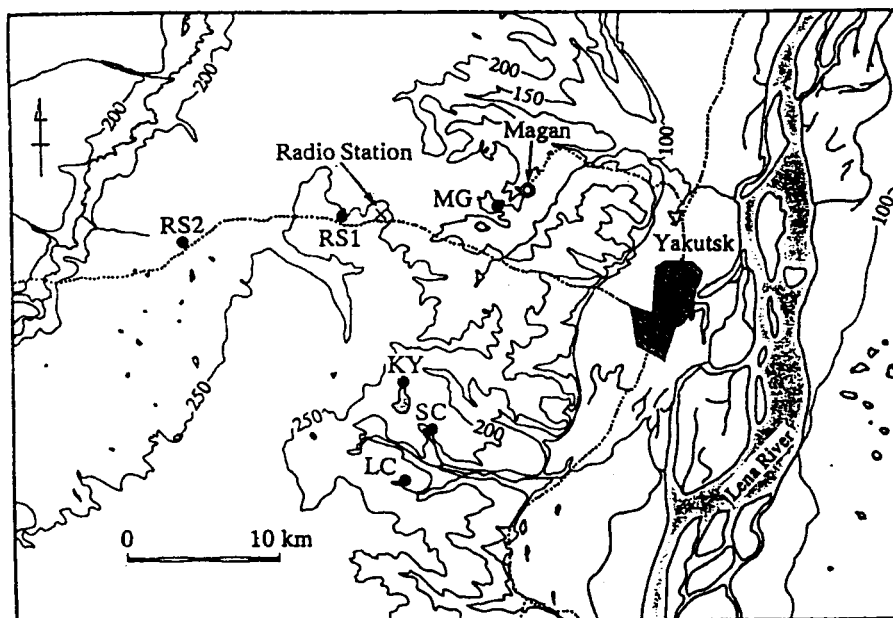


図6. ヤクーツク周辺の調査地点。ヤクーツク市はレナ河に面しておりこの永久凍土は浅い。100mの高度差の河岸段丘の上に(図の左2/3)は厚いアイスリッチな凍土層があり、アラスが点在している。

表1 ヤクーツク周辺アラーズの周辺水草帯でのメタン放出量測定、1994年7月

湖沼	日付 in 1994	水位/cm	メタンフラックス mg/m ² /day	場所のタイプ°	乾燥地の平均 mg/m ² /day	湿潤地の平均 mg/m ² /day
Lake DJ	07/20	5	317.1	E		434
	07/21	5	273.7	E		
	07/20	7	512.3	E		
	07/21	7	446.2	E		
	07/21	7	400.7	E		
	07/22	7	486.0	E		
	07/22	7	494.4	E		
	07/23	7	541.9	E		
Lake TL	07/23	0	9.7	D	10	150
		11	35.6	E		
		12	104.4	E		
		13	184.1	E		
		15	277.3	E		
Lake KY	07/13	0	0	D	3.9	523
		0	7.8	D		
Lake SC	07/15	6	523.4	B		
		0	0	D	0	339
		5	55.5	C		
		6	418.2	C		
Lake OL1	07/21	7	643.1	B		
		10	238.3	B		
		0	887.5	B	109	505
		0	150.0	C		
Lake OL2	07/22	0	67.3	D		
		0	121.6	B		
		0	216.7	B	28	241
		0	183.9	B		
		0	56.8	C		
Lake RS1	07/18	0	0	D		
		0	321.9	B		
		12	374.4	C		501
		14	627.4	C		
Lake RS2	07/28	0	0	D	0.7	108
		0	1.3	D		
		11	72.4	C		
		12	48.6	C		
		12	264.8	C		
Lake MG	07/26	13	45.5	C		
		0	0	D	46	518
		0	92.0	C		
		4	36.6	C		
		17	450.3	C		
		18	1053.0	C		
	29	532.0	C			
					乾燥地全体	湿潤地全体
範囲					0-109	108-523
平均					25	369

場所のタイプ B:水面上に張り出した湖岸水草帯 C:湿潤な湖岸水草帯、密に生えている
D:乾燥した湖岸水草帯、湿潤帯の外側 E:湖岸のアシ帯、まばらである

メタンの放出量 湖水面からのメタン放出量は、59cm角のアクリルチャンバーを水面に浮かせ、内部の空气中的メタン濃度経時変化から求めた。測定には2-3時間を要した。湖沼周囲の草地からの放出量は、30cm角のアルミニウムチャンバー内のメタン濃度経時変化より求めた。1993年の調査による4湖沼の平均では、水面からの放出量は $260\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ であった。湖水に浸っているか地下水位が20cmより浅い湿潤な周辺草地では $200\text{--}800\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ の放出量が観測された。比較的乾燥している周辺草地からも $48\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ と無視できない量のメタン放出を認めた。周辺草地を含めた湖沼の形態をモデル化し、平均的なアラスからの夏のメタン放出を算出したところ、水域の大きさが100m以下の小型のアラスで $310\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 、水域の大きさが数100m以上の大型のアラスで $170\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ と推定され、寒帯湿原のメタン放出量の従来の報告値と同じか、やや大きな値が得られた。

表2 ヤクーツク周辺アラスの水面からのメタンフラックス($\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$)

	日付		
	1994年		
Lake DJ	07/21	86	
	07/22	64	
Lake TL	07/22	306	
Lake KY	07/13	596	255
Lake SC	07/15	514	
Lake OL1	07/21	64	
Lake OL2	07/22	89	
Lake RS1	07/18		185, 351
Lake RS2	07/28	96	830
Lake MG	07/26		133
Lake LC			3,40

さらに、1994年7月にメタン放出量の測定を繰り返した。表1と表2にその結果をまとめた。表1が湖沼周囲の湿地帯の放出量測定結果である。Lake DJは直径3kmほどの大きな湖沼で周囲にまばらなアシ原がある。ここの水位7cmの地点では4日間朝夕の測定を繰り返したが、フラックスの変動は小さかった。Lake TLはLake DJと似た形態の湖沼であったが、アシ帯のフラックスはやや小さかった。Lake KYとLake SCは直径数百メートルの湖沼で、密な水草帯が発達している。湿潤な水草帯で大きなフラックスが認められたが、周辺の乾燥地はほぼメタン放出がなかった。Lake OL1と2は直径100ないし200mの湖沼で、周囲にコケ帯が発達している。ここでも湿潤帯から乾燥帯への次第にフラックスが低下していく傾向が再現性よく認められた。Lake RS1と2は直径数10mの池に近い湖沼であり、RS1で大きなフラックス、RS2でやや小さなフラックスが認められた。RS2は1993年に同じ場所を測定した時の1/7程でしかなかった。Lake MGは直径100mほどの湖沼で、周囲に広く水草帯が発達している。前年より著しく

水位が高く、普段は乾燥している周辺部にまで浸水していた。ここでは前年より大きなフラックスであった。1994年に観測した全湖沼の湿潤地を平均したフラックスは前年の結果をおよそ再現した。しかし、周辺乾燥地のフラックスの平均は約1/2となった。水位の増大に伴うフラックス上昇は1994年の観測の方で再現性よく認められており、湖沼形態のモデル化によるフラックスを推定をやり直した。その結果、小さな湖沼で $161\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 、大きな湖沼で $138\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ を得た。1993年の観測での乾燥地の過大評価が差の原因である。この結果によれば、メタンフラックスは従来の報告値にほぼ相当するものといえる。表2は湖水面からのフラックスである。1993年と1994年の結果を併記した。Lake LCは湖岸帯のメタン放出を著しく小さい湖沼であり、その原因が高い硫酸濃度にあるものと推定されている。湖面からの放出量と湖沼の形態との関係は明らかにならなかった。平均してみると2年間のフラックスの平均はそれぞれ260および $227\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ でありほぼ同程度であった。

3-3-2. 湖沼底泥に含まれる気体の組成と炭素安定同位体比

これらの湖沼の底泥を攪拌することにより、底泥に保持されている気泡が回収できる。1993年の観測で得た試料につき、気泡のガス組成を、TCD付きガスクロマトグラフで測定し、そのメタンと二酸化炭素の炭素安定同位体比を、GC/C/MS法により測定した(図7)。深度の比較的大きな(1m以上)の湖沼の湖心で採取すると、メタン濃度は65-80%であり、残りの大部分が窒素であった。深い湖沼の周辺部と浅い湖沼では20-80%の間で大きく変動し、窒素の割合が大きくなった。酸素の濃度は通常3%以下であったが、サンプリングの際に酸化的な湖水中を試料気体が通過することの影響があったかもしれない。二酸化炭素濃度は2-10%の間で比較的大きく変動したが、湖心部、周辺部、浅い湖沼の間での明確な差異はなかった。

炭素安定同位体比の測定結果によると、気泡のメタンでは平均61%、53から71%のやや大きな範囲の値を示した。一方、二酸化炭素の炭素安定同位体比は、気泡のメタン濃度と強い相関を示し、メタン濃度が高いほど同位体比が高くなる結果となった。関係は直線的であり、メタン濃度が70%以上に達するような気体では3%程度の重い二酸化炭素となった。メタン濃度をゼロに外挿した切片は17から19%となり、生物起源有機物よりやや重い同位体比となった。同様な現象は、釧路湿原の気泡試料でも認められているが、切片の同位体比が釧路湿原の場合には25%と生物起源有機物に極めて近い値となった点が異なる。メタンの炭素安定同位体比からは、これら小湖沼底泥でのメタン生成が、二酸化炭素の水素による還元を主たる経路として起こっていることが推定され、その際、基質の二酸化炭素の利用に伴ってその同位体比が変化したと考えられ、メタン生成が二酸化炭素の供給で制約されている可能性を示唆するものである。現在その生成過程をさらに詳しく解析する目的で、メタンの水素の同位体比の測定を行っている。これからは、メタンの生成した現場の水の由来を解析することが可能になる。

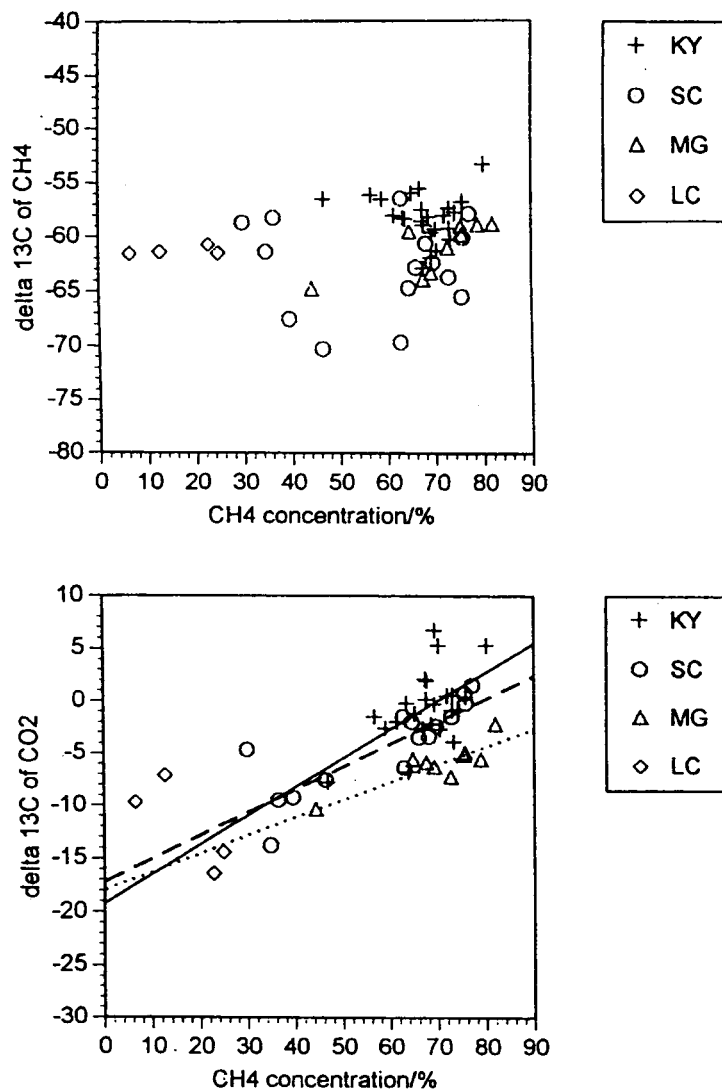


図7 ヤクーツク周辺アラーズの気泡ガスに含まれるメタンと二酸化炭素の炭素安定同位体比とメタン濃度の関係

3.3.3.まとめ

重要な温室効果気体であるメタンの自然放出源として、東部シベリアの永久凍土地域の針葉樹林帯に存在する数多くの湖沼群からなる湿地を調査した。レナ川左岸と右岸のそれぞれの湖沼群を、1993年と1994年の夏に調査して、湖水表面とその周辺湿地からのメタン放出量を測定した。水面からの放出量は1993年と1994年のそれぞれで、260、227 $\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ であった。湖沼周辺の湿地帯の放出量は乾燥草地で25、湿潤地で369 $\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ であった。これらの結果を、湖沼の水面から周辺草地までを平均的な形態としたモデルに当てはめると、直径100m程度の小さな湖沼では161 $\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 、500m程度の大きな湖沼では138 $\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ と推定された。この結果は、寒帯湿原のメタン放出量の従来の報告値と同程度であった。これらの湖沼の底泥から放出されるガス組成とメタン、二酸化炭素の

炭素安定同位体比を測定した。メタン濃度は65-80%であり、残りの大部分が窒素で、少量の二酸化炭素を含んでいた。気泡のメタン炭素安定同位体比は平均61%であった。一方、二酸化炭素の炭素安定同位体比は、気泡のメタン濃度と強い相関を示し、メタン濃度が高いほど同位体比が高くなる結果となった。メタンの炭素安定同位体比と合わせて、メタン生成は、二酸化炭素の水素による還元を主たる経路として起こり、その過程での二酸化炭素の供給が発生量を制約していることが推定された。

(この項、野尻ら)

3-4. 土壌中のメタン生成と輸送に関する研究

メタンは地下のメタン生成細菌により生成されるが、その養分としてピートなど植物体を分解し、アセテートや硝酸などメタン生成細菌が利用しやすい物質に変換するプロセスが必要である。また、生成したメタンが地表面近くの酸素含有量の多い場所で、メタン酸化細菌により酸化・消費されるプロセスも、大気への放出を決める重要な要因である。

湿原でメタンがどの深度で生成しているかを明らかにするため、第一に湿原の土壌間隙水に溶解しているメタン濃度の深度分布を測定した(図8)。94年度にはアルミの棒に垂直に8mmの孔を開け、蒸留水を含浸させたバルブ(濾紙)を充填し、これを湿原に挿入し数時間放置した。この間拡散により蒸留水は湿原の土壌間隙水と置換する。これを食塩を飽和させた水と窒素ガスの入った容器に移し振盪することにより液相から窒素ガスにメタンを移し、これを分析した。95年度は、長さの異なった1/16”

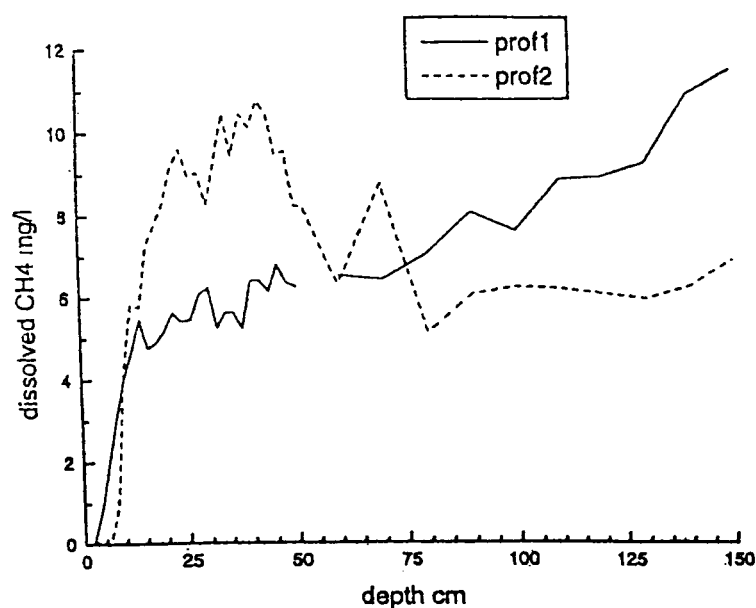


図8. 湿原の溶存メタンの深度分布

のステンレス管を板状に並べたものを湿原に挿入し、各深度から土壌間隙水を直接採取する方式を新たに考案し、測定を行った。図8の実線と点線とは約30m離れた場所でのデータであるが、いずれも深度15~20cmまではメタンの濃度が急激に増加し、それより深い場所での溶存メタンの変動は緩やかである。場所によっては点線のようにピークを示した後、更に深い場所ではむしろ少なくなる場合もあれば、実線の様に深くなるほど溶解度を増す場合もある。

深度4、28、48cmの溶存メタン濃度がどのような変動を示すかを図9に7月14~19日のデータで示す。17日の深さ28および48cmにおける溶存メタンの値は、その前後に比べ2倍の値を示しているが、深度4cmでは異なった変化となっている。この日は雨天でありその前後に比べ地表面温度は5~8℃も低かったが、深度28cmもの深さではその影響を全く受けない。大変興味ある結果であるが、この原因は不明である。

溶存メタン濃度を決定する要因は、メタン生成細菌による活動の積分値と、地表面への輸送によるロスのバランスである。従って、これを分離するために、地表面への輸送が無い状態で、

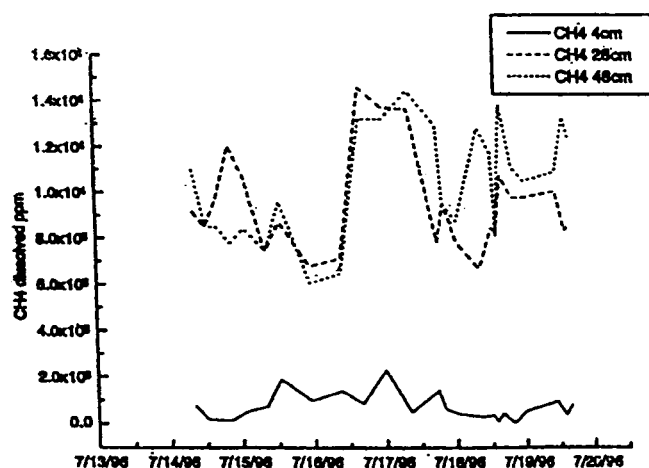


図9. 溶存メタンの時間変動

各深度でメタン細菌のメタン生産性を明らかにすることは興味ある。この目的でビートコアのサンプリングを行い、これを嫌気条件で培養し、溶存メタンの濃度の時間変化を測定した。図10のサンプルでは、最初の8時間で深い場所でのメタンの濃度は急激に増加したが、それ以降は増加が停止し、浅い場所(10cm)ではかなり遅れて増加が始まった。他方、別のサンプルでは10~20cmの深度での増加が目立つものの、全体としては平均的に増加している(図11)。

図3の様に深い場所のサンプルで急激にメタンを生成した原因は、元々メタン細菌が多く、基質となる物質も多かったと考えられる。その原因としては、地温が低かったためメタン細菌も多く基質が十分あるのにメタン生成が起こらなかったのが、培養温度で急速に進んだ可能性がある。しかしながら、特にサンプリングした場所で深い場所に低温塊があったとは考えにくい。図10の浅い場所や図11の全体の例では、メタン生成に時間がかかっている。これは初期のメタン細菌の量が少なく増殖に時間がかかったか、あるいはメタン細菌が利用できる酢酸や蟻酸が生成するまで時間がかかったためと考えられ

る。一般に30cm以下の深度では、ピートの葉など分解しやすい部分は既に分解が進んでおり、さらなる分解には時間がかかることから、基質の供給が制限因子になっている可能性が大きい。これを確かめるには化学成分の分析が必要である。10cmより浅い場所のサンプルでは、双方の結果で共通して、浅くなるほどメタンの生成が遅いが、これは初期条件としてメタン生成細菌が少なかった事を反映していると考えられる。

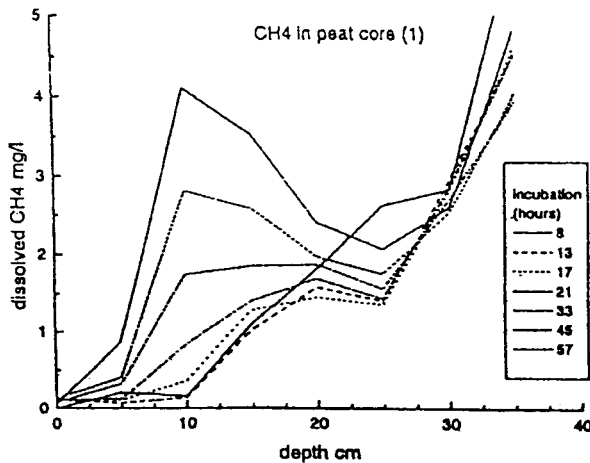


図10. ピートコアの培養実験。20cmより深い場所から得られた土壌は、短時間でメタンを生成したが、その後は生成が停止した。

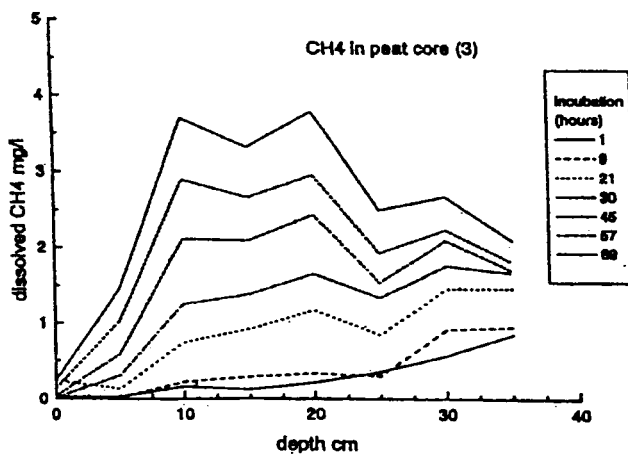


図11. 図3と同様な実験であるが、このサンプルではメタンの急激な増加は見られず、10~20cmのサンプルがメタンを効率よく生成した。

土壌中の溶存メタンの深度分布には、表面近くで急激な濃度勾配があり、深い所では変化が少なかった。表層の溶存メタン濃度の勾配が大きい場合メタンフラックスも大きくなるはずであるが、実際はむしろ逆であり、発生と輸送のプロセスについて更に詳しい研究が必要である。

ピートコアの培養実験は、メタン生成能に関する興味ある結果をもたらしたが、メタン生成の基質となる物質の濃度や、サンプルした場所の履歴など、新たな測定データが必要であることが明らかになった段階であり、更に掘り下げた研究が必要である。

未だ土壌中のメタンの輸送や土壌中での酸化プロセスの研究が未着手であり、将来の課題として残っている。メタンの輸送については、同位体でラベルしたメタンを過飽和状態で注入するか、あるいは、酢酸塩として供給するなどの実験が考えられる。

4 結論

温暖化が進行した場合、脆弱な植生と地質であるシベリアの凍土地帯が大きな影響を受け、メタンの発生が増加する可能性を様々な面から検討した。

①シベリアの大部分を占める凍土地帯は、アラスカやカナダの凍土地帯と異なり水の含有率が高いのが特徴である。アイスコンプレックスと呼ばれる凍土が現在融解をつづけているので、その中に含まれるメタン量を見積もった。現在、崖が融解し直接大気に放出されるメタンの量は2～10Tg/年であることを明らかにした。温暖化の結果アイスコンプレックスの融解が加速される場合は、このプロセスも無視できない。今後は衛星観測などにより北極海沿岸の海岸線の後退などが加速されるかどうか見守る必要がある。

②シベリアのツンドラ地帯でメタンの発生量を測定し、地温や融解深度とメタンの発生量の関係を明らかにした。メタン発生量はもっともメタンの発生の大きい時には80mg/m²/dayにも達するが、天候により大きく変動することが分かった。現在はメタンの発生時期が短いのでグローバルには小さい部分に過ぎないが、温暖化の結果地温が零度以上の期間が長くなれば温帯・亜寒帯域の湿原に劣らないメタン発生源になる可能性があることが分かった。年毎の気象変動に伴い通年のメタン発生量がどう変わるかに注目し、特に、温暖な年の測定例を積み上げる事が重要である。

③過去の山火事や森林伐採の結果、アイスリッチな凍土が融解し生成した凍土上の湖沼からのメタン発生量を測定した。湖沼の周辺状況により湖沼全体からのメタン発生量は大きく異なるが、直径100m程度の小さな湖沼では160mg/m²/day、500m程度の大きな湖沼では140mg/m²/dayであった。同位体分析の結果から二酸化炭素と水素からメタンの合成が起こっていると推定した。温暖化の結果凍土が融解しメタンが発生する可能性については、湖沼が出現した場合のメタン放出量の推定に必要なデータが得られないので、今後はアイスリッチな凍土の分布と、降雨量の変化に伴う火災の頻度の変化の推定が必要である。

④湿原からのメタン発生量が温暖化によりどの様になるかを推定する上で、土壌内プロセスを理解することが重要である。現在溶存メタン濃度の測定や、これを決める因子についての研究が進行中である。この様なプロセス研究によりメタン発生モデルを構築することが、温暖化によるフィードバックを見積もる上で必要である。

国際共同研究等の状況

相手先 ロシア科学アカデミー永久凍土学研究所

1994年7月から9月にかけて共同研究調査を行った（国立環境研究所および北海道大学）

1995年2月永久凍土学研究所にて、調査打ち合わせを行った（国立環境研究所）

1995年3月ヤクーツクにて研究成果のシンポジウムを行った（北海道大学）

研究発表の状況

- M.Fukuda : Occurrence of Ice-complex (Edoma) in Lena River Delta Region and Big Lhyavosky Island, High Arctic Eastern Siberia, Proc. Second Symp. Joint Siberian Permafrost Studies, pp5 (1994)
- T.Nakayama and A.Akiyama: Measurement of Methane Flux in a Tundra Wetland, Mustach Island in 1993. Proc. Second Symp. Joint Siberian Permafrost Studies, pp37 (1994)
- T.Nakayama, Y.Nojiri and Y. Zeng: Measurement of Methane Flux from Alases around Yakutsk, Eastern Siberia in 1993. Proc. Second Symp. Joint Siberian Permafrost Studies, pp40 (1994)
- Y.Nojiri and Z. Zeng: Composition of Gas Bubbles of Lakes around Yakutsk, Russia Proc. Second Symp. Joint Siberian Permafrost Studies, pp45 (1994)
- G.Inoue, Y. Takahashi, S.Maksyutov, M.Sorokin and N.Panikov: Methane Emission rate from the Wetland in West Siberia and its Controlling Factors Proc. Fifth Symp. Joint Siberian Permafrost Studies, pp34 (1997)
- 野尻幸宏他、シベリア永久凍土地帯の小湖沼のメタン放出とその炭素安定同位体比、日本地球化学会年会、名古屋、1994年10月