

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

①シベリアの自然湿地からのメタン発生総量推定に関する研究

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

野尻幸宏、向井人史、町田敏暢、マクシュートフ

大気圏環境部 上席研究官

井上元

大気圏環境部 大気動態研究室

遠嶋康徳、高橋善幸、中野智子、M.ソローキン

平成6－8年度合計予算額 40,786千円

(平成8年度予算額 13,366千円)

〔要旨〕 IPCCの94年の報告書1)にも述べられているとおり、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さが大きい。これは自然湿原からのメタンの発生が単位面積当たりの発生量は少ないが極めて広い面積に分布すること、降水量や気温など自然条件の変動により発生量が時間的に大きく変化すること、湿原へのアクセスが一般に困難であることなどに起因する。中でも西シベリアには世界再大規模の湿地があり、メタンの大きな発生源であると予想されるが、ここでのメタン発生の観測の例は全くない。その総量を推定することは、自然起源のメタン発生量推定の不確定さを少なくするために重要である。また、気候変動の影響を明らかにするためには、環境要因とメタンの発生量の関係を定量的に明らかにする必要がある。

92年以来94年までの三年間、大型の航空機によるメタンの広域濃度分布測定を西シベリアと東シベリアで行なったが、95年は年間発生量を見積る目的で、従来の観測時期(二週間)を二ヶ月に大幅に期間を広げた観測を行った。

94年度から96年度にかけては、航空機観測に加え西シベリア南部の典型的な高層湿原で、チャンバー法などの方法でメタンのフラックス測定を行った。メタンの発生は地温と正の相関を有しており、全体としては水位の高い湿原の中心から乾燥した森林に近い方向にむけてメタンのフラックスが減少していた。また、植生との関連も明らかになった。

シベリアでは世界で最も内陸的な気象となっており、夜間は短いにも係わらず強い逆転層が発生しており、逆転層内に蓄積されるメタンの量を測定、夜間の平均的なメタンフラックスを求める方法は、他の方法に比べ信頼性が高いことが93年の調査で判明したので、94年はその方法を中心に高精度の観測を行った。

[キーワード] シベリア、メタン、温暖化、発生量、湿原

1.序

大気中メタンの発生源としては、人為発生源と自然発生源に大きく分類されるが、バックグラウンド値としての自然起源のメタン発生量を明かにすることは、地球規模でのメタン収支を明かにする上で重要である。北半球の湿原は地球規模の有機炭素の14%を貯蔵しており、その大部分は二酸化炭素とメタンとして大気中に放出され、一部が泥炭化する。米国やカナダの寒帯やツンドラ湿原からのメタン発生量の測定値を全体に敷衍すると、従来言われていた100~200Tg/年から10~35Tg/年と大幅に小さくなる。こうした現状から、世界最大規模の湿地がある西シベリアでメタン発生量を実測することには大きな意味がある。ここでの観測結果は、衛星などの遠隔計測で得られた広域のデータによりスケールアップしシベリア全体のメタン発生量推定を行うための重要なデータとなる。

他方、温暖化のモデル計算では高緯度の冬の著しい気温上昇が予想されており、実際、シベリア中央部は近年温暖化が進行している。気温上昇は雪解け・解氷の時期を早め結氷の時期を遅らせるので、メタンの総発生量は増えるものと予想され、いわゆる正のフィードバックとなる。地温の上昇は単位発生量を増やすが総発生量の増加に直接結びつくかどうかは不明である。メタンの原料になる有機物を供給する水苔などの成長、栄養塩の供給による制限、蒸散が活発化する事による乾燥化など多くの要素が絡むためである。このように将来の地球温暖化に伴うフィードバック効果を推定するためにはメタン発生を正しく理解しモデルをつくるための基礎的なデータの蓄積が重要である。

2.研究目的

自然起源のメタンの総発生量を見積もることと、気候変動にともなうメタン発生量の変化を予測することが最終目的である。そのためには、チャンパー法、渦相関法、濃度勾配法、気球による高度分布測定、航空機による高度・水平分布測定、遠隔計測による濃度分布測定など、測定のスケールを変えた多様な手段を用いた観測で総合的に研究を進める必要がある。また、土壌中の嫌気層におけるメタン生成菌によるメタン生成速度、好気層におけるメタン酸化菌によるメタンの酸化、土壌から大気への輸送プロセスなど、土壌プロセスを支配する要因を明らかにし、環境要因によるメタン発生量の変動に対する評価も重要である。

3.研究成果

3-1.地上観測フィールドの特性

西シベリアの大低地における湿原は大きく分類して、北部のツンドラ地帯、中部の湖沼・低層湿原、河川流域に形成される湿原、南部の高層湿原からなる。このうち北部のツンドラ地帯はサブテーマ②と同一と考えられ、その地球環境へのインパクトは小さいと予想されるので、ここでは扱わない。河川流

域は全体の面積にしめる割合が小さく、また、年や季節により冠水の状況が異なるので定常的な発生源ではなく、研究対象になりにくい。こうした点から中部の低層湿原と南部の高層湿原での調査研究が必要と判断した。

南部の高層湿原はGreat Vasyugan Wetlandの一部で、その風上にあたる南に比較的乾燥した穀倉地帯を控えており、ここでのメタンの発生はないので観測に好都合である。多数の小さい河川がオビ川に向かって北に走るが、河川に沿いは水はけが良いため森林地帯となっている。木材の伐採を主たる産業とする100軒規模の村落が主要道路に沿って点在している。川の源流となる高層湿原は、積雪と降雨により供給される水を傾斜のない広い面積にわたってピートが保持している構造となっている典型的な湿原である。道路近くでは一部排水溝が掘られ、乾燥化したピートを園芸材料や燃料として採掘している。また、乾燥化した場所は森林化が進み、これを伐採しその跡で小麦や牧草の生産も行われている。しかしながら、これら人為的な影響のある面積は全体の1～2%程度で、大部分は自然の湿原と森林（粗な松林）である。（図1）

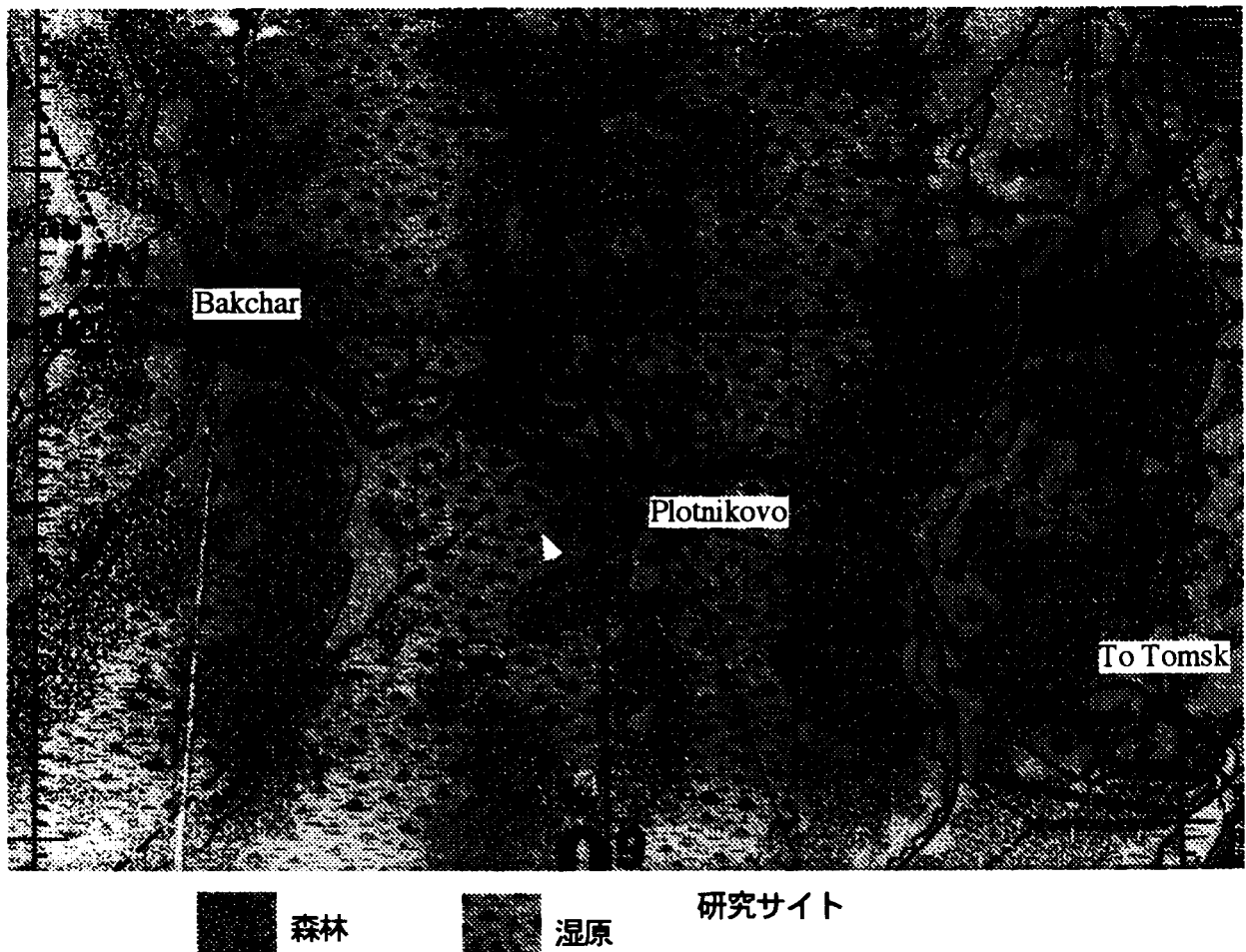


図1. 西シベリアの観測地域。湿原と森林が南北の縞状に分布している。

観測地点はトムスク市の西方約150kmのポロトニコボ村の南西の湿原（Bakchar Bog）に選定した。

その理由は①ノボシビルスクの土壤科学研究所の研究実績があり、②土壌と植生についての調査がすでに行われていること、③過去に人為的な擾乱が無いことが保証されているためである。ここはBakchar

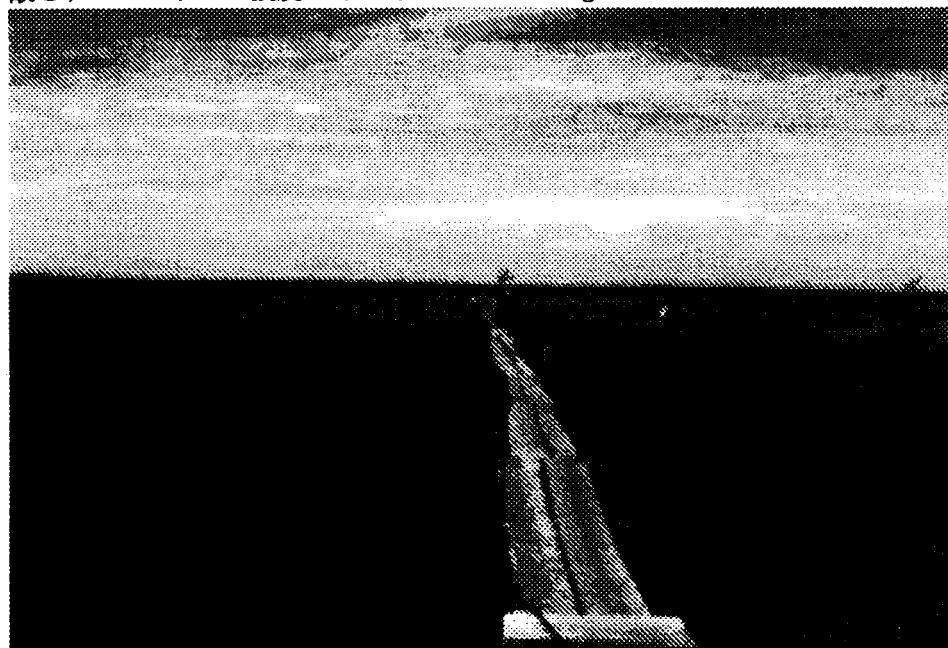
Table I メタン発生量と微視的な化学・生態学的特徴

Chamber	Micro-relief	Dominant plant species	% of total cover	Methane emission, mg CH ₄ ·h ⁻¹ ·m ⁻²			WT, cm	pH	NH ₄ , mg·l ⁻¹	NO ₃ , mg·l ⁻¹
				Mean	Std	CL _{0.05}				
1	Hummock	<i>Eriophorum vaginatum</i>	60	5,64	1,46	0,43	5,3	3,79	0,15	0,23
		<i>Chamaedaphne calyculata</i>	5							
		<i>Sphagnum</i>	100							
2	Hummock	<i>Eriophorum vaginatum</i>	50	29,09	18,70	5,55	8,5	3,64	0,25	0,46
		<i>Chamaedaphne calyculata</i>	5							
		<i>Sphagnum</i>	100							
3	Submerged hummock	<i>Eriophorum vaginatum</i>	55	3,62	1,96	0,58	7,8	3,7	n.d.	n.d.
		<i>Chamaedaphne calyculata</i>	10							
		<i>Sphagnum</i>	100							
4	Depression	<i>Carex rostrata</i>	50	17,60	11,67	3,47	5,5	3,43	3,84	0,1
		<i>Chamaedaphne calyculata</i>	5							
		<i>Sphagnum</i>	100							
5	Depression	<i>Carex rostrata</i>	50	20,37	18,08	5,37	6,0	3,6	5,2	0,1
		<i>Carex limosa</i>	10							
6	Depression	<i>Carex rostrata</i>	20	21,30	14,54	4,29	8,5	3,66	n.d.	n.d.
		<i>Carex limosa</i>	20							
		<i>Sphagnum</i>	100							
7	Depression	<i>Carex rostrata</i>	50	10,64	7,89	2,34	7,0	4,6	n.d.	n.d.
		<i>Carex limosa</i>	10							
		<i>Sphagnum</i>	100							
8	Waterlogged depression	<i>Menyanthes trifoliata</i>	60	14,67	4,16	1,23	3,0	3,7	0,7	0,6
		<i>Carex rostrata</i>	5							
		<i>Carex limosa</i>	10							
		<i>Sphagnum</i>	100							
9	Waterlogged depression	<i>Menyanthes trifoliata</i>	50	16,21	7,21	2,68	4,0	4,1	0,8	0,7
		<i>Carex limosa</i>	15							
		<i>Sphagnum</i>	100							
10	Hummock	<i>Betula nana</i>	40	23,77	16,26	5,11	6,0	4,2	n.d.	n.d.
		<i>Carex rostrata</i>	10							
		<i>Carex limosa</i>	5							
		<i>Sphagnum angustifolium</i>	100							
11	Depression	<i>Chamaedaphne calyculata</i>	10	7,17	6,08	1,75	5,5	4,17	n.d.	n.d.
		<i>Andromeda polyfolia</i>	5							
		<i>Carex rostrata</i>	20							
		<i>Equisetum fluviatile</i>	10							
		<i>Sphagnum majus</i>	100							
12	Depression	<i>Equisetum fluviatile</i>	40	5,79	7,48	3,02	8,0	4,6	n.d.	n.d.
		<i>Carex limosa, C. rostrata</i>	10							
		<i>Sphagnum</i>	100							

n. d.-not determined, std-standard deviation, CL_{0.05}-confidence limit for 0.05, WT-water table level

川と Iksa川に挟まれた15x30km²の湿原で、いわゆるNarym-typeの湿原である。

主たる植生はEriophorumと Carex Sphagnumである。ミズゴケの厚さは1.0から1.5mで、pHは3.45から4.6の酸性である。酸性の強い場所はミズゴケの生育の盛んなbogの周辺で、Menyanthes trifoliataの生育する場所は酸性が弱い。水溶性の窒素酸化物 (NO₃⁻、NH₄⁺) の濃度は大変低く、土壌上部の0-10cmの層では1 L当たり1mg N以下であった(表 I)。窒素化合物の濃度は50-60cmの深度で最大となり、硝酸とアンモニウム濃度はそれぞれ0.24と2.8 mg N/Lであった。



(写真1)

ベースキャンプから湿原に向け250mの長さの渡り、杭を打ちこれに板を乗せて木道とし、湿原に観測者の足跡が影響を与えないように配慮した。

バイオマスの総量は0-10cmの層で580-950 g・m²であり、bogの盛り上がった場所ほどバイオマスが多く、窪地ではその80%である。緑の植物量の割合はその逆で、盛り上がった場所では30%程度、窪地では60%である。バイオマスとNH₄⁺とは相関がなく、NO₃⁻とは負の相関がある。このことは植物の生長によりNO₃⁻が消費されたのであり、窒素分が植物の生長を支配してはいないことを示唆する。pHとの相関も強くない。このことは予想に反して水溶性窒素や酸性度ではなく、履歴も含む他の環境要因が植物の生長を支配している事を意味する。

ポロトニコボ村の校舎に本部を設けガス分析、微生物の培養、植生調査測定などを行った。PlotnikovoからBakcha方向に約15kmの一般道をすすみ、そこから湿原に向かって南に約6kmの自動車道を建設し、その先端の湿地と森林の境界に小屋(約15m²)を設営した(北緯56°35′、東経82°50′)。小屋では常時2名が宿泊し、手動のサンプリング、サンプル容器の交換、大気サンプリング容器の交換、発電機の燃料補給、自動気象観測機器の点検、気温プロファイラーの点検などを行った。ここに資材・燃料・食料・飲料水などを輸送したりサンプルを持ち帰るために、エンジン付きの小型のクローラーカート(1.2m x 2.0m、500kg積み)を導入した。ここに運搬した資材は、小屋建設の木材、木道建設木材、研究用資材、生活用資材、発電機と燃料、電池など全体で約8tである。(この井上)

3-2.チャンバー法によるメタンフラックスの測定-----メタンフラックスの植生依存-----

チャンバー法は、地面に箱をかぶせ、地表面から出てくるメタンにより箱の中の空気中メタンが増加する速度を測定するものである。観測の度に湿原に擾乱を与えないようステンレス製のベースを埋め込み安定化するまで2日間放置した。日射により箱の中の温度が上昇するのを防ぐためアルミコート

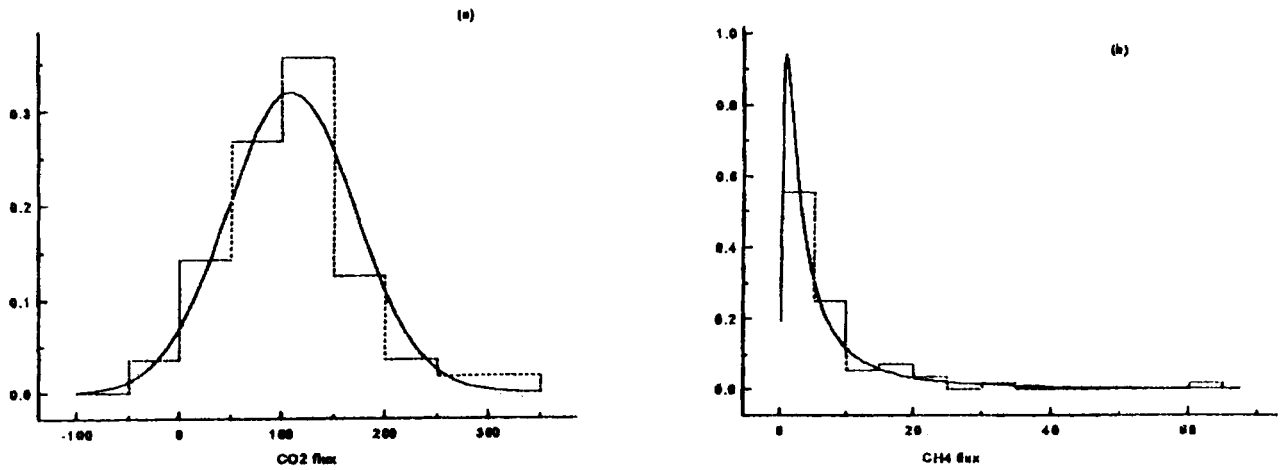


図2. CO₂ (a) とCH₄ (b) の発生量の頻度分布。CO₂ はガウス分布で平均109、分散63mg C h⁻¹m⁻²であり、CH₄ は対数正規分布で平均1.3、分散1.6mg C h⁻¹m⁻²である。

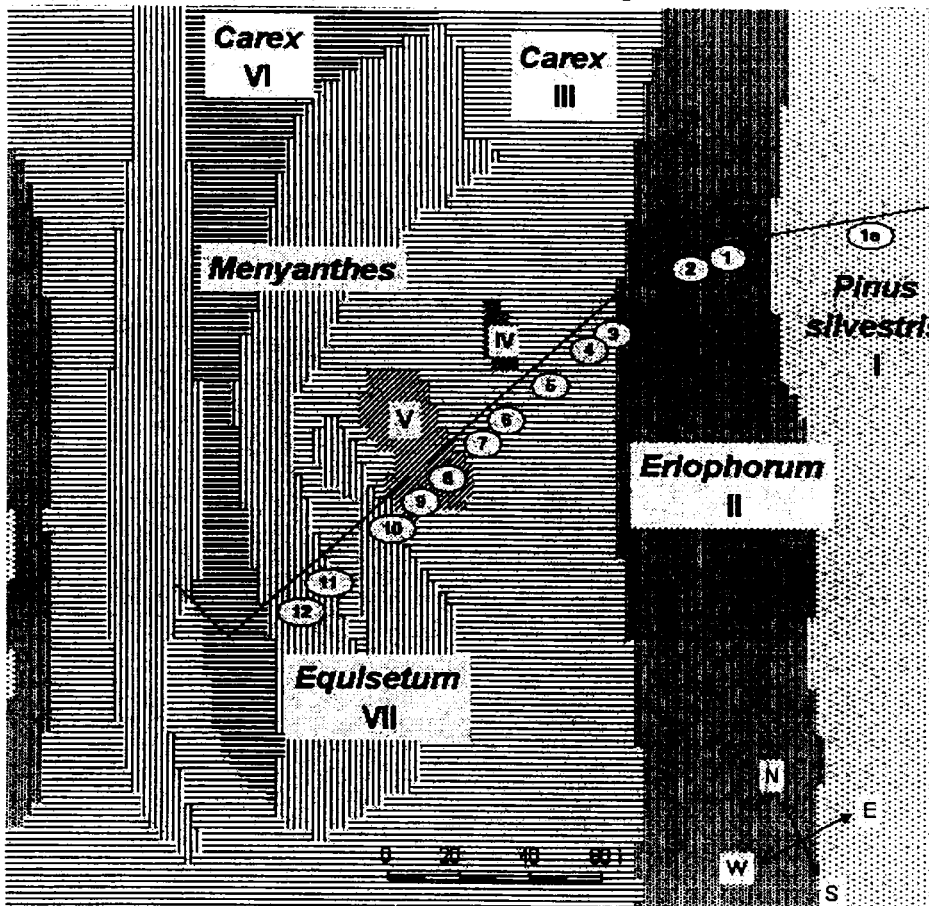


図3 木道に沿った12地点でメタンフラックスの測定を行った。右方向50m以東は粗なアカマツの森林である。

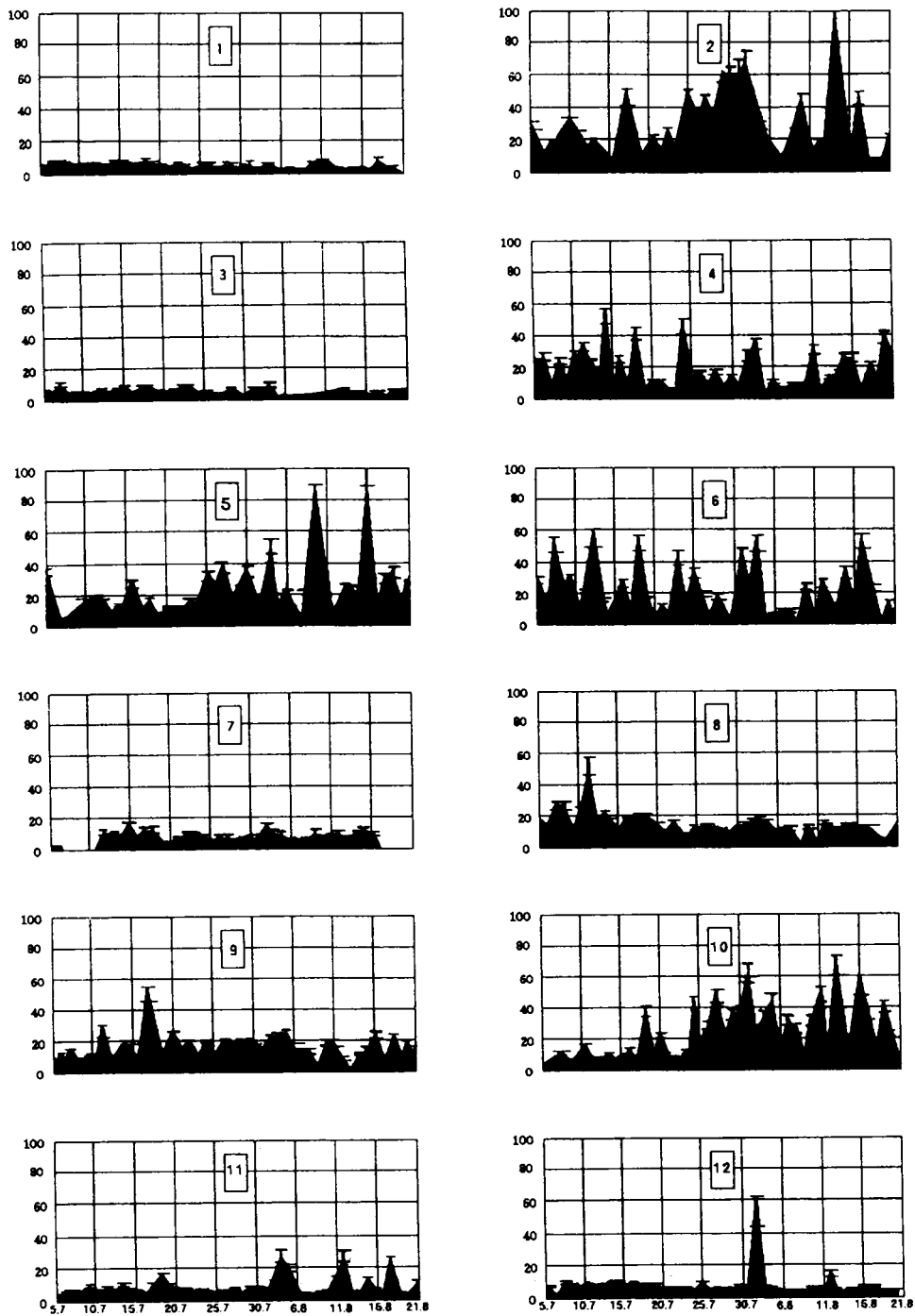


図4 図3に示した場所でのメタン発生量の日変化。1995年7月5日から8月21日の期間。

ラスチックシートでおおったアクリルの箱を使用した。一般的には15分間に4サンプルをシリンジに取り真空のバイアルビンに採取し、本部に持ち帰りFID-GCで分析した。二酸化炭素のフラックスが $110\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ を中心とした $60\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ の幅を持つガウス分布をしているのに対し、メタンのフラッ

クスは平均 $4\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ で分散 $5\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$ の対数正規分布となった。(図2, Panikov ら) 湿原の有機物の殆どが二酸化炭素として大気中に放出されるので、そのフラックスの分布は地温と土壤中有機物の量を反映し、同質の植生では大きな隔たりがない。それに対してメタンのフラックスは表層土壤の酸化性雰囲気の有無に強く依存するため、大きな幅を持ち平均値より小さい頻度が高い。

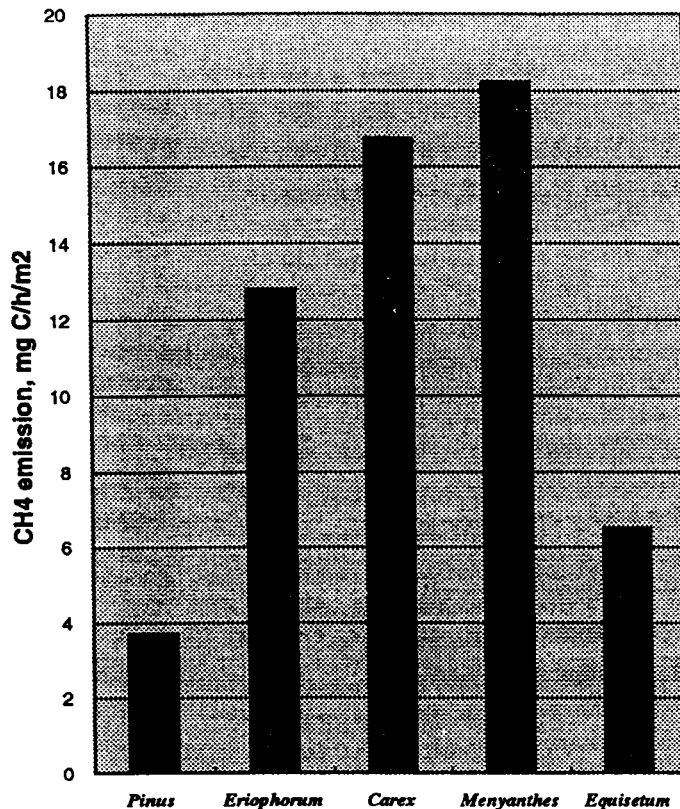


図5 植生とメタン発生量の関係。

この様にメタンの発生量については空間的な変動が大きいので、多くの場所での測定を行い、何らかの方法でスケールアップする必要がある。図3に示すように、木道に沿って13箇所ステンレス製のベースを埋め込みメタンフラックスを測定した結果を図4に示す。メタンの発生量は変動幅が大きく、最低では僅かな吸収 ($-3.6\text{mgC hr}^{-1}\text{m}^{-2}$)、最大発生量は $80\text{mgC hr}^{-1}\text{m}^{-2}$ にも達する。この変動の原因は未だ明らかではないが、測定の誤差をはるかに越えており、後述するように気泡となってメタンが生成する場合に、見かけ上のメタンの発生量が大きく測定されるものと推測される。一般的には、*Menyanthes trifoliata*の生育する窪地からの発生量が大きい、ハンモックの場所でも大きな発生量を記録する場合も多い(図5)。これは気泡や植物の茎を伝わった輸送が寄与しているためと考えられる。実際生きている草(*Carex*や*Eriophorum*)の量とメタン発生量の相関が見られ、ミズゴケや立木との相関は弱い(図6)。(この項、井上、パニコフ、マシュートら)

3-3.チャンバー法によるメタンフラックスの測定……………メタンフラックスの地温依存……………

信頼できるメタン濃度の測定にはFID付きガスクロを使用する必要があるが、湿原でチャンバーからサンプルを採取して直ちに分析するには、電力の供給、ガスボンベなど重量物の運搬、測定器を置く空調と砂塵防止などの問題あり適切ではない。そのためチャンバーを自動的に開閉し大気を自動的にサンプリングする装置を開発し、分析は分析センターで行うこととした。

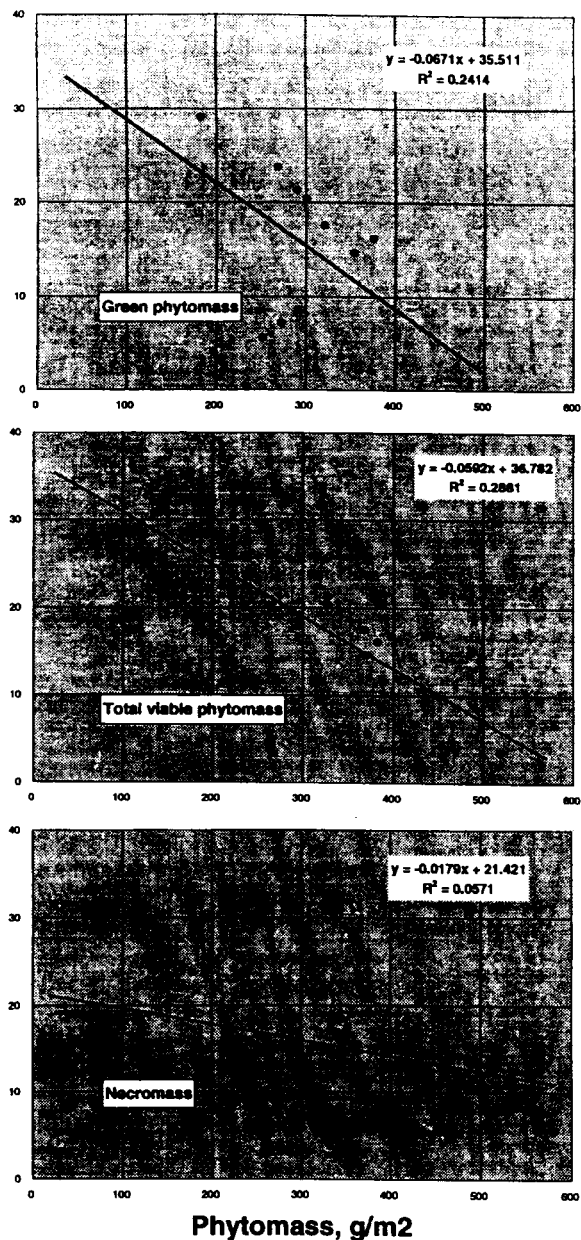


図6 メタン発生量(mg C hr⁻¹ m⁻²)の (a) 緑の植物量、(b) 生きている全植物量、(c) 全植物量との関係。ミズゴケや立木の量を入れた場合は相関が弱くなる。

チャンバーの自動開閉はチャンバー全体が上下する構造とし、更に降雨を遮らないように斜めに動かすこととした(図7)。ステンレスのベースとチャンバーはチャンネルに入れた水によってシールされ、チャンバーと外気とは遮断されているが、圧力補償バッグによって外気圧に保たれている。メタンの発生量が大きいミズゴケ質の湿地ではメタンの発生が気圧変動により影響を受けるので注意が必要である。

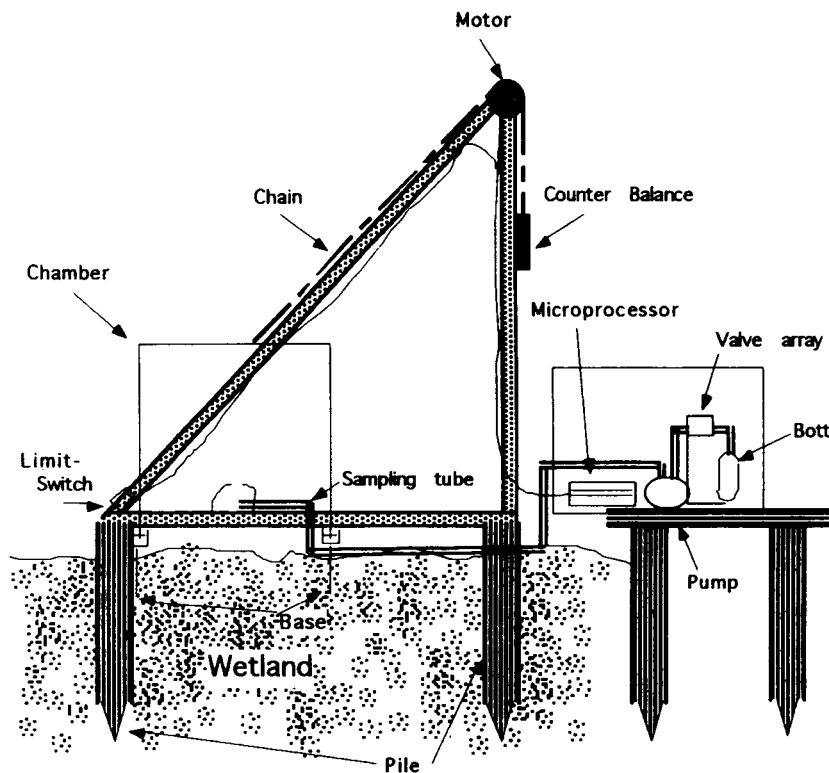


図7. 自動サンプリング装置の概略図

先ず、定時に（2時間毎）チャンバーを降ろしチャンバー内のファンを始動する。大気のサンプリングポンプを作動させ一定時間後（1分）に真空のバイアルボトルに充填する。24個のバルブアレーの切り替えをマイクロプロセッサで行い、容器を順々に満たしていく。1回の測定で4個のサンプルを5分間毎に採取するので12時間毎にボトルを交換する必要がある。湿原に杭を打ち込みフレームを固定し3日間待ってから観測を開始した。6月中旬から8月末までごみによるフィルターの目詰まりが1回あったことを除いては、大きなトラブル無く作動した。

図8にメタンフラックスの日変動を示す。△は地表面下5cmでの気温、●は手動で行った12のデータの相加平均、実線が自動チャンバーで得られた結果である。8月4-6日は欠測である。全体としては自動チャンバーによる測定値の日変化は、他の12ヶ所の値の変動と同一のパターンを示している。自動チャンバーでは発生量が日によって最大8倍まで異なり、12ヶ所の平均でも4倍変動している。地温の変動は地下30cm以下では変動が小さいが、地表面では日変化も大きく、メタンとの相関を見るために1日のバンド幅でスムージングしてある。この期間に地温は17℃から24℃の範囲で変化した。メタンの発生量は地温が高い時に大きく、地温が下がると小さくなり、互いに正の相関を持ち変動している（図10）。しかしながら、地温の変化にそのまま追従する訳ではなく、モデルで予想されるメタン細菌の増殖に要する地温積分の寄与があるわけでもない。なお、自動チャンバーによる測定では、メタンの発生量の日変動は現れなかった。メタンの生成がもっと深い場所で起こっている可能性、気温が高くなると地表面でのメタン酸化も早くなるのでキャンセルし合う可能性、メタンの地表面から大気への放出は

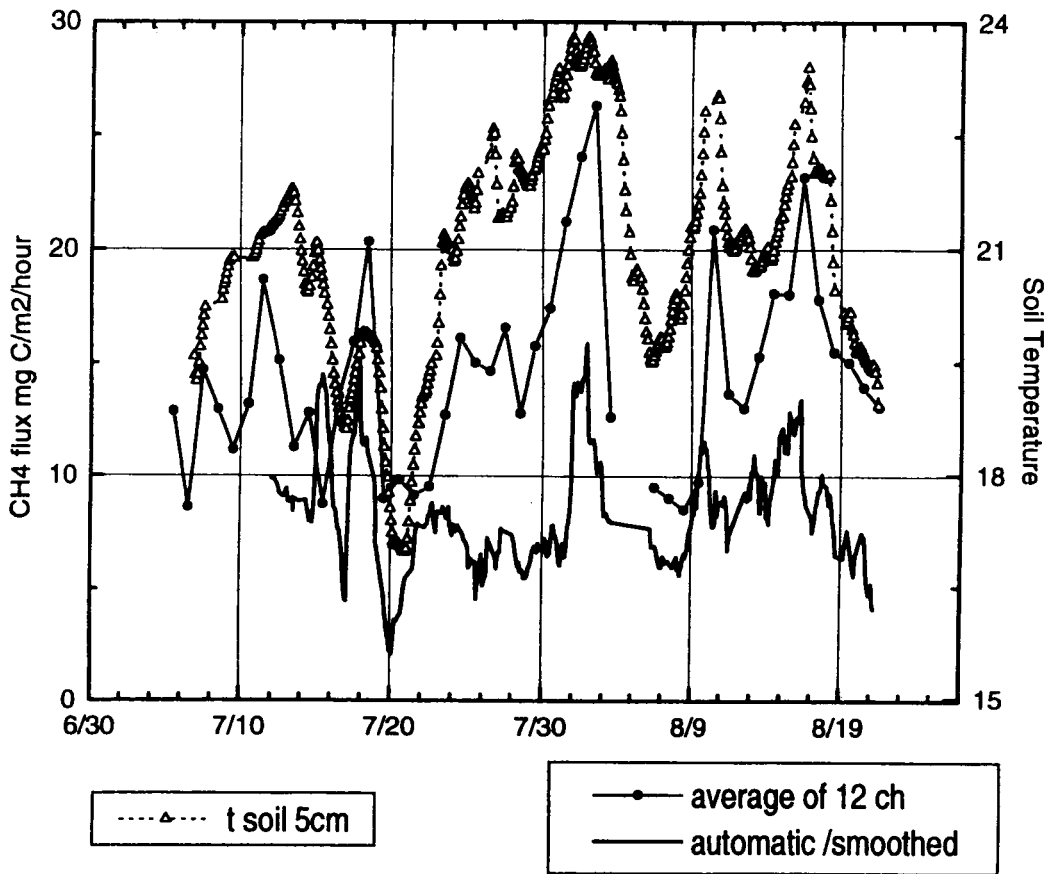


図8.メタン発生量△は地表面下5cmでの気温、●は手動で行った12のデータの相加平均、実線が自動チャンバーで得られた結果。測定は1995年7月から8月

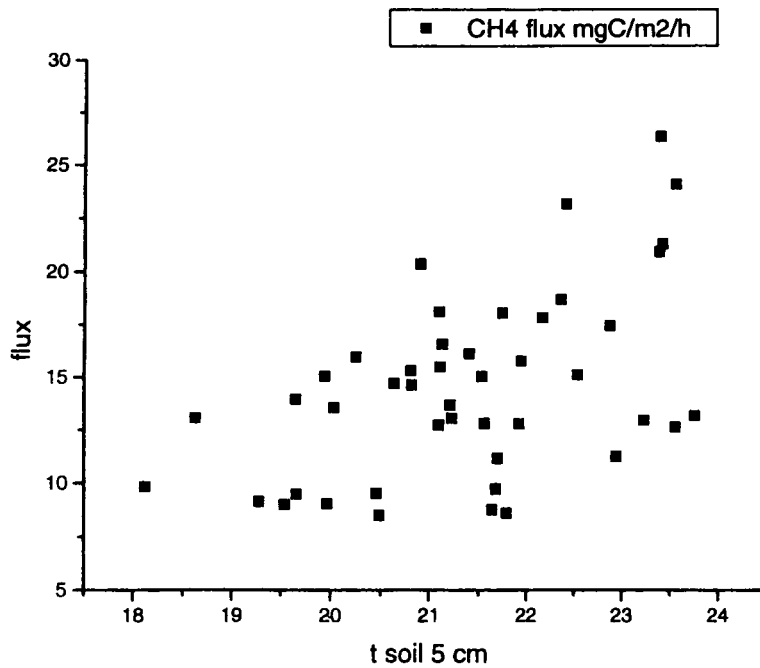


図9 メタン発生量と地下5cm (a)、地下15cm (b) の地温との関係

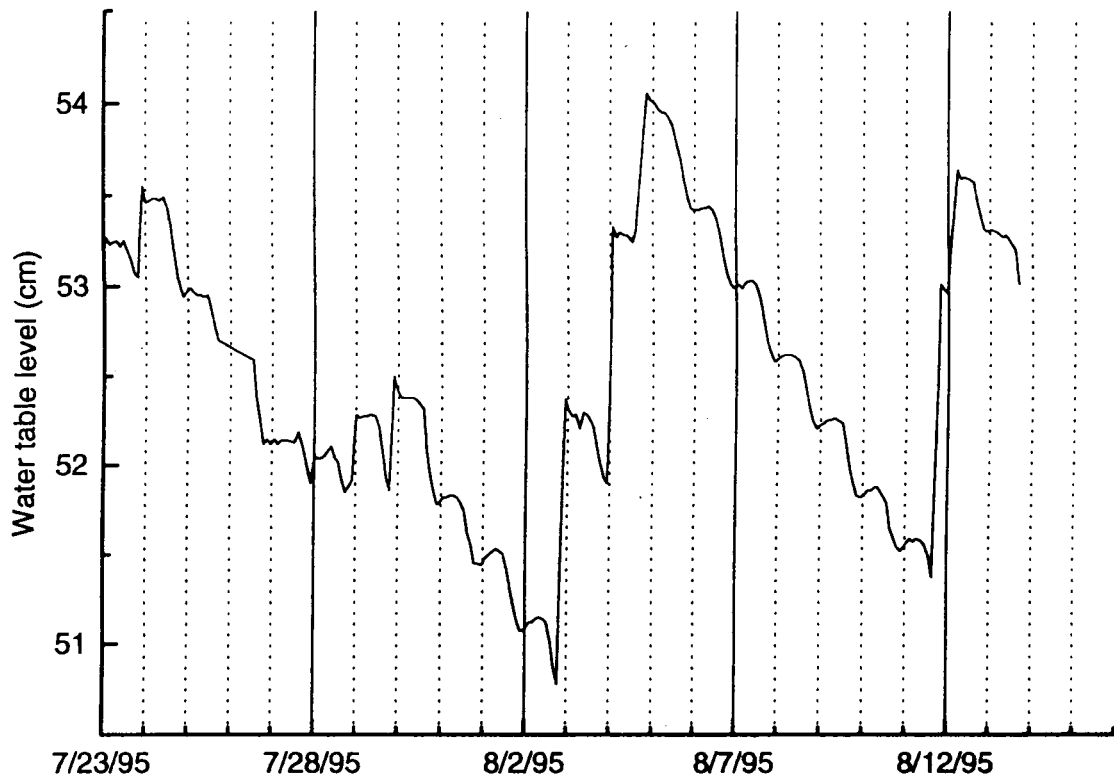


図10. 水位の相対的变化

輸送プロセスがコントロールとなっている、などの理由が考えられる。この間の水位を図10に示す。水位の零は圧力水位計の位置を示し意味を持たない。相対的にはこの1ヶ月あまりの期間に最大30 mm 程度変化している。水位の上昇は降雨に因るものであり、階段状の水位の低下は蒸散による。水位の上昇時は雨天であり、地温が低下しているのでメタンの発生量は低下する。このため、水位とメタンの発生量との間には明確な関係は見られなかった。

二酸化炭素と水素の発生吸収量の変動を図11に示す。チャンバーは遮光しているので土壌と植物の呼吸による二酸化炭素の放出のみが見られるはずであるが、実際には吸収となる場合もあり、光の漏れによる吸収と推察される。湿原上空の大気中水素の高度分布が、低空ほど低濃度であり、地表面が発生源である水蒸気との正の相関、地表面がシンクであるオゾンとの正の相関が有ることが分かっており、地表面は水素のシンクである。ここで得られた負のフラックスは、地表面のメタン酸化細菌に負うものと考えられるが、更なる研究が必要である。(この項、井上、高橋、マクシュートフ、ソローキン)

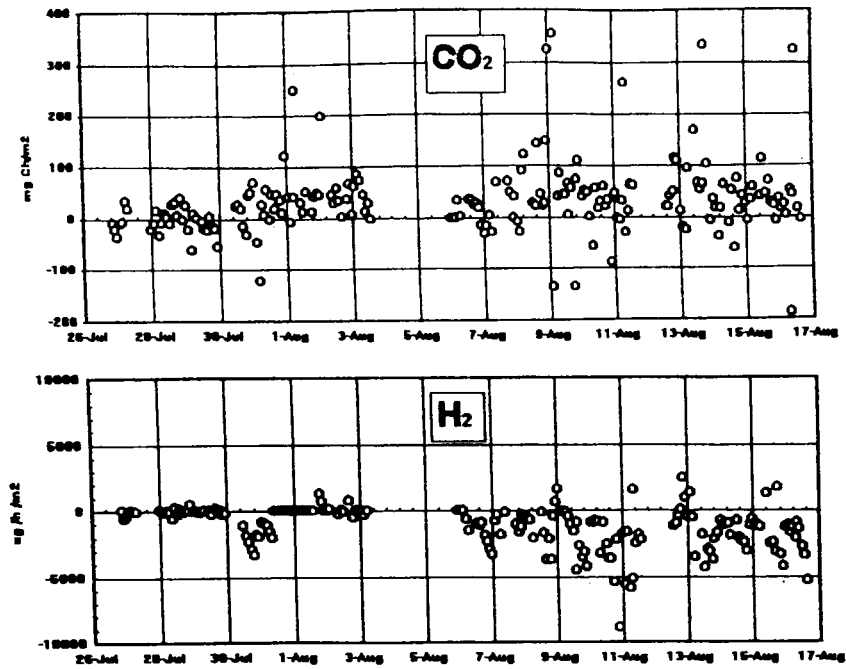


図11. 二酸化炭素と水素の発生/吸収の変動

3.4. 渦相関法によるメタンフラックスの測定

チャンバー法でメタンのフラックスを測定した場所と同一の場所に、5mの塔を建て超音波風速計を設置した。上向き・下向きの風に同期して風速の垂直成分の信号によりサンプリングバルブを開閉し、風向きに同期して二つのプラスチックバッグに大気を採取した。この濃度差と風速、経験的に決めた変換係数によりフラックスをもとめた。変動幅が大きくしばしば負の値を示したが、これは濃度測定の精度が不十分であったためと考えられる(図12)。

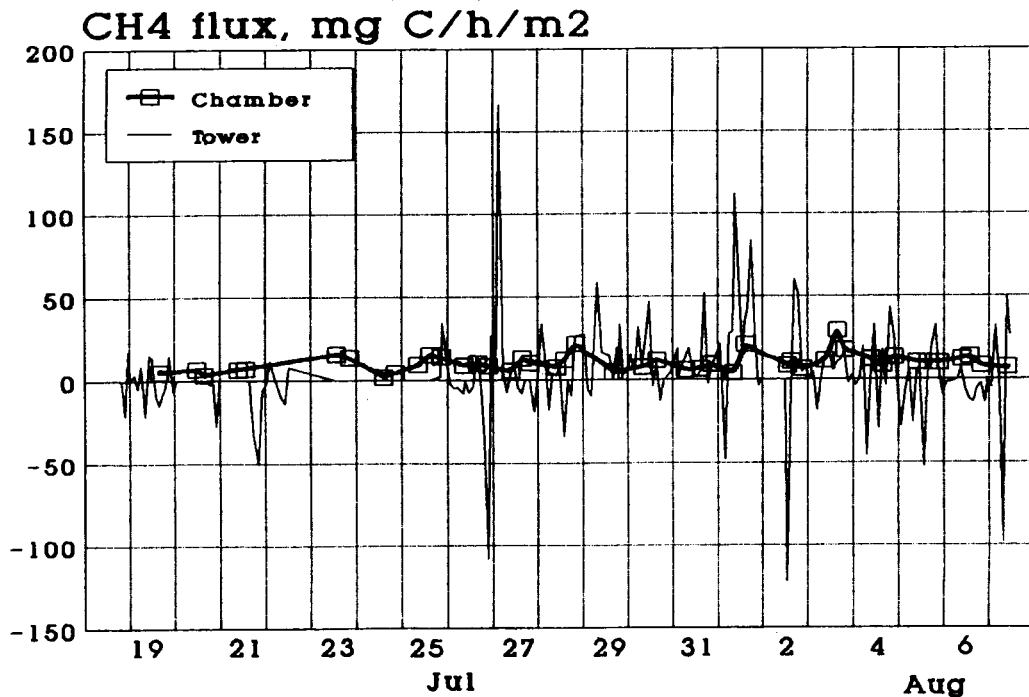


図12 コンディショナルサンプリング法によるメタンのフラックスの測定実験結果

3-5.航空機によるメタン測定

大気中のメタン濃度が産業革命以後急激に増加したことや、現在もその濃度が増加しつつあることが最近の研究から明らかにされている。大気中のメタンが増加した最大の原因は、水田、牛などの家畜、埋立地等の人為的なメタンの発生源が増加したためと考えられている。これらの発生源では微生物活動によってメタンが生成されるが、人為的なメタンの発生源には微生物起源の他に天然ガスの放出も重要であることがメタンの炭素の放射性同位元素(^{14}C)の測定から指摘されている(Wahlen et al., 1989; Quay et al., 1991)。大気の $^{14}\text{CH}_4$ の測定結果によるとメタンの15-25%が化石メタン、すなわち ^{14}C を含まないメタンであるという結果になった。この化石メタンの起源は石油や天然ガスの採掘や輸送、供給の過程や、石炭の採掘時に大気中に漏出するメタンであろうと信じられている。しかし、これまで放出量や放出過程の実測例はほとんどなかった。

西シベリア低地には広大な湿原が一面に広がっており、さらに世界最大級の油田・ガス田が存在しているため大規模なメタンの放出が予想されていた。シベリア上空の温暖化気体の濃度分布を調べるために国立環境研究所とロシア中央大気観測局は共同で航空機を用いた観測を1992年から毎年夏に行ってきた。これまでの観測から、シベリア上空のメタン濃度が様々な要因で変動すること、特に西シベリア低地の湿原上空できわめて高濃度のメタンが存在することなどが明らかにされてきた(Tohjima et al., 1994)。ここでは1994年の夏にスルグート(61.13° N, 73.20° E)の北部に広がる油田地帯上空での航空機観測の結果について述べる。なお、詳細についてはTohjima et al., (1996)を参照されたい。

3-5-1 大気中メタン

メタンを高精度で測定するために、Tohjima and Wakita (1994)によって開発されたイオン化検出器(FID)と触媒を組み合わせたメタンの連続測定装置を用いた。これは、FIDが炭化水素に対して選択的に感度があるが無機ガスに対してはほとんど感度がないことに着目し、メタン以外の炭化水素(非メタン炭化水素)を除去した空気をFIDに直接送り込むことでメタン濃度を連続的に測定するものである。空気試料中の非メタン炭化水素の酸化除去には加熱した白金触媒が用いられた。この連続測定装置で実際の大気を分析すると、触媒による非メタン炭化水素の除去が完全でないために、ガスクロでの分析結果よりも若干高い濃度になることが分かっている。そこで、シベリア上空での航空機観測の際には連続測定と平行してガスクロによるメタンの分析も5分毎に行い、連続測定の結果の補正に用いた。

この連続測定装置を気象測器や他の分析機器(CO_2 、 O_3 、湿度等)と共に気象観測機(イリュージン-18)に搭載し、飛行しながらシベリア上空の観測を行った。

3-5-2 結果と考察

観測は1994年の8月1日にスルグート北部の油田地帯の上空において行われた(図13)。観測域には石油採掘所やパイプライン等が所々存在しているが、市街を除いてほぼ全域が湿原におおわれており微生物起源のメタンの放出があることが予想された。

観測機は午前中（9時～12時）に図13の太実線に沿って高度150mの混合層内を飛行しながら各種の測定を行った。図14にメタン濃度の連続測定の結果（実線）とガスクロによる測定値（黒四角）を経度または緯度に沿ってプロットした図と、それぞれの飛行ルートを示した。メタン濃度は図14a～14dのいずれについてもバックグラウンド（約1.8ppmv）よりも高い濃度が観測されたが、図14a,14c,14dに示された測定では高濃度のピーク状の濃度変動が観測された。最も大きなピークの濃度は2.9ppmvにも到達し、ピークの半値幅も約4km程度と非常に鋭いものであった。一方、図14bのメタンの濃度分布をみるとピーク状の濃度変化は観測されなかった。

観測されたピーク状の濃度変化の説明には下からの強い放出があることがまず第一に考えられるが、それ以外にも大気のダイナミクスによる説明も可能である。つまり、夜間に地表付近に形成される逆

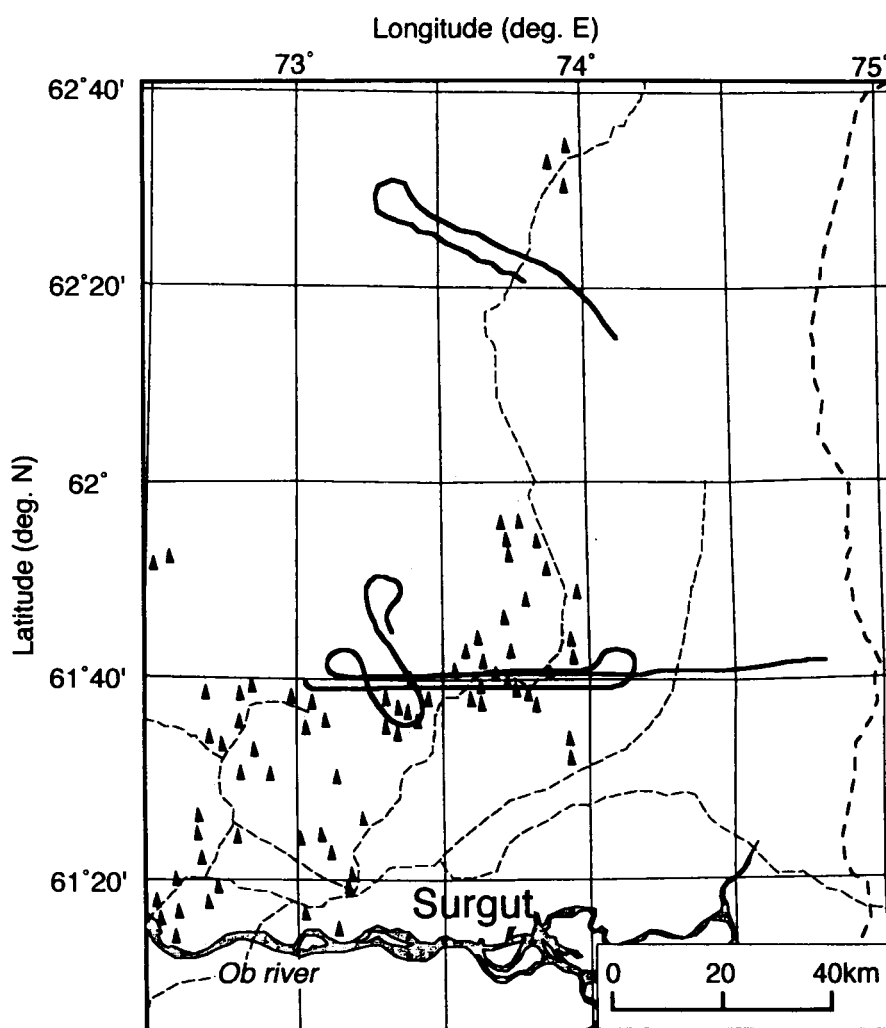


図13 1994年8月1日に航空機観測を行ったシベリアのスルグート北部の油田地帯の地図。図中で灰色の領域は石油鉱床の範囲を、また、黒三角は石油採掘施設を、細い破線は埋設された石油パイプラインを、太い破線は天然ガスのパイプラインをそれぞれ表す。観測用の航空機は図中の太実線にそって高度150mを飛行しながら各種の観測を行った。

転層に蓄積したメタンが混合層の発達とともに上空に輸送される過程で、混合層の発達の度合いが水平方向に不均一であるため、メタン濃度の水平分布に変動が生じるというものである。水平方向の混合層の発達の度合いの不均一性によるメタン濃度の変動はこれまでのシベリア上空における航空機観測でもしばしば観測されている(Tohjima et al., 1994)。しかし、今回の油田地帯上空で見られたはような大きな濃度変動や非常に鋭い濃度分布は湿原上空では観測されたことがなかった。また、もしも大気ダイナミクスによるものであるとすれば、地表面に発生源や消滅源をもつメタン以外の成分にもメタンのピーク位置と同じ場所に同様の変動が観測されるはずである。しかし、地表面に発生源をもつ水蒸気や、地表面に消滅源をもつオゾンなどにはピーク状の変化が観測されなかった(図15)。以上のことから、ピーク状の濃度分布は大気上下混合の不均一性が原因ではなくピークの下に強いメタンの放出が存在するためと考えられた。

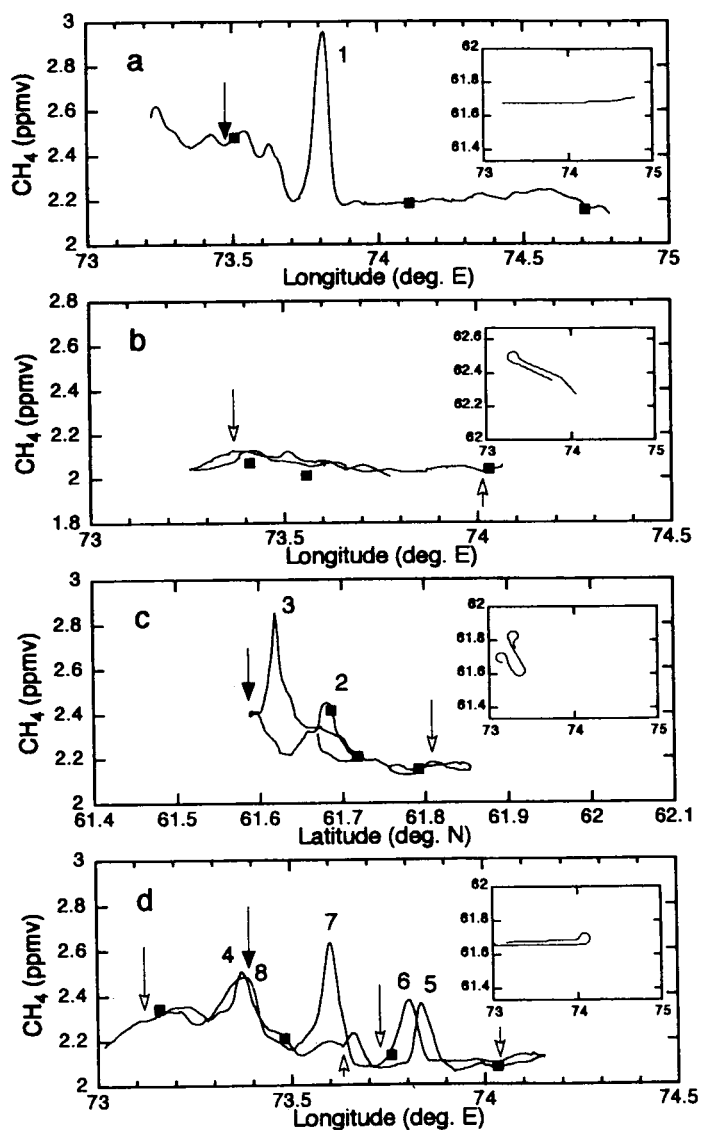


図14 1994年8月1日にシベリアのスルグート北部の油田地帯上空(高度150m)で観測されたメタンの濃度変化(Tohjima et al., 1996)。実線は連続測定を黒四角はガスクロによる測定結果を示す。各図中に航空機の飛行ルートを示した。図中の矢印は大気試料をボトルサンプリングした地点を表し、黒矢印はメタンの炭素安定同位対比が高い大気試料を示す(Sugawara et al., 1996)。

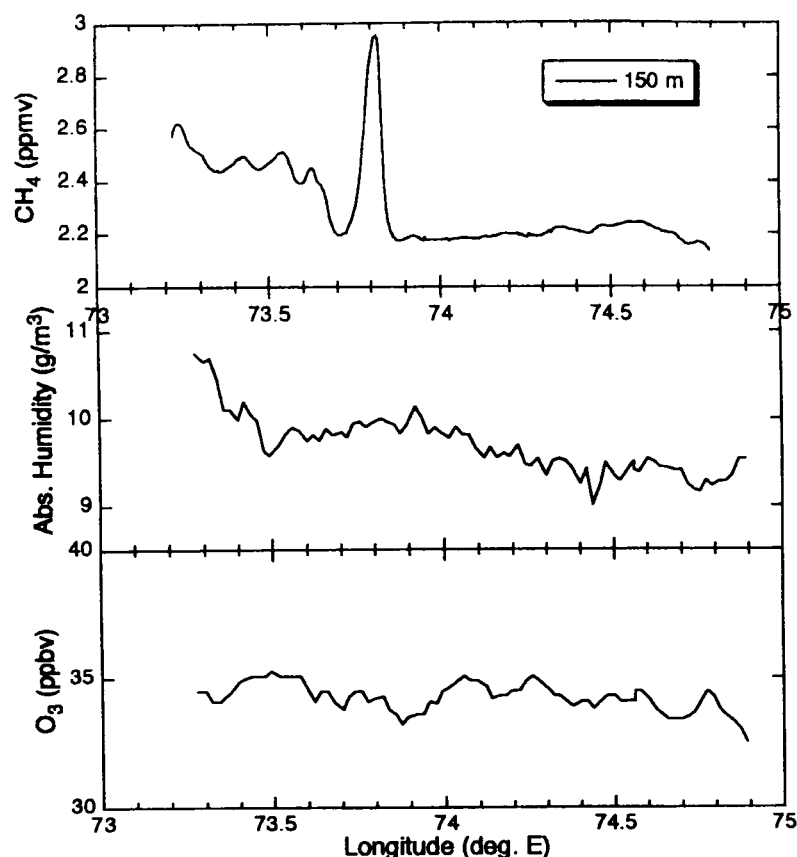


図15 図2aに示された場所と同じところで観測されたメタン、水蒸気、オゾンの濃度分布。

図16はメタンのピーク位置（白丸でプロット）の拡大図であるが、ピークの近く数km以内に必ず石油の採油所またはパイプラインが存在することが分かる。なお、図15中の番号は図14に示したピークの番号と一致している。また、図14bに示されたメタンのピークが観測されなかった領域には石油採掘所が存在しないことも、それらの施設とメタンのピークの関連性を示唆するものと考えられる。以上のことから、観測されたピーク状の濃度分布はその下にある石油採掘所、またはパイプラインからの天然ガスのリークをとらえたものと推定された。

Sugawara et al., (1996)はこの油田上空の観測中に大気試料を容器に採取し、メタンの炭素の安定同位体比($d^{13}C$)の分析を行った。大気試料の採取場所は図14の中に矢印で示した。分析の結果、メタン濃度が高いサンプルについてメタンの $d^{13}C$ が生物起源のメタンとバックグランド大気との混合で予想される値よりも重く（図14中、黒矢印で示した）、 $d^{13}C$ の重いメタンの発生源が存在することを明らかにした。彼らもまた、 $d^{13}C$ の重いメタンの起源として天然ガスを挙げており、この油田で採掘または輸送過程で天然ガスが漏出していることを支持するものであった。

今回の観測は夏期に行われたが、もし冬季に同様の観測を行えば湿原からのメタンの影響を受けずに天然ガスの漏出をより鮮明に観測できることが期待される。さらに、メタン濃度の空間分布から混合層内に蓄積したメタン量が計算できればメタンの放出量の推定も可能となるであろう。

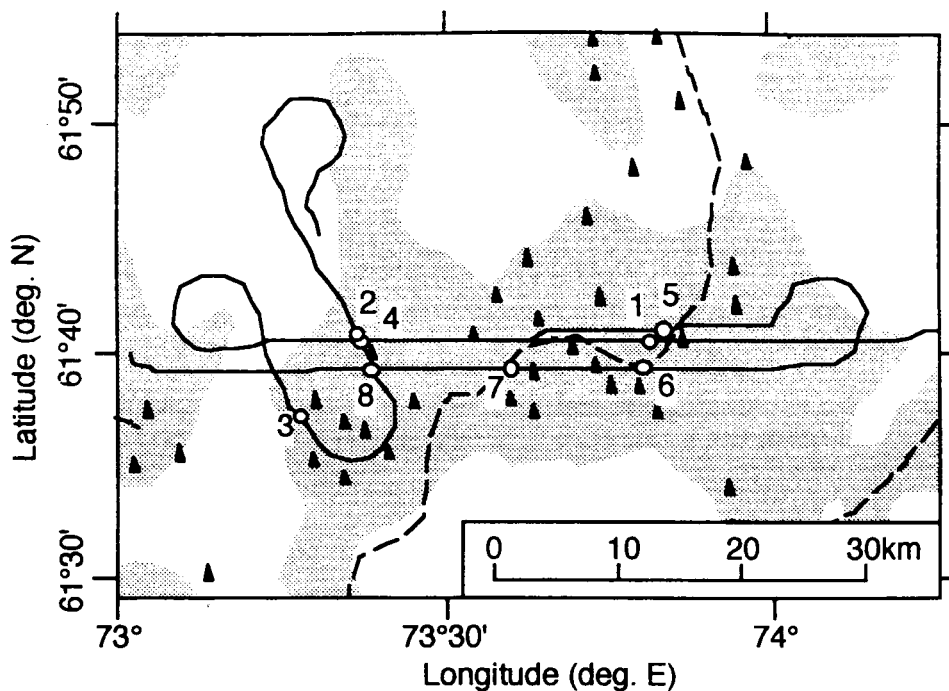


図16 スルグートの油田地帯上空で観測されたメタンのピーク位置と石油関連施設との位置的関係 (Tohjima et al., 1996)。図中で白丸はメタンのピーク位置を、曲線は飛行ルートを、破線は石油のパイプラインを、黒三角は石油採掘施設をそれぞれ表す。

3-5-3 まとめ

天然ガスの漏出をとらえた例としてシベリア油田地帯における観測結果について述べてきた。天然ガスの漏出の可能性はその生産から消費の過程のどこでも生じる可能性があるが、この例は少なくともそのガス・油田などの産出現場でのリークを示すものであった。このように天然ガス放出の実態は徐々に明らかにされつつあるが、今後さらに放出の実態調査や放出量の定量化を進めてゆく必要がある。

〔国際共同研究等の状況〕

1.日露環境保護協定 94-96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）－ロシア連邦気象観測部（ロシア気象委員会中央大気観測所）

毎年7・8月に日本側8名、ロシア側8名の参加で共同観測を行なったほか、研究打ち合せ、研究成果発表のため研究者の派遣（日本側2名）、招聘（2名）を相互に行なった。

2.日露環境保護協定 94-96年環境保護協力計画 湿原からのメタン発生量の共同観測とモデル化
環境庁（国立環境研究所）－ロシア科学アカデミー（微生物学研究所）、ロシア連邦気象観測部（ロシア気象委員会中央大気観測所）

毎年7・8月に日本側3名、ロシア側26名の参加で共同観測を行なったほか、研究打ち合せ、研究成果発表のため研究者の派遣（日本側1名）、招聘（3名）を相互に行なった。

3.IGBPはBAHC、IGAC、GCTEのインターコアプログラムとしてNES（Northern Eurasian

Study) を開始したが、この呼びかけ文の起草委員会等に出席し、国際共同研究プログラムの推進に貢献している。

[研究発表の状況]

S.Sugawara, et al., Aircraft measurements of the stable carbon isotopic ratio of atmospheric methane over Siberia,

Global Biogeochemical Cycle, 10, 223-231 (1996)

Y.Tohjima, et al., Airborne measurement of atmospheric methane over oil fields in western Siberia,

Geophysical Research Letters, 23, 1621-24, (1996)

Tohjima, Y. and Wakita H. : Development of a continuous measurement system and areal distribution of methane in some source areas. Appl.Geochem., 9, 141-146 (1994a).

N.Panikov et al. : Variability of Methane Emission from West-Siberian Wetlands as Related to Vegetation Type

. to be published in Ecological Chem St.Peterburg (1997)

G.Inoue, et al., CO₂ and CH₄ emission from wetlands in west Siberia,

Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994, 37-43 (1995) .

Y.Tohjima, et al., Airborne measurements of atmospheric CH₄ over the west Siberian lowland during the 1994

Siberian Terrestrial Ecosystem · Atmosphere · Cryosphere Experiment (STEAGE) ,

Proceedings of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994, 50-57 (1995) .

[参考文献]

Quay, P. D., King S. L., Stutsman J., Wilbur D. O., Steele L. P., Fung I., Gammon R. H., Brown T. A., Farwell G.

W., Grootes P. M., and Schmidt F. H. : Carbon isotopic composition of atmospheric CH₄: Fossil and biomass burning source strengths. Global Biogeochem. Cycles, 5, 25-47 (1991).

Tohjima, Y., et al. : Distribution and emission of CH₄ over the Central West Siberian Lowland "airborne measurements of greenhouse gases over Siberia III". Proceedings of the International Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, Japan, 9-21 (1994).

Wahlen, M., Tanaka N., Henry R., Deck B., Zeglen J., Vogel J. S., Southon J., Shemesh A., Fairbanks R., and

Broecker W. : Carbon-14 in methane sources and in atmospheric methane: The contribution from fossil carbon. Science, 245, 286-290 (1989).