

## 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) メタン濃度の測定と放出量の評価に関する研究

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、

町田敏暢、マクシュートフ

大気圏環境部 大気動態研究室

泉 克幸、内山政弘、松井一郎、光本茂記

東京大学理学部地殻化学実験施設

遠嶋康徳、脇田 宏

東京ガス・インフォメーションテクノロジー研究所 山本和成、田井秀男

地球・人間環境フォーラム

野尻知子、萩原富治

(委託) 千葉大学 隔測研究所

竹内延夫

平成3－5年度合計予算額 43,088千円

(平成5年度予算額 15,787千円)

〔要旨〕 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、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も極めて重要である。西シベリアには世界再大規模の湿地があるが、ここでのメタン発生の観測の例はなく、実際に測定することが重要である。

92年と93年の夏に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。その結果、メタン濃度の高度分布はその地域のメタン発生量に強く依存している事が分かった。メタンのフラックスを測定する目的で、メタン濃度の高度分布と渦拡散係数の測定を航空機で行なった。このような方法によるフラックス測定は熱や水蒸気については多く行なわれているが、メタンについては始めてのものである。フラックスの空間変動、時間変動を測定したが、数十kmスケールでの植生、水位、表面温度など複雑な地上の状況を反映していることが判明した。また、夜間には強い逆転層が発生していることが分かったので、ここに蓄積されるメタンの量を推定し、夜間の平均的なメタンフラックスを求める試みも行なった。地峡でのメタン濃度の連続測定を開始したが、その結果によると冬期でも無視できないメタンの放出がある可能性がある。

〔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も極めて重要である。西シベリアには世界再大規模の湿地があるが、ここでのメタン発生の観測の発表例はない。現在の北方の湿地からのメタン発生量の推定値はアラスカのデータなどを世界に敷衍したものであり、大きな誤差の可能性を含んでいる。実際、アラスカで観測されたメタンの発生量とカナダでの値

には大きな違いがあり、少なくとも主たる湿地については実際に測定することが重要である。図1

一方、シベリア中央部は近年温暖化が進行しているが、シベリアの凍土はアラスカやカナダに比べ多くの水分を含んでいるため、近い将来凍土融解による湿地の拡大が起り得る。凍土地帯の南部は現在

date 87/ 8/15,12:

emissions (1e9)

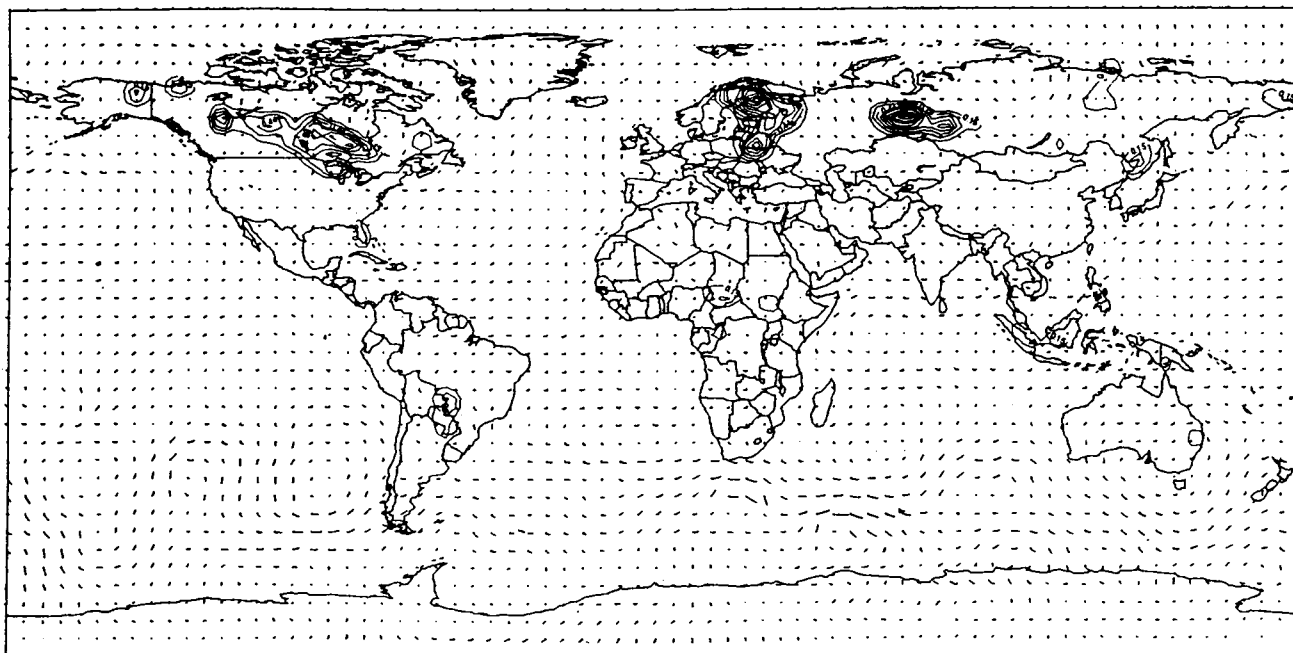


図1. 6月中旬の自然湿原からのメタン放出量分布の推定。

タイガと呼ばれる森林地帯であり、大量の有機物が蓄積されている。凍土地帯が湿地化した場合は、この大量に蓄積された腐植が嫌気性の条件で生物分解され、メタンとして大量に大気中に放出される可能性がある。

従って、西シベリアで現在のメタンの発生量を測定することは、その面積が大きいことから現状の把握として重要である。また、東シベリアの凍土地帯で既に湿地化した場所でメタンの発生量を測定すると共に、発生量を支配する因子を明かにすることは、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上で重要である。

## 2.研究目的

### 2-1.メタン発生量測定の手法確立

### 2-2.場所による発生量の差異の原因解明

### 2-3.発生量を決める要因の解明

### 2-4.季節変動の測定

湿原からのメタンの発生量の測定を行なうための手法の開発を行ない、シベリア凍土地帯のメタンの発生量を測定することが、第一ステージの目的である。第二段階としては発生量をコントロールする要素を明かにし、第三段階として将来の変動に対する応答を検討する。

### 3.研究成果

#### 3-1.メタンの発生量測定の手法開発

(a) ある夏の一時期に限ってみるとメタンの発生量は水位に強く依存する。従って、チャンバー法で地面から大気中に放出されるメタンの量を測定する手法を、ある地域全体の発生量に結び付けるためには、水位をパラメータとするのが適切である。しかしながら、湿地の水位はリモートセンシングによる測定が困難であり、地上での測定は測定地点へのアプローチの問題があり不可能である。このため、チャンバー法をこの目的に使用することは困難であると判断した。その後の研究で、現時点での水位だけではなく、過去の水位の経緯も強く反映していることも明らかになった。

(b) 気象が安定的であり大きな擾乱が無い場合には、ある場所での大気中メタン濃度はある平面範囲、ある期間のメタン発生量を積分した結果を反映している。シベリアの夏は、冬期ほどではないが、日本に比べ風速は小さい。しかし、もし平均風速が1m/sであるとする、1時間に3.6kmほど移動する。その間には数百mの規模の湖沼や湿地が点在するので、その大気に加えられたメタンは、様々な水位の地面から発生したものである。そのため、大気中のメタン濃度は地下水位の詳細な分布には依存せず、平均的な水位により決る値となる。現地調査の結果次の事が判明した。湖沼を主体としその周辺に湿原が存在し、僅かな灌木があるが、樹高の高い樹木は殆ど無い地域（高水位湿地）、湿原を主体とし湖沼や森林が点在する低層湿原、森林を主体とするが湿原や小さい湖沼が点在する高層湿原という程度の分類で十分ではないかと考えられる。ある緯度帯で気温がほぼ同じ条件下で、このような植生の差異から平均的な水位を捉え、それぞれのメタン発生量を測定することは現実的に可能であることが分かった。

#### 3-2.メタンの測定方の開発

航空機によるメタンの測定方法として、92年にはF I D付きのガスクロを用い、準連続測定を行なった。その結果、航空機による振動により信号に若干の雑音加わるものの、測定に大きな影響は与えないことが分かった。また、観測に使用した航空機は与圧してあるものの、高度変化にともなう機内圧の変化により感度の変動することが分かった。しかしながら、測定器の感度は標準ガスによる較正を比較的高頻度で行なうことにより、大気を容器にサンプリングして測定した信頼性の高い測定法と比較して、十分な精度が得られる事が分かった。しかしながら、測定の間隔はガスクロで測定する限り数分以上となり、その間航空機は20km以上進む。ガスクロによるメタンの測定は0.2%程度にまで精度を上げることが出来るが、一回の測定で、しかも繰り返せない測定では、変動があったとしてもそれが実際の濃度分布を反映しているものか、偶然平均値から離れた値となったのかが区別できない。そのため連続的な測定器の開発が急務であった。

93年度は二つのメタンの連続測定器を開発し、航空機に搭載して観測を行なった。一つは触媒の温度を調整することによりメタン以外の大きな炭化水素を燃焼させ、メタンは燃焼させないように調整する。これをガスクロのFIDに直接（カラムによる分離無く）導入し測定する方法である。航空機の機外から採取した試料大気は除湿したのち触媒を通し、流量をコントロールしてF I Dに導く。感度は流量に強く依存し、また、機内圧にも依存する。これらの感度は随時標準ガスやゼロガスによりスパンとゼロ点とを較正した。さらに、ガスクロを使用してメタンとその他の炭化水素を分離した測定器によっても較正した。図2

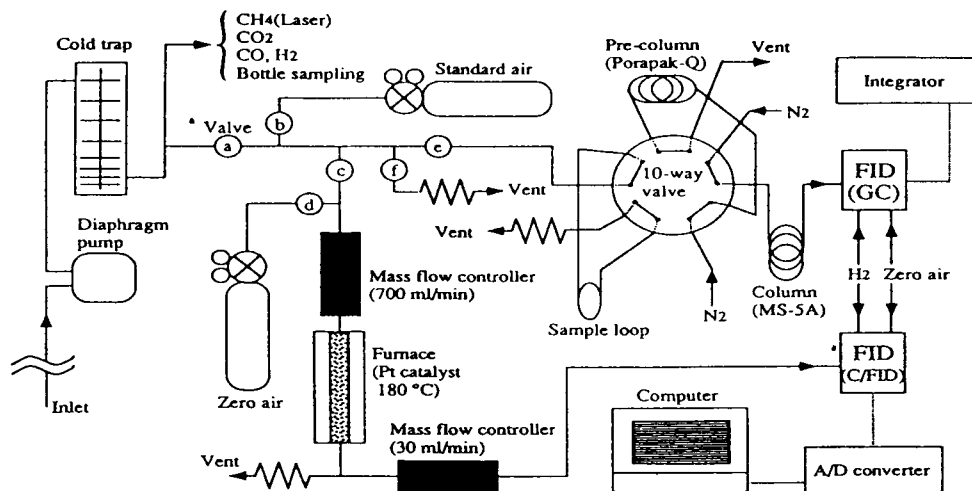


図2 メタンの連続測定器の概念図。航空機外から採取した空気は加圧、冷却除湿した後、ガスクロのサンプルループで計量し注入されFIDで測定する。他方、白金触媒炉を通し流量を調整してFIDに直接導入して連続測定を行なう。

メタンは $3\mu\text{m}$ 近辺の強い中赤外バンド以外に、 $1.6\mu\text{m}$ 帯に弱いオーバートーンの吸収がある。メタンの連続測定器としては中赤外レーザーによる前者の吸収帯の測定が一般には行なわれているが、中赤外レーザーは液体窒素温度に冷却するの必要があり、その温度調整は航空機上においては容易ではない。後者の近赤外レーザーは、その吸収強度が $10^{-3}$ 程度小さいとは言え、レーザーとしては室温近辺で発振し安定であると言う特徴を持つ。本研究では、ここで新たに開発した振動に耐える長光路光吸収セルと組み合わせることにより、吸収係数の小さい欠点を克服するという基本方針で研究を行なった。従来の長光路セルはホワイトセルと呼ばれる3枚鏡システムであり、これを改良した8枚鏡や、コーナークューブを用いて元に戻す方法などがある。ここでは全く異なる原理に基づく4枚鏡システムで $5\text{cm}$ 角の鏡で200回の光路を形成することが可能である。更に、振動などによる角度の変動を打ち消しあうようにできているので、航空機による振動などに強い(図3)。残念ながら航空機による実測ではレーザーの安定性などに問題があり僅かなデータしかとれなかったが、将来性のある方法である事が実証された。

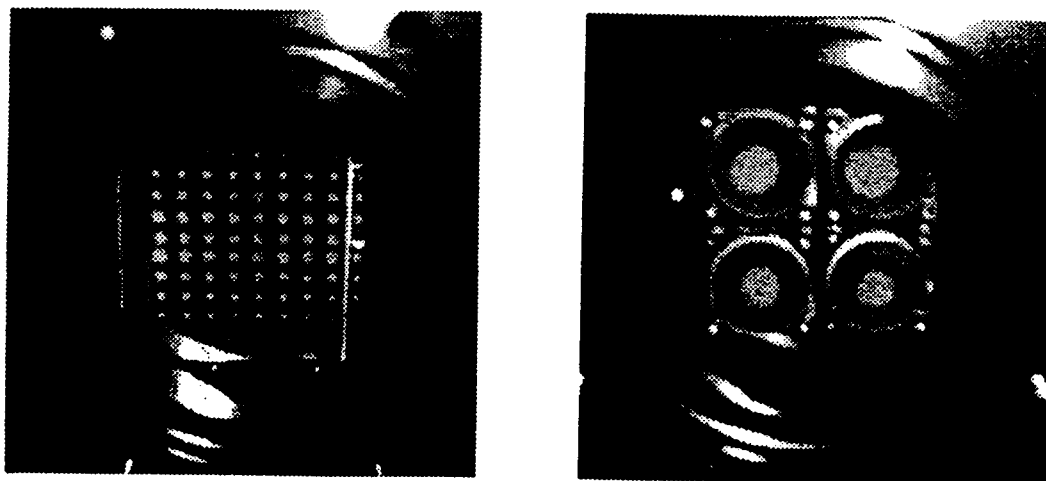


図3 新しく開発された多重反射鏡。ヘリウムネオンレーザーの反射が $9 \times 9$  (81) 回ほど往復繰り返されているのが見える。

### 3-3メタンの発生量測定手法（濃度勾配法）の開発

メタンの濃度勾配と渦拡散係数の測定からメタンのフラックスを測定する方法は、地上では古くから行なわれているが、93年には西シベリアで航空機によってこの測定を行なった。渦拡散係数を求める方法の一つとして、航空機観測では風の垂直成分の測定を行ない、これから計算によって求めた。風の垂直成分は航空機に搭載したINSで垂直の加速度と機体の迎え角を測定する方法と、加速度計と傾斜角計とで測定する方法を併用した。いずれも加速度のゼロレベルの安定性が良くないので、10分程度の測定の度にゼロ点補正を行なう必要がある。測定精度は15%と見積もられている。

この方法で求めたフラックスはある高度での瞬時値であり、逆転層が消えて閉じ込められていたメタンが渦拡散を行なう午前9-10時頃には大きな値になり、逆に夕方から夜の大気安定な時間帯ではゼロに近い値になる。従って、一日の発生量の総量を求めるには、この方法は必ずしも適していない。しかしメタンの地表面からの発生とその後の大気中での動態を正確に把握するには極めて有効な方法である。

### 3-2.航空機によるメタンフラックスの測定結果

1992年は西シベリア低地の中心にあるハンチマンシスク付近で、7月18日から22日まで、湿地からのメタンの発生量を評価することを目標とした観測を行ったが、1993年はほぼ同時期の7月21日から26日までニジェノバルトフスクを中心に観測を行なった。

大気中のメタン濃度は地表からの発生量と、接地境界層から上部対流圏への垂直運動によって決る。垂直の運動は乱流により、乱流は地上が太陽熱で熱せられて生じるので図4の様な日変動を示す。大気が安定になる日没から日出にかけては、地表面からのフラックスは有るが接地逆転層内にトラップされているので、ある高度でのフラックスはゼロとなる。地表面が太陽光で熱せられ大気の状態が不安定になり上下の混合が始まると、それまでトラップされていた高濃度のメタンを含んでいる大気が情報に輸送され大きなフラックスを示す。混合が盛んになる午後には地表面のフラックスと有る高度でのそれは等しくなる。

原理的には、もし、航空機観測でメタン濃度と乱流の強さを測定すればメタンの発生量が計算できる

ことになる。風の垂直成分は、それによって引き起こされる航空機の上下の加速度（加速度センサーとINSで独に測定）と飛行機のピッチ角の変動（傾斜計とINS）によって測定される。この方法はCAOに

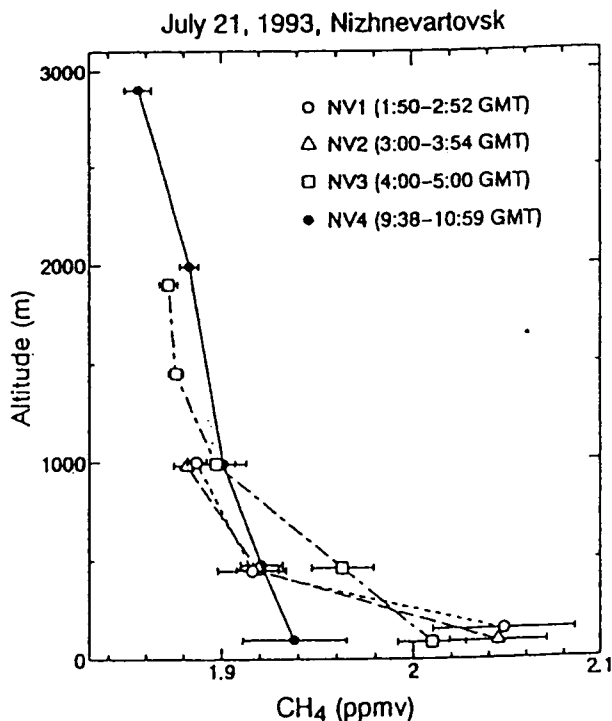


図4 1993年7月23日にハンチマンシスクで観測されたメタン濃度の高度分布。横棒は50km程度水平飛行した場合の濃度の変動幅を示す。現地時間はGMTより6時間早い。

よって開発されたもので20%の誤差が見込まれる。これは10 Hz以下の変動に対して十分な感度を有する。メタン濃度は遠嶋が担当し測定を行なったが、測定器の応答は0.1 Hz以下である。図5にメタンの信号の自己相関の計算結果を、ライマンαによる水蒸気の測定結果と並べて示す。水蒸気十分早い応答速度を持っているので、この半値幅(5 sec)は垂直の風によって運ばれる水蒸気の濃度変動に対応する。これに対してメタンの結果は25秒となっているが、これは除湿器の体積と試料空気の流速から推定した値にはほぼ等しい。従って、ここで得られた濃度変動から渦相関法によって直接フラックスを測定することは出来ない。

直接渦相関法でフラックスが測定出来ない場合は、濃度勾配法によって求める。それは次式

$$P = -K (\partial c / \partial z) = -(K_1 + K_2)(C_1 - C_2) / 2(z_2 - z_1)$$

でもとまる。但し、 $p$ はメタンの渦フラックス( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$ )、 $C$ はメタン濃度( $\text{mg}/\text{m}^3$ )、 $K$ は渦拡散係数( $\text{m}^2/\text{h}$ )である。航空機で2高度を飛行し、それぞれの高度での渦拡散係数とメタン濃度を求める。メタン濃度は触媒燃焼=FID方式により、連続的に求めた値を使用する(図6)。

風の垂直成分を数分間測定し渦拡散係数を求める。高度を変えて測定する間隔は15分程度であるので、この間に大気の状態は大きく変わらないとして、上の式でフラックスを計算したものを図7に一例として示す。左端は樹木のほとんど無い湖沼の多い湿原であり、55km地点でオビ河支流をわたり、樹木と湿原の混在した地帯に続いている

(図の最も下の線が地表面高度を示す)。これに対応し、メタンのフラックスは湖沼地帯で小さく、河の上で極値を示し、森林のある湿原で大きな値となっている。夜間や早朝には河は一般に周辺より温度が高いので、周辺の空気を集めて上昇気流を作るので、このような大きなフラックスと成ったものと考えられる。湖沼では湖水中での酸化プロセスが有るので、水位がゼロに近い湿原よりメタンの発生量は少ないことが知られてい

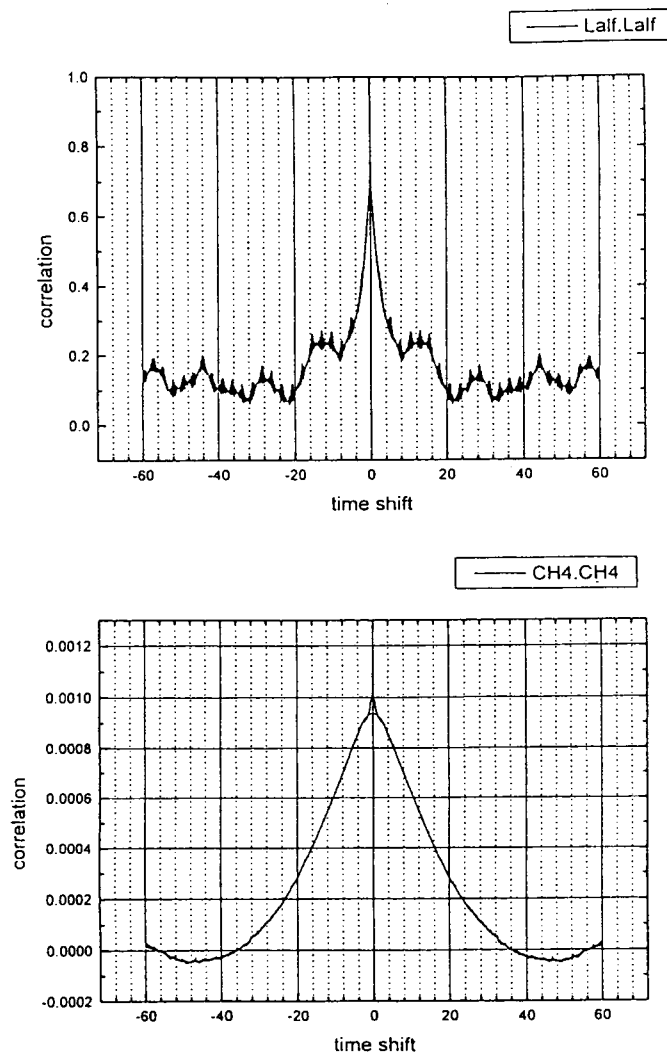


図5 ライマンα水分計による測定自己相関(a)と、メタン計によるもの(b)。 (a)の半値幅は6sあり、600m規模の濃度変動があることがわかる。(b)は30sである。

る。また、熱容量が大きいこの時刻では混合が弱いとも考えられる。午前9時台は8 mg/m<sup>3</sup>hで、10時台になると22mg/m<sup>3</sup>hと3倍に増え、11時から12時台にかけては再び7 mg/m<sup>3</sup>hに戻っている。これは図4に対応した現象と考えられる。このオビ河流域は、オビ河のそそぐ北極海から約3000km離れているが、海拔は100mに過ぎず、降水は殆ど海に向かって流れないので、広い範囲にわたって湿原や湖沼が分布している。その植生や水位は多様かつ複雑で、生物起源のメタン発生量は場所による依存性が強い。上記の様なメタンの空間分布の空気力学的な解析からフラックスを求める方法は、ある広がりでの平均値を示しており、この地域の全メタン放出量を推定するには有効な方法と言える。更にフラックスの日変化全体、場所によるフラックスの違い、その季節変化などから年間のメタン放出量を推定する必要があるが、今回の測定でその手がかりがつかめた。

将来の課題としては、次の3点が残されている。

- ①航空機によるフラックスを渦相関法で直接測定すること。
- ②航空機による測定を高頻度で測定するためのシステムを開発すること。
- ③長期に連続測定を行なうために地上での渦相関法測定を開始すること。

①の航空機による直接測定は、メタン濃度の変動を高速でかつ高感度で測定する必要がある。応答を早めるためには触媒を用いずに炭化水素全量をFIDで検出法するほかない。非メタン炭化水素の割合はこの辺りでは10%以下と予想され、フラックスの測定精度の範囲内である。また、大きな炭化水素を吸着除去できればほぼ無視できる。将来的には中赤外のレーザーによる測定を計画しているが、10Hzの

応答を実現するには機外に光学系を取り付ける事が必要と考えられる。もう一つの方法は、渦相関法を変形したコンディショナルサンプリングという方法である。これは垂直の風の成分が上向きの場合と下向きの場合とに分けてサンプリングを行ない、その差を後で高精度で測定してフラックスを求めるものである。さらに、渦拡散を担っているのは、比較的大きな風速の渦であることが分かっているので、サンプリング時にある大きさ以上の風の時のみサンプリングをするようにすれば、上向きと下向きのメタンの濃度差が大きくなるので測定精度は向上する。

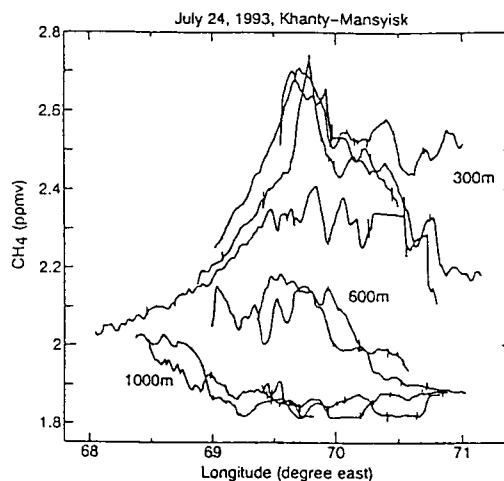


図6 1993年7月24日にハンティマンシスクで測定されたメタン濃度の高度、水平分布。

### 3-3. 地域によるメタン放出量の比較

ツンドラ地帯の多くは夏には雪や凍土の融解により湿地となり、水ごけが生育し泥炭を蓄積している。気温が低いのでここでのメタン放出量は多くはないと予想されるが、過去のメタン生成細菌の活動で生成したメタンを多く含む空気が氷に閉じ込められている事も分かっているので、大気の外からその大きさを評価する事は意義がある。図8に異なった緯度での測定結果を示す。測定した時刻が異なるため、高さ方向に積分した値を比較すべきであるが、定性的な理解はこの図から得られよう。チクシヤタゾフスキーは北極圏のツンドラ地帯であるが、100mから1000mまで1.8ppmの均一な濃度分布となっており、地上に発生源が無いことを示している。また、ポロトニコボやニジェノバルトフスクの測定は垂直の混

合の激しい昼間の観測であり、1000m以上の高度でも1.9ppmの高濃度になっている事がある。ハンティマンシスクの測定は早朝であり、逆転送にトラップされた2.5ppmを越えるメタンが観測されている。緯度的にはポロトニコボが最も南であり、ニジェノバルトフスクとハンティマンシスクはほぼ等緯度である。これらの比較をこのデータから論ずることはできない。

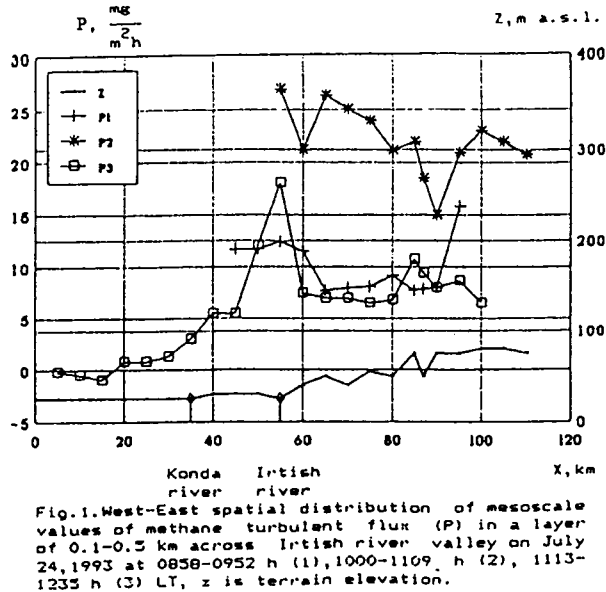


図7 1993年7月24日の渦フラックスの測定結果。それぞれ現地時間で、P1は9時から10時、P2は11時から12時、P3は12時から12時40分の間のデータである。zは海面高度（右スケール）をしめす。

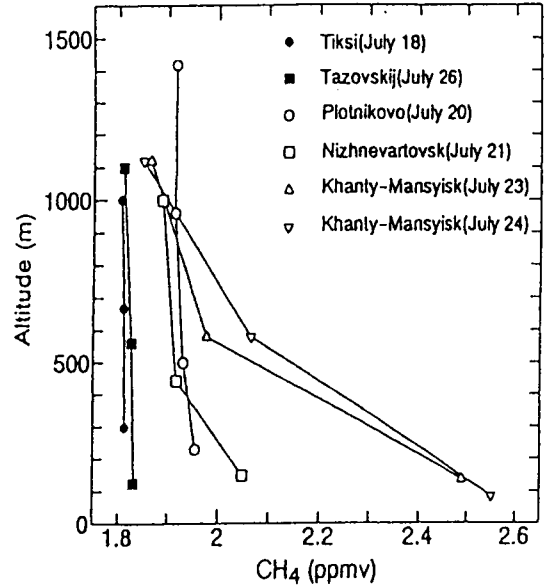


図8 各地でのメタン濃度の高度分布。黒はツンドラ地帯、白は亜寒帯の湿地である。

〔国際共同研究等の状況〕

1.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）－ロシア連邦気象観測部（ロシア気象委員会中央大気観測所）

ロシア側参加者 24名

日本側参加者 19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。

2.1.日露環境保護協定 94-95年環境保護協力計画 凍土地帯からのメタン発生量の共同観測

環境庁（国立環境研究所）－ロシア科学アカデミー（凍土研究所）、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）

ロシア側参加者 7名

日本側参加者 5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〕

- 1)"Airborne Measurement of Greenhouse Effect Gases over Siberia in 1992", Gen Inoue, K.Izumi, M.Uchiyama, S.Maksyutov, N.Vinnichenko, A.Postnov, V.Galaktionov, Global Change and Arctic Terrestrial Ecosystems, Norway, 57, 1993.
- 2)"Distribution and Emission of CH<sub>4</sub> over the Central West Siberia Lowland--Airborne Measurement of Greenhouse Gases over Siberia III--", Y.Tohjima, H.Wakita, T.Machida, S.Maksyutov, G.Inoue, K.Izumi, eta al., Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, 5-8, 1994
- 3)"Vertical Turbulent Transport of Methane in the Atmospheric Boundary Layer over the Central Western Siberia -- Airborne Measurements of Greenhouse Gases over Siberia VI--", A.Postnov, E.Stulov, G.Inoue, Y.Tohjima, S.Maksyutov and T.Machida, Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, 30-33, 1994.
- 4)"Short Term Simulations of Atmospheric Methane Concentration with a Global Tracer Transport Model", S.Maksyutov, Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, Internal Symposium on Global Cycles of Atmospheric Greenhouse Gases, Sendai, 333-336, 1994.