



Title	シベリアにおける温室効果ガスの時空間分布
Author(s)	町田, 敏暢; 笹川, 基樹; 下山, 宏; Arshinov, M.; Davydov, D.; Fofonov, A.; Krasnov, O.; Fedoseev, N.; Mitin, S.; 須藤, 洋志; 勝又, 啓一; 津田, 憲次; 中澤, 高清; Maksyutov, S.
Citation	低温科学, 68, 9-19 大気圏と生物圏の相互利用. 北海道大学低温科学研究所編
Issue Date	2010-03-31
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/45157
Type	bulletin (article)
File Information	LTS68_003.pdf



[Instructions for use](#)

シベリアにおける温室効果ガスの時空間分布

町田 敏暢¹⁾, 笹川 基樹¹⁾, 下山 宏²⁾, M. Arshinov³⁾, D. Davydov³⁾,
A. Fofonov³⁾, O. Krasnov³⁾, N. Fedoseev⁴⁾, S. Mitin⁵⁾, 須藤 洋志⁶⁾,
勝又 啓一¹⁾, 津田 憲次⁷⁾, 中澤 高清⁸⁾, S. Maksyutov¹⁾

2010年1月25日受付, 2010年2月4日受理

ロシア連邦のシベリア地域において航空機とタワーを用いた観測ネットワークを展開して温室効果ガスの長期モニタリングを行った。シベリア地域の二酸化炭素濃度は季節変動の振幅が同じ緯度帯の沿岸域に比べて明らかに大きく、シベリアにおける陸上生態系の活動が盛んであることがうかがえた。シベリアのメタン濃度は同じ緯度帯の沿岸域で観測された濃度より明らかに高い上にその季節変動には冬季と夏季と年に2回の極大値が見られ、湿地や天然ガス起源のメタン放出が大気中濃度の変動に大きく影響していることが示唆された。

Temporal and spatial distributions of atmospheric greenhouse gases over Siberia

Toshinobu Machida¹, Motoki Sasakawa¹, Kou Shomoyama², Mikhail Arshinov³, Denis Davydov³,
Alexsander Fofonov³, Oleg Krasnov³, Nikolay Fedoseev⁴, Sergey Mitin⁵, Hiroshi Suto⁶,
Keiichi Katsumata¹, Noritsugu Tsuda⁷, Takakiyo Nakazawa⁸, Shamil Maksyutov¹

Long-term monitoring for atmospheric greenhouse gases has been conducted by observational network using aircraft and towers in Siberia, Russia. The amplitudes in seasonal variation of carbon dioxide (CO₂) observed by towers are 28-33ppb, which are more than 10 ppm larger than those observed at background sites, implying higher biospheric activities in Siberia compared to coastal region. Small vertical difference in annual mean CO₂ mixing ratio indicates that emission and absorption fluxes are identical in Siberia. Daytime methane (CH₄) mixing ratios exhibit rise in summer and winter at almost all tower sites, which implies that large amount of CH₄ is released in summer, especially from wetland. Extremely higher annual mean CH₄ in lower altitude compared to upper troposphere suggests that land surface in Siberia acts as a substantial source for CH₄.

1. はじめに

ロシア連邦のシベリア地域はタイガと呼ばれる広大な森林地帯を有しており、ここに存在する陸上生態系の光合成および呼吸活動を通して大気中二酸化炭素 (CO₂) 濃度の変動に大きな影響を及ぼしている (Levin et al.,

2002, Lloyd et al., 2002, Ramonet et al., 2002)。また、西シベリアには大気中メタン (CH₄) の最も重要な自然発生源である湿地帯が広がっていると同時に、大規模な天然ガスの掘削地やパイプラインが存在しており、これらからの漏洩による CH₄ の放出が有意に存在すると考えられ、大気中の CH₄ についてもその濃度決定に深い関

1) 国立環境研究所地球環境研究センター

2) 北海道大学低温科学研究所

3) Institute of Atmospheric Optics, Russia

4) Permafrost Institute, Russia

5) Institute of Microbiology, Russia

6) 宇宙航空研究開発機構

7) 地球・人間環境フォーラム

8) 東北大学大学院理学研究科

¹ Center for Global Environmental Research, National

Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

² Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

³ Institute of Atmospheric Optics, Russia

⁴ Permafrost Institute, Russia

⁵ Institute of Microbiology, Russia

⁶ Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

⁷ The Global Environmental Forum (GEF)

⁸ Graduate School of Science, Tohoku University

わりがある (Tohjima et al., 1996, 1997). しかしながら, シベリア地域には CO_2 や CH_4 をはじめとする大気中温室効果ガスの系統的な観測がほとんど存在しておらず, 全球のこれらのガスの収支を解明する上で大きな妨げになっている.

国立環境研究所では 1992 年より 1994 年にかけて夏季に航空機を利用したシベリア地域のキャンペーン観測を実施し, シベリア上空における温室効果ガスの空間分布の解明を行った (Tohjima et al., 1996, 1997, Sugawara et al., 1996, Nakazawa et al., 1997). しかしながら, シベリア地域が温室効果ガスに及ぼす影響を定量的に理解するには, それらの気体の季節変動や経年変動を含めた長期的な動態を把握する必要があることから, 1993 年より大気サンプリング法による定期観測を開始した. 大気サンプリングの方法は, できるだけ広域の代表的なデータを得るために, 航空機を用いて上空の大気を採取することとし, 現在では西シベリアの 2 地点と東シベリアの 1 地点で月に 1 回の頻度で観測を継続している.

一方で, 航空機観測は予算の制限もあり観測頻度やサイトの数を向上させるには限界がある. 地上における大気連続観測は観測地点付近の放出源・吸収源の影響を強く受けてしまう傾向があるが, 日中の大気が良く混合した状態のデータは広範囲の代表性を有していると考えられる. 本研究では地表近傍の直接的影響を避けるためにタワーを利用し, 西シベリアの 8 地点と東シベリアの 1 地点においてタワー観測ネットワークを構築して,

CO_2 濃度と CH_4 濃度の詳細な空間分布と短周期変動を含めた長期的な観測を 2002 年より開始した. これらのタワーのうちの 1 ヶ所では上空で小型航空機を利用した CO_2 濃度鉛直分布観測を実施し, タワー観測値の空間代表性の検証を行うと共に自由対流圏と境界層の CO_2 濃度の比較を行っている.

本稿では航空機とタワーネットワークで得られた CO_2 濃度と CH_4 濃度の観測結果を紹介し, その特徴について述べる.

2. 観測方法

2.1 観測地点

本研究の航空機観測サイトとタワー観測サイトを図 1 に示し, サイトの概要を表 1 と表 2 にまとめた. 航空機観測の範囲には広がりがあるので, 表 1 ではおおよその緯度・経度を示している.

航空機観測は西シベリアの湿地帯である Surgut (SUR) 上空において 1993 年より開始された. 使用する航空機は双発ターボプロップの An-24 機で, 観測最高高度は 7000 m である. 引き続き 1996 年に東シベリアの森林地帯である Yakutsk (YAK) 上空で An-24 機を使って高度 5000 m までの, 1997 年には西シベリアの森林地帯である Novosibirsk (NOV) 上空で An-30 機を使って高度 7000 m までの観測が始まった. これら 3 ヶ所の観測は月に 1 回の頻度でサンプリング法によって実

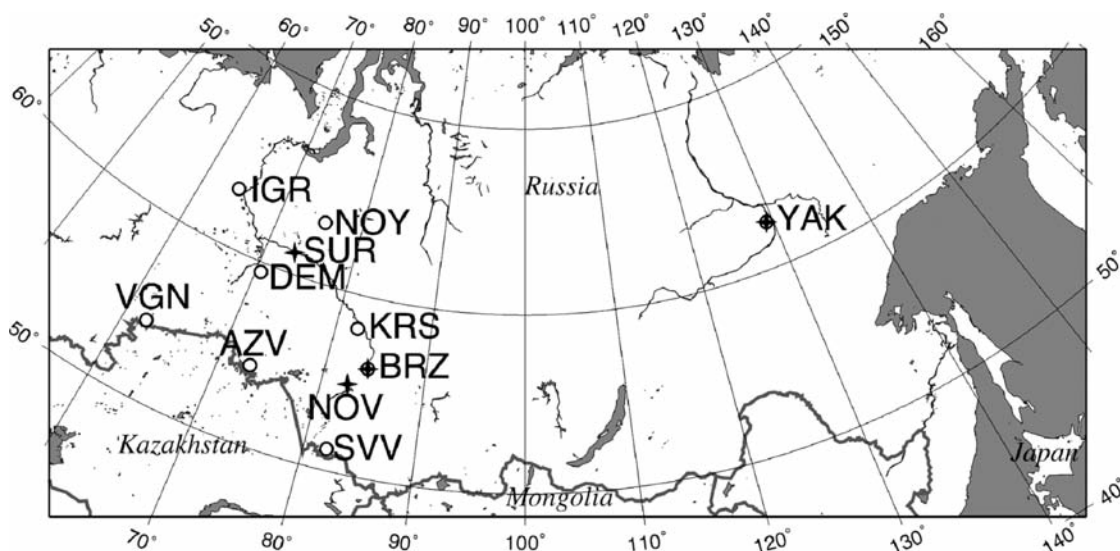


図 1: シベリアにおける航空機観測サイト (星印) とタワー観測サイト (白丸)

表 1: 航空機観測サイトの概要

Site	Code	Latitude	Longitude	Surface
Surgut	SUR	61°N	73°E	wetland
Novosibirsk	NOV	55°N	83°E	forest
Yakutsk	YAK	62°N	130°E	forest
Berezhovka	BRZ	56°N	84°E	forest

表 2: タワー観測サイトの概要

Site	Code	Latitude	Longitude	Sampling Height
Berezorechka	BRZ	56°09'N	84°20'E	80, 40, 20, 5 m
Karasevoe	KRS	58°15'N	82°25'E	67, 35 m
Igrim	IGR	63°11'N	64°25'E	47, 24 m
Noyabrsk	NOY	63°26'N	75°47'E	43, 21 m
Demyanskoe	DEM	59°47'N	70°52'E	63, 45 m
Savvushka	SVV	51°20'N	82°08'E	52, 27 m
Azovo	AZV	54°42'N	73°02'E	50, 29 m
Vaganovo	VGN	54°30'N	62°19'E	85, 42 m
Yakutsk	YAK	62°50'N	129°21'E	70, 11 m

施され、日本においてガス分析が行われる。YAK では 2001 年より小型航空機 (An-2 機) による観測に切り替わり、最高高度は 3000 m になったが、2008 年に大型航空機 (L-410 機) が使えるようになって高度 5000 m の観測が再開した。Berezorechka (BRZ) の上空では 2001 年より小型航空機 (An-2 機) に小型 CO₂ 濃度連続測定装置を搭載し、月に 1 から 4 回の頻度で CO₂ 濃度の詳細な鉛直分布を観測している。これら 4 地点の航空機観測は大気の良く混合した現地時間の午後を実施している。

タワー観測は西シベリアの BRZ において 2002 年に CO₂ 濃度の測定から開始された。2004 年には Karasevoe (KRS) と Igrim (IGR) において、2005 年には Noyabrsk (NOY), Demyanskoe (DEM) および東シベリアの YAK で観測が始まった。最南端のタワーである Savvushka (SVV) は 2006 年暮れに観測装置が設置されている。これらのサイトに加えて 2007 年からは西シベリア南部 Omsk 近郊の Azovo (AZV) において、2008 年からは西シベリア南部 Chelyabinsk 近郊の Vaganovo (VGN) において、同様のタワーを使った観測を立ち上げた。これによりシベリア全体で 9 ヶ所のタワーを使った観測ネットワークが構築された。西シベリア 8 サイトのうち BRZ と KRS は森林地帯である南部タイガ域に位置する。IGR, NOY, DEM の 3 ヶ所は北部タイガ域に属する。ここは森林密度が南部タイガよりも小さいと共に場所によっては湿地帯も広がっている。ロシア領内の南端に近い SVV, AZV, VGN はステップ気候に相当し、雨が少なく森林はほとんど存在しない。YAK は東シベリアの森林地帯に位置し、西シベリアのリファレンスとしての意義を有している。タワーネットワークサイトは将来、地域規模インバージョンモデルを使って亜大陸規模の CO₂ と CH₄ の放出源・吸収源分布を推定することを目的として配置された。

2.2 観測装置

2.2.1 航空機観測システム

2.2.1.1 航空機用大気サンプリングシステムと分析装置

SUR, NOV, YAK 上空の大気サンプリングは、両端にストップコックを備えたパイレックスガラスででき

た容積 500-750 ml のフラスコ内にダイアフラムポンプを使ってキャビン圧プラス約 0.2 MPa まで加圧充填することによって行う。SUR と NOV のサンプリングではストップコックやポンプの操作は手動で行われるが、YAK ではこれらの操作がシークエンサーを用いた自動オペレーションになっている。

大気サンプリングを終えたガラスフラスコは速やかに日本に送付し、分析が実施される。CO₂ 濃度は非分散型赤外分析計 (NDIR: LI-COR, LI-6252) を用いて 0.03 ppm の精度で測定される。CO₂ 濃度の絶対値は重量法によって製造された標準ガスに基づいた国立環境研究所 (NIES) 独自のスケール (NIES95 CO₂ スケール) によって決定されている。世界気象機関 (WMO) が採用している CO₂ スケールと NIES95 CO₂ スケールとの差は 355 ppm から 385 ppm の範囲で 0.10-0.14 ppm であり、わずかに NIES スケールの方が低い (Machida et al., 2009)。CH₄ 濃度は水素炎イオン化検出器 (FID) を備えたガスクロマトグラフ (GC: Agilent Technology, HP5890) によって、重量法基準の NIES94 CH₄ スケールに基づいて決定される。NIES94 CH₄ スケールと WMO スケールとの差は非常に小さいが、1750 ppb から 1840 ppb の範囲内で NIES スケールが 3.5-4.6 ppb だけ高い。WMO レポートでは NIES94 CH₄ スケールから WMO スケールへの変換係数を 0.997 としている (Zhou et al., 2009)。GC による CH₄ 濃度の分析精度は 1.7 ppb である。亜酸化窒素 (N₂O) と六弗化硫黄 (SF₆) の濃度は電子捕獲検出器 (ECD) を備えた GC (Agilent Technology, HP6890) で分析される。それぞれの分析精度は 0.3 ppb と 0.3 ppt である。一酸化炭素 (CO) と水素 (H₂) の濃度は還元ガス検出器 (RGD) 付きの GC (Peak Laboratories, Peak Performer 1) によってそれぞれ 3.1 ppb, 0.3 ppb の精度で測定されている。N₂O, SF₆, CO, H₂ の各濃度も NIES 独自の重量法スケールに基づいて値が決定されている。SUR サンプルの濃度分析は 1993 年 7 月から 2005 年 2 月まで東北大学によって実施され、その後 NIES が担当した。東北大学の標準ガススケールと NIES のスケールとの差は大気中濃度の変動に対して十分小さいことが確認されている。

2.2.1.2 航空機搭載用小型 CO₂ 濃度連続測定システム

BRZ 上空の観測に使用している航空機用 CO₂ 濃度観測装置は、シングルセル型の NDIR (LI-COR, LI-800) に小型の流量調整装置と圧力調整装置を組み込んだもので、ポンプやデータロガーを合わせて約 3 kg と軽量で取扱いを容易にしている。電源投入後の動作は自動であり、5 分に 1 回の頻度で NIES95 CO₂ スケールで値付けされた濃度 340 ppm と 390 ppm の標準ガスが NDIR に導入される。測定システムの応答時間は約 10 秒、ノイズレベルは 2 秒平均値を利用した場合 ±0.3 ppm、10 秒平均値を利用した場合 ±0.15 ppm である。

2.2.2 タワー観測システム

タワー観測ネットワークで使用している CO₂ および CH₄ 濃度測定システムの概略図を図 2 に示す。タワーの 2 高度 (BRZ では 4 高度) に設置した空気インレットから取り込んだ試料はダイアフラムポンプで加圧され、ガラス製の水分トラップ、ナフィオン薄膜ドライヤー、および過塩素酸マグネシウム除湿剤の 3 段で除湿され、マスフローコントローラで流量を一定 (40 ccm) に保った状態で NDIR (LI-COR, LI-800) に導入される。過塩素酸マグネシウムを使うことで、試料空気を露点 -40°C まで下げて測定することが可能になっている。また、3 段階の除湿を行うことで夏季でも過塩素酸マグネシウムを 1 ヶ月以上連続使用することができる。NDIR の出口は直接 CH₄ 計 (SnO₂ 半導体センサー) (Suto and Inoue, 2010) に接続されており、連続的に CO₂ 濃度と CH₄ 濃度を測定することができる。

大気中の CO₂ 濃度や CH₄ 濃度を長期間安定して精度良く測定するために、本システムでは空気ベースの CO₂, CH₄ 混合標準ガスを、大気中の濃度変動をカバーする範囲で 3 本備えている。これらの標準ガスの CO₂ および CH₄ 濃度は NIES95 CO₂ スケールと NIES94 CH₄ スケールで値付けされている。CO₂ や CH₄ の日変動を正確に捉えるためには 1 時間から 2 時間に 1 回の標準ガス測定を行うことが望ましいが、この

ような高頻度で較正を行うと 48 L の高压ガスシリンダーに充填された標準ガスでも 1 年未満で消費してしまう。そこで本システムでは、現地大気を 1 MPa 程度まで 48 L シリンダーに充填した「現地標準ガス (Reference Gas)」を 1 時間毎に導入し、検定済みの CO₂, CH₄ 標準ガスは 12 時間毎に導入する測定方法を採用した。この結果、観測精度を維持しつつ、日本から持ち込んだ標準ガスを 5 年以上使用することが可能となるシステムを構築できた。CO₂ 濃度および CH₄ 濃度の総合的な分析精度はそれぞれ 0.3 ppm, 5 ppb 以下と見積もられている。

3. 結果と考察

3.1 航空機観測

SUR 上空で 1996 年 1 月から 12 月までに観測された月別の CO₂ 濃度の鉛直分布を図 3 に示す。図 3 のうち、地表付近の観測値は高度 1-3 km までの、地表の影響を受けやすい大気境界層内のデータであると考えられ、観測サイト近傍における放出源・吸収源の影響を比較的強く受けている。これに対して高高度の観測値は、大気境界層上端から高度約 10 km の圏界面までに相当する自由対流圏のデータであり、観測サイトが位置する緯度帯の中より広い範囲の影響を受けているとみなせる。1 月から 5 月のシベリアが寒冷な季節における CO₂ 濃度は鉛直方向の差が小さいが、低高度ほどやや高い濃度を示している。これは観測サイト付近の地表面がわずかに CO₂ の放出源となっていることを示している。これらの季節には陸上生態系の呼吸・分解活動が弱いながらも光合成活動を上回っていることに加えて、人口は少ないものの化石燃料燃焼による CO₂ 放出が存在するために地表面が放出源になっているものと考えられる。6 月になると陸上生態系の光合成活動が盛んになり、高度 3 km 以下の CO₂ 濃度が低下を始める。高度 5.5 km より上空では 5 月との差は小さい。7 月は地表面において極めて強い吸収があることがわかるが、強い吸収の影響は

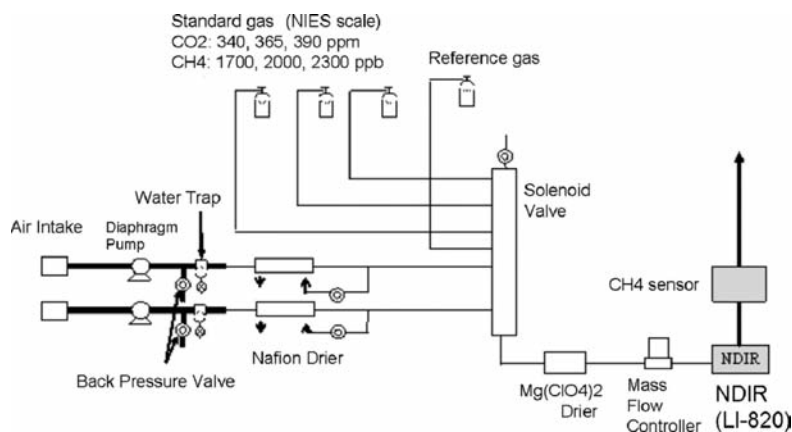


図 2: タワー観測システムの概略図

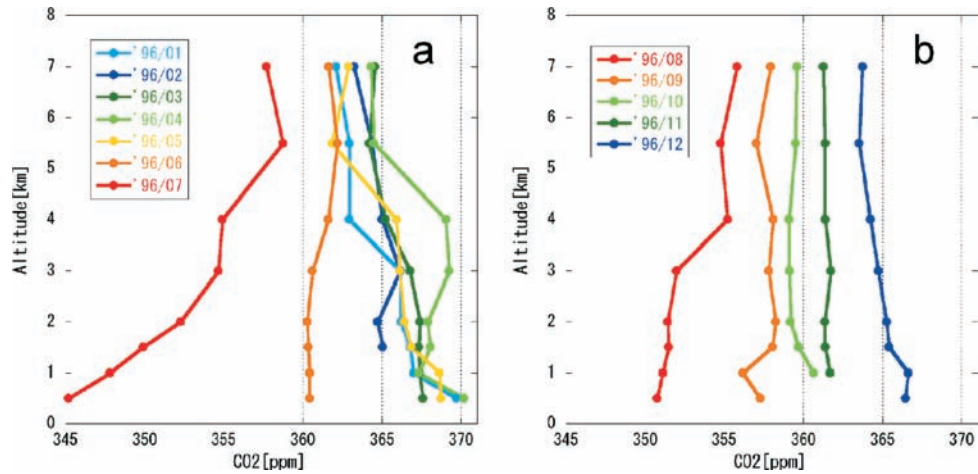


図3：SUR上空における1996年1月から7月まで(a)と8月から12月まで(b) CO₂ 濃度の鉛直分布

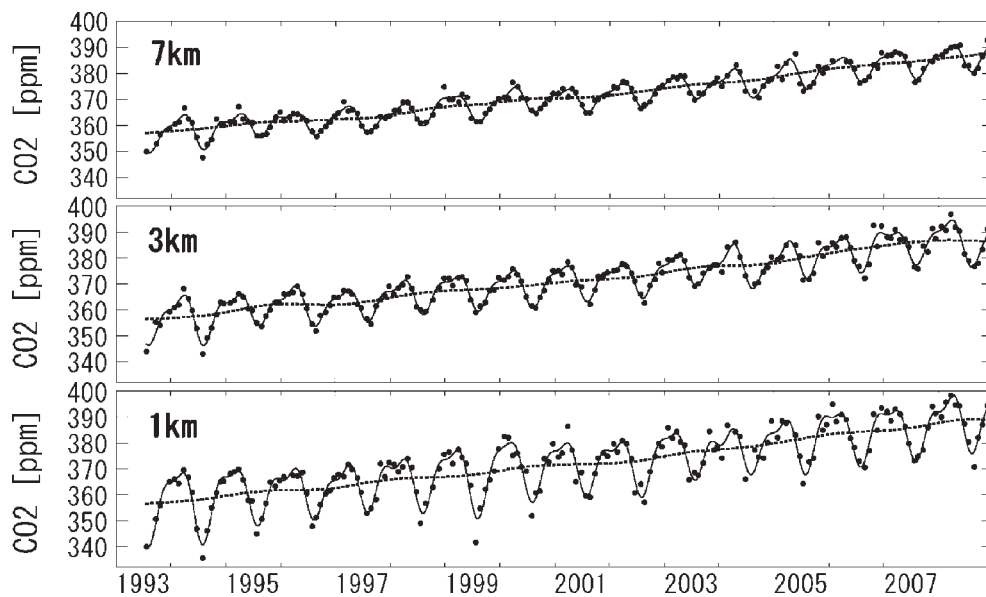


図4：SUR上空の高度7 km, 3 km, 1 kmで観測されたCO₂濃度の時系列。黒丸は観測値、実線はフィッティングカーブ、点線は経年変動を表す。

自由対流圏にまで達しており、夏季の大陸内部における鉛直混合の強さを反映した結果と考えられる。8月になっても負の濃度勾配（低高度でより低濃度）を示しているが、地表付近の濃度は7月ほど低くはなく、光合成と呼吸・分解のバランスが変わったことがわかる。9月以降は全ての高度で同じように濃度が上昇している。

これらの観測値を高度別の時系列としてプロットしたものが図4である。CO₂濃度の時間変動を統計的に扱うために、Thoning et al. (1989)の手法を利用して1年と半年周期の調和関数で平均的な季節変動を、カットオフ周期2年のローパスフィルターで経年変動を表現する。さらに、観測値から季節変動と経年変動をさし引いた残差にカットオフ周期150日のローパスフィルターで不規則変化をフィッティングし、年による季節変動の違いなどを表現している。これら1年と半年周期の調和関数、カットオフ周期2年のローパスフィルター、カットオフ周期150日のローパスフィルターから得られた変動

を合わせたものが図4のフィッティングカーブである。

高度1 kmにおける1994年から2008年までの季節振幅（フィッティングカーブから経年変動を差し引いた曲線における年ごとの極大値と極小値の差）の平均値は22.0 ppmである。振幅は高度3 kmでは15.1 ppm、高度7 kmでは10.8 ppmとなり高度1 kmにおける振幅の半分ほどになっている。CO₂は化学的に安定な気体であり大気中の化学的生成や消滅はほとんどないので、この振幅の差は地上の陸上生態系の活動によって作り出された季節変動が対流圏上部に伝わるにつれて減衰することを表している。平均的な季節変動を表す調和関数を比較すると、高度1 kmでは極小値が7月末から8月初めに見られるが、上部対流圏の高度7 kmでは半月ほど遅れて8月中旬に出現する。このことからCO₂の季節変動が地表付近で形成され、それが上層に伝わっていくメカニズムが存在することがわかる。同様な傾向が日本上空で観測されたCO₂濃度の季節変動でも観測され

ているが、日本上空での地表付近と上部対流圏との極小値の位相差は約1ヶ月である (Nakazawa et al., 1993). シベリア上空で上下の位相差が小さいのは大陸内部であるために夏季の地表面加熱による大気鉛直混合がより効率的に CO₂ 濃度の変動を上方に伝搬しているためであると考えられる。

高度1 kmの季節振幅である22.0 ppmという値は、同じ緯度帯の沿岸域での地上観測で得られたCO₂濃度の季節振幅である14-17 ppm (Conway et al., 2008) に比べて明らかに大きい。これはシベリアが大陸内部に位置し、陸上生態系の活動の影響を直接受けやすいためであると言える。地球大気は経度方向には比較的混合しやすいと言われているが、大気中で安定なCO₂でも強い放出源・吸収源が存在すれば同じ緯度帯であってもその濃度変動は決して均一でないことがわかる。

観測期間中(1993-2008年)のCO₂濃度の平均的な増加率は高度1 kmで2.1 ppm/year, 高度3 kmで2.0 ppm/year, 高度7 kmでは2.0 ppm/yearであり、高度による違いは見られない。これらの増加率はハワイ、マウナロア山で観測された同時期のCO₂濃度増加率である1.9 ppm/year (Keeling et al., 2009)とも同じ程度である。シベリア上空のCO₂濃度増加率は観測期間中一定の値ではなく、1994-1995年、1997-1998年、2002-2003年、2005年に3 ppm/year以上の高い増加率を示している。CO₂濃度増加とエルニーニョ南方振動(ENSO)イベントとは過去にも密接な対応があったことが多くの観測結果から示されており、気温や降水量のわずかな変動によって陸上生態系の呼吸と光合成のバランスがくずれてCO₂濃度増加率が大きくなるとの説が多い(例えばKeeling et al., 1995; Nakazawa et al., 1997; Morimoto et al., 2000)が、海洋の役割が大きいとする説もある(Francey et al., 1995)。1997-1998年と2002-2003年の高い増加率は1997年と2002年のENSOに対応する現象であろう。また、1994年と2005年にも南方振動指数(SOI)が負の傾向を示しているので、1994-1995年と2005年の増加率が高い現象もENSO的な気候変動に伴うものであると考えられる。このうち、1994-1995年、2002-2003年、2005年の濃度増加は全ての高度がほぼ同時に高い上昇率を示しており、この現象がシベリア地域に限ったことではないことが示唆される。これに対して1997-1998年の際には高度7 kmで急上昇を観測するより半年早く高度3 kmの濃度が上昇し、高度1 kmではさらに半年早く濃度が上昇していた。この位相の違いは1997年のENSOイベントに対してはシベリア地域の陸上生態系が他の地域より早く応答したか、ENSOとは無関係のCO₂放出があったことを示唆している。

図4の点線で表される経年変動曲線はどの高度もほぼ同じ値である。すなわち、SUR上空では季節変動を取

り除いた年平均濃度の高さ方向の違いが非常に小さい。これに対して日本上空では低高度におけるCO₂濃度の年平均値は高高度よりも明らかに高くなっている(Nakazawa et al., 1993)。これは日本付近には化石燃料の燃焼に伴う大量のCO₂放出があるために日本付近の地表面がCO₂の放出源になっていることを示している。日本などの工業国に比べると、シベリア地域の地表面からのCO₂放出量と吸収量の差は非常に小さいと言える。

図5はSUR上空で観測されたCH₄濃度の年平均値を鉛直分布にしたものである。いずれの年もCH₄濃度は低高度ほど高い濃度を示している。自由対流圏と考えられる高度3 km以上でも観測高度内での上下差が19 ppbになり、高度0.5 kmでは高度3 kmよりもさらに60 ppbほど高い濃度に達する。これはSURが湿地帯に位置しているので、地表面から発生する大量のCH₄が地表面に近くのCH₄濃度を高くしているためであると考えられる。さらにSUR付近には石油や天然ガスの掘削地やパイプラインがあり、それらからのCH₄の漏洩(Tohjima et al., 1996)も有意な寄与があると言える。

SUR上空のCH₄濃度は1994年から1997年にかけてほとんど経年的な変化がなかったが1997年以前と1998年以降との間に全ての高度において明瞭な濃度ギャップが見られる。この時期の急激な濃度増加はシベリア以外の他の地点でも観測されており(Dlugokencky et al., 2003)、全球的な傾向である。1998年以降の濃度は再び2004年まで増加が見られなかったが、2005年の4 km以上でわずかな増加が見え始め、2008年には2 km以上の濃度が2004年以前に比べて20 ppbほど高くなっている。2006年以降のCH₄濃度の再増加も世界の各地で観測されている(Rigby et al., 2008, Dlugokencky et al.,

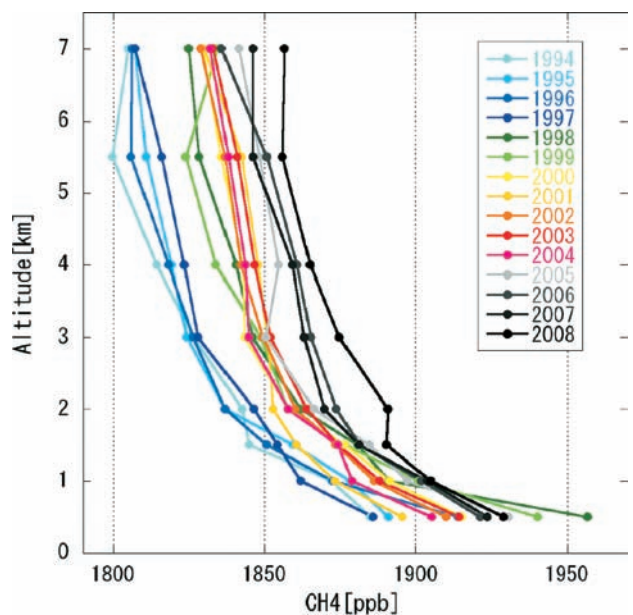


図5: SUR上空におけるCH₄濃度年平均値の鉛直分布

2009).

3.2 タワー観測

3.2.1 CO₂ 濃度の変動

シベリアのタワーネットワークで観測されたCO₂濃度の1時間値は特に夏季に明瞭な日変動が見られ、明け方に最高濃度を、夕方近くに最低濃度を示した。夜間には呼吸活動で発生したCO₂が成層化した大気層に蓄積することによって濃度が増加し、日中には鉛直混合による希釈効果と光合成活動によるCO₂の吸収で濃度が減少するといったメカニズムがCO₂濃度の日変動を作り出している。BRZタワーでは7月の平均的な日変動の振幅が高度5mで55ppmにも達する。一方冬季はCO₂濃度の日変動はほとんど見られない。

観測サイト周辺の空間代表性のあるデータを抽出するために上方インレットでの観測値のうち地理的現地時間の13時から17時の平均値(日中値)を計算し、時系列にしたものが図6である。BRZは40mと80mの観測値を合わせてプロットしている。フィッティングカーブは図4と同じ条件で作成したものである。日中値はすべての観測サイトにおいて冬季にCO₂濃度が高く、夏季に低くなる明瞭な季節変動をしている。季節変動の振幅

は28-33ppmであり、SUR上空1kmの振幅よりもさらに大きく、同じ緯度帯(52°N-68°N)の沿岸域で観測された季節振幅(Conway et al., 2008)に比べて10ppm以上大きい。2002年から観測が行われているBRZにおいては、データの蓄積によってCO₂濃度の経年変動も捉えられており、観測期間を通じた平均で2.0ppm/yearの増加率が得られる。季節変動を取り除いた年平均値は同じ緯度帯の沿岸域での観測値と同程度である。

タワーで観測されたCO₂濃度は日中の観測値であっても冬季に数日間にわたって濃度が高くなる現象が見られる。これは観測サイトがシベリア高気圧に覆われることによって鉛直方向の混合が妨げられ、地表面から放出されたCO₂が地表付近に蓄積したものと考えられる。

タワーネットワークで観測されたCO₂濃度の季節振幅を比較すると、低緯度側の森林帯に位置する観測地点BRZ(31.5ppm)、KRS(33.3ppm)が高緯度側の森林帯に位置する観測地点IGR(29.8ppm)、NOY(28.4ppm)よりも大きくなる傾向が見られる。夏季(6~8月)と冬季(12~2月)の平均CO₂濃度を緯度別に見ると、夏季のCO₂濃度は低緯度程低くなる傾向が存在している。これは低緯度側に存在する南部タイガのCO₂

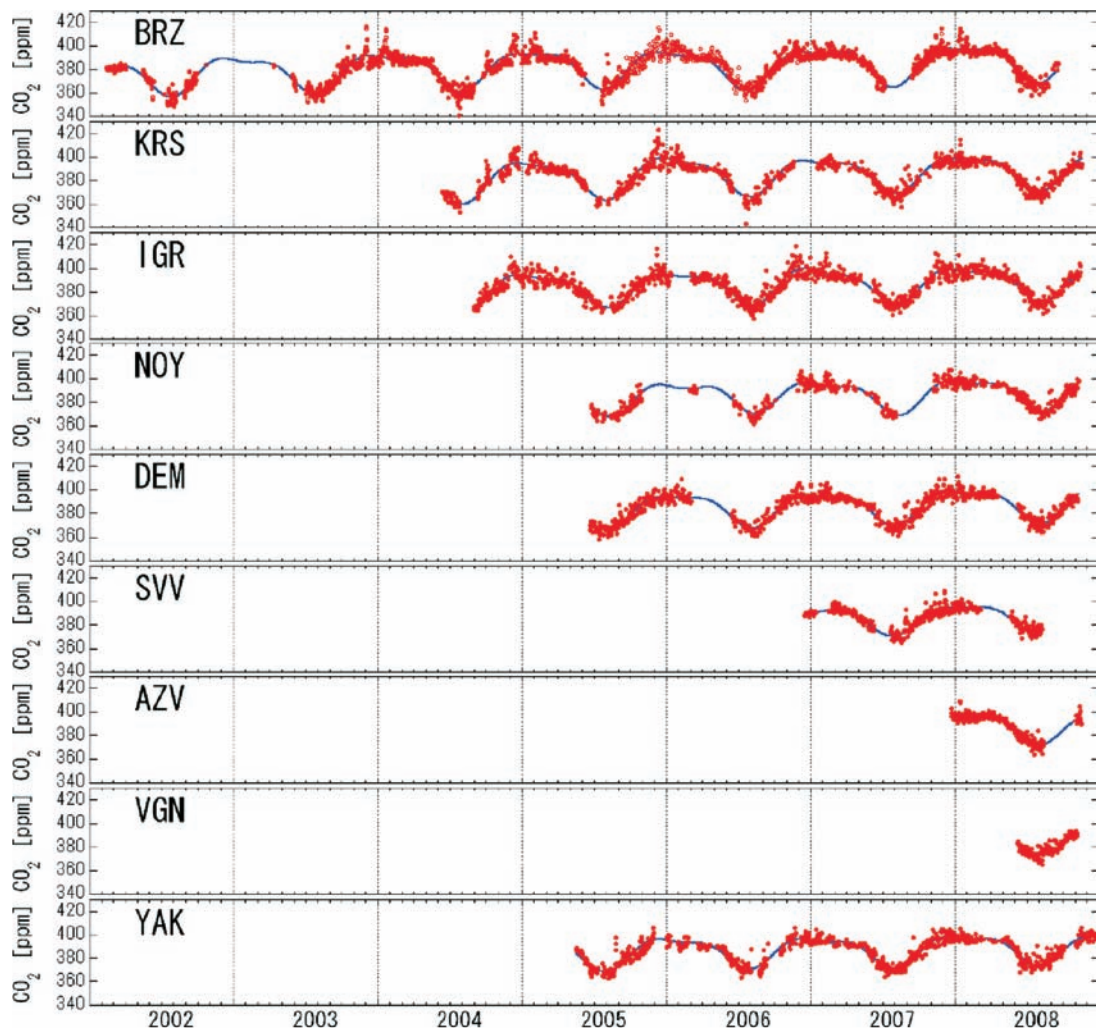


図6：各タワーサイトにおけるCO₂濃度の日中値(赤丸)。青線はフィッティングカーブを表す。

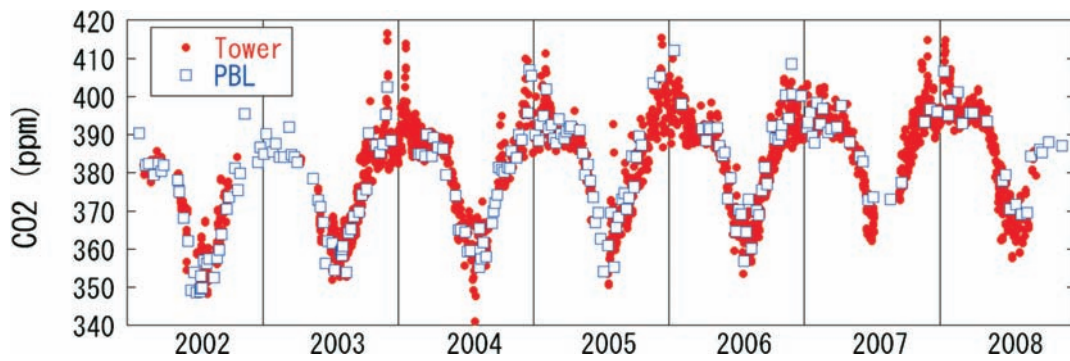


図7：BRZタワーの80 mと40 mで観測されたCO₂濃度の日中値（赤丸）とBRZタワー上空において小型航空機で観測されたPBL平均値（青四角）の時系列

吸収量が高緯度の北部タイガよりも大きい事を示すものである。一方、冬期のCO₂濃度は緯度に依存する結果は見られず、むしろ値はランダムであった。この結果から、夏季の陸上生態系活動の差がタワーネットワーク内の緯度による季節振幅の違いの原因となっていることがわかる。

タワー観測値の空間代表性を評価するために、BRZタワーで観測されたCO₂濃度と小型航空機(An-2機)によるBRZタワー上空の観測値を比較した。An-2機はBRZタワー直上の高度2 kmないし3 kmまでのCO₂濃度を連続観測する。本研究ではBRZ上空の大気境界層内(PBL)と自由対流圏(FT)におけるCO₂の振る舞いを明らかにするために各フライトで得られた気温、温位、湿度、CO₂濃度の鉛直分布から境界層上端高度を決定した。各フライトで得られたPBLのCO₂濃度を平均し、その時系列データをBRZタワーの80 mと40 mで観測された値の日中値と比較したものが図7である。タワーの日中値はその直上のPBLの平均値と極めて良く一致していることがわかる。航空機観測は好天日のみに実施するので、航空機観測データには天候によるバイアスが存在しているはずであるが、少なくとも好天日であれば地上タワーで観測されたCO₂濃度の日中値はPBLの代表値として扱うことができると確認された。

3.2.2 CH₄濃度の変動

タワーネットワークで観測されたCH₄濃度の1時間値は、同緯度の沿岸域で観測される1900 ppb以下のバックグラウンド大気レベル(Dlugokencky et al., 2009)を大きく上回っている。特に北部のサイト(IGR, NOY, DEM)では1年を通して2500 ppbまたはそれ以上の高濃度ピークが観測されている。タワーデータの1時間値は、低高度の値が高高度の値より高い場合が頻繁に観測されているが、これはタワー近傍からの極めてローカルな放出源の影響を受けた場合や、地表面付近に形成される安定成層が鉛直混合を抑制し地上から放出されたCH₄が地表面付近に溜まり続ける時に起こると考えられる(Sasakawa et al., 2010)。

CH₄濃度の日変動はCO₂と同様に夏季に最も振幅が

大きくなり、明け方に最高濃度を示す(図8)。CH₄はCO₂と違い地表面が常に放出源になっているので、濃度の日変動を作り出しているのは混合層高度の日変動であると考えられる。KRSでは7月には高高度の日変動の振幅が300 ppbにも達する。一方冬季にはシベリアのいずれのサイトにおいてもCH₄濃度の日変動はほとんど見られない。

空間代表性のある観測値としてCO₂と同様に日中(13:00-17:00)の値を抽出した。ただしローカルな放出源があった場合は特に下のインレットに強く影響が出やすいので、上下間のインレットの濃度差が大きい場合(50 ppb以上)は汚染を受けたデータとして解析から除いた。またその場合、時間変動も大きくなるのが予想されるので日中値が50 ppb以上変化する場合も解析には使用しなかった。シベリアにおけるCH₄濃度の日中値はほぼ全てのサイトで冬季だけではなく夏季にも極大値を示す(図9)。大気中のCH₄は夏季にOHラジカルとの消滅反応が進むので、バックグラウンド大気濃度は一般的に夏季に極小を示す(Rigby et al., 2008; Dlugokencky et al., 2009)。シベリアで夏季に極大値が観測されるのは、OHラジカルとの反応で消滅する量を凌駕するほどの大量のCH₄が夏季にシベリアの湿地帯から放出されているためと考えられる。シベリアのCH₄濃度は日中値であっても同じ緯度帯の沿岸域で観測された値(Dlugokencky et al., 2009)よりも1年を通じて高い値を維持しており、シベリア域では夏季には湿地帯から、冬季には化石燃料からのCH₄放出量が多いことが示唆される。全般的に北方のサイトでのCH₄濃度が高く、これは西シベリア北部に湿地帯が多いことと一致している。NOYやDEMでは、風向に強く依存する高濃度CH₄イベントもまれに観測され、これらのタワー近傍を通る天然ガスのパイプラインや加圧ステーションからのCH₄の漏出を検出することができた(Sasakawa et al., 2010)。

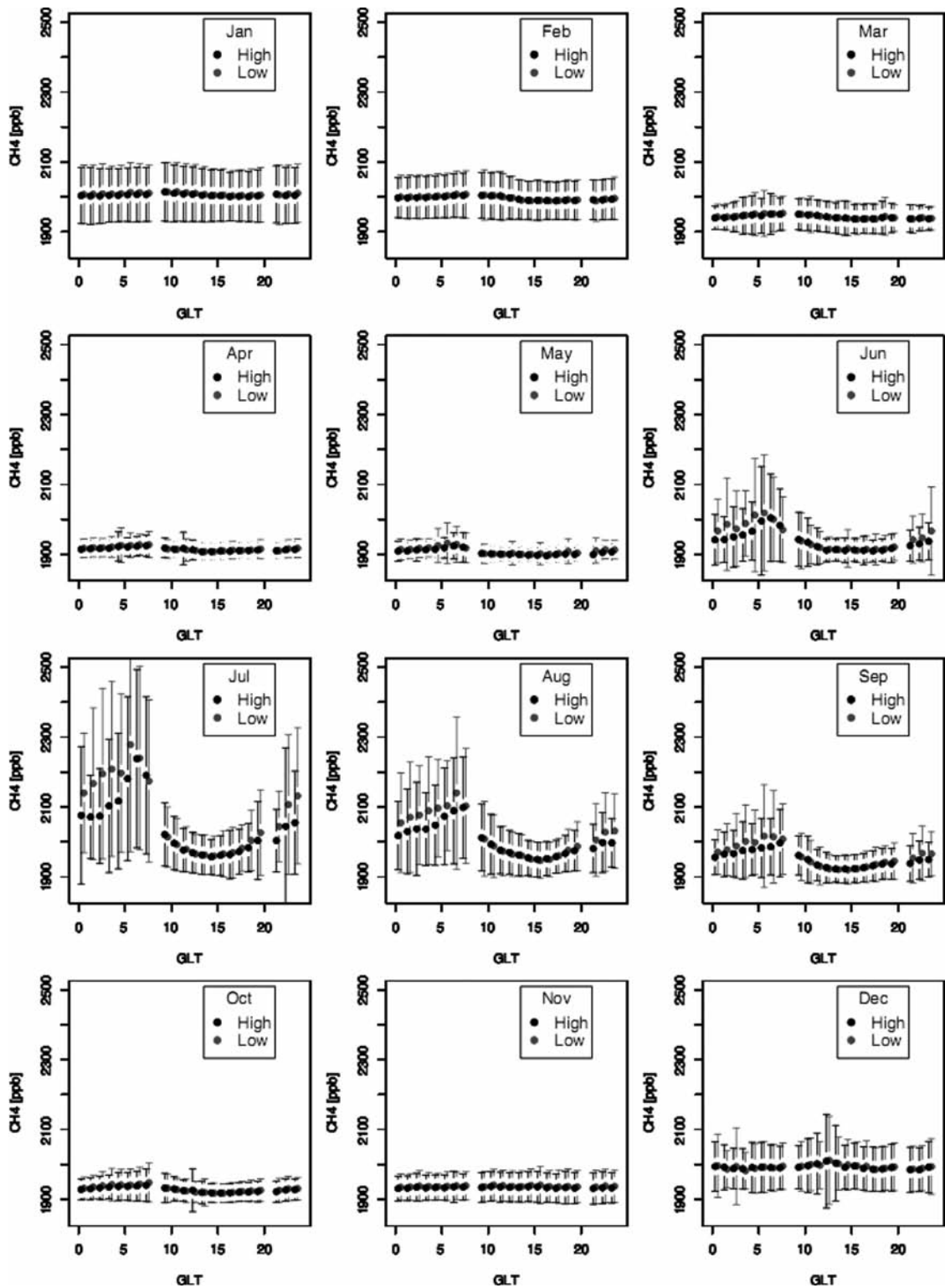


図8：KRS タワーで観測された CH₄ 濃度 1 時間値の日変動。横軸は地理的現地時間を，エラーバーは標準偏差を表す。黒丸は高高度インレットの，灰色の丸は低高度インレットの観測値。

4. まとめ

シベリア地域において航空機とタワーネットワークを利用して大気中の温室効果ガスの長期観測を実施した。

タワーで観測されたシベリア地域の CO₂ 濃度は冬季に高く夏季に低い明瞭な季節変動を示し，振幅は 28-33 ppm にも達する。これらの振幅は同じ緯度帯の沿岸域

に比べて 10 ppm 以上大きく，シベリアにおける陸上生態系の活動が盛んであることがわかる。航空機で観測された CO₂ 濃度の鉛直分布は冬季から春季にかけては地上付近がやや高くなるが，夏季には低高度の濃度が上空に比べて 10 ppm 以上低くなる。しかしながら年平均値の高度による差は小さく，シベリア地域の CO₂ 放出量と吸収量がバランスしていることが示唆された。

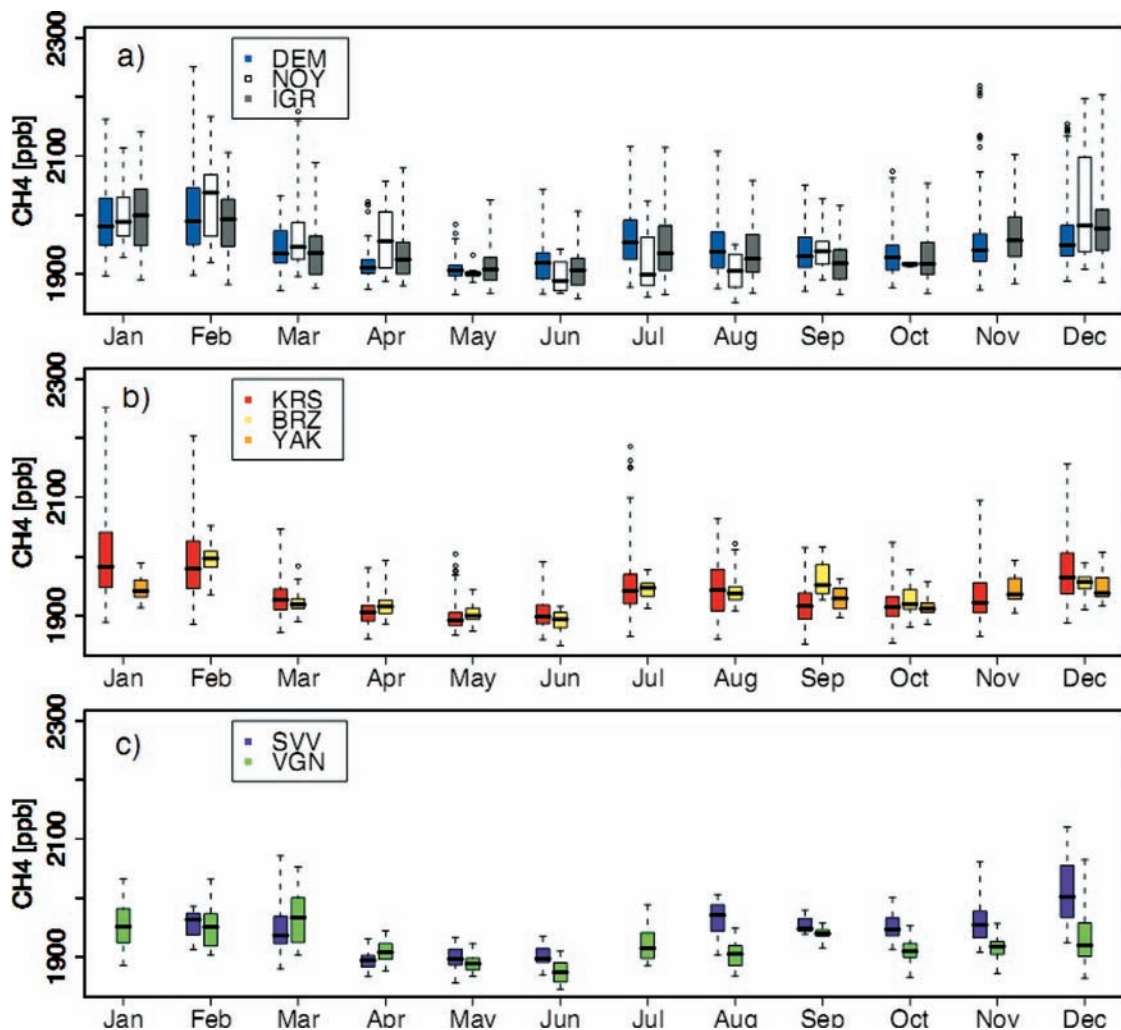


図9：各タワーサイトにおけるCH₄濃度の日中値の月毎の箱ひげ図。箱の長さは第3四分位数(75%点)から第1四分位数(25%点)の値を引いた値。箱の中の横線は中央値。ひげの長さは四分位範囲の3倍内の最も端にあるデータを示す。丸印は外れ値。

タワーで観測された地上付近のCH₄濃度の日中値は冬季と夏季と年に2回の極大値を示し、夏季に大量のCH₄放出が存在することがわかる。またシベリアのCH₄濃度は同じ緯度帯の沿岸域で観測された濃度より明らかに高く、シベリア域では年間を通してCH₄放出量が多いことが示唆される。航空機で観測されたCH₄濃度年平均値の鉛直分布が常に低高度ほど高いことからシベリアがCH₄の放出源であることがわかる。また、航空機で観測されたCH₄濃度は1998年に急激に増加して以来経年変動がほとんど見られなかったが、2006年頃よりシベリア上空でも明らかな濃度増加が観測されている。

謝辞

本観測システムの構築と維持のために渡井智則博士に多大なご尽力をいただいた。本研究の大型航空機による観測は国立環境研究所地球環境研究センターのモニタリング事業の一環として実施された。小型航空機の観測は環境省地球環境保全試験研究費の援助を受けた。タワー

観測は環境省地球環境研究総合推進費ならびに環境省地球環境保全試験研究費の援助を受けて実施された。

参考文献

- Conway, T. J., P. M. Lang, and K. A. Masarie (2008), Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1968-2007, Version: 2008-07-24, Path:<ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/flask/event/>.
- Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Bruhwiler, L., Masarie, K. A., Lang, P. M., Miller, J. B. and Tans, P. P. (2003) Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state? *Geophys. Res. Lett.* **30** (19), 1992, doi: 10.1029/2003GL018126.
- Dlugokencky, E. J., P. M. Lang, and K. A. Masarie (2009) Atmospheric Methane Dry Air Mole Fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1983-2007, Version: 2008-07-02, Path:<ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/ch4/flask/event/>.
- Francey, R. J., P. P. Tans, C. E. Allison, I. G. Enting, J. W. C. White, and M. Trolier (1995) Changes in oceanic and

- terrestrial carbon uptake since 1982, *Nature*, **373**, 326-330.
- Keeling, R. F., S. C. Piper, A. F. Bollenbacher and J. S. Walker (2009) Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U. S. A. doi: 10.3334/CDIAC/atg.035
- Keeling, C. D., T. P. Wholf, M. Wahlen, and J. van der Plicht (1995) Inter-annual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, *Nature*, **375**, 666-670.
- Levin, I., P. Ciais, R. Langenfelds, M. Schmidt, M. Ramonet and co-authors (2002) Three years of trace gas observations over the EuroSiberian domain derived from aircraft sampling - a concerted action, *Tellus B*, **54** (5), 696-712.
- Lloyd, J., R. L. Langenfelds, R. J. Francey, M. Gloor, N. M. Tchekbakova and co-authors (2002) A trace-gas climatology above Zotino, central Siberia, *Tellus B*, **54** (5), 749-767.
- Machida, T., Katsumata, K., Tohjima, Y., Watai, T. and Mukai, H. 2009. Preparing and maintaining of CO₂ calibration scale in National Institute for Environmental Studies - NIES 95 CO₂ scale. In: Report of the 14th WMO meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracer Measurement Techniques (ed. T. Laurila). Helsinki, Finland, September 10-13, 2007, WMO/GAW Report No.186, pp.26-29.
- Morimoto, S., Nakazawa, T., Higuchi, K. and Aoki, S. (2000) Latitudinal distribution of atmospheric CO₂ sources and sinks inferred by δ13C measurements from 1985 to 1991, *J. Geophys. Res.*, **105**, 24315-24326.
- Nakazawa, T., Sugawara, S., Inoue, G., Machida, T., Maksyutov, S. and Mukai, H. (1997) Aircraft measurements of the concentrations of CO₂, CH₄, N₂O, and CO and the carbon and oxygen isotopic ratios of CO₂ in the troposphere over Russia. *J. Geophys. Res.* **102**, 3843-3859.
- Nakazawa, T., S. Morimoto, S. Aoki, and M. Tanaka (1993) Time and space variations of the carbon isotopic ratio of the tropospheric carbon dioxide over Japan, *Tellus, Ser. B*, **45**, 258-274.
- Nakazawa, T., S. Morimoto, S. Aoki, and M. Tanaka (1997) Temporal and spatial variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric carbon dioxide in the western Pacific region, *J. Geophys. Res.*, **102**, 1271-1285.
- Ramonet, M., P. Ciais, I. Nepomniachii, K. Sidorov, R. E. M. Neubert and co-authors (2002) Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km north-west of Moscow, *Tellus B*, **54** (5), 713-734.
- Rigby, M., Prinn, R. G., Fraser, P. J., Simmonds, P. G., Langenfelds, R. L., Huang, J., Cunnold, D. M., Steele, L. P., Krummel, P. B., Weiss, R. F., O'Doherty, S., Salameh, P. K., Wang, H. J., Harth, C. M., Muehle, J. and Porter, L. W. (2008), Renewed growth of atmospheric methane, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22805, doi:10.1029/2008GL036037.
- Sasakawa, M., K. Shimoyama, T. Machida, N. Tsuda, H. Suto, M. Arshinov, D. Davidov, A. Fofonov, O. Krasnov, T. Saeki, Y. Koyama, and S. Maksyutov (2010) Continuous Measurement of Methane Concentration using 9-tower Network over Siberia, submitted to *Tellus B*.
- Sugawara, S., Nakazawa, T., Inoue, G., Machida, T., Mukai, H., Vinnichenko, N. and Khattatov, V. (1996) Aircraft measurements of the stable carbon isotopic ratio of atmospheric methane over Siberia. *Global Biogeochem. Cycles* **10**, 223-231.
- Suto, H. and Inoue, G. (2010) A New Portable Instrument for In-Situ Measurement of Atmospheric Methane Concentration by Applying an Improved Tin-dioxide Based Gas Sensor, *J. Atmos. Oceanic Technol.*
- Thoning, K., Tans, P. and Komhyr, W. (1989) Atmospheric Carbon dioxide at Mauna Loa Observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985. *J. Geophys. Res.* **94**, 8549-8565.
- Tohjima, Y., Maksyutov, S., Machida, T. and Inoue, G. (1996) Airborne measurements of atmospheric methane over oil fields in western Siberia. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 1621-1624.
- Tohjima, Y., Wakita, H., Maksyutov, S., Machida, T., Inoue, G., Vinnichenko, N. and Khattatov, V. (1997) Distribution of tropospheric methane over Siberia in July 1993. *J. Geophys. Res.* **102**, 25371-25382.
- Zhou, L. X., Kitzis, D. and Tans, P. P. 2009. Report of the fourth WMO round-robin reference gas intercomparison, 2002-2007. In: Report of the 14th WMO meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracer Measurement Techniques (ed. T. Laurila). Helsinki, Finland, September 10-13, 2007, WMO/GAW Report No.186, pp.40-43.