

シベリアのタワー観測ネットワークによる温室効果ガス（CO₂、CH₄）の長期変動解析

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター 大気・海洋モニタリング推進室 笹川基樹・町田敏暢

地球環境研究センター 物質循環モデリング・解析研究室 伊藤昭彦

平成24～28年度合計予算額 115,399千円

(うち、平成28年度当初予算額 17,661千円)

[要旨] シベリアにおけるタワー観測ネットワーク (JR-STATION: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) を用いてCO₂濃度とCH₄濃度の連続測定を5年間実施した。GOSATのL4B全球CO₂濃度と比較を行い、夏期はこれまで報告されているバイアスの範囲内で一致することが確認された。ただし冬期のデータに関してL4BデータはJR-STATIONデータより低く、内陸のシベリア域で冬期に観測される高濃度CO₂を再現していない。JR-STATIONのCO₂データは沿岸地域におけるバックグラウンドサイトと比較して大きな季節振幅を示した。CH₄濃度は、大きな濃度変動を示し濃度レベルも高い。大気がよく混合する日中の平均値でも、バックグラウンドで観測される冬季を極大とする季節変動以外に夏季にも濃度極大が見られる。西シベリアにはCH₄の起源となる大湿地帯が存在するためであり、これが西シベリアのタワーサイトのCH₄濃度の特徴である。現行のセンサーとキャビティリングダウン分光分析装置で、シリンダーの乾燥空気を並列に測定し、CO₂に関しては良い一致が見られた。CH₄に関しては、従来の半導体センサーの直線性の問題で、標準ガス濃度から離れた濃度では誤差が大きくなることがわかった。本観測値と他のプラットフォームで観測された値も用いて、全球を幾つかの地域に分けて逆計算によりフラックスを推定した。事後推定CO₂フラックスのソース・シンクのバランスは全球で変わらないが、その分布に大きな変化があった。CO₂吸収と不確実性は、ユーラシア亜寒帯域では小さくなり、他の北半球域（ユーラシア温帯域、ヨーロッパ、北アメリカ亜寒帯域、北アメリカ温帯域）では大きくなった。北半球の50°N以北からの事後推定CH₄フラックスは、全球の約15%を占めることがわかった。ユーラシア北部では先見値より高い値が見積もられ、これは西シベリア低地帯での増加が主な原因であった。事後推定CH₄フラックスは、西シベリア低地帯においては2007年、ハドソン湾低地帯においては2011年に正のアノマリーが見られ、これらの地域での異常な高温が原因と考えられる。

[キーワード] 二酸化炭素、メタン、タワー観測、シベリア、フラックス、タイガ、湿地

1. はじめに

ロシア共和国のシベリア域は、グローバルな温室効果ガスの循環にとって重要な放出源・吸収源が分布している上に、地球温暖化に伴い永久凍土の融解やタイガ植生の遷移が起こるなど、気候変動に対して脆弱な地域である。しかし世界の温室効果ガス観測網の中でシベリア域は観測の空白域であった。そこで国立環境研究所では、平成14年度に始まった地球環境研究総合推進費「21

世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」のテーマ2でトップダウンアプローチによる亜大陸規模のCO₂収支推定の手法を確立することを目指して、シベリア域においてタワーを使ったCO₂濃度観測ネットワークの構築を開始した。その後観測ネットワークはCH₄濃度の測定も加え、平成19年度から開始した地球環境保全試験研究費「タワー観測ネットワークを利用したシベリアにおけるCO₂とCH₄収支の推定」で徐々に9ヶ所まで展開し、JR-STATION (Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network)¹⁾として多点同時観測を行えるようになった。平成24年度からは本研究予算でJR-STATIONを稼働し、観測の空白域であったシベリア域における温室効果ガスの長期変動を捉えるための貴重なデータが蓄積されてきている。本研究は日露国際協力の一環としての技術協力から始まっており、長期継続の実績からロシア国内で継続的な観測を行うことができるのは現在でも日本のみであることから、欧米諸国には実施の難しい貴重な貢献がなされている。

2. 研究目的

本研究では、観測の空白域であったロシア共和国のシベリア域において、JR-STATIONを用いて温室効果ガス (CO₂、CH₄) 濃度の詳細な空間分布と10年規模の長期変動を捉えることが目的である。世界最大規模のタイガや湿地が広がるシベリアでは、気候変動に対する陸域生態系の応答が大気中温室効果ガス濃度に多大な影響をおよぼすことが予想される。例えばCO₂濃度に関しては、西シベリア域において2009年と2010年の夏季の濃度差が例年より大きく、これは気温の異常に応答したタイガ植生の光合成量の変化によるとの推察も報告された²⁾。またCH₄濃度は2007年から全球規模での再増加が報告されているが^{3), 4)}、西シベリアの湿地帯からのCH₄放出量の変化がその増加に寄与する可能性も報告され³⁾、長期変動をモニタリングすることが強く求められている。さらにその時空間変動と衛星や*in situ*での観測を始めとする他の観測データを組み合わせて、シベリア域の多様な地表面 (タイガ・ステップ域・湿地帯) からのフラックス分布を推定しその不確実性を小さくすることが目的であり、地球規模での温室効果ガスの動態を把握する上での重要な知見となる。

3. 研究方法

(1) 観測地点

JR-STATIONの観測地点を示した地図と位置情報・採取高度を図1と表1に示す。以降、タワーサイト名は表1のIDコードで表す。西シベリアのIGR、NOY、DEMはタイガと湿地が混在する場所に位置する (図2左)。またNOY、DEM周辺には石油、IGR周辺には天然ガスの掘削施設が存在する。KRSとBRZはタイガ域、VGN、AZV、SVVはステップ域に位置する。YAKはタイガとステップが混在する場所に位置する (図2右)。

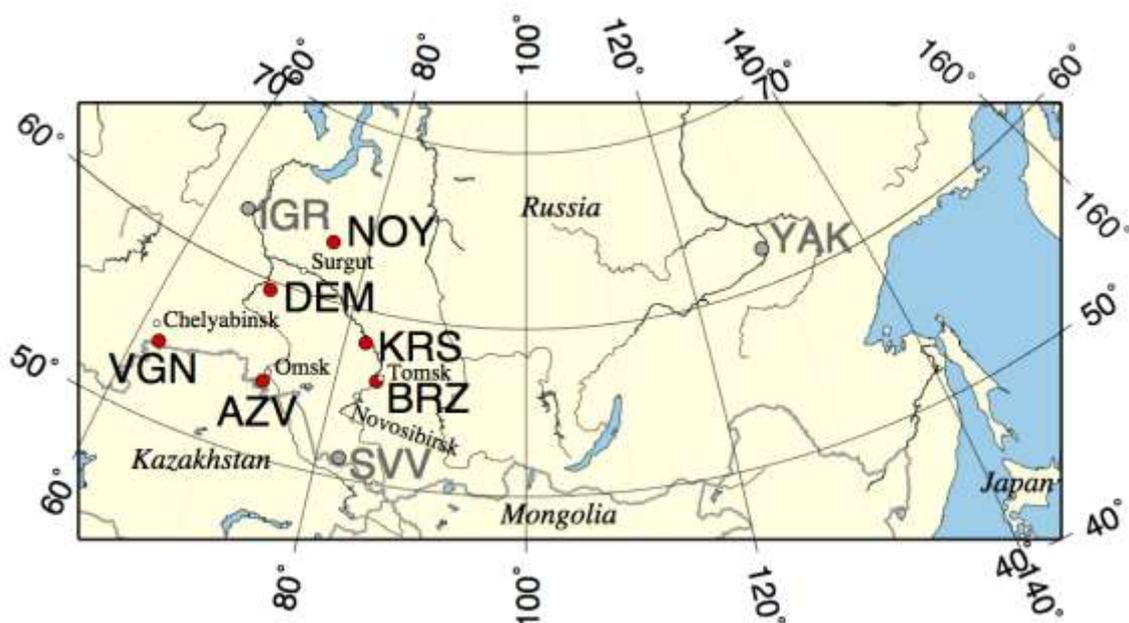


図1. JR-STATIONの位置 (●)。●は過去のサイト。国境はグレーラインで示す。

表1. JR-STATIONの位置情報および空気採取高度

Identifying Code, LST	Location	Latitude (N)	Longitude (E)	Air inlet heights (m)	Elevation at tower base (m a. s. l) ^{a)}
BRZ, GMT+6	Berezorechka	56° 08' 45"	84° 19' 55"	5, 20, 40, 80	168
KRS, GMT+5	Karasevoe	58° 14' 44"	82° 25' 28"	35, 67	76
IGR, GMT+4	Igrim	63° 11' 30"	64° 24' 50"	24, 47	9
NOY, GMT+5	Noyabrsk	63° 25' 45"	75° 46' 48"	21, 43	108
DEM, GMT+5	Demyanskoe	59° 47' 29"	70° 52' 16"	45, 63	63
SVV, GMT+5	Savvushka	51° 19' 31"	82° 07' 42"	27, 52	495
AZV, GMT+5	Azovo	54° 42' 18"	73° 01' 45"	29, 50	110
VGN, GMT+4	Vaganovo	54° 29' 50"	62° 19' 29"	42, 85	192
YAK, GMT+9	Yakutsk	62° 05' 19"	129° 21' 21"	11, 77	264

a) Google earthから求めた高度。

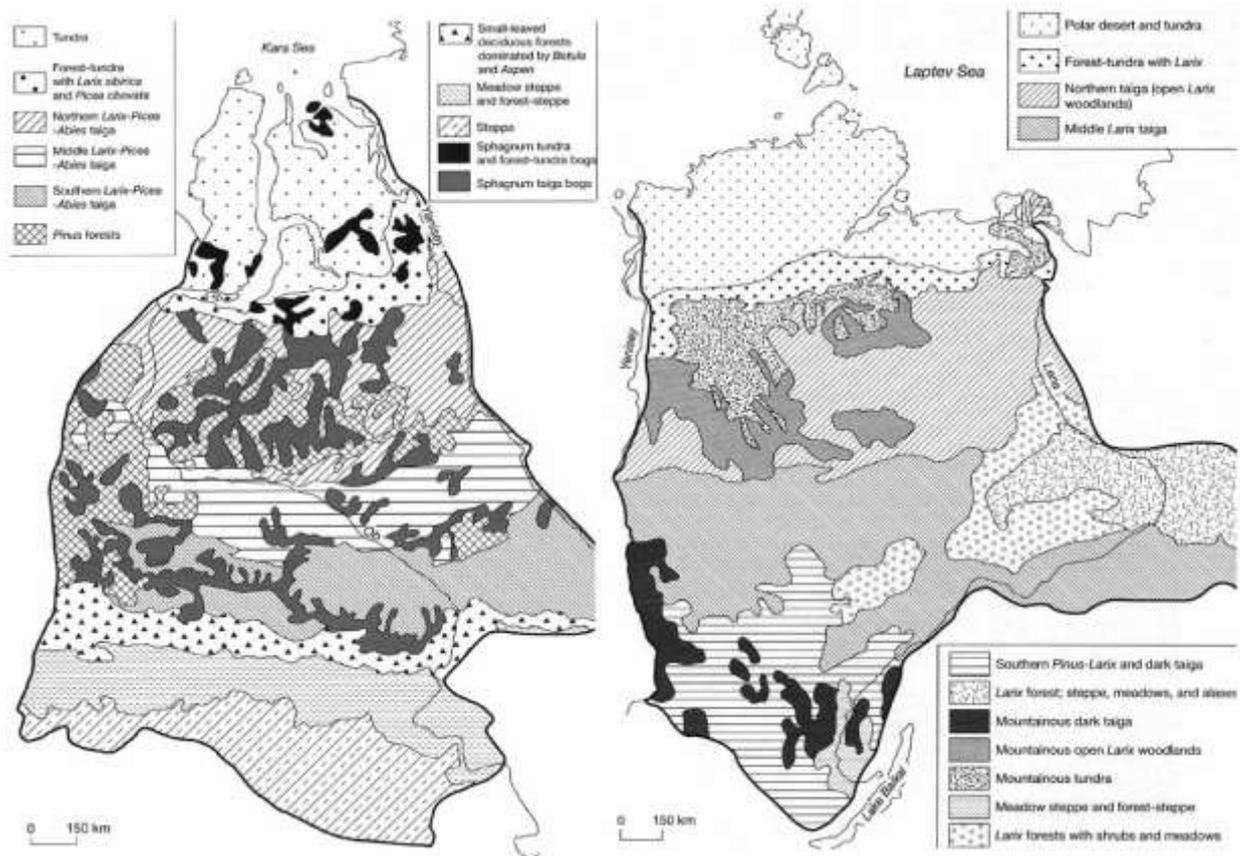


図2. 西シベリア (左) と東シベリア (右) の植生⁵⁾

(2) 観測システム

CO₂およびCH₄濃度測定システムの概略図を図3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ヤ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CO₂計である非分散型赤外分析計 (NDIR: LI-COR, LI-820) 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℃まで下げて測定することが可能になっている。3段階の除湿を行うことで夏季でも1ヶ月

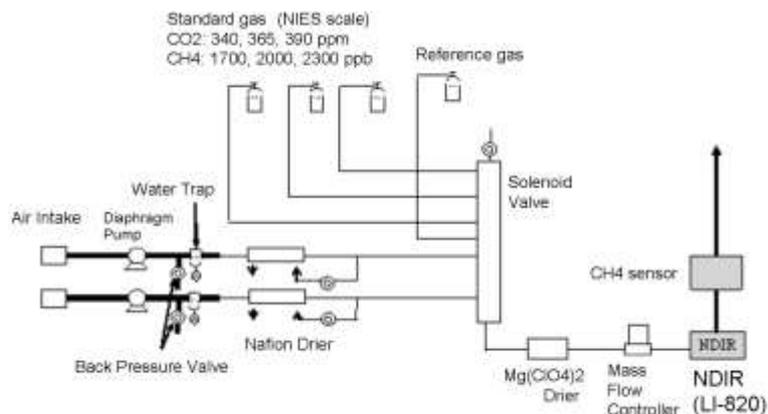


図3. タワー観測システムの概略図

以上の過塩素酸マグネシウムの連続使用ができる⁶⁾。NDIRの出口は直接CH₄計(SnO₂半導体センサー)⁷⁾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。

CO₂計は流量制御などの改造を加えることにより、数分のデータを平均化処理して±0.1 ppmの分解能を実現した。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は、測定の基準となる標準ガスが重要である。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濃度は国立環境研究所において、国際比較可能な基準であるNIES09 CO₂スケール⁸⁾、NIES94 CH₄スケール⁹⁾によって検定されている。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必要があるが、このような高頻度で校正を行うと、48 Lの高圧ガスシリンダーに充填された標準ガスでも1年未満で使い切ってしまう。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りファレンスガス(現地標準ガス)を1時間ごとに導入し、検定済みのCO₂、CH₄標準ガスを12時間ごと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⁶⁾。2高度(BRZでは4高度)からの大気試料と現地標準ガスの流路は20分毎(BRZでは6分毎(～2006/5)、12分毎(2006/8～))に切り替わる。流路内でのガスの置換とセンサーの反応時間を考慮して最後の3分間(BRZでは1分間)を平均した値をその時刻の代表値(1時間値)として扱う。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 ppbv以下¹⁾と見積もられている。

4. 結果・考察

(1) タワー観測値と衛星観測値の比較、CO₂濃度について

シベリア域での温室効果ガスの観測は限られているため、GOSATなどの観測衛星から計算される大気中濃度の検証値としても、本研究の観測値は非常に有効である。逆に本研究のタワー観測で得られた大気中濃度が、衛星の観測値に基づいた濃度とどの程度一致するかも重要な情報である。そこで本研究の値とGOSATのL4B全球CO₂濃度との比較を行った。タワー観測の値は連続値であるが特に夜間の値は局所的な影響を強く受けるため、大気がよく混合する日中の13:00から17:00の間に観測された値のみを抽出した。また欠測が少なく通年観測の行なえたAZVとIGRの2010年と2011年のデータを使用した。L4Bの算出は、月別・地域別(全球64分割)に推定されるL4A全球CO₂吸収排出量に基づき大気輸送モデルを用いて行われるので、月の切れ目に不連続が現れる。そこで両データの日中値から月平均を求め、その時系列を図4に示す。L4Bと比較してタワー観測の値は季節振幅が大きい。夏期の値はL4Bより低く、冬期の値は高い。Sasakawa et al. (2013)¹¹⁾はシベリアの森林域において、夏期(6月から8月)のタワー観測値は日中値であっても境界層内の平均値より負のバイアスを示すことを明らかにしている。AZVとIGRの環境はSasakawa et al. (2013)¹¹⁾の森林域とは異なるが、どちらも内陸の観測点なので参考にはできる。彼らの報告値(観測高度80 mで2.4±0.8 ppm、40 mで3.0±0.6 ppmの負のバイアス)から予測すると、AZVとIGRの観測高度は50 mと47 mなので、夏期は境界層内の平均値より約3 ppm低く観測されることになる。L4Bデータとの夏期の差異は、ほぼこの範囲内で説明がつく。ただし冬期の差異は説明がつかない。GOSATの観測ではシベリア域などの高緯度帯のデータが限られ、またL4A全球CO₂吸収排出量の算出にJR-STATIONのデータは使用されていないため、観測の空白域となったシベリアでは誤差が大き

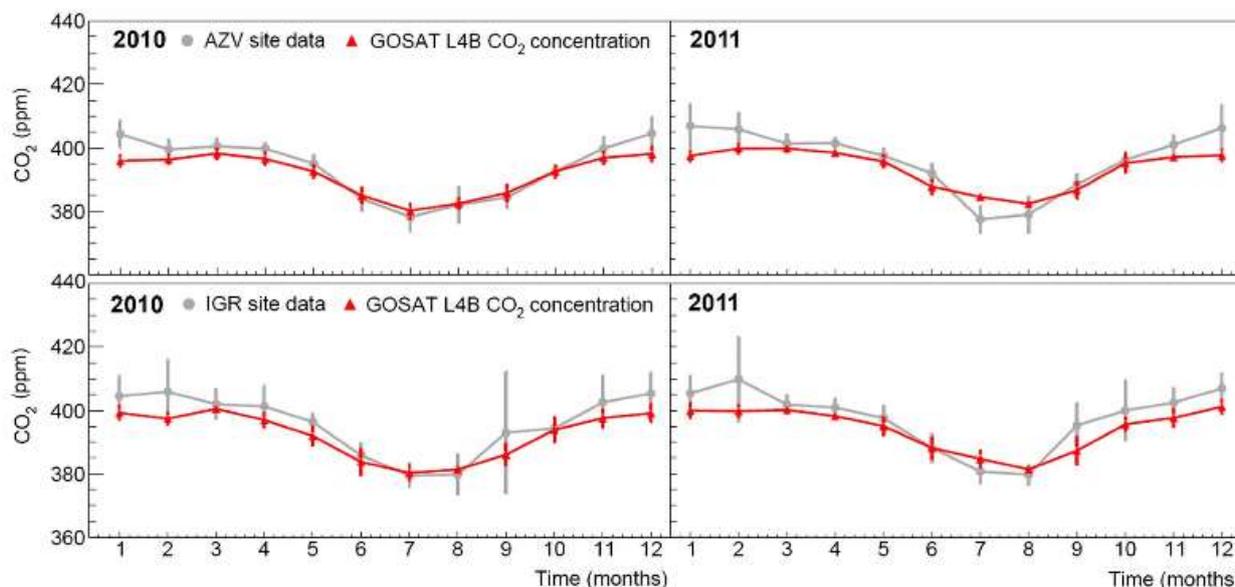


図4. AZV と IGR で 2010 年と 2011 年に観測された CO₂ 濃度の日中値 (13:00-17:00 LST) の月平均値と GOSAT L4B データの時系列¹⁰⁾

なった可能性がある。

(2) JR-STATION で測定された CO₂ と CH₄ の濃度変動

JR-STATION で、2002 年から 2016 年にかけて観測された CO₂ 濃度の 1 時間値を図 5 に示す。また、より広範囲の空間代表性を持った特徴を捉えるために、日中平均値を求めた。計算は 13:00 ~17:00 LST のデータの内、2 つ以上 (BRZ で 6 分毎に流路を切り替えていた期間は 4 つ以上) のデータが得られた日に限定した。更に計算に使用したデータの最大値と最小値の差が 10 ppm 以上あった場合は、局所的な汚染の影響が考えられるため解析には使用しなかった。全てのタワーサイトで CO₂ 濃度に明瞭な季節変動を観測した。夏季の日変動は大きく、濃度が上がる夜間には、冬季の濃度よりも高くなることが観測されている。これは夏季におけるタイガの陸上生態系による呼吸の影響が強く現れることを反映している。

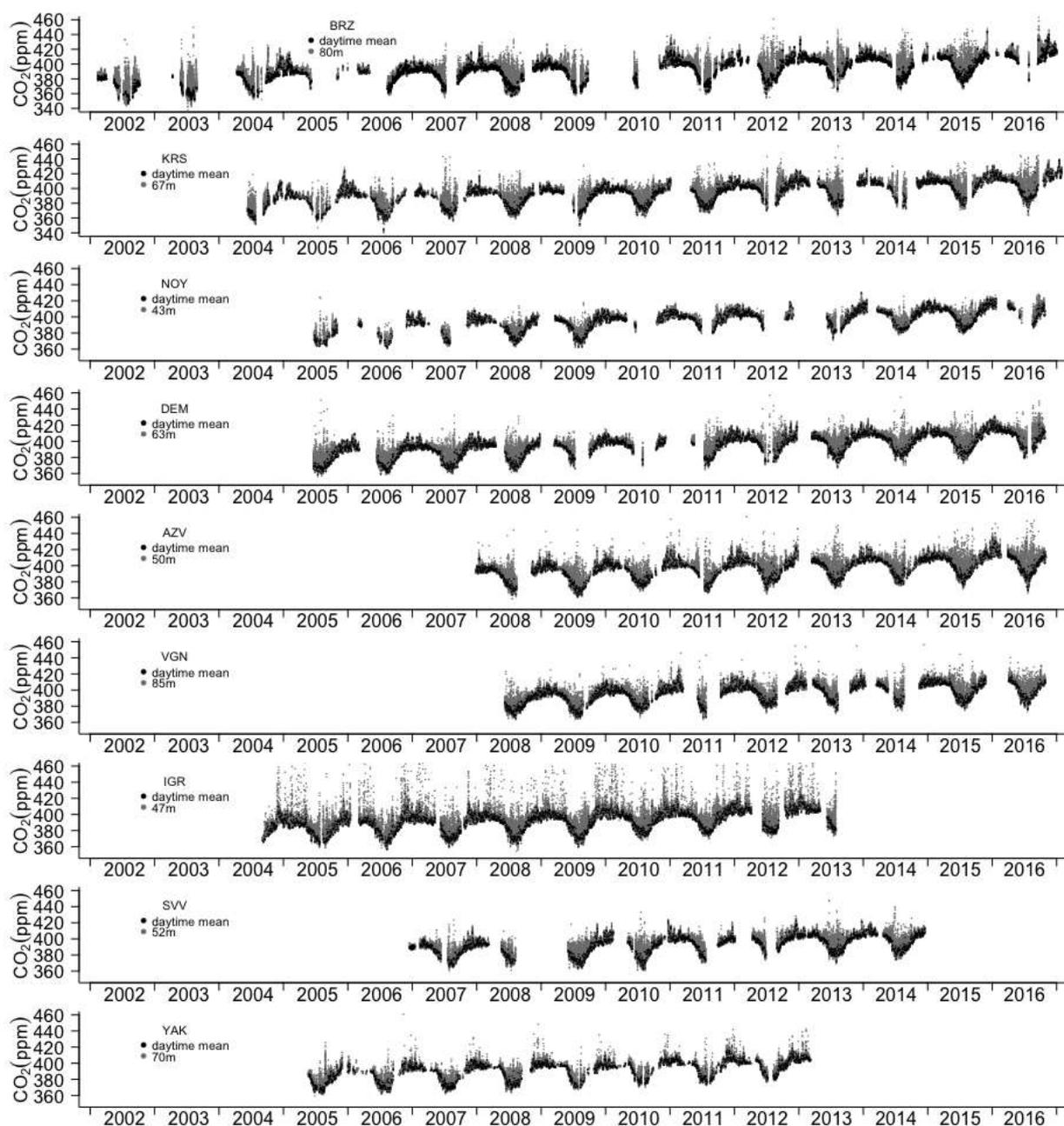


図5. JR-STATIONの高高度インレットで観測されたCO₂濃度 (ppmv) の1時間値 (灰色)。BRZは80 mと40 mのインレットからのデータ。黒丸は日中平均値 (13:00-17:00 LST) を示している。

2004年から2016年にかけて観測されたCH₄濃度の1時間値を図6に示す。CH₄濃度は、大きな濃度変動を示した。特に大陸内部では夜間に大気が成層化しやすく局所的な影響を強く反映するため昼夜での濃度差が大きくなる。ただし、大気がよく混合する日中の平均値でも、沿岸地域におけるバックグラウンドで観測される冬季をピークとする季節変動以外に夏季にも濃度の上昇が見られる。西シベリアにはCH₄の起源となる大湿地帯が存在するためであり、これが西シベリアのタワーサイトのCH₄濃度の特徴の一つである。

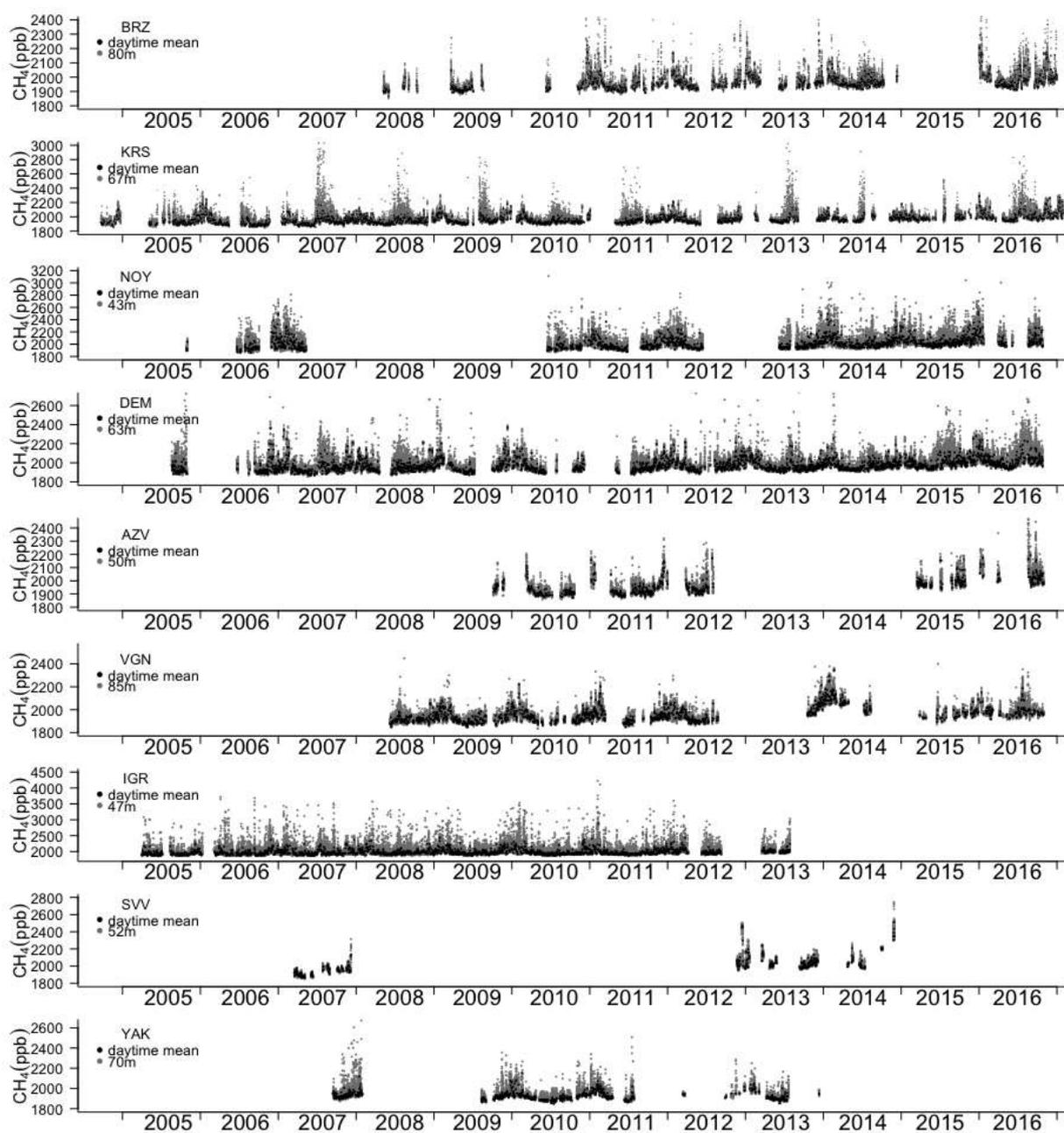


図6. JR-STATIONの高高度インレットで観測された CH_4 濃度 (ppbv) の1時間値 (灰丸)。BRZは80 m と40 m インレットの値を示す。黒丸は日中平均値 (13:00-17:00 LST)。日中平均値は、低高度と高々度インレットの濃度差が50 ppbvより小さく、更にそのデータ数が2つ以上の時のみ計算。

(3) キャビティリングダウン分光分析装置 (CRDS) と現行センサーの比較実験

現行のセンサー (NDIR、 SnO_2 半導体センサー) と CRDS で並列に測定するセッティング (図 7) を、以前 IGR で使用されていた観測システムに施し、濃度既知の 2 種類の乾燥空気 (CPC2400, CPC2401) をセクターユニットのサンプルラインから導入し測定した (表 2)。 CO_2 に関してはどちらの乾燥空気も誤差の範囲で良い一致を示した。また SnO_2 半導体センサーは、CPC2400 に関しては一致しているが、CPC2401 の不一致度 (2.5σ) は 5% 水準では受容不可能である。CPC2401 の

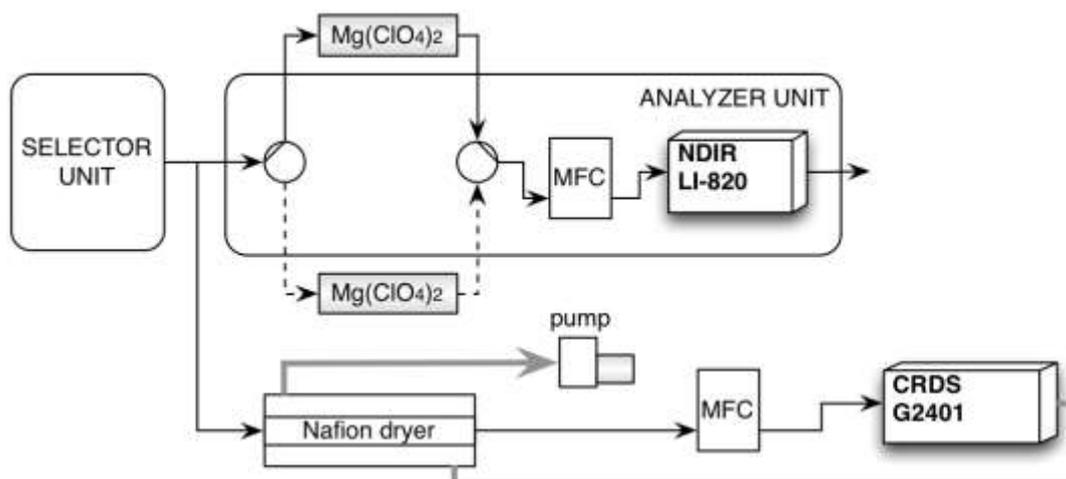


図 7. タワー観測システムへの CRDS 設置の取り付け図。MFC はマスフローコントローラ。

表 2. CRDS と現行のセンサー（NDIR、SnO₂ 半導体センサー）の乾燥空気を用いた比較実験（平均±標準偏差）

ID	CO ₂ (ppm)				CH ₄ (ppb)			
	N	NDIR	CRDS ^{a)}	NDIR-CRDS	N	SnO ₂ sensor	CRDS ^{a)}	SnO ₂ -CRDS
CPC2400	14	392.5±0.1	392.41±0.05	0.1±0.1	14	2271±3	2267.4±0.1	4.0±3.3
CPC2401	11	392.2±0.0	392.39±0.07	0.0±0.1	9	1922±3	1915.6±0.1	6.4±2.6

a) 1 データはサンプルが切り替わる 2 分前から 1 分前までの平均値

CH₄ 濃度は挟まれる標準ガスの CH₄ 濃度（表 3）がどちらも離れているので（100 ppbv 以上）、検量線作成時の測定誤差が大きくなった可能性がある。CH₄ 計は濃度に対する応答が直線ではないため、2 次曲線で検量線を作成しており、これが一つの原因と考えられる。

表 3. 比較実験に使用し、その後 KRS の観測で使用している標準ガス濃度

ID	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)
CPD00031	373.86	1787.58
CPD00032	403.2	2069.16
CPD00033	429.56	2311.04

タワー観測システムは 2 高度の切り替えが 20 分毎に行われるが、CRDS データにはその情報が記録されない。またネットワーク接続のない環境での観測のため、タワー観測システムと CRDS が記録する時刻が徐々にずれる。そこで以下の順序で濃度計算を行う処理スクリプトを作成した。

1. 生データから水補正後（“species” が 3）の濃度データのみを抽出。
2. CH₄ 濃度が 1795 ppbv を切る時間から 70 秒前を最低濃度の標準ガスの導入開始時間として、

それ以降 20 分毎に標準ガス番号を割り振る (std1, std2, std3)。切替え後 180 秒のデータは置換時間としてフラグをつける。

3. 標準ガス後は 20 分毎にバルブ番号 (High, Low, Ref) を繰り返し割り振る。ここでも切替え後 180 秒のデータは置換時間としてフラグをつける。CH₄ 濃度が次に 1795 ppbv を切るまでこれを繰り返す。
4. 標準ガスの割り振りがされたデータのみ抽出し、バルブ切り変わり前 180 秒間の平均を計算。
5. 標準ガスの平均値から検量線を計算し、2 つの標準ガスで挟まれる期間のサンプルデータを NIES スケールに変換。
6. NIES スケールに変換したデータをバルブ切り変わり前 180 秒間の平均を計算 (タワー観測システムとの比較のため)。

(4) 逆計算によるフラックス推定

JR-STATION において観測された濃度値とその他のプラットフォームで観測された値も用いて、全球を幾つかの地域に分けて逆計算によりフラックスを推定した。

① CO₂ のフラックス計算

CO₂ のフラックス計算には逆計算モデルシステムである CarbonTracker¹²⁾ を使用した。先験値として (1) 植生によるフラックスを Carnegie-Ames-Stanford Approach Global Fire Emissions Database (CASA GFED) version 3.1、(2) 海洋フラックスを Jacobson et al. (2007)¹³⁾ による大気海洋間の分圧差、(3) バイオマスバーニングを GFED v3.1、(4) 化石燃料起源フラックスを CDIAC と EDGAR に基づいて分布させたものを使用した。大気観測の値としては以下の 3 種類のデータセットを同化させた ; (1) NOAA ESRL、EC、CSIRO、NCAR、LBNL による地上観測、(2) WDCGG、(3) JR-STATION (図 8)。

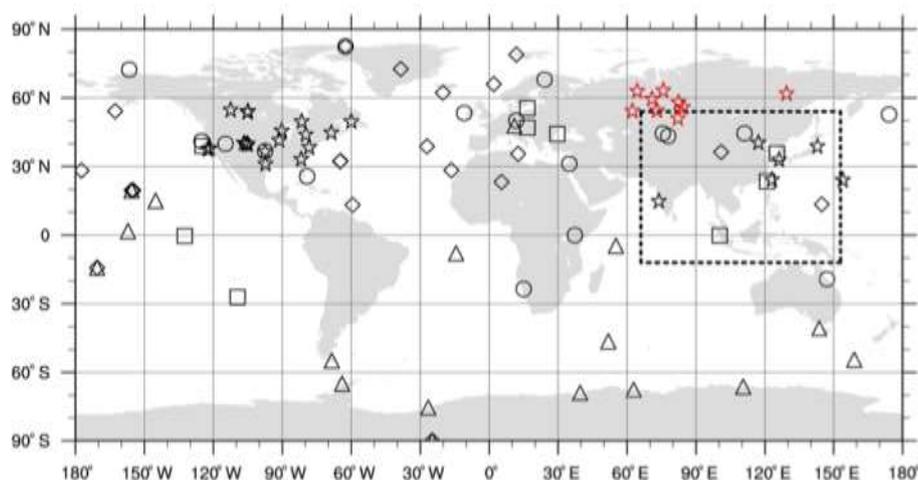


図 8. CO₂ の逆計算に使用した CO₂ 濃度の観測ネットワーク¹⁴⁾。△: 海洋大気境界層、○: 陸域、◇: 海洋と陸域の混合域および山岳域、☆: 連続観測、□: その他。JR-STATION は赤で示す。

本研究では 2 種類のフレームワークで逆計算を行った。一方は JR-STATION のデータのみを使用しない事後推定 (以下 CNTL 推定) で、もう一方は JR-STATION のデータもすべて含んだ事後推定 (以下 JR 推定) である。

CNTL 推定、JR 推定ともに先験値より、 $1.60\text{--}1.61\text{Pg C yr}^{-1}$ 吸収が大きかった (図 9a, c, d; 表 4)。先験値と JR 推定の値はユーラシア亜寒帯域 (Eurasian boreal) で差が大きく、ただしその差異は先験値と CNTL 推定の差異ほどではなかった。CNTL 推定と JR 推定の差異はユーラシア亜寒帯域で大きく (図 9b)、それは JR-STATION が位置する領域である。JR-STATION のデータを逆計算に加えることで、その領域での CO_2 吸収量は減少した。一方で北アメリカ、ヨーロッパ、西部北太平洋、大西洋など他の領域では吸収量が増加した。

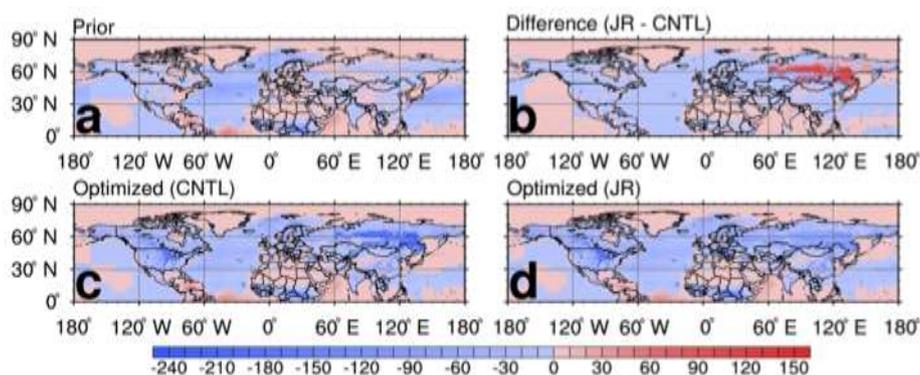


図 9. 2002-2009 年平均の生物圏及び海洋からの CO_2 フラックス ($\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)¹⁴⁾: (a) 先験値 (b) JR 推定と CNTL 推定での差 (c) CNTL 推定によるフラックス (d) JR 推定によるフラックス。青は CO_2 吸収、赤は大気への放出を表す。

両推定での領域ごとのフラックスと不確実性を表 4 に示す。植生 (Global land) と海洋 (Global ocean) を合わせた全球の吸収量は CNTL 推定 ($-5.54 \pm 1.85 \text{Pg C yr}^{-1}$) と JR 推定 ($-5.55 \pm 1.72 \text{Pg C yr}^{-1}$) でほぼ同じ値であるが、CNTL 推定は JR 推定より植生による吸収量が 0.07Pg C yr^{-1} 大きく、海洋による吸収が 0.08Pg C yr^{-1} 小さかった。JR-STATION のデータを加えることで、全球のシンクに大きな差異は見られなかったが、植生と海洋でのフラックス分布に違いの出ることが分かった。また JR-STATION のデータを加えることで陸域におけるフラックスの不確実性が下がった。上述したようにユーラシア亜寒帯域での差異が大きく、CNTL 推定の値 ($-1.17 \text{Pg C yr}^{-1}$) より JR 推定の値 ($-0.77 \text{Pg C yr}^{-1}$) は吸収量が顕著に小さい。観測の空白域であったシベリアを JR-STATION の観測によってコンストレインできた結果であり、不確実性も減少している。

表 4. 2002-2009 年平均の領域ごとの先験値 (A priori)、CNTL 推定、JR 推定の CO_2 フラックスとその 1σ ($\text{Pg C yr}^{-1} \text{ region}^{-1}$)¹⁴⁾

Region	A priori	CNTL	JR
Eurasian boreal	-0.07 ± 1.10	-1.17 ± 0.93	-0.77 ± 0.70
Eurasian temperate	-0.05 ± 0.49	-0.31 ± 0.41	-0.36 ± 0.40
Europe	-0.01 ± 0.76	-0.20 ± 0.67	-0.37 ± 0.64
North American boreal	-0.04 ± 0.61	-0.30 ± 0.38	-0.36 ± 0.38
North American temperate	-0.02 ± 0.66	-0.55 ± 0.41	-0.59 ± 0.41
Northern Hemisphere total	-1.42 ± 1.85	-3.21 ± 1.49	-3.21 ± 1.34
Tropical total	0.06 ± 0.80	0.12 ± 0.74	0.11 ± 0.74
Southern Hemisphere total	-2.57 ± 0.97	-2.46 ± 0.81	-2.45 ± 0.81
Global total	-3.94 ± 2.24	-5.54 ± 1.85	-5.55 ± 1.72
Global land	-1.33 ± 1.90	-3.59 ± 1.57	-3.52 ± 1.43
Global ocean	-2.61 ± 1.19	-1.95 ± 0.97	-2.03 ± 0.96

全球合計のフラックスはCNTL推定とJR推定で似た傾向を示したが、地域ごとに見ると異なる傾向が見える（図10）。先験値と比較すると両推定ともに大きな吸収を示した。予想通りユーラシア亜寒帯域での差異が最も大きく、JR推定ではCNTL推定に比較して弱い吸収を示している。一方で他の地域、特にヨーロッパの2008年、2009年、ではJR推定の方で強い吸収を示した。これは東ヨーロッパでの吸収が大きくなったためである。JR-STATIONは主に西シベリアに位置するので東ヨーロッパのフラックスもコンストレインできることを示している。ユーラシア亜寒帯域における経年的な変化は、CNTL推定では $-0.06 \text{ Pg C yr}^{-2}$ だがJR推定ではわずかに増加傾向だった（ $0.02 \text{ Pg C yr}^{-2}$ ）。これは2005年以降吸収量が弱まっているためである。このように、求められた CO_2 吸収はユーラシア亜寒帯域とヨーロッパでは両推定で逆の傾向を示し、他の地域では似た傾向を示した。

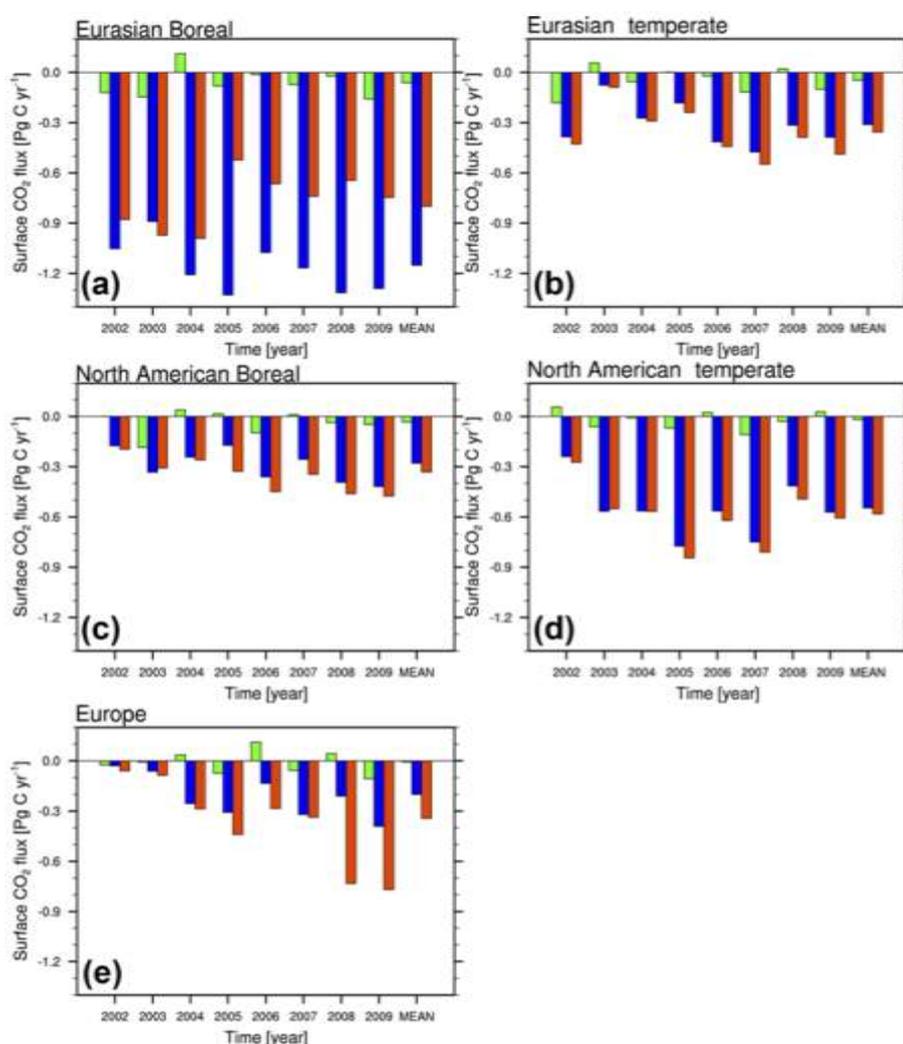


図10. (a)ユーラシア亜寒帯域、(b)ユーラシア温帯域、(c)北アメリカ亜寒帯域、(d)北アメリカ温帯域、(e)ヨーロッパにおける生物圏からの年平均フラックス (Pg C yr^{-1}) の経年変化¹⁴⁾: 先験値 (緑)、CNTL推定 (青)、JR推定 (赤)。2002-2009年間の平均を右 (MEAN) に示す。

2002-2009年平均の生物圏からの月平均フラックスは、両推定で亜寒帯域の夏季に強い吸収を示し、他の季節には先験値より弱い吸収を示した。結果として図11に示されるような、年間平均

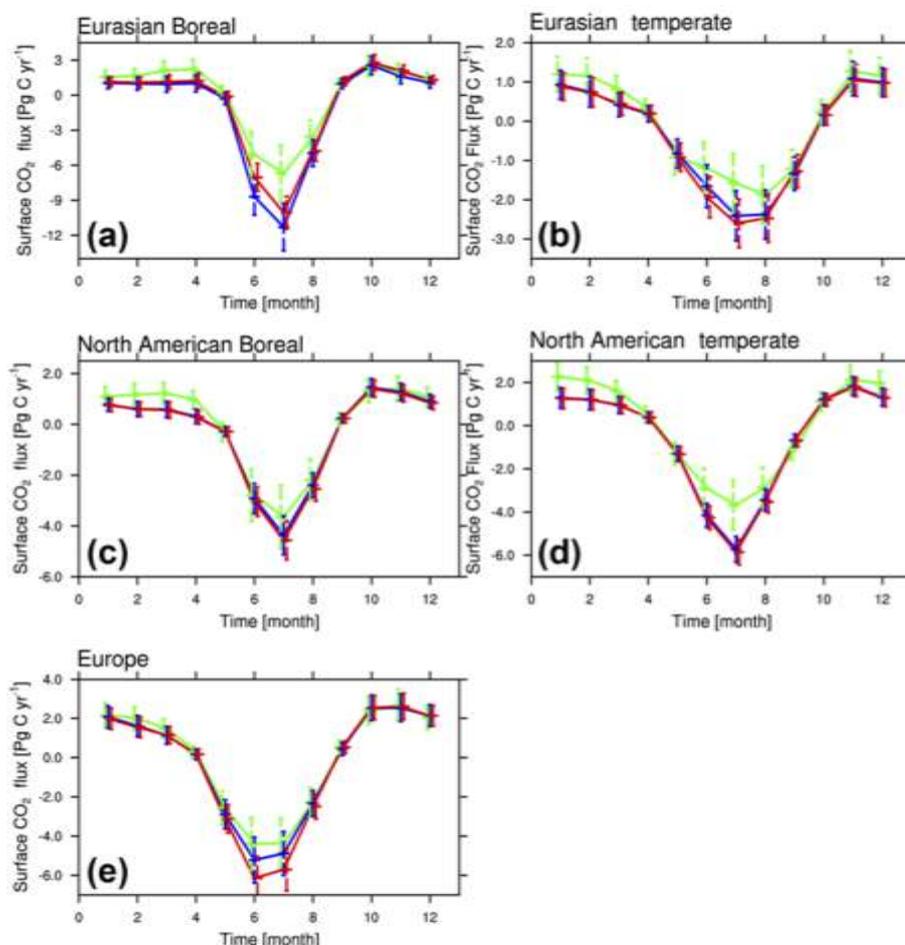


図 11. 各領域における 2002-2009 年平均の生物圏からの月平均フラックスとその不確実性¹⁴⁾; 先験値 (緑)、CNTL 推定 (青)、JR 推定 (赤)

で先験値より強い吸収になった。両推定間での一番大きな差異は、6月と7月に見られる。JR 推定ではユーラシア亜寒帯域における夏の吸収が弱く、他の領域ではやや強い吸収を示す。JR-STATION のデータによって、北半球夏季の植生の活動による CO₂ 吸収の情報が得られることがわかる。

先行研究と JR 推定との比較結果を表 5 に示す。ユーラシア亜寒帯域での本研究の値は、Zhang et al. (2014)¹⁵⁾、Maki et al. (2010)¹⁶⁾、CT2013B (CarbonTracker) の結果より小さいが、Saeki et al. (2013)¹⁷⁾ よりは高く、Dolman et al. (2012)¹⁸⁾ の結果には近かった。Zhang et al. (2014)¹⁵⁾ と CT2013B は本研究と逆計算のフレームワークが近いので、地表による吸収の減少は JR-STATION の観測値を加えたためと考えられる。Saeki et al. (2013)¹⁷⁾ との地表による吸収の差異は逆計算のフレームワークの差異 (先験値、大気輸送モデル、観測データセット、逆計算メソッド) が影響していると考えられる。ただし JR-STATION のデータを加えた両研究は、シベリアにおける CO₂ 吸収の減少や不確実性の点で似たような結果を示している。Dolman et al. (2012)¹⁸⁾ による地表の吸収は 3つのメソッド (インベントリ、渦相関法、逆計算法) の平均で求められシベリア域だけではなくロシアやその周辺域も見積もっているが、JR 推定と近い値を出している。概して JR 推定によるユーラシア亜寒帯域の値は先行研究の値と比較できる範囲内である。

表 5. 本研究 (JR 推定) と先行研究の逆計算による CO₂ フラックス¹⁴⁾

Citation	Area	Estimate surface CO ₂ flux	Period	Remarks
This study	Eurasian boreal	-0.77 ± 0.70	2002–2009	JR experiment
Saeki et al. (2013)	Eurasian boreal	-0.35 ± 0.61	2000–2009	Including biomass burning (0.11 Pg C yr ⁻¹), Using JR-STATION observations
Zhang et al. (2014b)	Eurasian boreal	-1.02 ± 0.91	2006–2010	Using CONTRAIL observations
Maki et al. (2010)	Eurasian boreal	-1.46 ± 0.41	2001–2007	
Dolman et al. (2012)	Russia ^a	-0.613		Average of inventory- based, eddy covariance, and inversion methods
CT2013B ^b	Eurasian boreal	-1.00 ± 3.75	2002–2009	
This study	Europe	-0.38 ± 0.64	2002–2009	JR experiment
		-0.75 ± 0.63	2008–2009	
Reuter et al. (2014)	Europe	-1.02 ± 0.30	2010	Using satellite data
CTE2014 ^c	Europe	-0.07 ± 0.49	2002–2009	
		-0.11 ± 0.38	2008–2009	

^a Including Ukraine, Belarus, and Kazakhstan (total area is $17.1 \times 10^{12} \text{ m}^2$).

^b The results of CT2013B (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/CT2013B/>) were derived from <ftp://afip.cmdl.noaa.gov/products/carbontracker/co2/fluxes/>.

^c The results of CTE2014 (CarbonTracker Europe; Peters et al., 2010) were derived from <ftp://ftp.wur.nl/carbontracker/data/fluxes/>.

ヨーロッパでは、JR 推定による長期間 (2002–2009) の地表の吸収量は CTE2014 より大きくなるが、2008–2009 に限ると、さらに大きく見積もられた。JR 推定による 2008 年と 2009 年の値は $-0.73 \pm 0.41 \text{ PgCyr}^{-1}$ と $-0.76 \pm 0.38 \text{ PgCyr}^{-1}$ だったが、CNTL 推定ではより小さく ($-0.21 \pm 0.49 \text{ PgCyr}^{-1}$ 、 $-0.38 \pm 0.44 \text{ PgCyr}^{-1}$)、CTE2014 に近い値 ($-0.11 \pm 0.38 \text{ PgCyr}^{-1}$) になった。期間は違うが Reuter et al. (2014)¹⁹⁾ による衛星観測の結果によると、ヨーロッパの地表による 2010 年の吸収量は更に大きい値だった。

② CH₄ のフラックス計算

CH₄ のフラックス計算には、逆計算のフレームワーク FLEXINVERT²⁰⁾ を使用した。先験値として (1) 海洋フラックスを Lambert and Schmidt (1993)²¹⁾ による季候値、(2) バイオマスバーニングを GFED v3.1、(3) 人為起源フラックスを EDGARv4.2-FT2010、(4) 野生の反芻動物のフラックスを Houweling et al. (1999)²²⁾ による季候値、(5) シロアリのフラックスを Sanderson et al. (1996)²³⁾ による値を使用した。(6) 湿地のフラックスに関しては 2 種類の地表モデル: LPX-Bern model²⁴⁾ と LPJ-DGVM²⁵⁾ を使用した。以下それぞれを使用した事後推定結果をシナリオ S1、S2 と示す。LPJ-DGVM は乾燥土壌による酸化と水田からのエミッションを計算しないので、S2 では土壌酸化として Ridgwell et al. (1999)²⁶⁾ による季候値を、米生産でのエミッションは EDGARv4.2-FT2010 の値に Matthews et al. (1991)²⁷⁾ のエミッションファクターをかけたものを使用した。先験値の概要を表 6 に示す。大気観測の値は JR-STATION の値と、他の機関によってシベリア、ヨーロッパ、カナダで作られた新しいサイトの値を使用した (図 12、表 7)。観測サイト数の変化の影響を調べる

表 6. 2009 年の起源ごとの先験値 ($Tg\ yr^{-1}$)²⁸⁾。湿地のフラックスに関しては S1 と S2 で別のモデルを使用した。

Source type		Dataset		Globally		> 50° N	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2
Natural	Wetlands	LPX-Bern	LPJ-DGVM	202	175	25	27
	Termites	Sanderson et al. (1996)	Sanderson et al. (1996)	19	19	0	0
	Wild animals	Houweling et al. (1999)	Houweling et al. (1999)	5	5	1.2	1.2
	Ocean	Lambert and Schmidt (1993)	Lambert and Schmidt (1993)	17	17	5.3	5.3
	Soil oxidation	LPX-Bern	Ridgwell et al. (1999)	-49	-38	-6.5	-4.3
	Biomass burning	GFED3.1	GFED3.1	13	13	1.2	1.2
Anthropogenic	Fuel and industry	EDGARv4.2-FT2010	EDGARv4.2-FT2010	150	150	25	25
	Enteric ferment	EDGAR v4.2-FT2010	EDGAR v4.2-FT2010	101	101	6.5	6.5
	Waste	EDGAR v4.2-FT2010	EDGAR v4.2-FT2010	61	61	7.0	7.0
	Rice cultivation	LPX-Bern	EDGAR v4.2-FT2010	36	38	0.04	0.02
Total				556	541	65	69

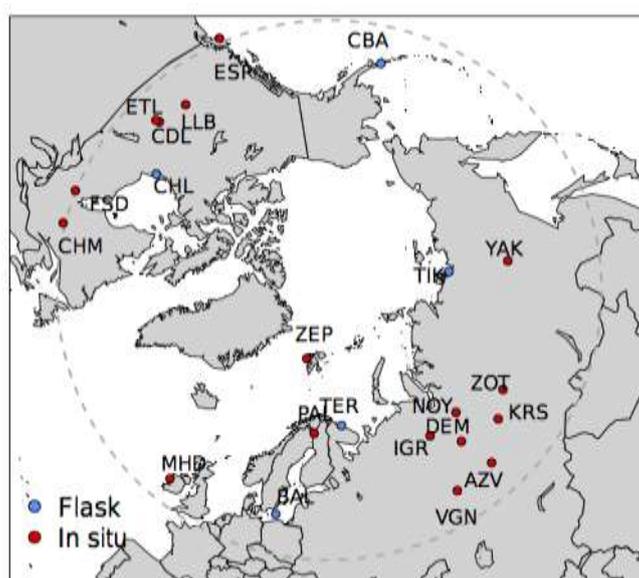


図 12. CH_4 の逆計算に使用した観測サイト²⁸⁾。灰色のダッシュ線は 50°N の逆計算ドメインの南境界。

ため、S1 と同じ先験値を用い、大気観測の値が準連続的に存在するサイト (ZEP, TER, PAL, IGR, DEM, KRS, CBA, LLB, ETL, MHD, FSD, ESP) のみを使用した結果をシナリオ S3 として示す。

表 7. CH₄の逆計算に使用した観測サイトの情報²⁸⁾

Station	ID	Network	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Time period
Zeppelin ^c	ZEP	NILU	78.9° N	11.9° E	479	2004–2013
Tiksi	TIK	NOAA	71.6° N	128.9° E	43	2011–2013
Teriberka ^c	TER	MGO	69.2° N	35.1° E	40	2004–2013
Pallas ^c	PAL	FMI	68.0° N	24.1° E	565	2004–2013
Noyabrsk	NOY	JRS	63.4° N	75.8° E	143	2005–2013
Igrim ^c	IGR	JRS	63.2° N	64.4° E	72	2005–2013
Yakutsk	YAK	JRS	62.1° N	129.4° E	287	2007–2013
ZOTTO	ZOT	MPI	60.8° N	89.4° E	125	2009–2013
Demyanskoe ^c	DEM	JRS	59.8° N	70.9° E	138	2005–2013
Churchill	CHL	EC	58.8° N	94.1° W	35	2007–2013
Karasevoe ^c	KRS	JRS	58.3° N	82.4° E	117	2004–2013
Baltic Sea	BAL	NOAA	55.5° N	16.7° E	28	2004–2011
Cold Bay ^c	CBA	NOAA	55.2° N	162.7° W	25	2004–2013
Lac La Biche ^c	LLB	EC	55.0° N	112.5° W	546	2004–2013 ^a
Azovo	AZV	JRS	54.7° N	73.0° E	150	2009–2013
Vaganovo	VGN	JRS	54.5° N	62.3° E	285	2008–2013
East Trout Lake ^c	ETL	EC	54.4° N	105.0° W	492	2005–2013
Candle Lake	CDL	EC	53.9° N	104.7° W	489	2004–2007
Mace Head ^c	MHD	AGAGE	53.3° N	9.9° W	25	2004–2013
Fraserdale ^c	FSD	EC	49.9° N	81.6° W	210	2004–2013
Chibougamau	CHM	EC	49.7° N	74.3° W	393	2007–2010
Estevan Point ^c	ESP	EC	49.4° N	126.6° W	39	2004–2013 ^b

^a Flask samples from NOAA 2004–2007 and continuous thereafter. ^b Flask samples 2004–2009 and continuous thereafter.

^c Sites used in scenario S3.

モデルの代表性に関する不確実性として、逆計算ドメイン内での輸送とバックグラウンドの混合比に関わる輸送の不確実性を考慮した。これには2種類の再解析データ (ECMWF EIとNCEP FNL) を使用した結果の差異を指標とした。具体的には、2009年の2種類の再解析データの気象データによってフォワード計算を行い、各月各サイトでの日中平均値 (12:00–16:00) を求めた。このプロキシでは輸送による真の不確実性の最低値を考慮することになるが、この時空間分布の程度の指標にはなる。ドメイン内での輸送の不確実性は2–65 ppbvでバックグラウンドの混合比の不確実性は2–22 ppbvであった。この不確実性は、低いPBLを表現する難しさから予期されるように内陸部のサイトで冬季に高かった。輸送の不確実性に加えて、観測値から日中平均を求める際に起きる時間代表性の不確実性を見積もりを考慮した。この不確実性は単純に日中の観測値の標準偏差から見積もった。不確実性の合計は観測の不確実性 (5 ppbv) とモデルに関わる3種類の不確実性の平方和の平方根から求めた。

2009年の年間平均事後推定フラックスと先験値との差異を図13に示す (他の年も類似した分布であった)。全てのシナリオで、西シベリア湿地帯、ヨーロッパ、カナダ西部、ハドソン湾低地帯の近傍で大きなフラックスが現れている。加えて、特に東部ヨーロッパとロシアで多くのホットスポットが見られ、これはEDGARで表される人為起源放出であり逆計算でほとんど変化しない。全てのシナリオで、逆計算で変化する領域も似通っている。これは同じ先験値を使用しているS1とS3間では想定内であるが、S2でも西シベリア湿地帯とカナダ西部では増加、ヨーロッパとロシア西部では減少、という同じ傾向を示すことは注目すべき点である。ただしS2のみに見られる特徴は、ハドソン湾低地帯における減少傾向であり、これはS2に使用した湿地モデル (LPJ-DGVM) によるこの地域の先験値が、高く見積もられている結果と考えられる。

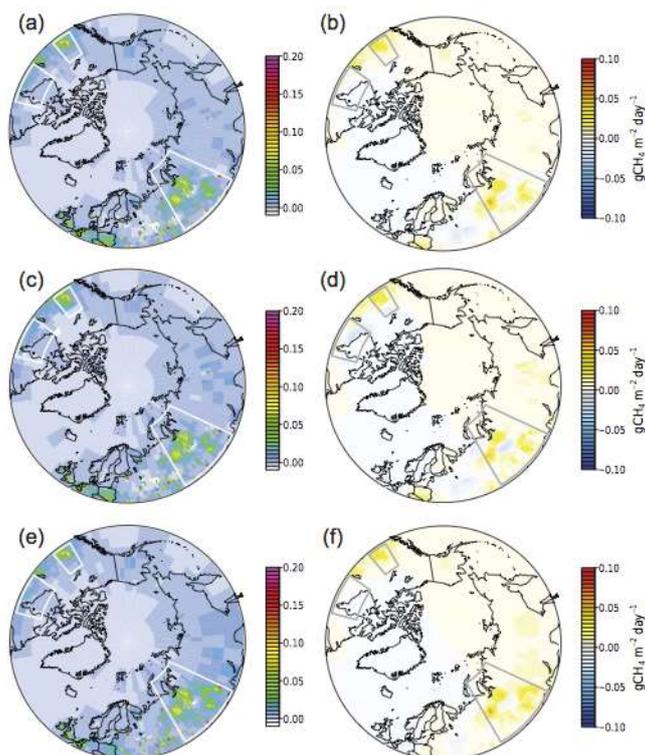


図13. 2009年の年間平均事後推定フラックスと先験値との差異 ($\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)²⁸⁾ ; (a)-(b):S1の結果、(c)-(d):S2の結果、(e)-(f):S3の結果。区切られた領域はカナダ西部のAlberta、カナダ東部のハドソン湾低地帯、西シベリア湿地帯を示している。

図14にS1とS3における、不確実性の減少分布を示す。S2はS1と同じ観測値を用い、先験値の不確実性も同じなので、S1と同じ結果である。S1とS2は2009年に19のサイトで全3291の観測を使用し、S3では12のサイトで全2499の観測を使用している。シベリアにおいてはYAK、VGN、AZV、ZOTを加えること、カナダにおいてはCHLを加えることが、不確実性を大きく減少させることがわかる。しかし、すべてのシナリオでヨーロッパ、西シベリア、カナダでの不確実性の減少が大きく、東シベリア、グリーンランド、アラスカでは小さかった。

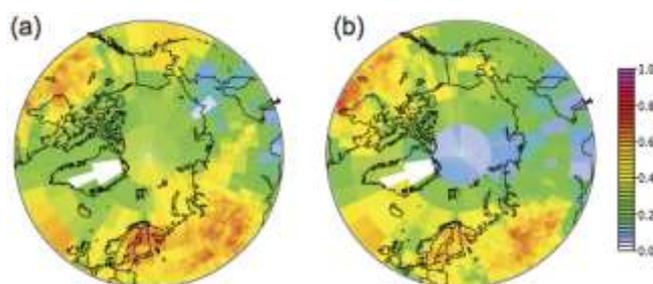


図14. 2009年の不確実性の減少分布 ($1 - \sigma_{\text{post}} / \sigma_{\text{prior}}$) σ は各グリッドでの不確実性²⁸⁾ : (a)S1とS2の結果、(b)S3の結果。

図15に北部北アメリカ（カナダとアラスカ）と北部ユーラシア（ヨーロッパとロシア）における領域積算CH₄フラックスの時系列を示す。北アメリカでは、湿地に使用したモデルの差異を反映

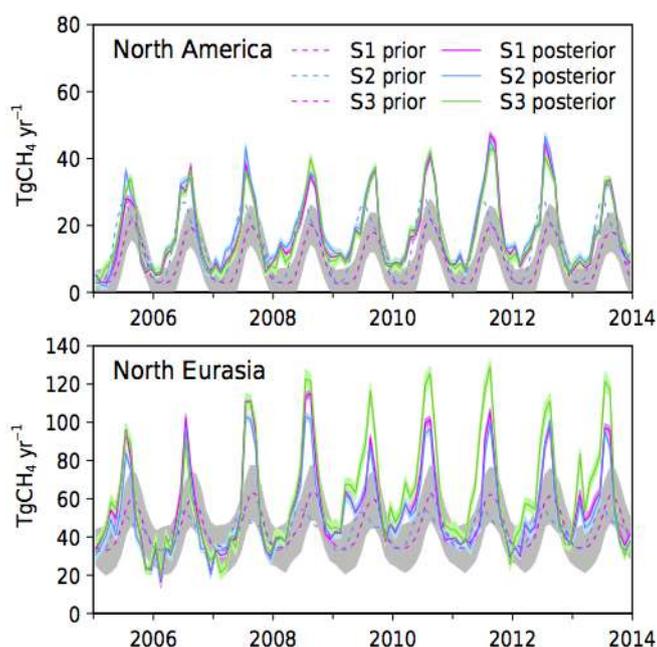


図15. 北部北アメリカと北部ユーラシアにおける領域積算事後推定CH₄フラックス (TgCH₄ yr⁻¹)²⁸⁾。先験値はダッシュ線で示されている。S1とS3の先験値は同じ。灰色のシェードはS1の先験値の不確実性、色つきのシェードは事後推定フラックスの不確実性を表す。

した季節振動のフェーズと夏の極大に先験値間で明瞭な差異が見られる。対して事後推定フラックス間では顕著な差異が見られず、これは逆計算で季節振動をよくコンストレインしていることと、CHLとCHMで観測が断続的であることは北部北アメリカの積算フラックスには大きな影響を及ぼさないことを示している。北部ユーラシアでも、地表モデルの選択により先験値に差異が見られるが、事後推定フラックスではその差は見られなくなっている。S1とS2の結果は非常に似通っているが、S3では2008年以降夏の極大が大きくなっている。これはS3では4つのサイト (YAK, VGN, AZV, ZOT) を使用していないためであり、シベリアのフラックスをコンストレインすることに残りのIGR, DEM, KRSの観測に、より依存したことを意味している。この結果から、これらのサイトのデータが2007年以降のみ利用できるため、S1とS2でも2005-2007のフラックスは過剰に見積もっていることが推察できる。

各領域の事後推定CH₄エミッションを、S3よりもよくコンストレインするS1とS2のレンジをつけて表す。そのレンジはおおよそ各シナリオの不確実性に近かった。S3は逆解析の期間をほぼ通して得られるサイトのデータのみ使用しているため、そこで見られる年々の差異は観測数の差異とは関係ないため、年々変動とトレンドの解析には使用する。

北部北アメリカ (> 50°N) では2005-2010平均で16.6-17.9 Tg yr⁻¹と見積もられ、これはS1の先験値より7.1 Tg yr⁻¹、S2の先験値より3.7 Tg yr⁻¹高い (表8)。またこの見積りはCarbon-Tracker CH₄²⁹⁾の8.1 Tg yr⁻¹、TM5³⁰⁾の14.0 Tg yr⁻¹よりもかなり高い。しかしMiller et al. (2014)³¹⁾による2007-2008のカナダの見積もり21.3±1.6 Tg yr⁻¹よりは低かった。北部北アメリカのCH₄フラックスの卓越した地域内で、更に先験値との差異が見えるのはHBLと西カナダである。

表8. 2005-2010の先験値と事後推定フラックスの平均値 (units Tg yr⁻¹) と先行研究との比較²⁸⁾

Inversion	No. in situ + (flask) sites	North America		Northern Eurasia	
		Prior	Posterior	Prior	Posterior
S1	17 + (5)	9.5 ± 5.1	16.6 ± 1.1	44.4 ± 12.5	55.2 ± 2.5
S2	17 + (5)	14.2 ± 5.1	17.9 ± 1.1	43.3 ± 12.5	52.2 ± 2.5
S3	10 + (2)	9.5 ± 5.1	17.1 ± 1.3	44.4 ± 12.5	59.5 ± 3.2
MACC NOAA ^a	(7)	-	14.0	-	34.0
CT-CH ₄ ^b	6 + (10)	7.5	8.1	60.3	49.7

^a Bergamaschi et al. (2013); ^b Bruhwiler et al. (2014).

西シベリア低地帯 (WSL)、ヨーロッパ、西カナダ、ハドソン湾低地帯 (HBL) に大きなフラックスが見られる (図 16)。北半球高緯度域からの CH₄ 起源を 82.0-83.6 Tg yr⁻¹ と推定した (S1 と S2 のレンジ)。これは全球の~15%と推定され、先験値より大きかった。ユーラシア亜寒帯域では年間平均で 52.2-55.5 Tg yr⁻¹ と推定した。これは先験値より大きい、主に WSL での増加が原因であった。WSL ではフラックスの季節変動が捉えられ、これは主に湿地によるもので先験値より 7.1 Tg yr⁻¹ (S1)、8.9 Tg yr⁻¹ (S2) 高く、19.3-19.9 Tg yr⁻¹ と見積もられている。カナダの Alberta では年間通して大きなフラックス (S1 シナリオでは 5.0 Tg yr⁻¹) があり、この地域ではカナダの天然ガスの 72%が生産されているので、これは人為起源 CH₄ と考えられる。

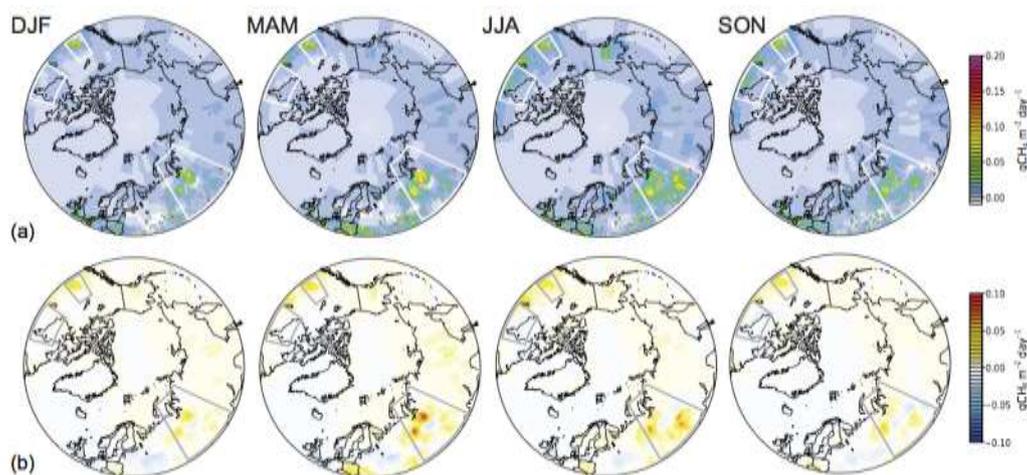


図 16. (a) 季節ごとの S1 シナリオによるフラックス分布と (b) 先験値との差の分布 (g CH₄ m⁻² day⁻¹)²⁸⁾。2009 年の値を使用。DJF は 2008-2009。枠線は本研究で定義した WSL、HBL、Alberta を表す。

北部ユーラシアでの年々変動は大きい(図 17)。それは WSL の経年変動と類似していて (R=0.53)、特に 2007 年のアノマリーはほぼ WSL に起因する。WSL では 2007 年気温が異常に高かったため湿地からの放出が活発になったことが考えられる。北アメリカでも年々変動は大きく、HBL の値と強い相関を示した (R=0.80)。一方で Alberta の値とも緩やかな相関を示した (R=0.59)。2011 年に強い正のアノマリーが見られるが、北アメリカ亜寒帯では 2011 年に気温が異常に高く、HBL における湿地からの放出量が増加したことが一因である。

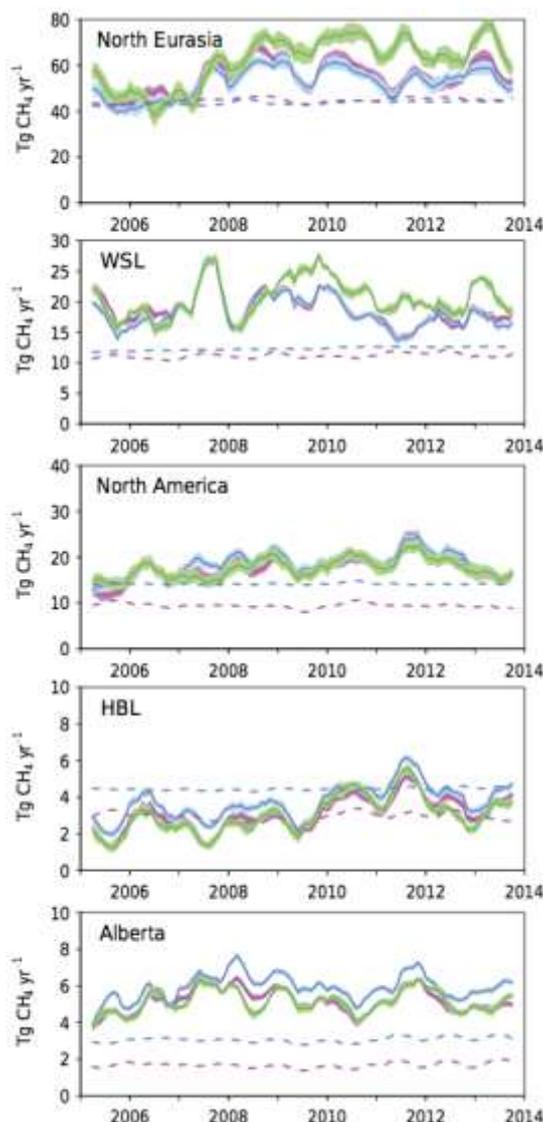


図17. 各領域における事後推定CH₄フラックスの年々変動 (Tg yr⁻¹)²⁸⁾。各領域の時系列データから平均的な季節変動成分を差し引き、6ヶ月のタイムウィンドウで移動平均して求めた。曲線はシナリオごとの値でシェードは不確実性を示す (S1:マゼンタ、S2:青、S3:緑)。ダッシュ線はS1とS2の先験値。

5. 本研究により得られた成果

- ・タワー観測ネットワーク (JR-STATION) により、観測の空白域であったシベリア域のCO₂濃度とCH₄濃度について先行研究と合わせた10年規模のデータが蓄積できた。
- ・GOSATのL4B全球CO₂濃度と比較を行い、夏期はこれまで報告されているバイアスの範囲内で一致することが確認された。ただし冬期のデータに関してL4BデータはJR-STATIONデータより低く、内陸のシベリア域で冬期に観測される高濃度CO₂を再現していない。
- ・JR-STATIONで観測されたCO₂濃度は沿岸域のCO₂濃度より大きな季節振幅を示し、CH₄濃度は高濃

度レベルで大きな変動を示した。

- ・ 現行のセンサーとCRDSで、乾燥空気を並列に測定し、CO₂に関しては良い一致が見られた。CH₄に関しては、従来の半導体センサーの直線性の問題で、標準ガス濃度から離れた濃度では誤差が大きくなることがわかった。

- ・ CRDSの生データから、二高度のデータに分割し、NIESスケールに変換するまでのデータ処理スクリプトを作成した。

- ・ 他の観測のデータにJR-STATIONのCO₂濃度も加えた逆計算解析により、全球の事後推定CO₂フラックスを求めた結果、ソース・シンクのバランスは全球で変わらないが、その分布に大きな変化があった。CO₂吸収と不確実性はユーラシア亜寒帯域で小さくなり、他の北半球域（ユーラシア温帯域、ヨーロッパ、北アメリカ亜寒帯域、北アメリカ温帯域）では大きくなることがわかった。

- ・ JR-STATIONも含む、近年高緯度域で開始された観測を合わせて、CH₄フラックスの逆計算解析を行った。北半球の50°N以北からの事後推定CH₄フラックスは、全球の約15%を占めることがわかった。ユーラシア北部では先験値より高い値が見積もられ、これはWSLでの増加が主な原因であることを明らかにした。

- ・ 事後推定CH₄フラックスは、WSLにおいては2007年、HBLにおいては2011年に正のアノマリーが見られ、これらの地域での異常な高温が原因と考えられる。

6. 引用文献

- 1) Sasakawa, M., K. Shimoyama, T. Machida, N. Tsuda, H. Suto, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, O. Krasnov, T. Saeki, Y. Koyama, and S. Maksyutov (2010), Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia, *Tellus B*, 62, doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00494.x.
- 2) Guerlet, S., S. Basu, A. Butz, M. Krol, P. Hahne, S. Houweling, . P. Hasekamp, and I. Aben (2013), Reduced carbon uptake during the 2010 Northern Hemisphere summer from GOSAT, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50402.
- 3) Rigby, M., R. G. Prinn, P. J. Fraser, P. G. Simmonds, R. L. Langenfelds, J. Huang, D. M. Cunnold, L. P. Steele, P. B. Krummel, R. F. Weiss, S. O'Doherty, P. K. Salameh, H. J. Wang, C. M. Harth, J. Muehle, and L. W. Porter (2008), Renewed growth of atmospheric methane, *Geophys. Res. Lett.*, 35, doi:ARTN L22805.
- 4) Dlugokencky, E. J., L. Bruhwiler, J. W. C. White, L. K. Emmons, P. C. Novelli, S. A. Montzka, K. A. Masarie, P. M. Lang, A. M. Crowell, J. B. Miller, and L. V. Gatti (2009), Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden, *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi:10.1029/2009GL039780.
- 5) www.rusnature.info

- 6) Watai, T., T. Machida, K. Shimoyama, O. Krasnov, M. Yamamoto, and G. Inoue (2010), Development of an atmospheric carbon dioxide standard gas saving system and its application to a measurement at a site in the West Siberian forest, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, doi:10.1175/2009JTECHA1265.1.
- 7) Suto, H., and G. Inoue (2010), A new portable instrument for in situ measurement of atmospheric methane mole fraction by applying an improved tin dioxide-based gas sensor, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, doi:10.1175/2010JTECHA1400.1.
- 8) Machida T., Y. Tohjima, K. Katsumata, H. Mukai (2011) A New CO₂ Calibration Scale Based on Gravimetric One-step Dilution Cylinders in National Institute for Environmental Studies - NIES 09 CO₂ Scale, GAW Report No. 194, 114-119.
- 9) Zhou, L.X., Kitziis, 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, 40- 43.
- 10) Kondo, M., K. Ichii, H. Takagi, and M. Sasakawa (2015), Comparison of the data-driven top-down and bottom-up global terrestrial CO₂ exchanges: GOSAT CO₂ inversion and empirical eddy flux upscaling, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JG002866.
- 11) Sasakawa, M., T. Machida, N. Tsuda, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, and O. Krasnov (2013), Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/jgrd.50755.
- 12) Peters, W., A. R. Jacobson, C. Sweeney, A. E. Andrews, T. J. Conway, K. Masarie, J. B. Miller, L. M. P. Bruhwiler, G. Petron, A. I. Hirsch, D. E. J. Worthy, G. R. van der Werf, J. T. Randerson, P. O. Wennberg, M. C. Krol, and P. P. Tans (2007), An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 104, doi:10.1073/pnas.0708986104.
- 13) Jacobson, A. R., S. E. M. Fletcher, N. Gruber, J. L. Sarmiento, and M. Gloor (2007), A joint atmosphere-ocean inversion for surface fluxes of carbon dioxide: 1. Methods and global-scale fluxes, *Global Biogeochem. Cycles*, 21, doi:10.1029/2005GB002556.
- 14) Kim, J., H. M. Kim, C. -H. Cho, K. -O. Boo, A. R. Jacobson, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, and N. Fedoseev (2017), Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, doi:10.5194/acp-17-2881-2017.
- 15) Zhang, H. F., B. Z. Chen, I. T. van der Laan-Luijkx, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Fukuyama, R. Langenfelds, M. van der Schoot, G. Xu, J. W. Yan, M. L. Cheng, L. X. Zhou, P. P. Tans, and W. Peters (2014), Estimating Asian terrestrial carbon fluxes from CONTRAIL aircraft and surface CO₂ observations for the period 2006-2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, doi:10.5194/acp-14-5807-2014.

- 16) Maki, T., M. Ikegami, T. Fujita, T. Hirahara, K. Yamada, K. Mori, A. Takeuchi, Y. Tsutsumi, K. Suda, and T. J. Conway (2010), New technique to analyse global distributions of CO₂ concentrations and fluxes from non-processed observational data, *Tellus B*, 62, doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00488.x.
- 17) Saeki, T., S. Maksyutov, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, P. Tans, T. J. Conway, M. Saito, V. Valsala, T. Oda, R. J. Andres, and D. Belikov (2013), Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements, *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/jgrd.50127.
- 18) Dolman, A. J., A. Shvidenko, D. Schepaschenko, P. Ciais, N. Tchepakova, T. Chen, M. K. van der Molen, L. B. Marchesini, T. C. Maximov, S. Maksyutov, and E. - Schulze (2012), An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods, *Biogeosciences*, 9, doi:10.5194/bg-9-5323-2012.
- 19) Reuter, M., M. Buchwitz, M. Hilker, J. Heymann, O. Schneising, D. Pillai, H. Bovensmann, J. P. Burrows, H. Boesch, R. Parker, A. Butz, O. Hasekamp, C. W. O'Dell, Y. Yoshida, C. Gerbig, T. Nehrkorn, N. M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, F. Hase, R. Kivi, R. Sussmann, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa (2014), Satellite-inferred European carbon sink larger than expected, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, doi:10.5194/acp-14-13739-2014.
- 20) Thompson, R. L., and A. Stohl (2014), FLEXINVERT: an atmospheric Bayesian inversion framework for determining surface fluxes of trace species using an optimized grid, *Geosci. Model Dev.*, 7, doi:10.5194/gmd-7-2223-2014.
- 21) Lambert, G., and S. Schmidt (1993), Reevaluation of the oceanic flux of methane - Uncertainties and long-term variations, *Chemosphere*, 26, 579-589.
- 22) Houweling, S., T. Kaminski, F. Dentener, J. Lelieveld, and M. Heimann (1999), Inverse modeling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model, *J. Geophys. Res.*, 104, 26137-26160.
- 23) Sanderson, M. G. (1996), Biomass of termites and their emissions of methane and carbon dioxide: A global database, *Global Biogeochem. Cycles*, 10, doi:10.1029/96GB01893.
- 24) Spahni, R., F. Joos, B. D. Stocker, M. Steinacher, and Z. C. Yu (2013), Transient simulations of the carbon and nitrogen dynamics in northern peatlands: from the Last Glacial Maximum to the 21st century, *Clim. Past*, 9, doi:10.5194/cp-9-1287-2013.
- 25) Bergamaschi, P., C. Frankenberg, J. F. Meirink, M. Krol, F. Dentener, T. Wagner, U. Platt, J. O. Kaplan, S. Koerner, M. Heimann, E. J. Dlugokencky, and A. Goede (2007), Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JD007268.
- 26) Ridgwell, A. J., S. J. Marshall, and K. Gregson (1999), Consumption of atmospheric methane by soils: A process-based model, *Global Biogeochem. Cycles*, 13, 59-70.

- 27) Matthews, E., I. Fung, and J. Lerner (1991), Methane emission from rice cultivation: Geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions, *Global Biogeochem. Cycles*, 5, doi:10.1029/90GB02311.
- 28) Thompson, R. L., M. Sasakawa, T. Machida, T. Aalto, D. Worthy, J. V. Lavric, C. L. Myhre, and A. Stohl (2017), Methane fluxes in the high northern latitudes for 2005–2013 estimated using a Bayesian atmospheric inversion, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, doi:10.5194/acp-17-3553-2017.
- 29) Bruhwiler, L., E. Dlugokencky, K. Masarie, M. Ishizawa, A. Andrews, J. Miller, C. Sweeney, P. Tans, and D. Worthy (2014), CarbonTracker-CH₄: an assimilation system for estimating emissions of atmospheric methane, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, doi:10.5194/acp-14-8269-2014.
- 30) Bergamaschi, P., S. Houweling, A. Segers, M. Krol, C. Frankenberg, . A. Scheepmaker, E. Dlugokencky, . C. Wofsy, . A. Kort, C. Sweeney, T. Schuck, C. Brenninkmeijer, H. Chen, V. Beck, and C. Gerbig (2013), Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: Inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements, *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/jgrd.50480.
- 31) Miller, S. M., D. E. J. Worthy, A. M. Michalak, S. C. Wofsy, E. A. Kort, T. C. Havice, A. E. Andrews, E. J. Dlugokencky, J. O. Kaplan, P. J. Levi, H. Tian, and B. Zhang (2014), Observational constraints on the distribution, seasonality, and environmental predictors of North American boreal methane emissions, *Global Biogeochem. Cycles*, 28, doi:10.1002/2013GB004580.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O. (2013) Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 1–10.
- ② Saeki T., Maksyutov S., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Tans P., Conway T. J., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R. J., Belikov D. (2013) Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118 (2), 1100–1122
- ③ Bohn T. J., Melton J. R., Ito A., Kleinen T., Spahni R. (2015) WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia. *Biogeosciences*, 12 (11), 3321–3349.
- ④ Kondo M., Ichii K., Takagi H., Sasakawa M. (2015) Comparison of the data-driven top-down and bottom-up global terrestrial CO₂ exchanges: GOSAT CO₂ inversion and empirical eddy flux upscaling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120, 1226–1245.

- ⑤ Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Y., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavric J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J. (2015) Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a mesoscale quantification by generalized atmospheric inversion. *Biogeosciences*, 12, 5393-5414
- ⑥ Belikov D.A., Maksyutov S., Yaremchuk A., Ganshin A., Kaminski T., Blessing S., Sasakawa M., Gomez-Pelaez A.J., Starchenko A. (2016) Adjoint of the global Eulerian-Lagrangian coupled atmospheric transport model (A-GELCA v1.0): development and validation. *Geoscientific Model Development*, 9 (2), 749-764.
- ⑦ Kim J., Kim H.M., Cho C.H., Boo K.O., Jacobson A.R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Fedoseev N. (2017) Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (4), 2881-2899.
- ⑧ Niwa Y., Tomita H., Satoh M., Imasu R., Sawa Y., Tsuboi K., Matsueda H., Machida T., Sasakawa M., Belan B., Saigusa N. (2017) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0)-Part 1: Offline forward and adjoint transport models. *Geoscientific Model Development*, 10 (3), 1157-1174.
- ⑨ Thompson R.L., Sasakawa M., Machida T., Aalto T., Worthy D., Lavric J.V., Myhre C.L., Stohl A. (2017) Methane fluxes in the high northern latitudes for 2005-2013 estimated using a Bayesian atmospheric inversion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (5), 3553-3572.

(2) 口頭発表

- ① 林田佐智子, 齋藤尚子, 犬伏和之, 寺尾有希夫, Shamil Maksyutov, 町田敏暢, 笹川基樹, 杉田考史, 横田達也, 向井人史 (2012) GOSAT データなどを用いた全球メタン発生領域の特性抽出と定量化 ~環境省推進費プロジェクトの紹介と進捗状況報告(第一報)~. 日本気象学会 2012 年度秋季大会, 同講演予稿集, 526-526.
- ② Saeki T., Maksyutov S., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Tans P.P., Conway T.J., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R.J. (2012) Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. AGU Fall Meeting 2012, Abstracts.
- ③ 林田佐智子, 齋藤尚子, 犬伏和之, 寺尾有希夫, Shamil Maksyutov, 町田敏暢, 笹川基樹, 杉田考史, 横田達也, 向井人史, 野原精一 (2012) 全球メタン発生領域の特性抽出と定量化へのアプローチ ~環境省環境研究総合推進費プロジェクトの紹介~. 第 18 回大気化学討論会, 講演要旨集, 97.
- ④ Sasakawa M., Machida T., Tsuda T., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N. (2012) Continuous measurements of CO₂ concentration from a tower network (JR-STATION) over Siberia. 第 18 回大気化学討論会, 第 18 回大気化学討論会 講演要旨集, 86-86.

- ⑤ Machida, T., T. Saeki, M. Arshinov, B. Belan, N. Fedoseev, S. Mitin, M. Sasakawa and S. Maksyutov (2012) Temporal and spatial variations of atmospheric carbon dioxide and methane over Siberia, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 同予稿集.
- ⑥ Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N. (2013) Continuous measurements of CO₂ concentration from a tower network (JR-STATION) over Siberia. 9th International Carbon Dioxide Conference, Abstracts.
- ⑦ 笹川基樹, 町田敏暢, 津田憲次, Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Fedoseev N., Galanin A. (2013) Interannual variations in CO₂ summer uptake between 2009 and 2010 over Siberia: Reduced carbon uptake during the 2010 summer?. 大気化学討論会第 19 回, 講演要旨集, 60.
- ⑧ 町田敏暢, 笹川基樹, Arshinov M., Belan B., Mitin S., Maksyutov S., 松枝秀和, 澤庸介, 佐伯田鶴 (2013) 航空機を利用したシベリア上空の温室効果ガスの長期観測. 第 19 回大気化学討論会, 講演要旨集, 61.
- ⑨ Ishijima K., Patra P.K., Ghosh A., Morimoto S., Machida T., Sasakawa M., Tohjima Y., Ito A., Aoki S., Nakazawa T. (2013) Model resolution comparison for methane simulation in the Arctic region. Third International Symposium on the Arctic Research, Abstracts, 128-128
- ⑩ Machida T., Sasakawa M., Sawa Y., Matsueda H., Morimoto S., Murayama S., Niwa Y., Tsuboi K., Aoki S. (2013) Observations of atmospheric greenhouse gases from a tower network and aircraft over Siberia. Third International Symposium on the Arctic Research, Abstracts, 137-137.
- ⑪ Sasakawa M., Machida T., Ito A., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N., Nesterova M., Galanin A., Patra P., Ishijima K. (2014) Long-term variations of atmospheric CH₄ concentration over Siberia derived from aircraft and tower measurements. 7th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG7), Abstracts.
- ⑫ 笹川基樹, 町田敏暢, 伊藤昭彦, Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Patra P., K. Ishijima (2014) Long-term variations of atmospheric CH₄ concentration over Siberia derived from aircraft and tower measurements. 第 20 回大気化学討論会, 講演要旨集, 83.
- ⑬ Kim J., Kim H.M., Cho C., Jacobson A., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Fedoseev N. (2014) Effect of Atmospheric CO₂ Observations in Asia on the Optimization of Surface CO₂ Flux. 2014 AGU Fall Meeting, Abstracts.
- ⑭ Machida, T. and M. Sasakawa (2014) Observation of Greenhouse Gases by Aircraft and Tower Network in Siberia, Japan-Russia Workshop on Arctic Research -Toward Future Japan-Russia Cooperation in Arctic Observation and Research-.
- ⑮ Belan B.D., Machida T., Sasakawa M., Davydov D.K. , Fofonov A. V. , Krasnov O.A. , Maksyutov S., Arshinov M.Y. (2015) Spatial and Temporal Variability of CO₂ and CH₄ Concentrations in the Atmospheric Surface Layer over West Siberia. European Geosciences Union General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, 17.

- ⑩ Thompson R., Stohl A., Myhre C.L., Sasakawa M., Machida T., Aalto T., Dlugokencky E., Worthy D. (2015) Methane emissions in the Arctic and sub-Arctic from a Bayesian atmospheric inversion. European Geosciences Union General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, 17.
- ⑪ Ramirez T.G.N., Marshall J., Houweling S., Dlugokencky E.J., Worthy D.E.J., Vaughn B., Simpson I., White J., Brand W.A., Sasakawa M., Nichol S., Ramonet M., Tyler S.C., Hueber J., Helmig D., Read K., Punjabi S., Gatti L.V., Krummel P., Heimann M. (2015) Isolating wetland CH₄ emissions using the additional constraints of ¹³CH₄, and C₂H₆ in a inverse modeling framework. European Geosciences Union General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, 17.
- ⑫ Kim H., Maksyutov S., Saito M., Ito A., Belikov D., Saeki T., Morino I., Uchino O., Yoshida Y., Sasakawa M., Machida T., Yokota T. (2015) Estimating regional CH₄ fluxes using ground-based and space-based observations. 日本気象学会 2015 年度春季大会, 同予稿集, 236-236.
- ⑬ 笹川基樹, 町田敏暢, 伊藤昭彦, 津田憲次, Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Patra P., 石島健太郎 (2015) シベリアにおける航空機とタワーネットワークを用いたメタン濃度の長期変動解析. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 同予稿集, 14-14.
- ⑭ Sasakawa M., Machida T., Ito A., Tsuda K., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Patra P.K., Ishijima K. (2015) Long-term variations of atmospheric CH₄ concentration over Siberia derived from aircraft and tower observation. 第 21 回大気化学討論会, 講演要旨集, 88.
- ⑮ Maksyutov S., Janardanan R., Oda T., Ito A., Saito M., Kaiser J., Belikov D., Ganshin A. (2015) Developing a high-resolution CO₂ flux inversion model for global and regional scale studies. 2015 AGU Fall Meeting, Abstracts.
- ⑯ Kim H., Maksyutov S., Belikov D., Ito A., Morino I., Yoshida Y., Yokota T., Sasakawa M., Machida T. (2015) Inverse modeling analysis of regional methane fluxes using GOSAT retrievals in 2010-2012. 2015 AGU Fall Meeting, Abstracts.
- ⑰ Sasakawa M., Machida T., Ito A., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Patra P., Ishijima K. (2015) Long-term Variations of Atmospheric CH₄ Concentration over Siberia Derived from Aircraft Observation. 2015 AGU Fall Meeting, Abstracts.
- ⑱ Thompson R., Stohl A., Myhre C.L., Sasakawa M., Machida T., Aalto T., Dlugokencky E., Worthy D. (2015) Estimation of methane fluxes in the high northern latitudes from a Bayesian atmospheric inversion. 2015 AGU Fall Meeting, Abstracts.
- ⑲ 笹川基樹, 町田敏暢, 勝又啓一, 津田憲次, Arshinov M. (2016) 西シベリアにおけるタワー観測ネットワークを用いた二酸化炭素・メタンの連続測定. GRENE 北極気候変動研究事業 研究成果報告会, 講演予稿集.
- ⑳ Ishijima K., Sasakawa M., Machida T., Patra P.K., Ito A., Kumar K.R., Saeki T., Morimoto S., Aoki S., Nakazawa T. (2016) Analysis of atmospheric methane from Siberian tower

observation using chemistry transport model. GRENE 北極気候変動研究事業 研究成果報告会, 講演予稿集.

- ⑳ Thompson R., Stohl A., Myhre C. L., Sasakawa M., Machida T., Aalto T., Dlugokencky E., Worthy D., Skorokhod A. (2016) Methane fluxes in the high northern latitudes estimated using a Bayesian atmospheric inversion. EGU General Assembly 2016, Geophysical Research Abstracts, 18(11875).
- ㉑ Belan B.D. , Machida T., Sasakawa M., Maksyutov S., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M. (2016) Changes in CO₂ trends observed in the lower troposphere over West Siberia. EGU General Assembly 2016, Geophysical Research Abstracts, 18(11616).
- ㉒ Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Katsumata K., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2016) Continuous measurement of CO₂ and CH₄ concentration from a tower network (JR-STATION) over Siberia. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 同予稿集.
- ㉓ Sasakawa M., Machida T., Ito A., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2016) Continuous measurement of CO₂ and CH₄ concentration from a tower network (JR-STATION) over Siberia. The 22nd Symposium on Atmospheric Chemistry, Book of Abstracts, 48.
- ㉔ Tsuruta A., Aalto T., Backman L., Laan-Luijkx I.T.V.D., Krol M., Spahni R., Lienert S., Houweling S., Laurila T., Hatakka J., Dlugokencky E., Worthy D., Sasakawa M., Peltola O., Mauranen A., Heimann M., Kozlova L., Crotwell A., Peters W. (2016) Methane budget estimates for northern high latitudes by CarbonTracker Europe-CH₄. The 2nd ICOS Science Conference.
- ㉕ Aalto T., Kangasaho V., Tsuruta A., Rautiainen K., Backman L., Laan-Luijkx I.T.V.D., Krol M., Spahni R., Lienert S., Houweling S., Laurila T., Juha Hatakka, Worthy D., Sasakawa M., Peltola O., Mauranen A., Heimann M., Kozlova L., Dlugokencky E., Crotwell A., Peters W. (2016) Methane budgets in northern latitudes during soil freezing period. The 2nd ICOS Science Conference.
- ㉖ Machida, T., M. Sasakawa, M. Arshinov, S. Mitin, A. Galanin, and T. Maximov (2016) Atmospheric greenhouse gases over Siberia, IX International Symposium “C/H₂O/ENERGY BALANCE AND CLIMATE OVER THE BOREAL AND ARCTIC REGIONS WITH SPECIAL EMPHASIS ON EASTERN EURASIA” , Abstracts.
- ㉗ Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Katsumata K., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2017) Continuous measurement of CO₂ and CH₄ concentration from a tower network (JR-STATION) over Siberia. JPGU Annual Meeting 2017, Chiba (アブストラクト提出済み) .

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 毎年4月に行われた国立環境研究所「春の環境講座」と毎年7月に行われた国立環境研究所「夏の大公開」においてシベリアにおける温室効果ガスの観測活動についての紹介を行った。
- ② プレスリリース (2015年7月17日、「地上・衛星観測データが示す大気中二酸化炭素の行方～異なる2つの最新手法を相互的に評価～」)、文部科学記者会、科学記者会、神奈川県政記者クラブ、横須賀市政記者クラブ、青森県政記者会、むつ市政記者会、高知県政記者クラブ、沖縄県政記者クラブ、名護市駐在3社、筑波研究学園都市記者会同時配信：
<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2015/20150717/20150717.html>

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

【成果の普及】

JR-STATIONによって得られたデータを国立環境研究所地球環境研究センターの地球環境データベース (<http://db.cger.nies.go.jp/portal/geds/index>) において公開し、国内外の研究者からのリクエストに応じてデータ利用研究を推進している。以下の大学・研究所の研究者からコンタクトがあり、データの提供を行った；気象研究所、海洋研究開発機構、東京大学大学院、IMAU, Utrecht University (オランダ)、Climate Change Unit, IES, European Commission Joint Research Centre (イタリア)、Max Planck Institute for Biogeochemistry (ドイツ)、Yonsei University (韓国)、Norwegian Institute for Air Research (ノルウェー)、University of Edinburgh (イギリス)、Finnish Meteorological Institute (フィンランド)。

【政策的な寄与・貢献】

「地球観測の推進戦略」(平成16年12月27日)の“IV. 分野別の推進戦略”内の“1. 地球温暖化”では、“今後10年間を目処に取り組むべき課題・事項”として、“①全球的把握”に“全球的な温室効果ガス観測”、“⑤気候変動に対して脆弱な地域での温暖化影響モニタリング”が挙げられている。シベリアは気候変動に対して脆弱な地域であると認識されており、特に地表はこれまで系統的なCO₂・CH₄濃度観測の空白域になっていたことから、本タワーネットワークは「地球観測の推進戦略」の方針として示される全球的な定点観測網の構築に貢献している。

「第3期科学技術基本計画」(平成18年3月28日)の科学技術の戦略的重点化の実現に向けての目標を明記した「分野別推進戦略」の”Ⅲ環境分野”では、国際協力・分担により二酸化炭素収支観測の全球カバーを目指して進め、人為起源二酸化炭素の地球各圏への分配を把握することを推進している。本研究は観測の空白域であるシベリア域において質が高く空間密度も高い有用な観測を推進していることに加えて、モデルの改善を通じてCO₂やCH₄の収支量の推定誤差低減にも貢献している。

「GEOS 新10年実施計画の検討に向けた我が国の地球観測の方針」(平成27年1月14日)の“今後10年間の具体的な実施方針”で“将来の環境創造への貢献”として、“地球温暖化や地球環境の保全等に関する課題解決のための基礎的な情報を収集・提供する。”とある。具体的には、“温室効果やオゾン層破壊に関係する物質の分布・循環の観測”、“地球温暖化に対し、脆弱(ぜいじゃく)な地域(極域等)の監視”、“不確実性の定量的評価や低減のための観測データの取得”が挙げられており、「地球観測の推進戦略」と同様に本研究は地球観測の方針に示された内容に合

致したものである。また“GEOSS への貢献”として最後に“国際社会や多様なコミュニティが協調して世界的な課題の解決に貢献することを示しつつ、主導国との間の科学技術外交の側面を意識しながら、GEOSS の更なる発展を目指す。”とあるが、本研究はロシア側の研究者との協力により温暖化問題解決の基礎データを提供し貢献することが大いに期待される。