

地球一括計上

課題名	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（CO ₂ 、CH ₄ ）の長期変動解析		
担当研究機関	国立研究開発法人国立環境研究所		
研究期間	平成24－28年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	115,399千円（うち28年度 17,661千円）
研究体制	国立研究開発法人国立環境研究所		
研究概要	<p>1. 序（研究背景等）</p> <p>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)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。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>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。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、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、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 <i>in situ</i>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。</p>		

3. 研究の内容・成果

(1) 観測地点

JR-STATIONの地図を図1に示す。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。またNOY、DEM周辺には石油、IGR周辺には天然ガスが存在する。KRSとBRZはタイガ、VGN、AZV、SVVはステップに位置する。YAKはタイガとステップが混在する場所に位置する。

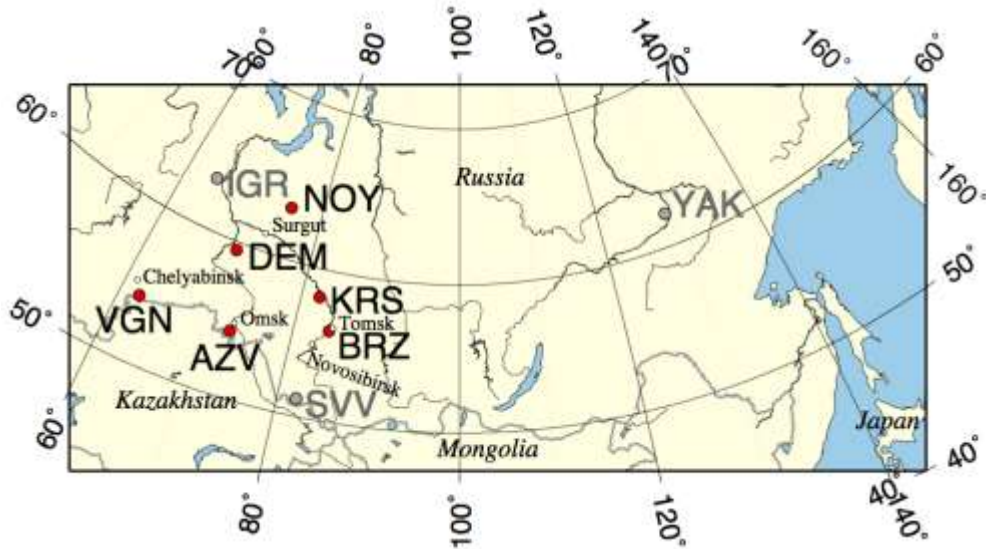


図1. JR-STATIONの位置（●）。○は主要な都市。国境はグレーラインで示す。

(2) 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れだけ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。また観測値の欠損が少なく季節変動を捉えた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2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)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)の森林域とは違うが、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

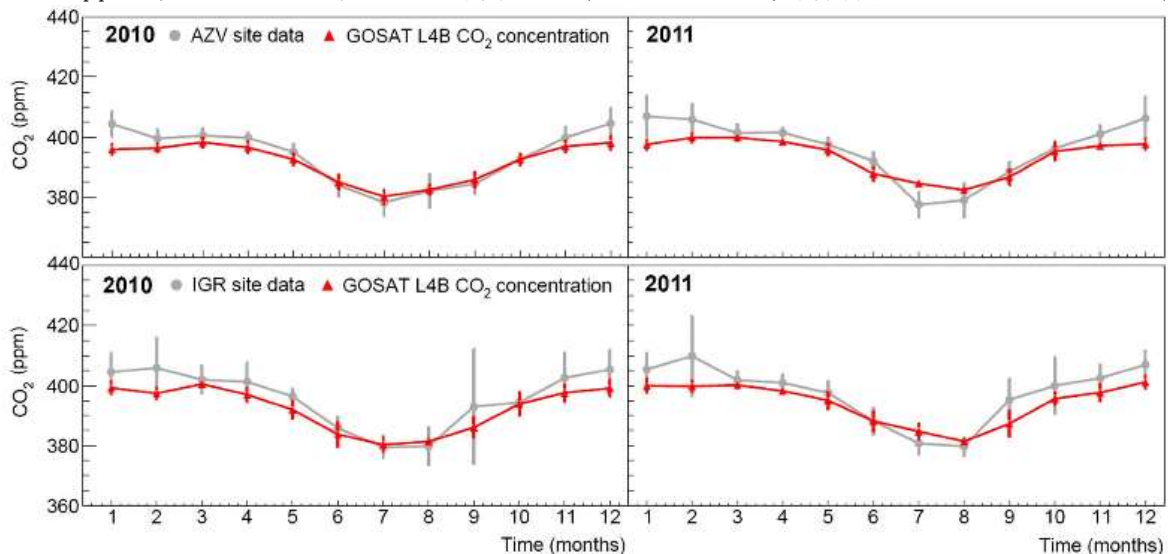


図2. AZVとIGRで2010年と2011年に観測された日中値（13:00-17:00 LST）の月平均値とGOSAT L4Bデータの時系列（Kondo et al., 2015）

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くなった可能性がある。

(3) 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3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なることを反映している。

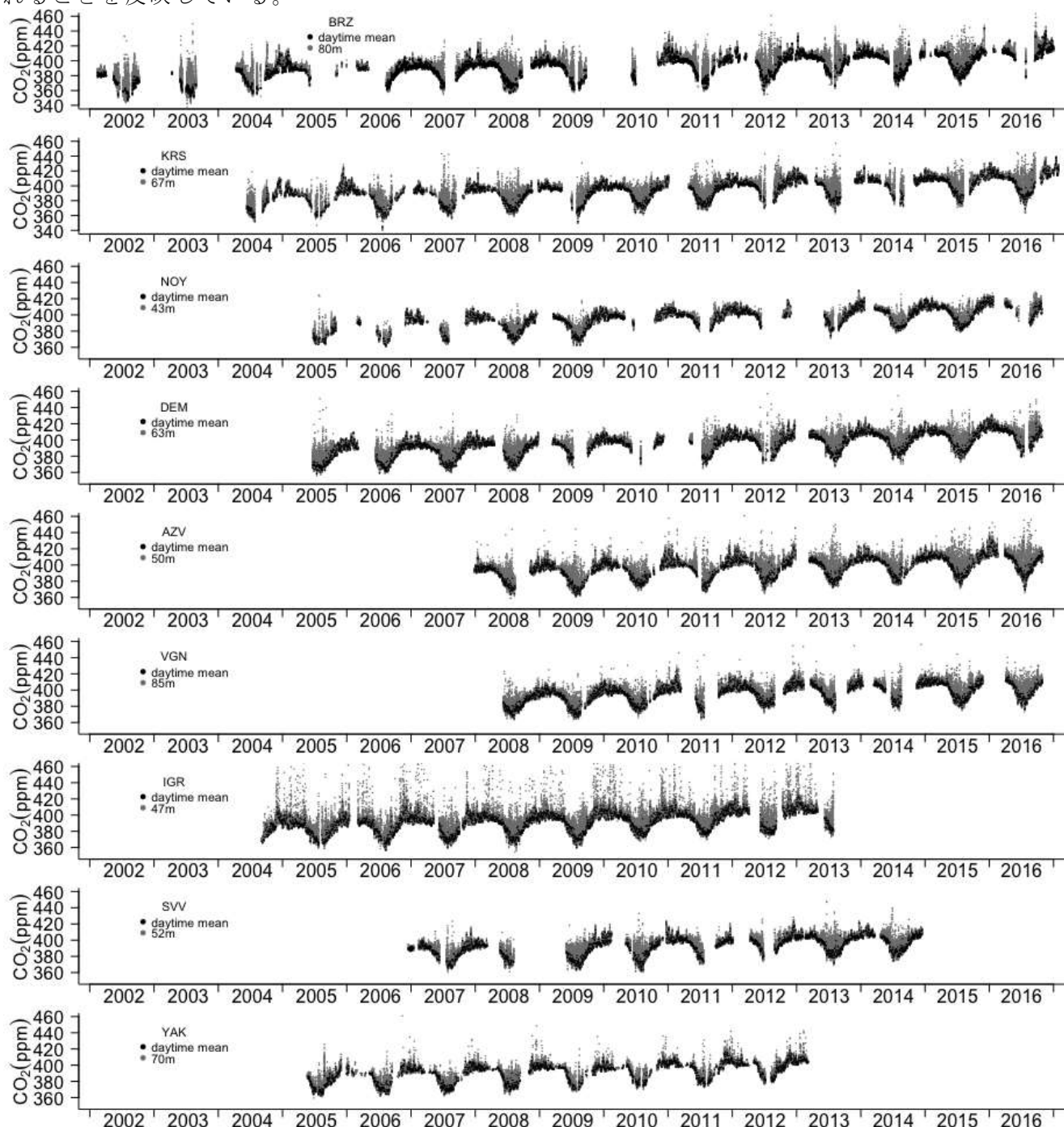


図3. JR-STATIONの高高度インレットで観測されたCO₂濃度 (ppmv) の1時間値 (灰色)。BRZは80 mと40 mのインレットからのデータ。黒丸は日中平均値 (13:00-17:00 LST) を示している。

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4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出る。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

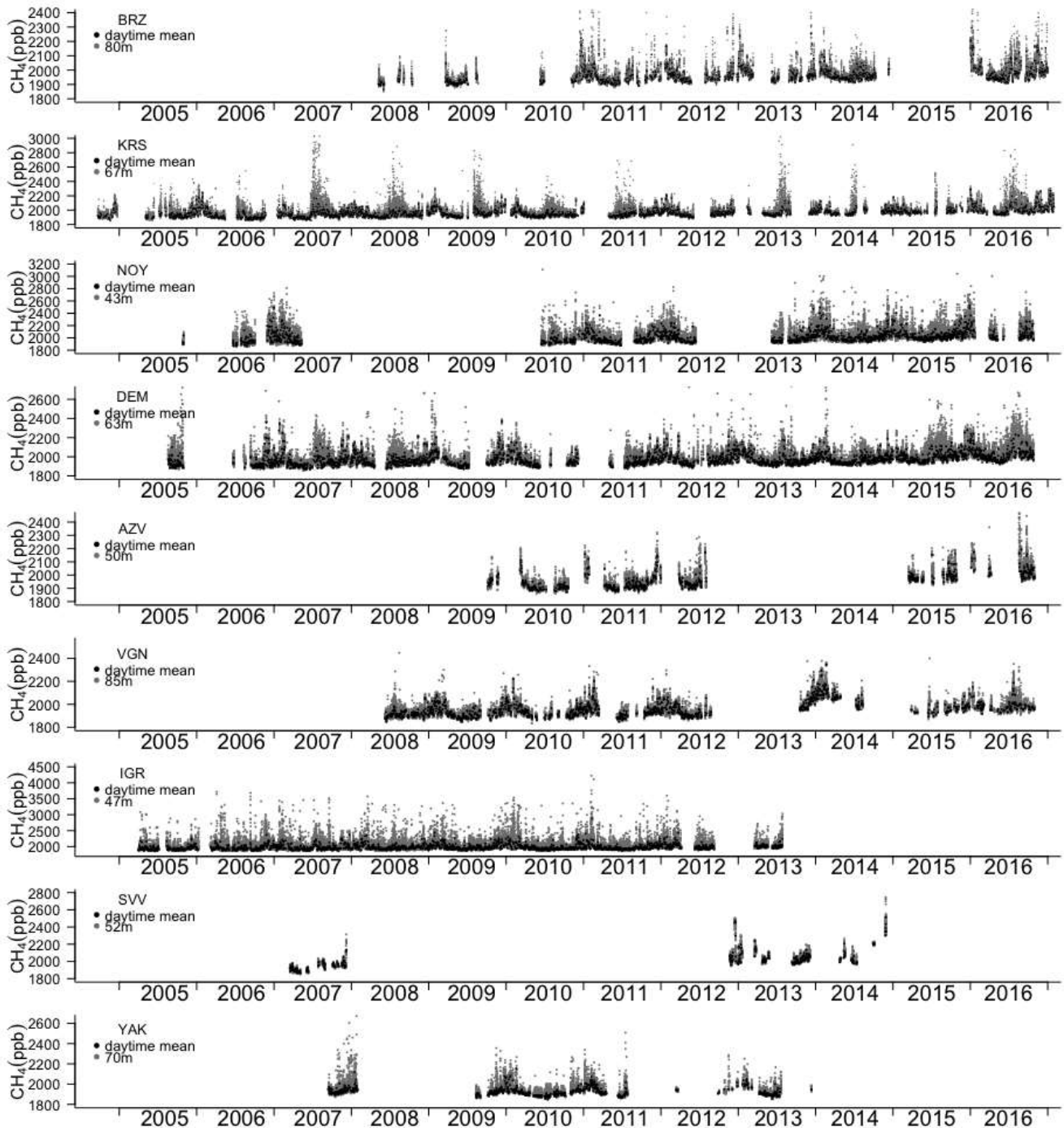


図4. JR-STATIONの高高度インレットで観測されたCH₄濃度 (ppb) の1時間値 (灰丸)。BRZは80 mと40 mインレットの値を示す。黒丸は日中平均値 (13:00-17:00 LST)。日中平均値は、低高度と高高度インレットの濃度差が50 ppbより小さく、更にそのデータ数が2つ以上の時のみ計算。

(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。

CO₂フラックスの推定では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。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った傾向が見える（図5）。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CO₂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。

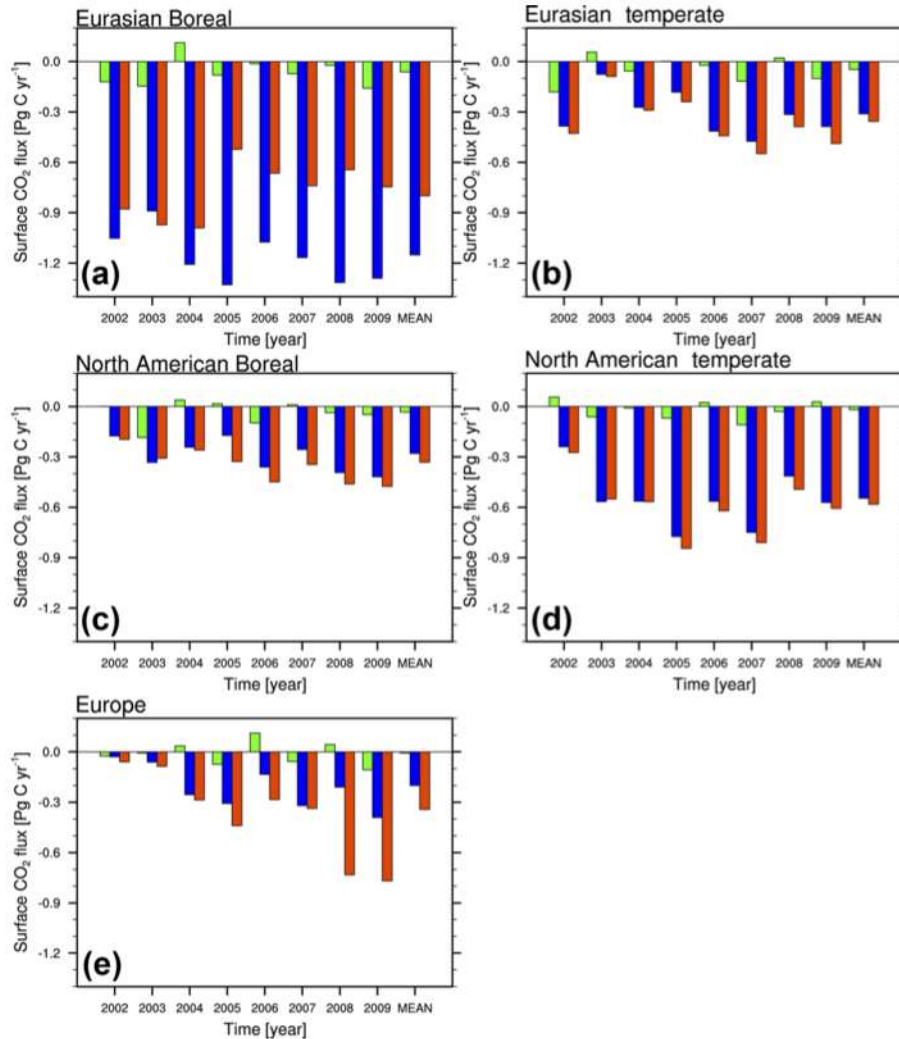


図5. (a)ユーラシア亜寒帯域、(b)ユーラシア温帯域、(c)北アメリカ亜寒帯域、(d)北アメリカ温帯域、(e)ヨーロッパにおける生物圏からの年平均フラックス (Pg C yr^{-1}) の経年変化：先験値（緑）、CNTL推定（青）、JR推定（赤）。2002-2009年間の平均を右（MEAN）に示す。（Thompson et al., 2017）

CH₄フラックスの推定では、先験値の違いからシナリオS1、S2、使用した観測値の違いからシナリオS3の結果を示す。北部ユーラシアでの年々変動は大きい（図6）。それは西シベリア低地帯（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、ハドソン湾低地帯（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。

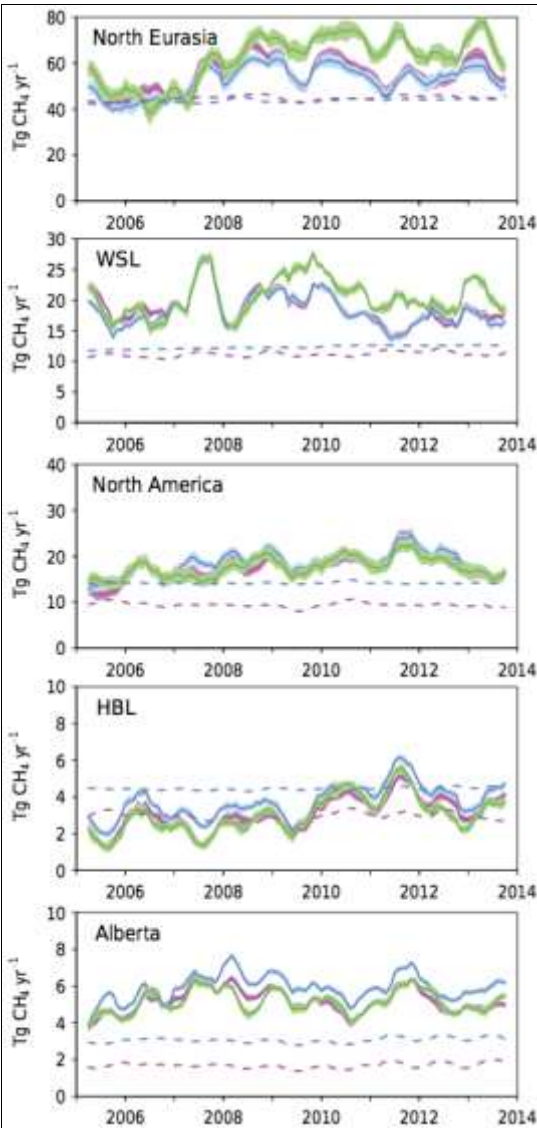


図6. 各領域における事後推定CH₄フラックスの年々変動(Tg yr⁻¹)。各領域の時系列データから平均的な季節変動成分を差し引き、6ヶ月のタイムウィンドウで移動平均して求めた。曲線はシナリオごとの値でシェードは不確実性を示す(S1:マゼンタ、S2:青、S3:緑)。ダッシュ線はS1とS2の先験値。

4. 考察

- ・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。

- ・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。

5. 波及効果

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)。