

西シベリアの雪氷圏におけるタワー観測ネットワークを用いた
温室効果ガス収支の長期変動解析

環境省 国立研究開発法人国立環境研究所

地球システム領域 大気・海洋モニタリング推進室 笹川基樹・町田敏暢
地球環境データ統合解析推進室 白井知子
物質循環モデリング・解析研究室 伊藤昭彦

平成29-令和3年度合計予算額 129,389千円
(うち、令和3年度当初予算額 26,699千円)

[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濃度の連続測定を継続し、当該地域では唯一の貴重な観測データを得ることができた。これで20年近くの長期データになり、本課題での温室効果ガス収支の長期変動解析に使用した以外でも広く国際的な利用が進んでいる。陸域生態系モデルによるシミュレーションにより2001-2020年の期間について、北半球高緯度域の生態系は正味のCO₂シンクと推定された。この吸収量は、経年変動を示しつつも長期的に増加するトレンドが見られ、うち約3分の1が北緯45°以北の陸域生態系によるものであった。また、本観測で得られた濃度データを利用した全球インバース解析の結果から、2002-2017年の16年間において、ユーラシア亜寒帯領域全体として、夏季のCO₂吸収に増加傾向が見られた。NDVI・地表面温度・降水量との比較により、特にシベリア北部でNDVIの有意な増大が見られ、地球温暖化及び施肥効果による植生活動の活発化が、夏季のCO₂吸収増加トレンドに寄与したことが示唆された。インバース解析によるCH₄フラックスについては、JR-STATIONが設置されている西シベリアにおいて湿地からの放出量がこれまで想定されていた値より大きいことが明らかになった。CO₂、CH₄共に大きなフラックス変動を示すシベリア域の推定値を精緻化することで、全球のより正しいフラックス推定にも貢献している。

[キーワード] 日ソ環境保護協力協定、日露科学技術協力協定、シベリア、二酸化炭素、メタン、フラックス推定、タイガ、湿地

1. はじめに

本研究は、日ソ環境保護協力協定の枠組み内の課題「湿地からのメタン放出のモデル化に関する共同研究」及び、日露科学技術協力協定の枠組み内の課題「シベリア生態系の影響を受けた温室効果気体の観測」と「シベリアにおけるランド・エコシステムの温室効果ガス収支」に基づくロシアとの長期にわたる国際共同研究である。

周北極域となるロシア共和国のシベリア域は、気候変動の影響を顕著に受ける可能性の高い雪氷圏であり、そこには温室効果ガスの循環及びその将来予測にとって重要な放出源・吸

収源が分布している。CO₂吸収・放出に関しては世界最大規模のタイガ、CH₄放出に関してはこれも世界最大規模の湿地が存在し、気候変動に対するシベリア域の陸域生態系の応答が全球の大気中温室効果ガス濃度に多大な影響を及ぼすことが予想される。従来研究で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¹⁾。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^{2, 3)}、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²⁾、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。しかし世界の温室効果ガス観測網の中で、広大なシベリアは観測の空白域であった。

そこで国立環境研究所は世界に先駆けて、1991年からシベリアでの温室効果気体の発生・吸収に関する航空機による大気観測を、日露国際協力の一環として開始した。ロシア国内で観測を行うために、以下の研究所と共同研究を行ってきた；ロシア科学アカデミーの微生物研究所、大気光学研究所、永久凍土研究所、ロシア気象委員会中央高層大気観測所。

本タワー観測ネットワークは、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、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」で、構築を開始した。その後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か所まで展開し、JR-STATION (Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network)⁴⁾として多点同時観測を行えるようになった。平成24年度からは地球環境保全試験研究費「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」でJR-STATIONを稼働し、現地の事情で一部のサイトを撤収したが、観測を継続した。

本タワー観測ネットワークによって、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連続データが蓄積されてきた。これらのデータは、シベリア域に焦点を当てながら全球のCO₂やCH₄のフラックス推定に使用されてきた⁵⁻⁸⁾。またGOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) データを用いて得られたCO₂フラックス推定値の検証⁹⁾や、モデルの検証データ^{10, 11)}としても幅広く用いられてきた。現在でも主にフラックス推定の目的で多くの研究に利用されている。これは本研究で得られるデータが希少であり、代替できない貴重なものであることを表している。ある時期に限られた集中観測のデータではなく、通年観測で経年的な変化を追うことのできる時間スケールでの観測であることも、データ利用者にとって利便性が高いと考えられる。

30年近くにわたるロシアの研究機関との共同研究の実績から、シベリアでの温室効果ガスを継続的にモニタリングできるのは、現在でも国立環境研究所のみである。これは欧米諸国の他機関でも実施が非常に難しく、温室効果ガス研究の国際的なコミュニティからも本観測の継続が強く期待されている。

2. 研究目的

シベリア域における温室効果ガスの観測網は、国立環境研究所とロシア科学アカデミーの大気光学研究所及び微生物研究所が共同で運用してきたタワー観測ネットワーク (JR-STATI

ON) がほぼ唯一である。本研究ではこのJR-STATIONを用いて温室効果ガス(CO₂、CH₄)濃度の観測を継続することが第一の目的である。さらに観測濃度の時空間変動と衛星など他の観測データを組み合わせて、インバース解析(結果である濃度分布の観測値から、原因であるフラックス分布を推定する方法)を用い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とともに濃度増加との因果関係やそれぞれの放出源・吸収源の寄与を明らかにすることが第二の目的である。得られたデータは国立環境研究所独自のデータベースにより、迅速な公開を行うことによって国内外の研究者への利用を促進する。

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。NOYとDEMは常緑樹と湿地が混在する場所に位置する(図2)。またNOYとDEMの周辺には石油の掘削施設が存在する。KRSは湿地と落葉樹が混在する地域でBRZは落葉樹と常緑樹が混在する地域である。AZVは農地、VGNは農地と陸水域が点在する地域に位置する。例としてBRZのタワー周辺環境を図3に示す。

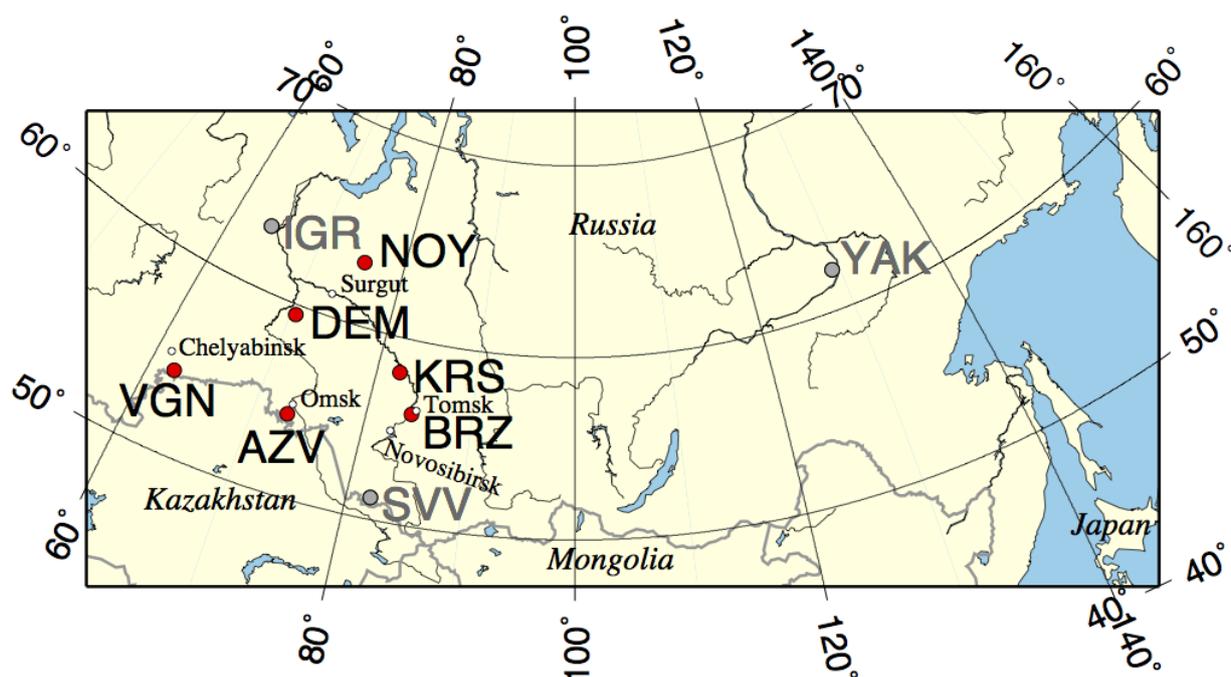


図1. JR-STATIONの位置(●)。●は過去のサイト。国境はグレーラインで示す。

表 1. JR-STATIONの位置情報及び大気採取高度

Identifying Code	Location	Latitude (N)	Longitude (E)	Air inlet heights (m)	Elevation at tower base (m a. s. l.) ^a
BRZ	Berezorechka	56° 08′ 45″	84° 19′ 55″	5, 20, 40, 80	168
KRS	Karasevoe	58° 14′ 44″	82° 25′ 28″	35, 67	76
NOY	Noyabrsk	63° 25′ 45″	75° 46′ 48″	21, 43	108
DEM	Demyanskoe	59° 47′ 29″	70° 52′ 16″	45, 63	63
AZV	Azovo	54° 42′ 18″	73° 01′ 45″	29, 50	110
VGN	Vaganovo	54° 29′ 50″	62° 19′ 29″	42, 85	192

a) Google Earthによる見積もり。

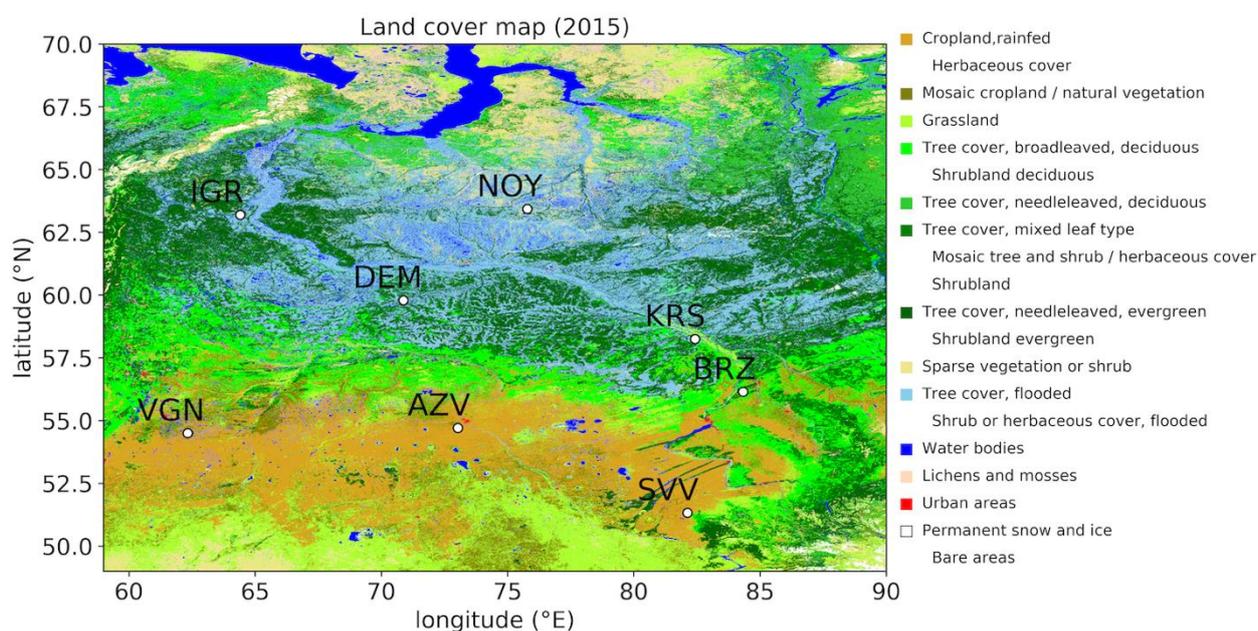
図 2. 西シベリアの土地被覆。ESA Climate Change Initiative¹²⁾のデータを元に2015年を描画。

図 3. BRZのタワー。タワー下の白いコンテナに観測システムが収納されている。

(2) 観測システムと測定シーケンス

CO₂及びCH₄濃度測定システムの写真と概略図を図4と図5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（PD-625-24SS, Permapure, USA）、及び過塩素酸マグネシウム除湿剤の3段階で除湿され、マスフローコントローラ（SEC-E40, S TEC, Japan）で流量を一定（35 cm³/min）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か月以上の過塩素酸マグネシウムの連続使用ができる¹³⁾。NDIRの出口は直接CH₄計（SnO₂半導体センサー）¹⁴⁾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。

センサーの更新を見越して、KRSには2015年、DEMとNOYには2016年にCRDS（Cavity Ring-Down Spectroscopy）を設置した。6-port valveの後で流路を分岐し、ナフィオン薄膜ドライヤー（MD-050-72S-1, Permapure, USA）を通過させてからマスフローコントローラで流量を35 cm³/minに制御して導入した。ポンプが故障した時などに逆流して乾燥剤がCRDSに入ってしまうように逆止弁を2か所に設置している。

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及び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¹⁵⁾、NIES94 CH₄スケール¹⁶⁾によって検定されている。NDIRや半導体センサーは、気温や気圧の変化により、1-2時間で出力がドリフトする可能性があるため、1-2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較正を行うと、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。シベリアへは高圧ガス容器の輸送を頻繁に行うことが難しいため、標準ガスの消費量を節約する必要があった。そこで本システムでは、現場の外気を48 L容器に1 MPa程度まで充填し、それをサブワーキングスタンダードガス（SWS-gas）として1時間ごとに導入し、検出器のドリフトを見積もる測定方法を採用した。SWS-gas用の高圧ガス容器は2本あり、低圧になるとその都度自動で充填され、交互に使用される（図5中”On-site gas A, B”）。一度充填すると約1週間使用できる。標準ガスの導入は12時間に1度行い、その値によりスパンの較正を行った。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¹³⁾。

2高度の観測ができるように、“Selector Unit”内の6-port valveにより、20分間隔で高高度、低高度、SWS-gasの順に流路を切り替えるシーケンスを採用した（BRZでは4高度の測定で6分間隔（-2006/5）、12分間隔（2006/8-）の切り替え）。図6に半日分（t₀-t₄₂）の測定シーケンスを示す。

導入ラインや検出器内での測定ガスの置換時間を考え、最後の3分間（BRZでは1分間）を測定値とした。サンプリング頻度が3秒なので、60データの平均値と標準偏差だけを記録した。これはストレージ（CR10X, CAMPBELL, USA）の使用量をできるだけ減らすためである。タイムスタンプは測定が終了した時の時刻で、出力はすべて電圧値となる。本来変化の小さい標準ガスやSWS-gasの出力の標準偏差に対しては、閾値を設け異常値を削除している。標準

的な測定に対しCO₂の標準偏差で2 mV、CH₄で5 mVを閾値としている。同時に、隣り合うSWS-gasの出力電圧値が大きく異なる場合も何らかの異常が発生したと判断して、挟まれているサンプルガスは欠測としている。

CRDSは本体に全データを保存しており、データ回収後バルブ切り替え前の3分間を切り出す処理をしている。

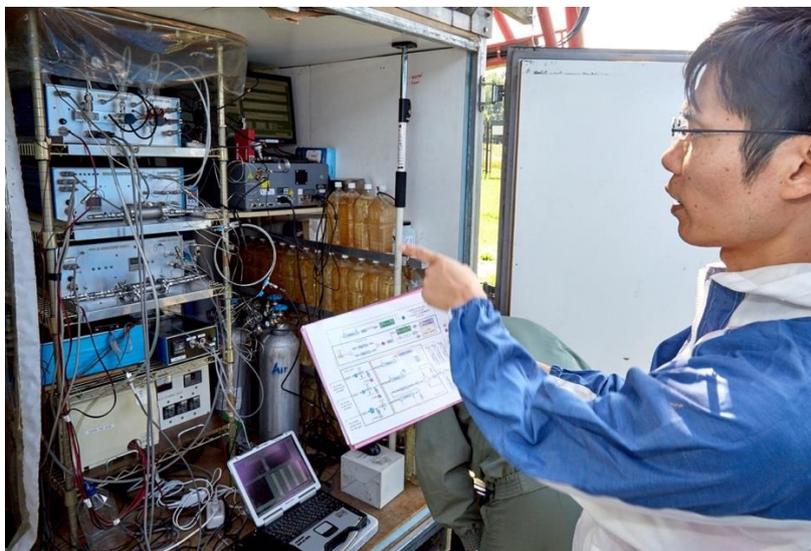


図4. 観測システムの外観とメンテナンス時の様子（KRS）。スチールラックの上からポンプユニット、セレクトーユニット、アナライザーユニット、触媒ユニットとメタン計、バッテリーが配置されている。右上部はCRDS。右下部は標準ガス。側面の水入りのペットボトルでコンテナ内の昼夜の温度変化を抑えている。

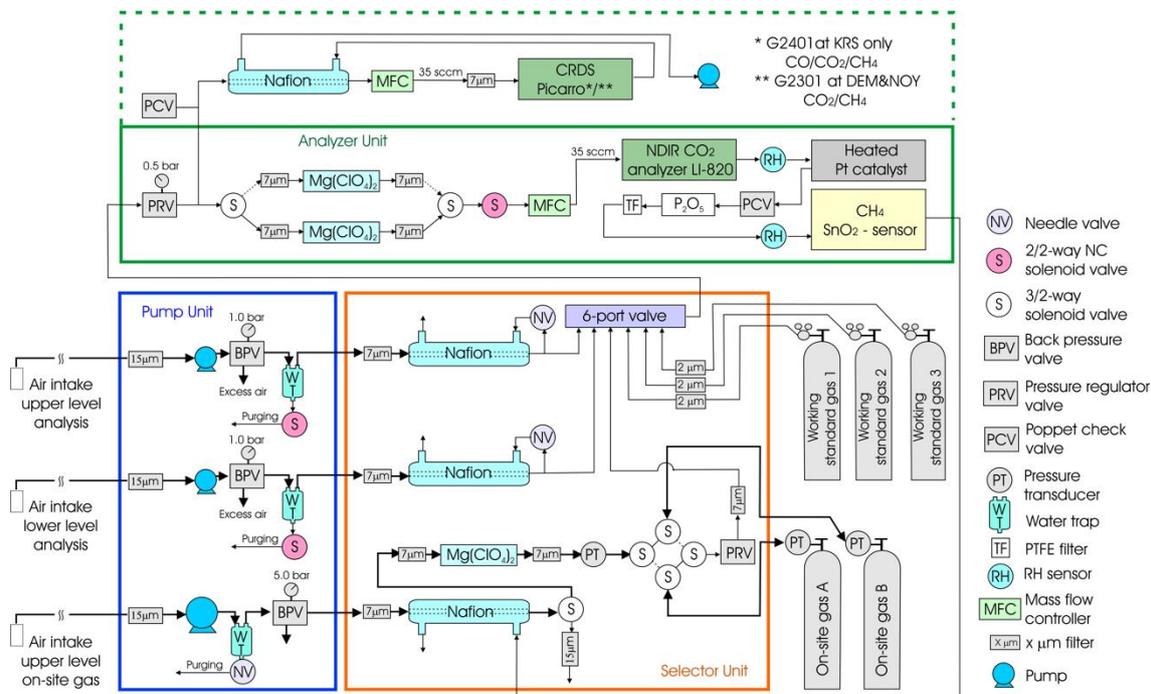


図5. タワー観測システムの概略図（二次利用不可）

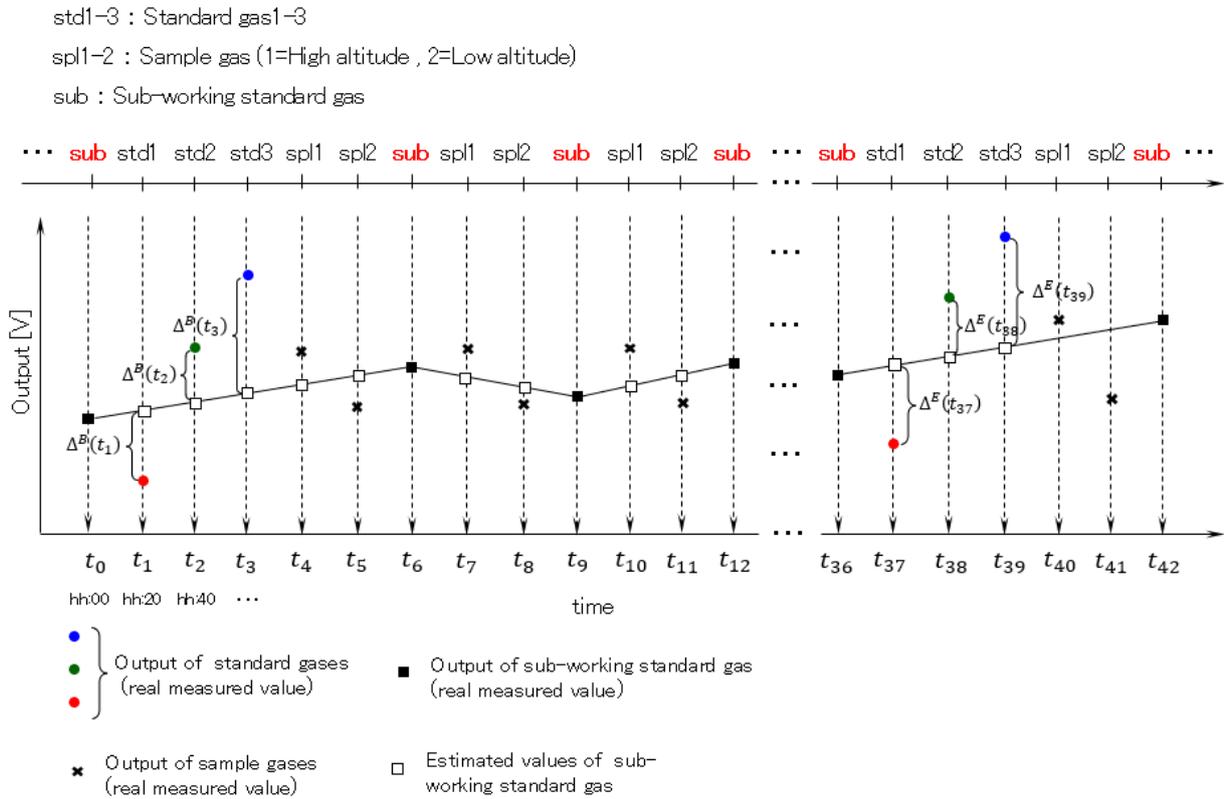


図6. 連続する標準ガス測定で挟まれた半日分の測定シーケンス

実大気の濃度計算を行なう前に、12時間に一度導入される標準ガスの正常性を確認する。図6にあるように、SWS-gasの出力値を時間内挿して標準ガスの時刻で推定した値と標準ガスの出力値の差 (Δ^B 、 Δ^E)、及びその合成された分散 (σ^2) は以下のように求められる。

$$\Delta^B(t_i) = V_{std}(t_i) - \left(\frac{6-i}{6} \cdot V_{sub}(t_0) + \frac{i}{6} \cdot V_{sub}(t_6) \right) \quad (1)$$

$$(\sigma^L(t_i))^2 = (\sigma_{std}(t_i))^2 + \left(\frac{6-i}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_0) \right)^2 + \left(\frac{i}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_6) \right)^2 \quad (2)$$

$$\Delta^E(t_j) = V_{std}(t_j) - \left(\frac{42-j}{6} \cdot V_{sub}(t_{36}) + \frac{j-36}{6} \cdot V_{sub}(t_{42}) \right) \quad (3)$$

$$(\sigma^R(t_j))^2 = (\sigma_{std}(t_j))^2 + \left(\frac{42-j}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_{36}) \right)^2 + \left(\frac{j-36}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_{42}) \right)^2 \quad (4)$$

ここで $i = 1, 2, 3$ 、 $j = 37, 38, 39$ である。時刻 t_2 (t_{38})の標準ガス2の出力値と、SWS-gasの出力値を時刻 t_2 (t_{38})に時間内挿した値を基準に $\Delta^B(t_1)$ ($\Delta^E(t_{37})$)と $\Delta^B(t_3)$ ($\Delta^E(t_{39})$)で推定した標準ガス1と3の出力値を元に1次式の検量線を作成する。その寄与率にCO₂に関して0.999以上、CH₄に関して0.99以上の閾値を設け、安定しない標準ガスはサンプルガスの濃度計算に使用しない。

更に (Δ^B 、 Δ^E) に対し以下のように電圧差 (δ) を定義する。

$$\delta_{(1,37)} = \Delta^E(t_1) - \Delta^B(t_{37}) \quad (5)$$

$$\delta_{(2,38)} = \Delta^E(t_2) - \Delta^B(t_{38}) \quad (6)$$

$$\delta_{(3,39)} = \Delta^E(t_3) - \Delta^B(t_{39}) \quad (7)$$

これらの電圧差は、システムが安定していれば小さいと考えられるが、感度を含め何らかの異常が発生した場合はその限りではない。サンプルガスの濃度計算への悪影響を低減するために、閾値を設ける。その際、電圧の差を濃度の差にしてから閾値を掛ける。B側とE側それぞれの濃度差 ($\overline{\delta_{(i,j)}^B}, \overline{\delta_{(i,j)}^E}$) は、(S^B, S^E) を検量線の傾きとすると、CO₂の場合以下のようになる。

$$\overline{\delta_{(i,j)}^B} = |\delta_{(i,j)} / S^B| \quad (8)$$

$$\overline{\delta_{(i,j)}^E} = |\delta_{(i,j)} / S^E| \quad (9)$$

一方、CH₄の場合は横軸が濃度の対数なので

$$\overline{\delta_{(i,j)}^B} = C_i \cdot \left| e^{\frac{\delta_{(i,j)}}{S^B}} - 1 \right| \quad (10)$$

$$\overline{\delta_{(i,j)}^E} = C_i \cdot \left| e^{-\frac{\delta_{(i,j)}}{S^E}} - 1 \right| \quad (11)$$

となる。ここで $C_{i\{=1,2,3\}}$ は標準ガスの濃度を表す。以上の濃度差にCO₂濃度の差で5.0 ppm以下、CH₄濃度で50 ppb以下の閾値を設け、閾値を超える期間は装置が不安定と判断しすべてのサンプルガスを欠測とした。

(3) 陸域モデルによる湿原CH₄フラックスの検証

陸域生態系モデル (VISIT: Vegetation Integrated Simulator for Trace gases; Ito 2010, Inatomi et al., 2010) を用いて広域スケールで陸域生態系起源のCO₂、CH₄交換量を推定した。植生分布はOlson et al. 及びRamankutty and Foleyのデータにより与え、CH₄放出源となる各メッシュの湿原率はGlobal Lake and Wetland Dataset により決定した。気象条件は1901-2020年についてCRU TS 4.05、2021年はNCEP/NCAR再解析データを用いた。湿原における湛水域の変動はGlobal Carbon Projectのモデル相互比較で共通データとなっているWAD2Mを使用した。空間分解能0.5度 x 0.5度でグローバルなシミュレーションを実施し、グローバル合計、北緯45° または60° 以北の合計、ロシア、そして西シベリア低地領域 (北緯50-70°、東経60-90°) での集計を行った。生態系のCO₂交換は、光合成と生態系呼吸の差である生態系純生産から、火災及び土地利用による放出を差し引いた大気からの交換量と定義した。

(4) インバース解析

西シベリア域におけるCO₂とCH₄のフラックス推定の精度を高めるため、本観測値を用いたインバース解析（大気と地上フラックス交換の結果である濃度分布の観測値から、原因であるフラックス分布を推定する方法）を行った。昨年度までに、本観測値を用いないインバース解析により推定されたフラックスデータから大気中CO₂濃度の再現実験を行い、本観測値との比較を行った。また、JR-STATIONのCO₂観測値を加えたインバース解析を行い、加えなかった場合の結果と比較した。今年度は、CO₂インバース解析を2年間延長し2017年まで実施し、さらに推定された西シベリアのCO₂フラックスと気候アノマリーの解析を行った。また、CO₂同様に、JR-STATIONのCH₄観測データを整備し、JR-STATIONのCH₄観測データを加えたインバース解析を実施した。

モデル計算は、国立環境研究所で開発されたオイラー型全球大気輸送モデル（NIES-TM）とラグランジュ型粒子拡散モデル（FLEXPART）を組み合わせた結合モデル（GELCA: Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model）¹⁷⁾を用いて行った。気象データは、JRA-55（気象庁55年長期再解析）^{18,19)}を使用した。フラックス先験値としては、陸域生態系モデル（VISIT）^{20,21)}、海洋トレーサー輸送モデル（OTTM: Ocean Tracer Transport Model）²²⁾、化石燃料によるCO₂排出インベントリ（ODIAC: The Open-Data Inventory for Anthropogenic Carbon dioxide）²³⁾、及び森林火災によるCO₂排出インベントリ（GFAS: Global Fire Assimilation System）²⁴⁾を用いた。本研究で取得されたJR-STATIONの観測値データセット、及び全球に分布する大気中CO₂濃度観測値としては、米国海洋大気庁（NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration）が提供しているデータセットObsPack²⁵⁾（obspack_CO2_1_GLOBALVIEWplus_v5.0_2019-08-12）を用いて、2001年1月から2017年12月の期間、全球を64領域に分けて（図7）、インバース解析による陸域及び海洋フラックスの最適化を行った。CH₄に関しては、フラックス先験値としては、陸域生態系及び森林火災によるCH₄排出インベントリは、CO₂同様に、VISIT-CH₄、GFASを用いた。人為起源によるCH₄排出インベントリはEDGER（Emissions Database for Global Atmospheric Research, v4.2 FT2010, <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>）を用いた。観測値データとしては、本研究で取得されたJR-STATIONの観測値データセットの他、全球に分布する大気中CH₄濃度観測値としてWDCGG（WMO GAW World Data Centre for Greenhouse Gases, <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/introduction.html>）を通して提供されるデータセットを用いた。フラックス推定に用いた領域は、陸域はCO₂と同じ42領域（図7）に分けたが、全海洋を1つに扱い、全球で43領域とした。

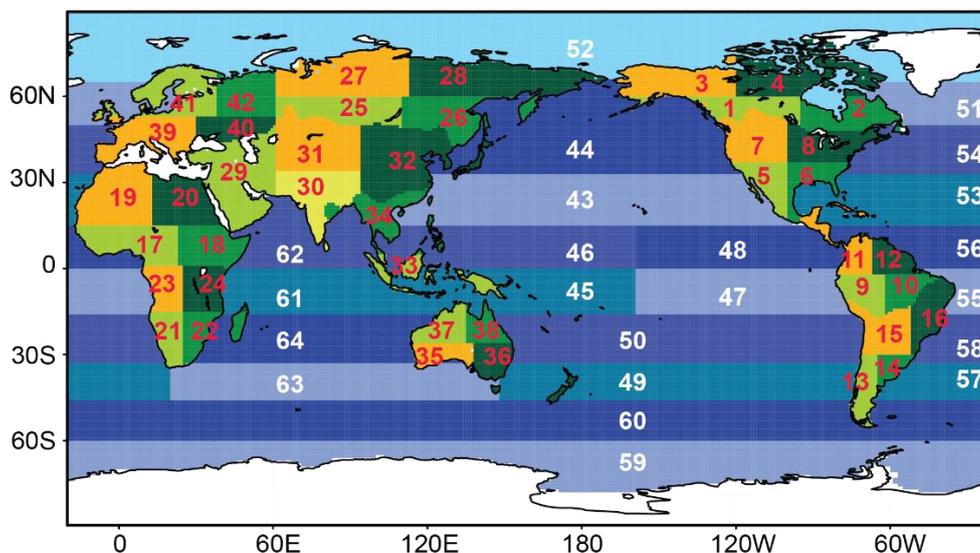


図7. インバース解析に用いた64領域（陸域42:海洋22）

(Shirai et al., (2017)¹⁷⁾ Figure 3より転載)

JR-STATIONのCO₂観測値は、サイトごとに、大気がよく混合されていると見なせる13:00-17:00 LSTを抽出し、さらに、低高度インレットと高高度インレットでの観測値の濃度差が、（抽出された全データの標準偏差を σ として） 3σ より大きい場合はデータを除外し、 3σ 以内であった場合には高高度観測値を使用した（BRZについては、観測している4高度のうち、20 mでの観測値を低高度観測値、80 mと40 mでの観測値を高高度観測値と見なした。80 mと40 mの両高度で観測値がある場合はその平均値、片方しか観測値がない場合はそのまま使用した。ただし、両高度の観測値がある場合で、その濃度差が 3σ より大きい場合はデータを除外した）。さらに、フィッティング²⁶⁾によりデータの平滑化を行った上で外れ値を除外し、日中平均値を計算した。

また、インバース解析により推定されたCO₂フラックスの長期トレンドと比較するため、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、地表面温度、降水量の3つの気象要素のトレンドを調べた。NDVIは、NASA GSFC提供のTerra/Aqua衛星搭載MODISセンサーのL1データを用いてJAXAが算出したプロダクトを用いた(<https://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index.html>)。地表面温度と降水量は、NOAA/OAR/ESRLが提供しているNCEP再解析データを用いた。3つの物理量とも、時間・空間解像度を揃え（月平均・ $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ）、フラックス推定で用いた領域のグリッドに合わせ集計した。夏季のフラックス（6-8月の3か月分を合計した値）に注目し、3物理量についても年ごとに夏季3か月分の合計値が、2002-2017年の16年分の夏季の平均値からどれだけ離れているか（アノマリー）を算出し、推定フラックスのアノマリーの時系列と比較した。

4. 結果・考察

(1) サンプル空気の濃度及び不確かさの計算

本観測システムによる、CO₂濃度及びCH₄濃度の総合的な分析精度はそれぞれ ± 0.3 ppmv¹³⁾、 ± 3 ppbv以下⁴⁾と見積もられていた。ただしSWS-gasを用いた測定シーケンスは本システム独

自であり、個々の検出器ごとに特性も異なることがわかってきたため、改めて個々の出力値（電圧値：V）から濃度を求めるメソッドの見直しと、データ個別に不確かさを導出した。

①サンプル測定時の標準ガス出力と不確かさの見積もり

3. (2)でB側とE側の標準ガスが共に閾値をクリアしたら、SWS-gasの出力値が装置のドリフトを追跡していると仮定し、両標準ガスに挟まれた個々のサンプルが測定された任意の時刻で標準ガス出力を推定する。B側とE側から推定されたそれぞれの標準ガス出力を、測定時間の差の比に応じて重み付け、代表値 $\hat{V}_{std(t_i,t_j)}^{BE}(t_k)$ とその分散 $\left(\hat{\sigma}_{std(t_i,t_j)}^{BE}(t_k)\right)^2$ を以下のように計算する。概念図を図8に示す。

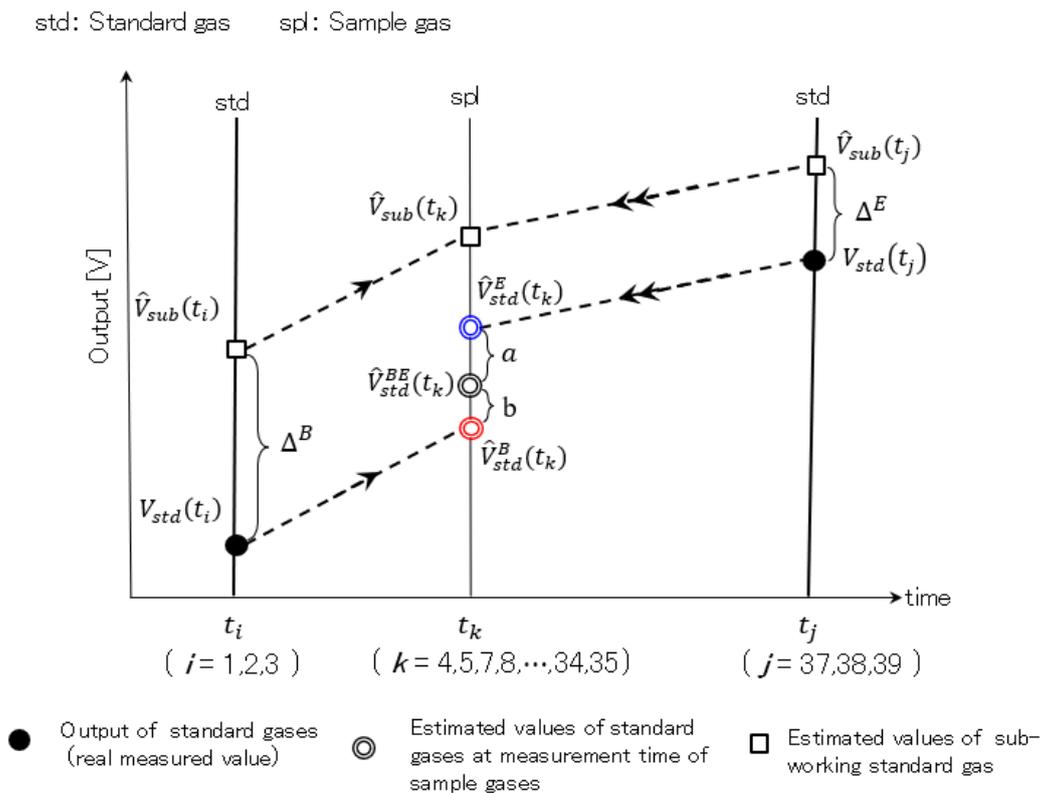


図8. サンプル測定時における標準ガス出力の推定方法の概念図

$$\begin{aligned}\hat{V}_{std(t_i,t_j)}^{BE}(t_k) &= \frac{a}{a+b} \cdot \hat{V}_{std(t_i)}^B(t_k) + \frac{b}{a+b} \cdot \hat{V}_{std(t_j)}^E(t_k) \\ &= \hat{V}_{sub}(t_k) + \frac{1}{a+b} \cdot \{a \cdot \Delta^B(t_i) + b \cdot \Delta^E(t_j)\}\end{aligned}\quad (12)$$

$$\begin{aligned}
\left(\hat{\sigma}_{std(t_i, t_j)}^{BE}(t_k)\right)^2 &= (\hat{\sigma}_{sub}(t_k))^2 + \left(\frac{a}{a+b} \cdot \sigma_{std}(t_i)\right)^2 + \left(\frac{a}{a+b} \cdot \frac{6-i}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_0)\right)^2 \\
&+ \left(\frac{a}{a+b} \cdot \frac{i}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_6)\right)^2 + \left(\frac{b}{a+b} \cdot \sigma_{std}(t_j)\right)^2 + \left(\frac{b}{a+b} \cdot \frac{42-j}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_{36})\right)^2 \\
&+ \left(\frac{b}{a+b} \cdot \frac{j-36}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_{42})\right)^2
\end{aligned} \tag{13}$$

ここで $a : b = (t_j - t_k) : (t_k - t_i)$ 。ここで標準ガス1、2、3に対応する (i, j) の組は(1,37), (2,38), (3,39) である。 $\hat{V}_{sub}(t_k)$ は、サンプルガスを挟む直近のSWS-gasの時間内挿値で、サンプルガス1 (spl1) か2 (spl2)によって別様に推定される。

{spl1 | $k = 4$ }

$$\hat{V}_{sub}(t_4) = \frac{1}{3} \cdot V_{sub}(t_0) + \frac{2}{3} \cdot V_{sub}(t_6) \tag{14}$$

{spl1 | $k = 7, 10, 13, \dots, 34$ }

$$\hat{V}_{sub}(t_k) = \frac{2}{3} \cdot V_{sub}(t_{k-1}) + \frac{1}{3} \cdot V_{sub}(t_{k+2}) \tag{15}$$

{spl2 | $k = 5$ }

$$\hat{V}_{sub}(t_5) = \frac{1}{6} \cdot V_{sub}(t_0) + \frac{5}{6} \cdot V_{sub}(t_6) \tag{16}$$

{spl2 | $k = 8, 11, 14, \dots, 35$ }

$$\hat{V}_{sub}(t_k) = \frac{1}{3} \cdot V_{sub}(t_{k-2}) + \frac{2}{3} \cdot V_{sub}(t_{k+1}) \tag{17}$$

ここで、 $V_{sub}(t_l)$ { $sub | l = 0, 6, 9, 12, \dots, 36$ } は実測値である。ここで一例として、{spl1 | $k = 4, (i, j)$ } の場合に $\hat{V}_{std(t_i, t_j)}^{BE}(t_k)$ に対し推定値を含まない変数で書き直し、分散も合わせて表記する。

{spl1 | $k = 4, (i, j) = (1, 37), (2, 38), (3, 39)$ }

$$\begin{aligned}
\hat{V}_{std(t_i, t_j)}^{BE}(t_4) &= \frac{1}{3} \cdot V_{sub}(t_0) + \frac{2}{3} \cdot V_{sub}(t_6) \\
&+ \frac{a}{a+b} \cdot \left\{ V_{std}(t_i) - \left(\frac{6-i}{6} \cdot V_{sub}(t_0) + \frac{i}{6} \cdot V_{sub}(t_6) \right) \right\} \\
&+ \frac{b}{a+b} \cdot \left\{ V_{std}(t_j) - \left(\frac{42-j}{6} \cdot V_{sub}(t_{36}) + \frac{j-36}{6} \cdot V_{sub}(t_{42}) \right) \right\}
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
\left(\hat{\sigma}_{std(t_i,t_j)}^{BE}(t_4)\right)^2 &= \left(\frac{1}{3} \cdot \sigma_{sub}(t_0)\right)^2 + \left(\frac{2}{3} \cdot \sigma_{sub}(t_6)\right)^2 \\
&+ \left(\frac{a}{a+b} \cdot \sigma_{std}(t_i)\right)^2 + \left(\frac{a}{a+b} \cdot \frac{6-i}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_0)\right)^2 + \left(\frac{a}{a+b} \cdot \frac{i}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_6)\right)^2 \\
&+ \left(\frac{b}{a+b} \cdot \sigma_{std}(t_j)\right)^2 + \left(\frac{b}{a+b} \cdot \frac{42-j}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_{36})\right)^2 + \left(\frac{b}{a+b} \cdot \frac{j-36}{6} \cdot \sigma_{sub}(t_{42})\right)^2 \quad (19)
\end{aligned}$$

②検量線によるサンプル濃度と不確かさの導出

以上の方法で求めた、サンプル測定時の標準ガス出力の推定値 ($\hat{V}_{std(t_i,t_j)}^{BE}(t_k)$) とその分散の推定値 ($\left(\hat{\sigma}_{std(t_i,t_j)}^{BE}(t_k)\right)^2$) を用いて、検量線を作成する。検量線は1次式 ($y = Sx + I$) を使用する。ここで、 y : 出力電圧、 x : 濃度である (CH₄の半導体センサーは、濃度の対数 (log) が出力電圧と直線関係にあるため $x : \log(\text{濃度})$)。検量線による濃度推定の概念図を図9に示す。

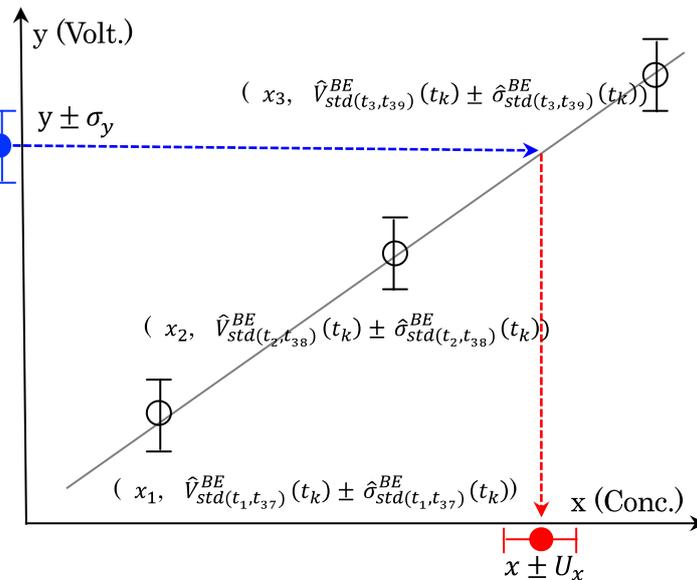


図9. 検量線による濃度推定の概念図。灰色の直線が検量線 ($y = Sx + I$)。誤差付きの出力値 (青丸) から誤差付きの濃度 (赤丸) を求める。この時検量線の誤差も考慮される。

最尤法の手順に従って尤度関数 (L) の最大値を求める。ここでは測定誤差は正規分布すると考え、重みは

$$w_{(i,j,k)} = 1 / \left(\hat{\sigma}_{std(t_i,t_j)}^{BE}(t_k)\right)^2 \quad (20)$$

となる。正規方程式 $\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial S} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial I} = 0 \end{cases}$ を解いて以下の解を得る。

$$S = \frac{(\sum w_i)(\sum w_i x_i y_i) - (\sum w_i x_i)(\sum w_i y_i)}{(\sum w_i)(\sum w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i)^2} \quad (21)$$

$$I = \frac{(\sum w_i y_i)(\sum w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i y_i)(\sum w_i x_i)}{(\sum w_i)(\sum w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i)^2} \quad (22)$$

総和の添え字は標準ガス (i=1, 2, 3) を表す。ここで実際には、測定電圧から濃度を推定するので上記検量線の逆関数を使う。また、上記検量線は加重平均点 $(\bar{x}, \bar{y}) = (\frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i}, \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i})$ を必ず通ることから

$$x = \frac{y - \bar{y}}{S} + \bar{x} \quad (23)$$

を検量線に使用した。ここから求められる濃度に伴う不確かさ (U_x) は、以下の様に計算される (JCSS JCG200S21-01に準拠)。

$$U_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)^2 U^2(y) + \left(\frac{\partial x}{\partial \bar{y}}\right)^2 U^2(\bar{y}) + \left(\frac{\partial x}{\partial S}\right)^2 U^2(S) + \left(\frac{\partial x}{\partial \bar{x}}\right)^2 U^2(\bar{x}) \quad (24-1)$$

ここで U は個々の成分の不確かさを表す。各項ごとに記述すると：

a) 第1項 測定電圧のばらつき (σ_y) からの寄与。かつ、60回の反復測定：

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)^2 U^2(y) = \frac{\sigma_y^2}{S^2} \cdot \frac{1}{60}$$

b) 第2項 \bar{y} のばらつきからの寄与：

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \bar{y}}\right)^2 U^2(\bar{y}) = \frac{1}{S^2} \frac{\sum w_i^2 \sigma_i^2}{(\sum w_i)^2} = \frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{\sum w_i}$$

ここで、 σ_i^2 は検量線を構成する標準ガス (i = 1, 2, 3) の電圧値の分散をそれぞれ表す。

c) 第3項 検量線の傾き (S) のばらつきからの寄与：

$$\left(\frac{\partial x}{\partial S}\right)^2 U^2(S) = \frac{(y - \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i})^2}{S^4} \cdot \sum_i \sigma_i^2 \left(\frac{\partial S}{\partial y_i}\right)^2 = \frac{(y - \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i})^2}{S^4} \cdot \frac{\sum w_i}{(\sum w_i)(\sum_i w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i)^2}$$

d) 第4項 \bar{x} のばらつきからの寄与：

標準ガス濃度の平均のばらつきに起因する項であるが、個々の標準ガス濃度に不確かさが与えられていなかったり、測定時の他の不確かさに比べ無視できる場合が多く、本研究でもこの項は考慮しない。

まとめると、1次検量線の逆推定から求まる濃度の不確かさは、以下のようになる。

$$U_x = \frac{1}{S} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{60} + \frac{1}{\sum w_i} + \frac{1}{S^2} \cdot \frac{(\sum w_i)y - \sum w_i y_i)^2}{(\sum w_i)^2(\sum_i w_i x_i^2) - (\sum w_i)(\sum w_i x_i)^2}} \quad (24-2)$$

式中の Σ は標準ガスに対する総和を意味する。ここでメタンの場合、上記不確かさは濃度の対数で計算されているので、濃度に戻すと推定濃度 x に対して高濃度側 (U^+) と低濃度側 (U^-) で不均等で、 $U^+ = x(e^{U_x} - 1)$ 、 $U^- = x(1 - e^{-U_x})$ となる。

③SWS-gas測定によるシステムの安定度の確認

4. (1)②の検量線の作成は、サンプルガスを挟む直近のSWS-gasの両方が正常な場合にのみ行う。ここでSWS-gasの正常性の判断方法を説明する。SWS-gasは、ポンペ1次圧0.1 MPaを下回るまで(約1週間)使用するので、この間同一濃度のガスを繰り返し導入することになる。システムが安定していれば、SWS-gasの出力電圧は連続的に変化すると考えられるが、なんらかの要因で一時的に不安定になると、前後に比べてずれた(不連続)値になると考えられる。このずれを検出するために以下の方法を採用した。まず対象のSWS-gasの出力を基準にして、4. (1)①で説明した方法で $\Delta^B(t_i)$ と $\Delta^E(t_j)$ を時間内挿し標準ガスの出力を推定する。これで検量線を作成し、対象となるSWS-gasの濃度を計算する。次に、このSWS-gasに近接する両隣のSWS-gasの出力を時間内挿し、対象とするSWS-gas測定時の出力を推定する。この推定した値を基準に、同様な手順でSWS-gasの濃度を計算する。これら2つの手順で計算された濃度の差が、CO₂では1 ppmv、CH₄では10 ppbv以上の場合は、システムが不安定と判断して、真ん中のSWS-gasを使用しない。この確認は、3つが同じガスで、濃度の計算が可能なすべてのSWS-gasに対して行なった。ただし、連続する3つのSWS-gasの導入時間内に標準ガスが導入された場合は例外として確認しない。

次に、同一のSWS-gasの推定濃度のばらつきを確認する。ここで、独立したSWS-gasの推定濃度は、標準ガスに隣接する二つのSWS-gasの出力を標準ガス2の時間に内挿した値を、3. (2)で寄与率の検証に使った検量線で推定したもののみとする。同一のSWS-gasでの測定が、1週間続いた場合は、この間に14個の推定濃度が得られるが、これらの濃度の変動幅と標準偏差(σ_{SWS})を求めた。変動幅はCO₂で5 ppmv、CH₄で20 ppbv、標準偏差はCO₂で0.5 ppmv、CH₄で6 ppbvを設定し、これを超える期間に関しては、含まれるすべてのサンプルを不採用とした。サンプル濃度算出のメソッド概要をフローチャートに示す(図10)。

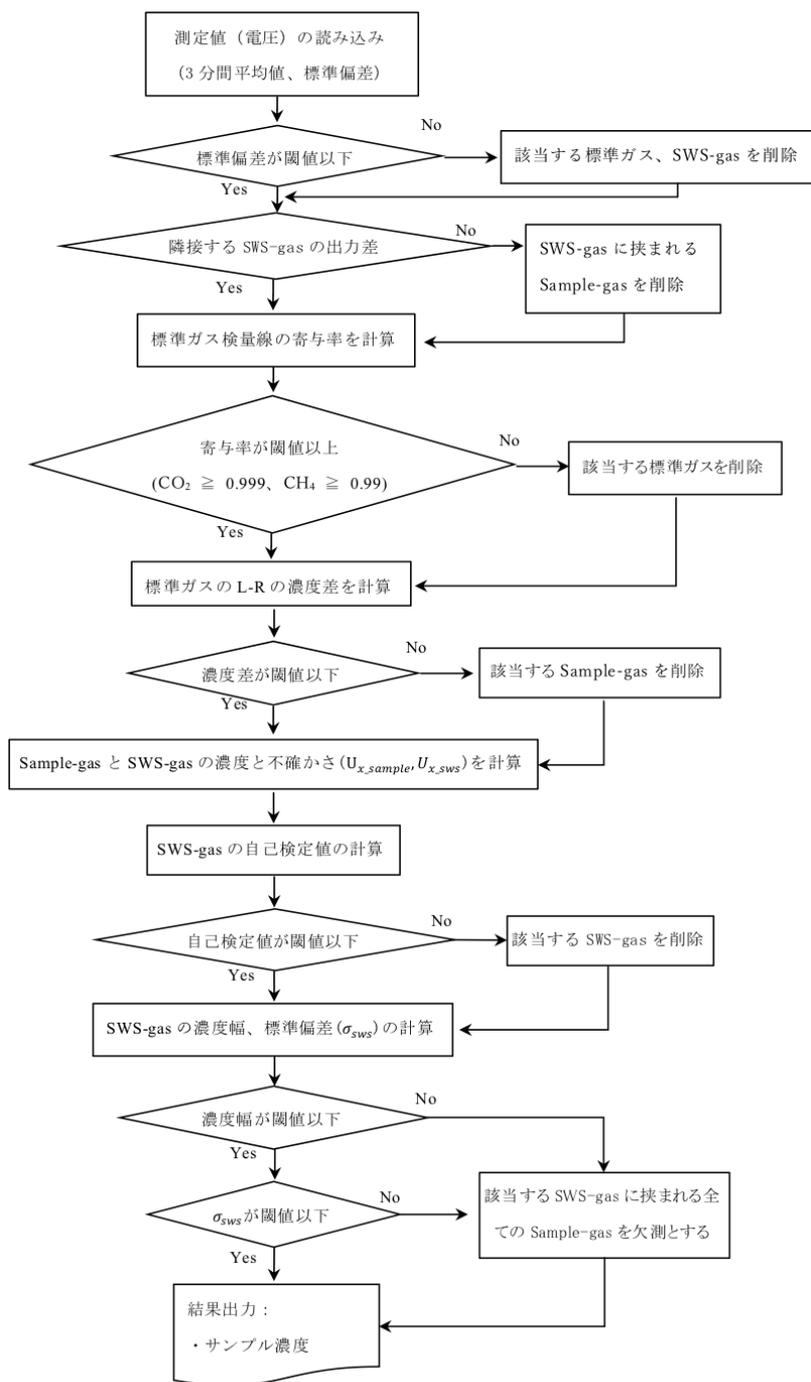


図10. 本観測システムによるサンプル濃度算出のメソッド

ここで上記のメソッドによる不確かさの時系列変化をKRSのデータを例として示す(図11)。CO₂に関しては、今まで報告されていた不確かさ(±0.3 ppmv)よりいい精度であることがわかった。またCH₄に関しても、今まで報告されていた不確かさ(±3 ppbv)より高い期間はあるが、概ねそれより精度よく測定されていることが明らかになった。この不確かさには測定電圧のばらつき(σ_y)からの寄与、つまり測定時間内(3分間)の大気の実際の変動を含むため、CO₂濃度もCH₄濃度も夏季に濃度変動が大きくなることから、不確かさもその間変動しやすくなっている。

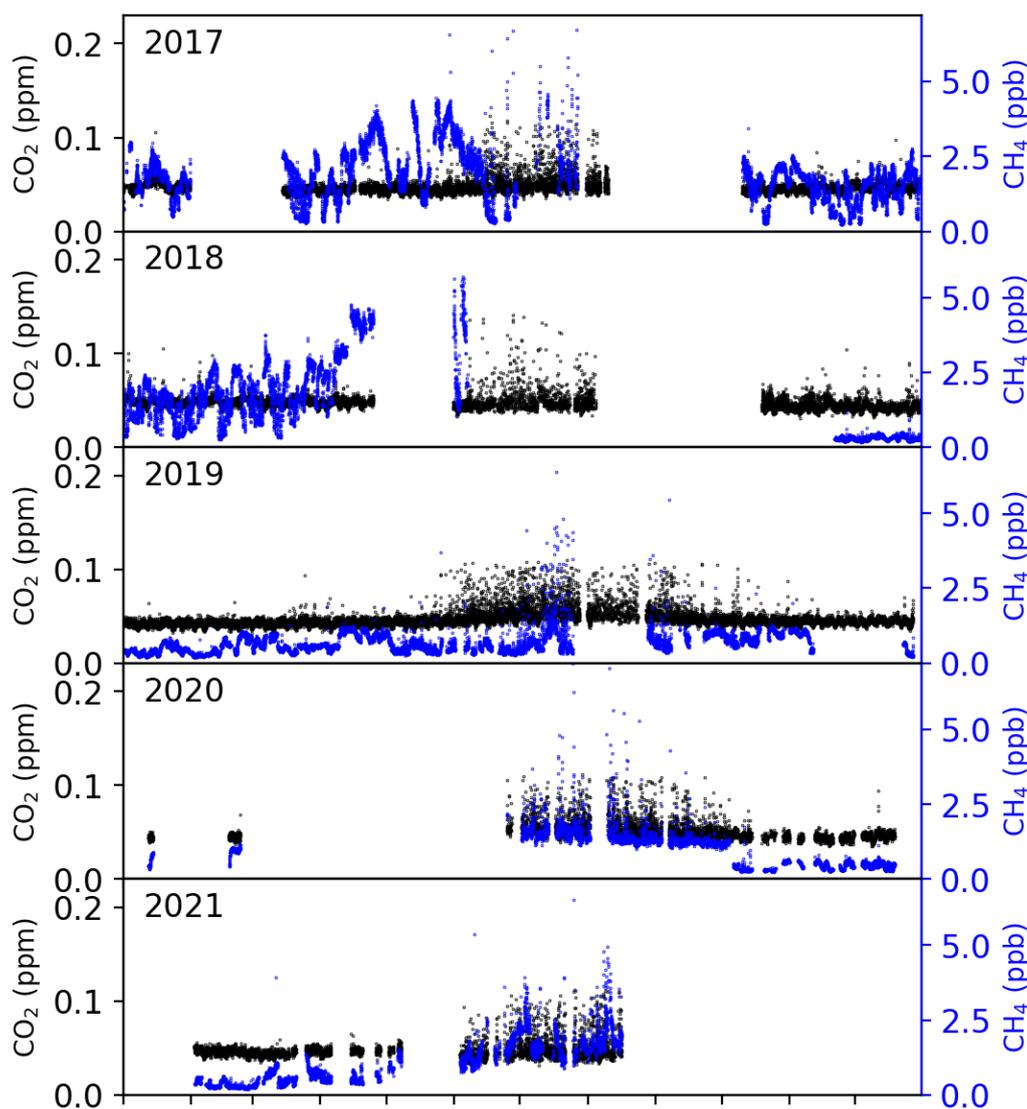


図11. KRSにおける不確かさの時系列。黒ドットがCO₂（左軸）、青ドットがCH₄（右軸）。CH₄はU⁺を示す。

(2) 従来センサーとGRDSの比較

上記のように計算した不確かさを考慮して、従来センサとGRDSの一致度を確認する。GRDSのデータは装置のアラームが表示されなくても、そのキャビティの温度が安定しない時にCO₂濃度も安定しないことがわかったので、その温度のばらつきに閾値をかけデータを抽出することで比較を行った。例としてNOYにおけるNDIRとGRDSの相関図を示す（図12）。両データには直線関係があり、よく一致している。またGRDSのCH₄濃度はキャビティ温度に敏感ではないことがわかったので、全データをSnO₂半導体センサと比較した（図13）。SnO₂半導体センサの方がGRDSよりやや高い値を示すが、ばらつきを考慮すると両センサは良い一致を示している。将来的にGRDSでの測器の置き換えが可能であることを確認できた。

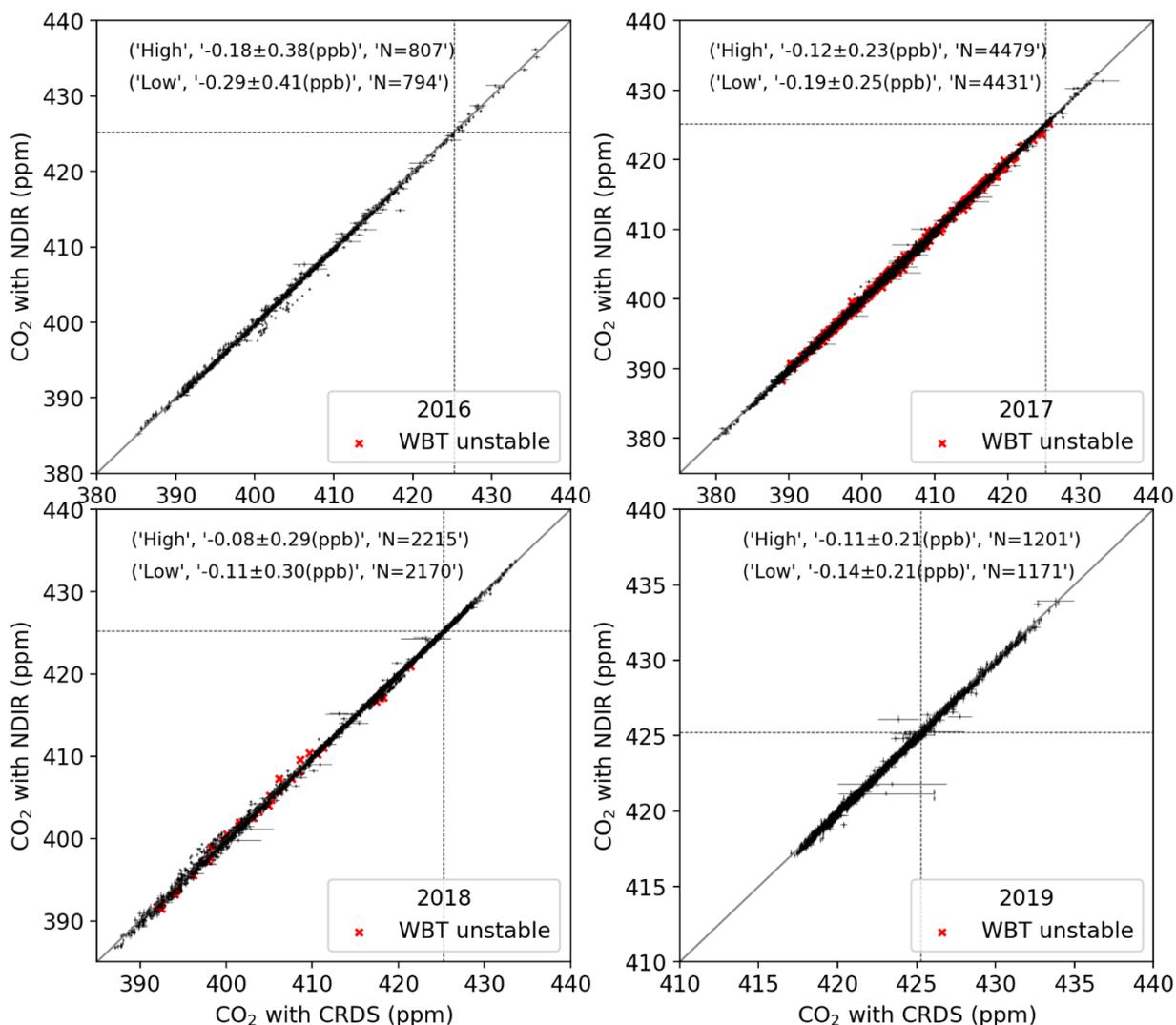


図12. NOYにおけるCRDSとNDIRによるCO₂濃度の相関図。赤バツはCRDSのキャビティ周りの温調が不安定な期間のデータ。CRDSの値は流路切り替わり前3分間のデータの平均。灰色の直線は1:1。ドット線は高濃度標準ガスの濃度。図中の数値は高度ごとのNDIRの値のCRDSの値からの差（加重平均値±標準偏差、サンプル数）。計算には温調が安定している期間で高濃度標準ガス濃度以下のデータのみを使用した。

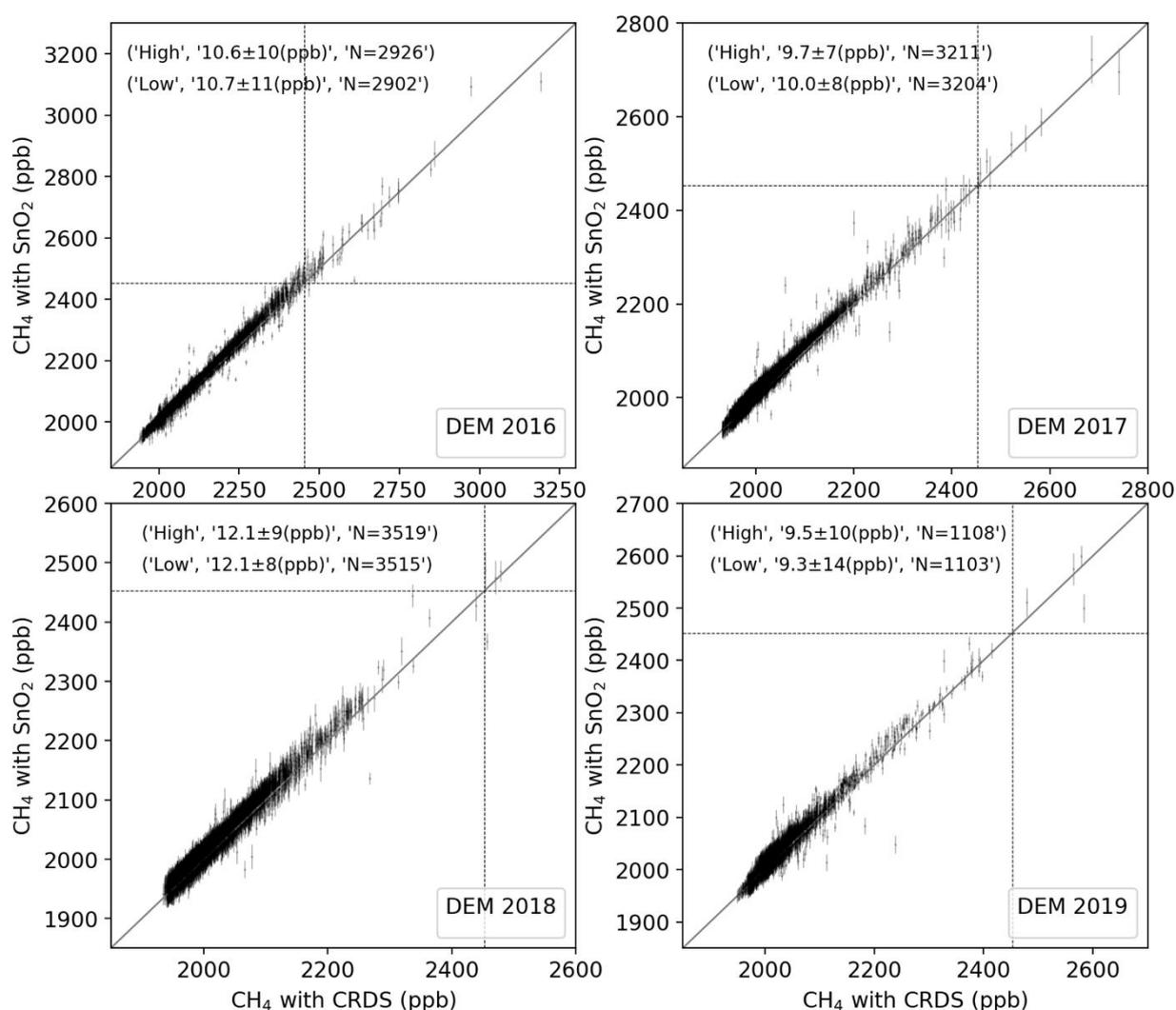


図13. DEMにおけるCRDSとSnO₂半導体センサによるCH₄濃度の相関図。CRDSの値は流路切り替わり前3分間のデータの平均。灰色の直線は1:1。ドット線は高濃度標準ガスの濃度。図中の数値は高度ごとのSnO₂半導体センサの値のCRDSの値からの差（加重平均値±標準偏差、サンプル数）。計算には高濃度標準ガス濃度以下のデータのみを使用した。

(3) CO₂とCH₄の濃度変動

JR-STATIONで、2002年から2021年にかけて観測されたCO₂濃度とCH₄濃度の1時間値を図14と図15に示す。2020年はCOVID-19パンデミックの影響で、一時期タワー観測システムのメンテナンスに行くことができなかったためシステムを停止したが、2020年夏以降再開し、その後概ね観測を継続できた。

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。さらに計算に使用したデータのCO₂濃度の最大値と最小値の差が10 ppmv以上（CH₄濃度は50 ppbv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。

観測当初よりシベリア域のCO₂濃度もCH₄濃度も、長期的な経年増加が観測されている。CO₂濃度の季節振幅は森林域のサイト（BRZ、KRS）で特に大きく、大気中CO₂濃度への陸域生態系

による影響の空間分布が見えている。CH₄濃度は中高緯度のサイト (BRZ、KRS、NOY、DEM) で西シベリア湿地帯の影響で濃度変動が非常に大きくなる。比較的継続して観測を行えたKRSにおいては、2020年、2021年は夏期に例年より高濃度CH₄が観測された。2020年はシベリアにおいて異常高温が報告されており、それに伴い西シベリア湿地帯からのCH₄放出量に大きな変化があり、その影響を捉えたのかもしれない。

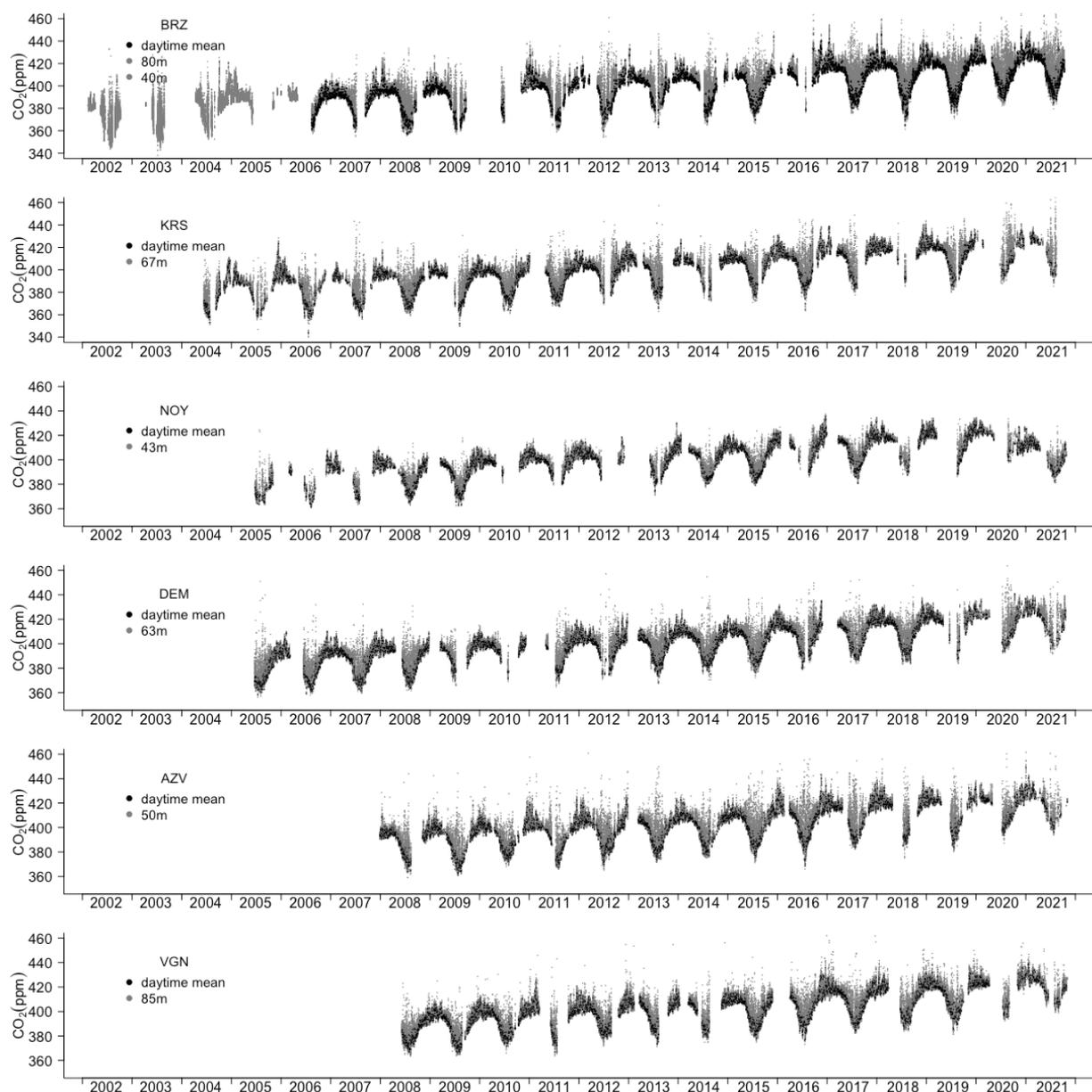


図 14. 高高度インレットで測定された CO₂ 濃度の濃度変化 (灰丸)。黒丸は日中平均値で、13:00-17:00 LST にデータ数が2つ以上 (BRZ で6分ごとに流路を切り替えていた期間は4つ以上) あり、その内の最大値と最小値の差が 10 ppmv より小さい時のみ計算。

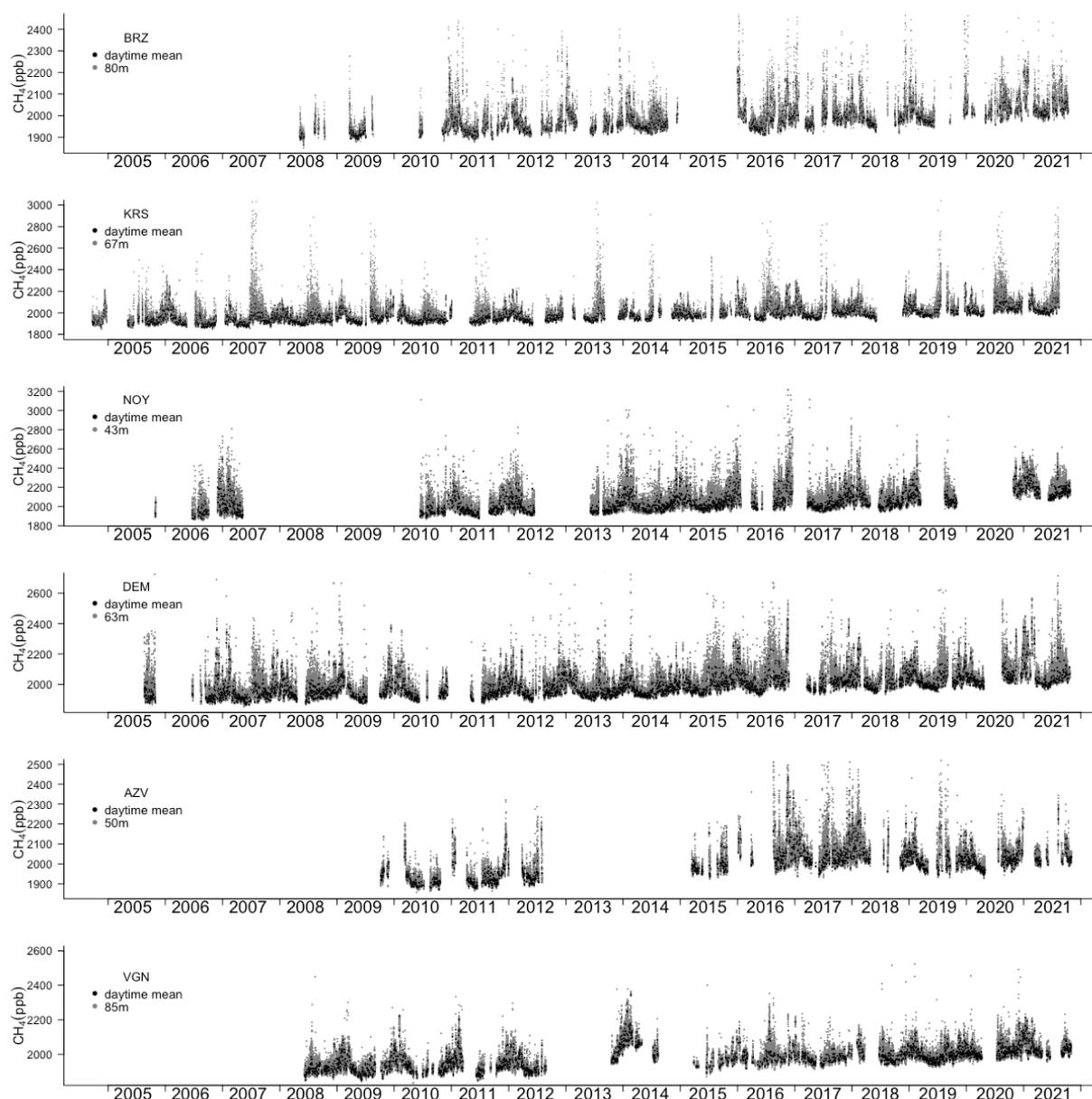


図15. 高高度インレットから測定された CH_4 濃度の濃度変化（灰丸）。黒丸は日中平均値（13:00–17:00 LST）を示している。日中平均値は、低高度と高高度インレットの濃度差が50 ppbより小さく、更にそのデータ数が2つ以上の時のみ計算。

（4）陸域生態系モデルによる陸域 CO_2 ・ CH_4 フラックスの推定

陸域生態系モデルによるシミュレーションにより、2001–2020年の期間について、北半球高緯度域の生態系は正味の CO_2 シンクと推定された。ロシア全体では $0.615 \text{ Pg C yr}^{-1}$ と推定され、これは陸域全体の約15%に相当していた。うち西シベリア低地は $0.136 \text{ Pg C yr}^{-1}$ の吸収源となっており、炭素吸収源としての重要性が示された。なお、北緯 45° 以北の陸域生態系による吸収量は $1.227 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 、 60° 以北では $0.495 \text{ Pg C yr}^{-1}$ であった。図16(a)が示すように、ユーラシアの森林帯は内陸部の乾燥域付近までが広く CO_2 吸収源となっ

ていた。内陸部と北極海沿岸の一部に放出域が見られたが、これは光合成・分解の生物的な過程ではなく、火災など攪乱に伴う放出が主要因となっていた。

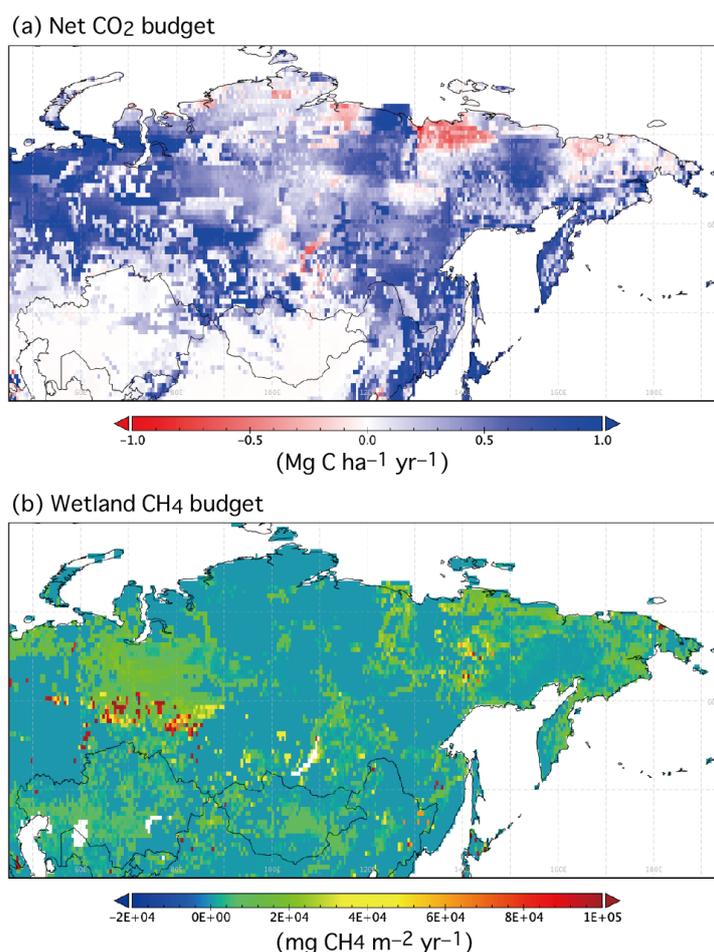


図 16. 陸域モデルで推定された陸域生態系の温室効果ガス交換。(a) 正味の年間 CO₂ 交換 (青が吸収、赤が放出)、(b) 湿原 CH₄ 放出。2001-2020 年の平均値。

同じ期間について、北半球高緯度域の湿原は CH₄ 放出源となっており、ロシア域の放出量はモデルシミュレーションでは 18.8 Tg CH₄ yr⁻¹ と推定されたが、これは陸域全体の約 12.3 % に相当していた。うち西シベリア低地による放出は 12.9 Tg CH₄ yr⁻¹ であり (ロシア全体の約 69 %)、北半球高緯度域の主要な放出源の 1 つとなっていた。図 16(b) は西シベリア低地の湿原には強い放出源が散在していることを示すが、その他にも平地の湿原や河川氾濫原に放出域が見られた。

北半球における日射、温度、降水の変動を反映して、陸域生態系の CO₂・CH₄ 交換には明瞭な季節変化が見られた (図 17、18)。ロシア及び西シベリア低地域での CO₂ 吸収のピークは 6 月に見られ、10 月から 4 月にかけては CO₂ 放出域となっていた。放出量のピークは秋季の 10 月と春季の 3 月に見られる年が多く、植生の休眠期間のうち比較的温度が高い時期に相当していた。ロシア及び西シベリア低地域での CH₄ 放出のピークは 7 月に見られ、日射量だけでなく温度や水分条件を反映して CO₂ 吸収より遅めに生じていた。気温が低下し土壌凍結によっ

て CH₄ 生成が低下する 11 月から 4 月にかけて CH₄ 放出はゼロ付近まで低下した。

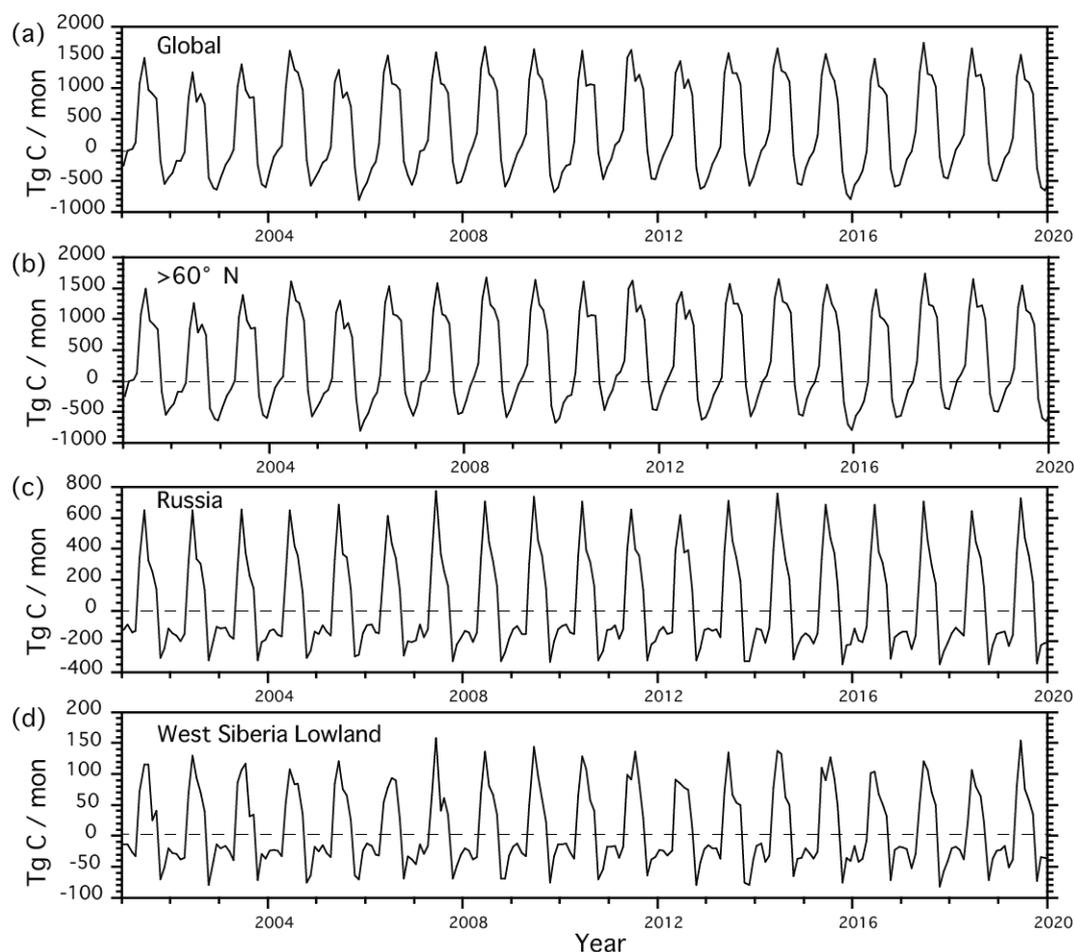


図 17. 陸域モデルで推定された陸域生態系 CO₂ 交換の時間変化。(a) グローバル、(b) 北半球高緯度域 (60° 以北)、(c) ロシア、(d) 西シベリア低地域 (北緯 50–70°、東経 60–90°)。

2001–2020 年にかけて陸域生態系の正味 CO₂ 吸収は、経年変動を示しつつも長期的に増加するトレンドが見られ (+0.063 Pg C yr⁻¹)、うち約 12 %が北緯 60° 以北の陸域生態系によるものであった。湿原 CH₄ 放出における長期トレンドは CO₂ に比べて不明瞭であり、陸域全体でも +0.17 Tg CH₄ yr⁻¹ 程度であった。西シベリア低地では 2007 年にそれまでシミュレーション期間を通じての最高値 (14.1 Tg CH₄ yr⁻¹) を示した後に若干低下した後、2010 年代にかけて再び徐々に増加する傾向があった。CO₂ 吸収の増大傾向は植生への施肥効果や温暖化に伴う生育期間の延長効果が原因と考えられており、衛星観測に基づいて示された greening 効果と整合的である。また、植生の活性化は生育期間と休眠期間の CO₂ 交換の対比をより強調し、結果的に大気 CO₂ 濃度の季節振幅拡大に寄与していることが指摘されている (Graven et al., 2013)。ここで実施されたシミュレーションにおいても、1901 年からの月別交換量を長期間比較すると、夏季の吸収ピークが増加し、秋季から春季の放出量が増加していることが再現された (図 19)。このような陸域生態系モデルによるシミュレーション結果は、定性的には観測と整合的であるが、より定量的な検証を行うことで精度を確認し必要に応じてモデル改良

を進める必要がある。

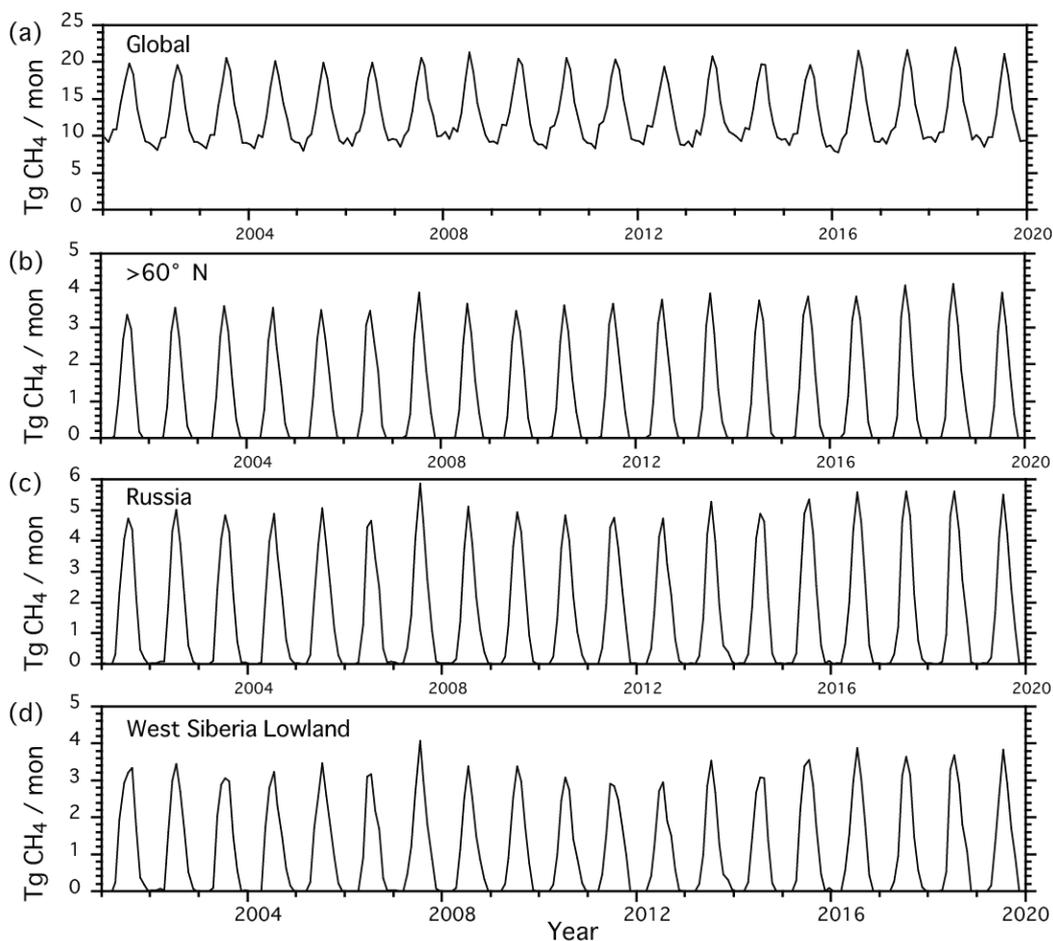


図18. 陸域モデルで推定された陸域生態系CH₄交換の時間変化。(a)グローバル、(b)北半球高緯度域 (60° 以北)、(c)ロシア、(d)西シベリア低地域

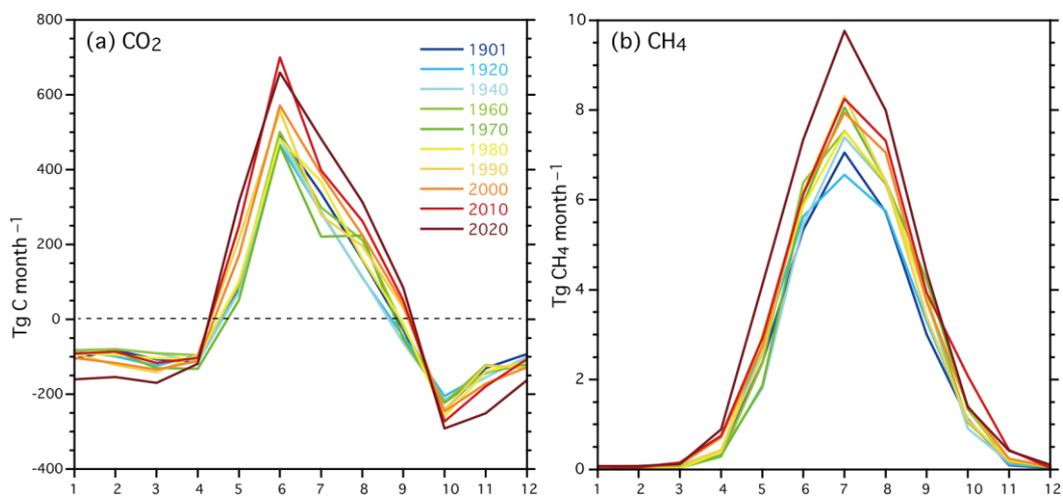


図19. 陸域生態系モデルでシミュレートされた北半球高緯度の陸域生態系における温室効果ガス交換の季節変化。(a)陸域生態系CO₂交換 (60° 以北)、(b)湿原CH₄放出 (45° 以北)

(5) 本観測値を用いたCO₂全球インバースモデル解析

観測値データセットObsPackのみを用いたインバース推定（以下、ObsPack推定）と、ObsPackに加えてJR-STATION観測値を用いたインバース推定（以下、ObsPack+JR推定）を行った。2001年から2017年まで計算したが、2001年はスピンアップ期間とし、2002年からの結果のみについて考察する。

図20に、ユーラシア亜寒帯領域（図7の領域25-28）の陸域CO₂フラックス経年変化を、図21に最適化に用いた領域単位での経年変化を示す。ユーラシア亜寒帯領域全体では、2005-2008年にはObsPack+JR推定の方がObsPack推定よりも吸収量が少なく、2009年以降はObsPack+JR推定の方が吸収量が大きい傾向が見られる。また、全体として、2009年以降の方がそれ以前の2000年代に比べ吸収量が増えているように見える。図21で、領域ごとの寄与を確認すると、相対的に前半の北西部と南東部の吸収量の寄与が大きく、いずれの領域でも後半の吸収量が増大していることがわかる。

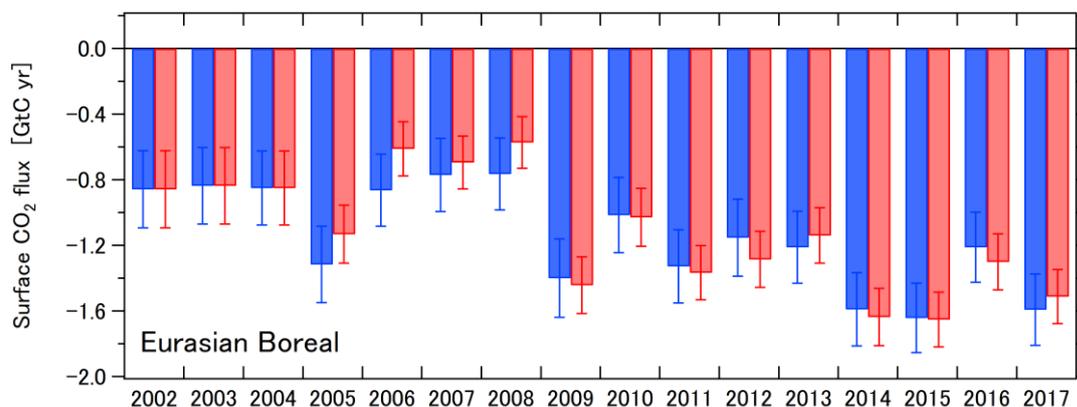


図20. ユーラシア亜寒帯領域の陸域CO₂フラックス経年変化（青：ObsPack、赤：ObsPack+JR）

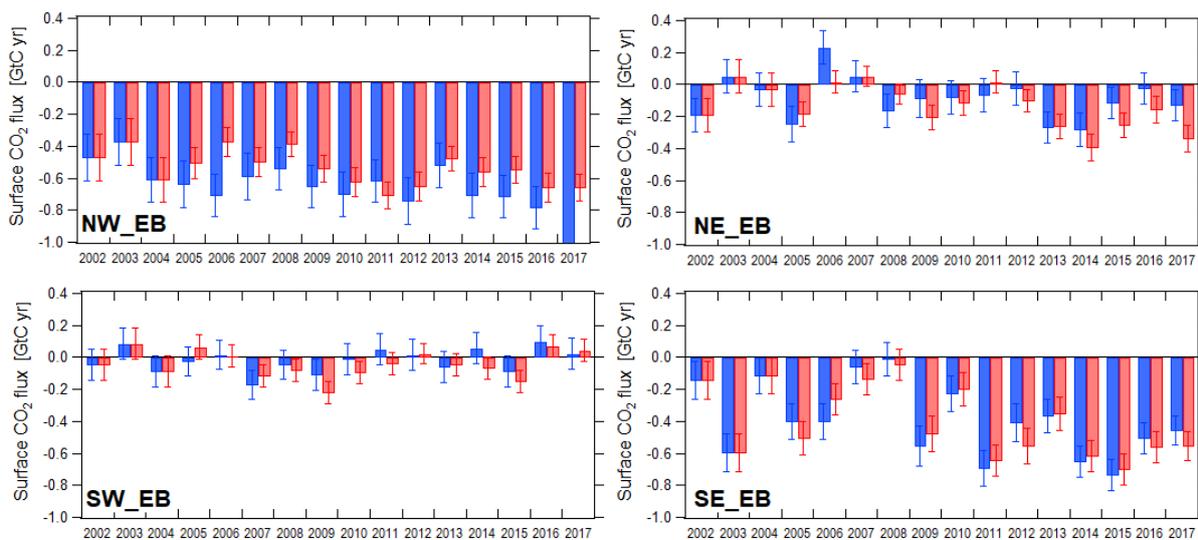


図21. ユーラシア亜寒帯領域を構成する4領域（北西NW、北東NE、南西SE、南東SE）の陸域CO₂フラックス経年変化（青：ObsPack、赤：ObsPack+JR）

2009年以降のフラックス増大傾向に対する各季節の寄与を調べるため、計算期間を2002-2008年、2009-2017年の2期間に分けて、各期間の平均的な季節変動を比較した(図22)月ごとのフラックス推定値の年によるバラつきは季節や領域により違いが見られたが、ユーラシア亜寒帯領域全体では、2009年以降の夏季の吸収増大が明確に示されたほか、春季・秋季の吸収も増えており、温暖化に伴う植物活動の活性化の早まりや、光合成と呼吸のバランスの変化が影響していると思われる(図22a)。サブ領域ごとに比較すると、夏季の吸収増加は北部領域(図22d, e)、春季と秋季の吸収増加は南東領域(図22c)においてそれぞれ顕著であることがわかった。

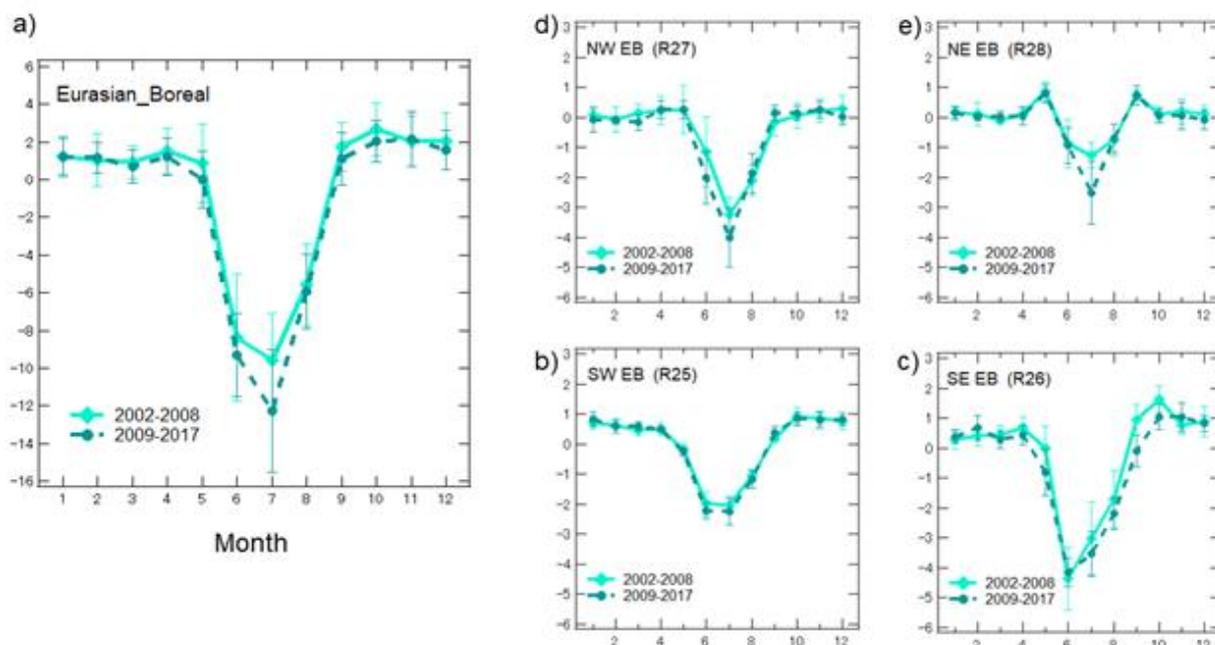


図22. シベリア観測値を用いて逆計算により推定したa)ユーラシア亜寒帯全体(EB)及び構成4領域(b)R25 c)R26 d)R27 e)R28)における月平均CO₂フラックス(GtC/month/region)(水色実線:2002-2008年の平均、緑破線:2009-2017年の平均)。エラーバーは年々変動の標準偏差(σ)を示す。

1年を3か月ずつに区切って定義した季節ごとにCO₂フラックスのアノマリー(16年平均からの偏差)を計算し、年全体で計算したアノマリーとの相関を表2に示す。ユーラシア亜寒帯領域でのCO₂フラックスの年々変動には、夏季アノマリーの寄与が大きいことが示された。夏季フラックスの寄与は特に北部領域で顕著であることがわかった。

表 2. ユーラシア亜寒帯の 4 領域 (R25-28) について推定したCO₂フラックスの季節ごと (MAM: 3-5月、JJA: 6-8月、SON: 9-11月、DJF:12-1月) のアノマリー (16年平均からの偏差) と年ごとのアノマリーとの相関係数 (R²)

Region				R27				R28			
MAM	JJA	SON	DJF	0.06	0.52	0.05	0.18	0.01	0.63	0.06	0.26
				R25				R26			
				0.00	0.43	0.62	0.15	0.48	0.60	0.47	0.01

これを踏まえ、ユーラシア亜寒帯領域でのCO₂フラックスの2002-2017年の16年間にわたる長期トレンドを解釈するため、夏季の3か月間に注目して、NDVI、地表面気温、降水量の3つの気象要素について同期間のアノマリーのトレンドを調べた。(図23)。ユーラシア亜寒帯領域全体としては、2002-2017年の16年間において、年ごとの変動はありつつも、夏季のCO₂吸収には増加傾向が見られた(図23a)。特に2011年以降の増加が顕著であった。比較した3物理量のうち、NDVIは、16年の間に著しく増加していた他、地表面温度も予想通り増加傾向が見られた。降水量については、年々変動が大きく、長期トレンドは不明瞭であったが、2010年以降は2012年を除き降水量は多めであり、この期間、植生活動の妨げになり得る干ばつが起こりにくい条件だったことが示唆された。

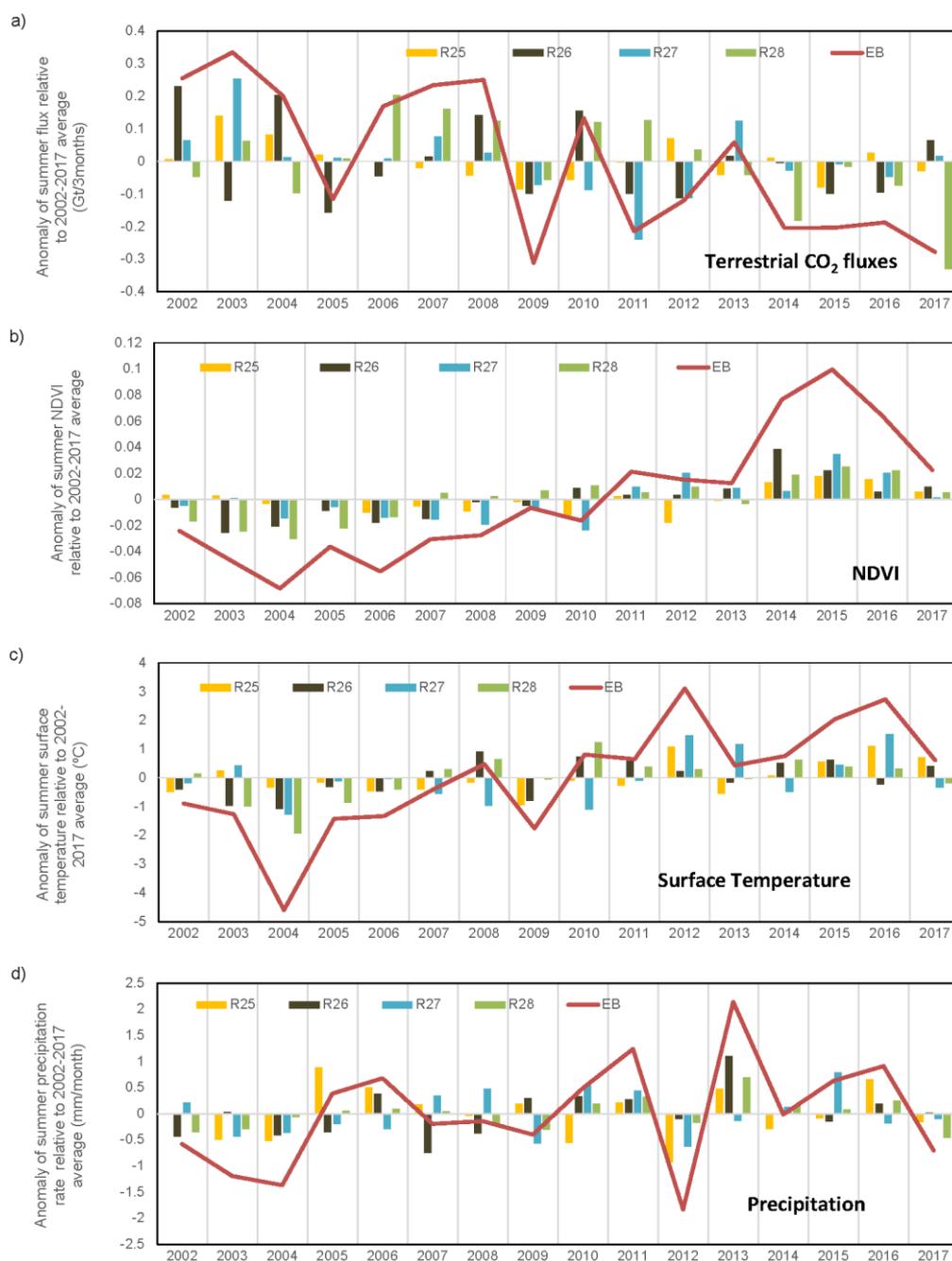


図23. ユーラシア亜寒帯全体 (EB) 及び構成 4 領域 (R25-28) における、2002-2017年夏季の a) 陸域CO₂フラックス (ObsPack+JRによる推定値)、b) NDVI、c) 地表面温度、d) 降水量の16年平均に対するアノマリー。(赤実線 : EB、棒グラフ・黄 : R25、深緑 : R26、水色 : R27、黄緑 : R28)

明確な増加トレンドが見られた夏季のNDVIについて、増加の地理的分布を確かめるため、2009-2017年の平均値から2002-2008年の平均値を差し引き、2002-2017年の平均値に対する変化率(%)を $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ グリッドで表示した(図24a)。これによるとNDVIの増加は、ユーラシア亜寒帯の4領域(R25-28)内では、主に北部で顕著であったことがわかる。図24bには、同様に

して2002-2008年から2009-2017年へのCO₂夏季フラックスの増加（%）を領域ごとに示した。G ELCAで推定された夏季の陸域CO₂フラックスの増加率もNDVIと同様、北部、特に北東域で高くなっており、これらの領域から植生分布の増加や光合成の活性化が、この期間の夏季のCO₂吸収増加トレンドに寄与したことが示された。

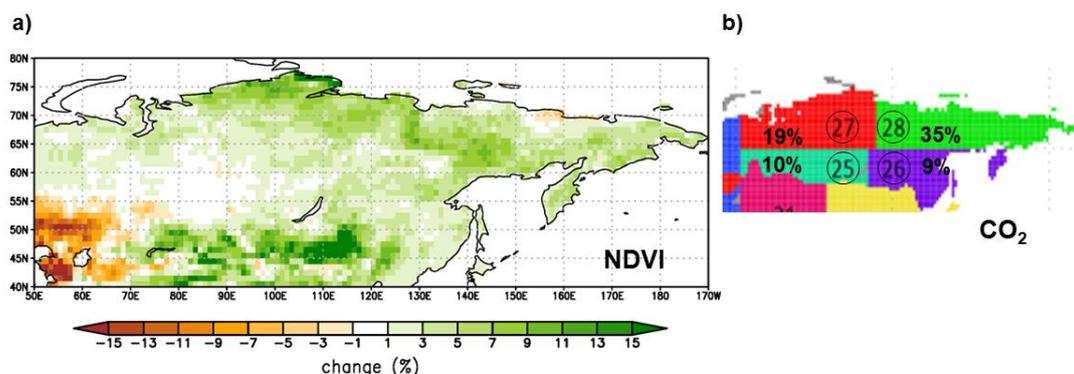


図24. 夏季（6-9月）におけるNDVI (a) 及び陸域CO₂フラックス (b) の増加率（%）。2009-2017年の平均値から2002-2008年の平均値を差し引き、2002-2017年の平均値に対する変化率（%）として示した（丸囲みは領域番号）

（6）本観測値を用いたCH₄全球インバースモデル解析結果

CH₄全球インバースモデルを用いて、JR-STATION観測値のCH₄放出量推定への影響、及び西シベリアCH₄放出量の時空間変動の解析を実施した。計算期間は1999年から2017年で、基準ケースとしてWDCGGの全球観測値データベースでインバース推定（以下、WDCGG推定）を行い、実験ケースとして2005年からWDCGGにJR-STATION観測値を加えたインバース推定（以下、WDCGG+JR推定）を行った。図25にWDCGG推定とWDCGG+JR推定の平均的なフラックス空間分布の違いを示す。JR-STATION観測値の影響は、JR-STATIONが設置されている西シベリア2領域（図7の領域25、27）と隣接する領域に主に限定され、西シベリアのCH₄放出増加（+1.26 Tg/yr, 7.7%）を示した。一方、全球放出量の均衡として、東・南アジア、北米ではCH₄放出減少となった。

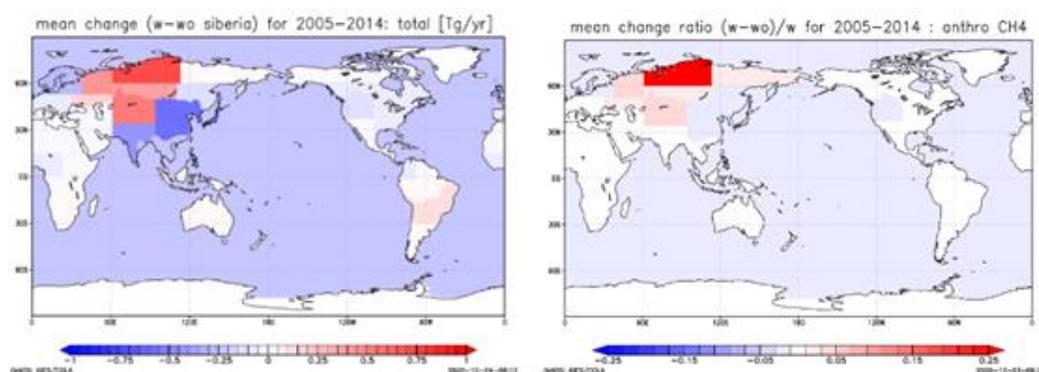


図25. JR-STATION観測値追加によるCH₄フラックス推定への影響。（左）全フラックスの差（WDCGG+JR推定 - WDCGG推定）[Tg/year]、（右）WDCGG推定領域フラックスへの相対変化[%]。正值は放出量増加、負値は放出量減少を示す。10年間平均値（2005-2014年）。

西シベリアの主なCH₄放出源は、人為起源（天然ガス・石油等）及び湿原である。図26に示すように、WDCGG+JR推定の西シベリアのCH₄放出増加は、主に夏の湿原CH₄放出増加に起因し、さらに、西シベリア北部では、顕著な冬季の人為起源CH₄放出増加を示した。人為起源CH₄フラックスの季節変化については不確かさが大きく、湿原起源との分離も含め、検証して行く必要がある。

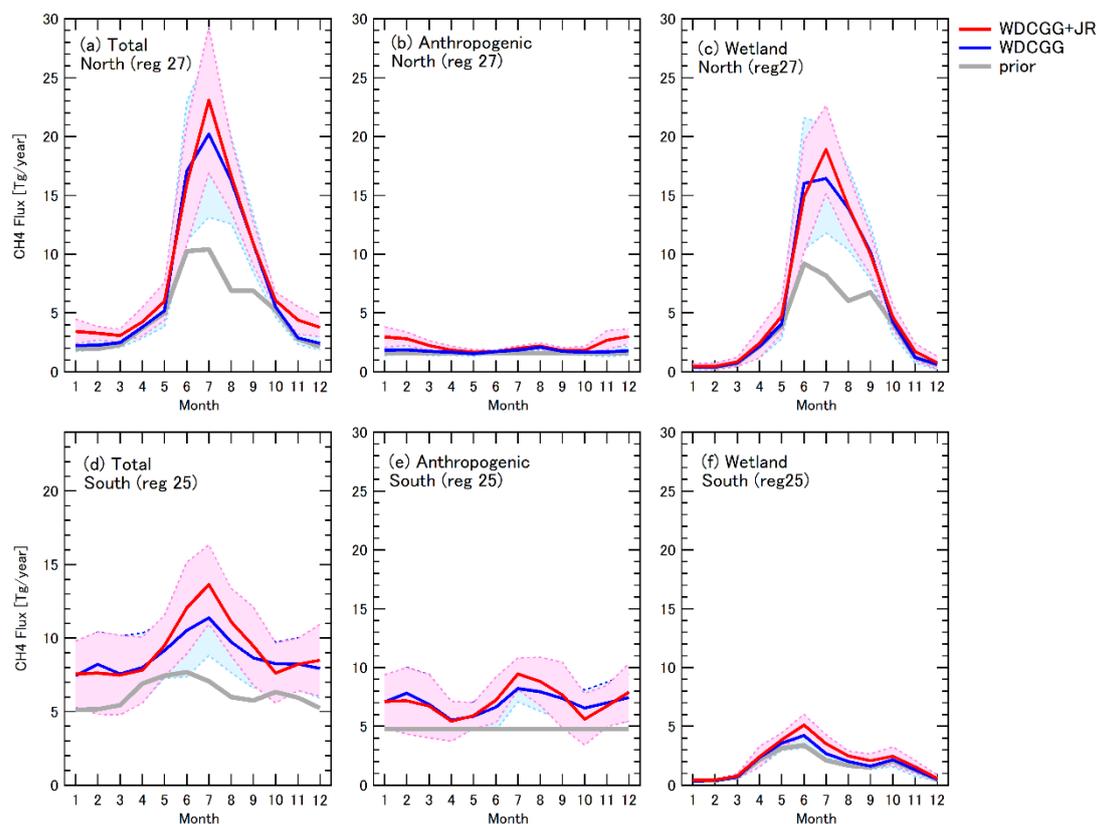


図26. 推定された西シベリアCH₄放出量の平均的季節変化。(a)–(c), (d)–(f)は、北部（領域27）と南部（領域25）を示す。左から右へ、全フラックス、人為起源、湿原起源。赤実線と赤影はWDCGG+JR推定の平均値及びその不確かさ（標準偏差）を示す。同様に、青実線と青影はWDCGG推定による。

5. 成果

・ COVID-19の影響で、2020年の一時期、全サイトで観測システムを停止しなければならなかったが、その後はJR-STATIONを用いてCO₂濃度とCH₄濃度の連続測定を継続することができ、20年近くに及ぶ貴重なデータを得ることができた。これらのデータは本報告書内で示す解析に使用された他、本研究分野で国際的に利用が進んでいる。

・ 現場の大気を使用することで標準ガスを節約する本観測システム独自の測定シーケンスに従い、各データに不確かさを導出する方法を新たに確立した。

・ CRDSを本観測システムに組み込む方法を検討し、従来センサとの比較を行い、良い一致が見られた。今後もCRDSによる装置の更新を行う見通しが立てられ、更なる長期観測を行う体制を整えた。

・陸域生態系モデルによるシミュレーションにより、2001-2020年の期間について、北半球高緯度域の生態系は正味のCO₂シンクと推定された。ロシア全体での吸収量は0.615 Pg C yr⁻¹と推定され、これは陸域全体の約15%に相当していた。うち西シベリア低地は0.136 Pg C yr⁻¹の吸収源となっており、炭素吸収源としての当該地域の重要性が示された。またこの吸収は、経年変動を示しつつも長期的に増加するトレンドが見られ(+0.063 Pg C yr⁻¹)、うち約12%が北緯60°以北の陸域生態系によるものであった。

・陸域生態系モデルによるCH₄に関しては、北半球高緯度域の湿原が放出源となっており、ロシア域の放出量はモデルシミュレーションでは18.8 Tg CH₄ yr⁻¹と推定されたが、これは陸域全体の約12.3%に相当していた。うち西シベリア低地による放出は12.9 Tg CH₄ yr⁻¹であり(ロシア全体の約69%)、北半球高緯度域の主要な放出源の1つとなっていた。西シベリア低地では2007年にシミュレーション期間を通じての最高値(14.1 Tg CH₄ yr⁻¹)を示した後若干低下した後、2010年代にかけて再び徐々に増加する傾向があった。

・本観測で得られたCO₂濃度を利用して全球インバース解析を行い、ユーラシア大陸高緯度域のCO₂フラックスを推定した。その結果、ユーラシア亜寒帯領域全体として、2002-2017年の16年間におけるトレンドとして、夏季のCO₂吸収に増加傾向が見られた。NDVI・地表面温度・降水量との比較により、特にシベリア北部でNDVIの有意な増大が見られており、地球温暖化及び施肥効果による植生活動の活発化が、夏季のCO₂吸収増加トレンドに寄与したことが示唆された。

・同様なインバース解析によるCH₄フラックスについては、JR-STATION観測値を用いた推定では、西シベリア領域においてCH₄放出量が大きく見積もられた。このことは本観測データが存在しないと西シベリア湿地からの放出量が小さく見積もられてしまうことを示しており、本観測は全球のより正しいフラックス推定に有意に貢献していることが確認された。

・2018年までのCO₂濃度とCH₄濃度データの品質確認を行い、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>)を通して公開した。2019年のデータも品質確認は終わり近日中に公開予定である。2020年以降のデータに関しては、プレリミナリーデータとして直接要望があった場合に提供した。

6. 引用文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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. Crotwell, 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.

- 4) 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*, 62B, 403-416.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) <https://www.esa-landcover-cci.org/>
- 13) Watai, T., Machida, T., Shimoyama, K., Krasnov, O., Yamamoto, M., Inoue, G. (2010), Development of atmospheric carbon dioxide standard gas saving system and its application to a measurement at a site in West Siberian forest, *J. Atmos. Ocean. Tech.* 27, 843-855.
- 14) Suto, H. and Inoue, G. (2010), A new portable instrument for in-situ measurement

- t of atmospheric methane mole fraction by applying an improved tin-dioxide based gas sensor, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, doi:10.1175/2010JTECHA1400.1.
- 15) 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.
 - 16) Zhou, L.X., Kitzis, D. and Tans, P.P. (2009) Report of the fourth WMO round-robin in 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.
 - 17) Shirai, T., Ishizawa M., Zhuravlev R., Ganshin A., Belikov D., Saito M., Oda T., Valsala V., Gomez-Pelaez A. J., Langenfelds R., Maksyutov S (2017), A decadal inversion of CO₂ using the Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model (GELCA): sensitivity to the ground-based observation network, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 69:1, 1291158, DOI: 10.1080/16000889.2017.1291158.
 - 18) Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi (2015), The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
 - 19) Harada, Y., H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, S. Kobayashi, Y. Ota, H. Onoda, K. Onogi, K. Miyaoka, and K. Takahashi (2016), The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability, *J. Meteor. Soc. Japan*, 94, 269-302, doi:10.2151/jmsj.2016-015.
 - 20) Inatomi, M, Ito A, Ishijima K, Murayama S (2010) Greenhouse gas budget of a cool temperate deciduous broadleaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems* 13:472-483.
 - 21) Ito, A (2010) Changing ecophysiological processes and carbon budget in East Asian ecosystems under nearfuture changes in climate: implications for long-term monitoring from a process-based model. *J Plant Res.*, 123:577-588.
 - 22) Graven, H. D. *et al.* (2013) Enhanced seasonal exchange of CO₂ by northern ecosystems since 1960. *Science* 341, 1085-1089, doi:10.1126/science.1239207.
 - 23) Valsala V., S. Maksyutov and M. Ikeda (2008) Design and validation of an offline Oceanic Tracer Transport Model for Carbon Cycle Study, *J. Climate*, Vol. 21, 2752-2769.
 - 24) Oda, T. and Maksyutov, S. (2011) A very high-resolution (1 km x 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 543-556, doi:10.5194/acp-11-543-2011.

- 25) Kaiser, J. W., Heil A., Andreae M. O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L., Morcrette J.-J., Razinger M., Schultz M. G., Suttie M., and van der Werf G. R. (2012) Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences* 9, 527-554.
- 26) Cooperative Global Atmospheric Data Integration Project. (2017). Multi-laboratory compilation of atmospheric carbon dioxide data for the period 1957–2016; obs pack_CO2_1_GLOBALVIEWplus_v3.2_2017-11-02 [Data set]. NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division. <https://doi.org/10.15138/G3704H>
- 27) Nakazawa, T., Ishizawa, M., Higuchi, K., and Trivett, N. B. A. (1997) Two curve fitting methods applied to CO₂ flask data, *Environmetrics*, 8, 197-218, 1997.
- 28) Walter BP, Heimann M (2000) A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: application to five wetlands sites, sensitivity to model parameters, and climate. *Global Biogeochem Cycles* 14: 745–765.
- 29) Ito A (2019) Methane emission from pan-Arctic natural wetlands estimated using a process-based model, 1901-2016. *Polar Science* 21: 26-36. DOI: 10.1016/j.polar.2018.12.001
- 30) GAW Report No.242 (2017) 19th WMO/IAEA meeting on carbon dioxide, other greenhouse gases and related measurement techniques (GGMT-2017)

[研究成果の発表状況] (課題開始年度—令和3年度)

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Wang J. S., Kawa S. R., Collatz G. J., Sasakawa M., Gatti L. V., Machida T., Liu Y., Manyin M. E. (2018) A global synthesis inversion analysis of recent variability in CO₂ fluxes using GOSAT and in situ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18 (15)
- ② Groot Zwaaftink C. D., Henne S., Thompson R. L., Dlugokencky E. J., Machida T., Paris J. D., Sasakawa M., Segers A., Sweeney C., Stohl A. (2018) Three-dimensional methane distribution simulated with FLEXPART 8-CTM-1.1 constrained with observation data. *Geoscientific Model Development*, 11 (11), 4469–4487
- ③ Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A., Sasakawa M., Machida T. (2019) Analysis of the Diurnal, Weekly, and Seasonal Cycles and Annual Trends in Atmospheric CO₂ and CH₄ at Tower Network in Siberia from 2005 to 2016. *Atmosphere*, 10 (11)
- ④ Wang F., Maksyutov S., Tsuruta A., Janardanan achari R., Ito A., Sasakawa M., Machida T., Morino I., Yoshida Y., Kaiser J. W., Janssens-Maenhout G., Dlugokencky E. J., Mammarella I., Lavric J. V., Matsunaga T. (2019) Methane Emission Estimates by the Global High-Resolution Inverse Model Using National Inventories. *Remote Sensing*, 11 (21) (2489)

- ⑤ Janardanan achari R., Maksyutov S., Tsuruta A., Wang F., Tiwari Y.K., Valsala V., Ito A., Yoshida Y., Kaiser J.W., Janssens–Maenhout G., Arshinov M., Sasakawa M., Tohjima Y., Worthy D.E.J., Dlugokencky E.J., Ramonet M., Arduini J., Lavric J.V., Piacentino S., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Mammarella I., Matsunaga T. (2019) Country–Scale Analysis of Methane Emissions with a High–Resolution Inverse Model Using GOSAT and Surface Observations. *Remote Sensing*, 12(3) (375)
- ⑥ Lin X., Rogers B.M., Sweeney C., Chevallier F., Arshinov M., Dlugokencky E., Machida T., Sasakawa M., Tans P., Keppel–Aleks G. (2020) Siberian and temperate ecosystems shape Northern Hemisphere atmospheric CO₂ seasonal amplification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1–9
- ⑦ Ito A (2021) Bottom–up evaluation of the regional methane budget of northern lands from 1980 to 2015. *Polar Science*, 27, 100558, doi:10.1016/j.polar.2020.100558.

(2) 口頭発表

- ① Sasakawa M., Machida T., Ito A., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2017) Continuous measurement of CO₂ and CH₄ concentration from a tower network (JR–STATION) over Siberia. JpGU–AGU Joint Meeting 2017, Abstracts, (AAS11–P05)
- ② Sasakawa M., Machida T., Ito A., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2017) Continuous measurement of CO₂ and CH₄ concentration from a tower network (JR–STATION) over Siberia. 10th International Carbon Dioxide Conference, ICD C 10 Abstracts, 99
- ③ Sasakawa M., Tsuda N., Machida T., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2018) Working standard gas saving system for in–situ CO₂ and CH₄ measurements and calculation method for concentrations and uncertainty. JpGU–AGU Joint Meeting 2018, Abstracts, (AAS06–P03)
- ④ Belan B.D. , Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Kozlov A., Machida T., Sasakawa M., Paris J.D. (2018) Fofonovaya Observatory for comprehensive atmospheric monitoring in West Siberia: current status and future needs. EGU General Assembly 2018, Geophysical Research Abstracts, 20(6183–1)
- ⑤ Zwaafink C.G., Henne S., Thompson R., Machida T., Paris J.D., Sasakawa M., Sengers A., Sweeney C., Stohl A. (2018) Three–dimensional concentration fields of methane simulated with a Lagrangian model nudged with observation data. EGU General Assembly 2018, Geophysical Research Abstracts, 20(13946)
- ⑥ Niwa Y., Ito A., Machida T., Sasakawa M., Tohjima Y., Terao Y., Umezawa T., Morimoto S., Aoki S., Sawa Y., Tsuboi K., Matsueda H., Dlugokencky E., Harth C.,

- Krummel P.B., Langenfelds R.L., Loh Z.M., Muhle J., O' Doherty S., Prinn R. G., Ramonet M., Salameh P., Sweeney C., Weiss R., Young D., Castaldi S., Noce S., Saunio M., Stavert A.R. (2019) Global inverse analysis of CH₄ fluxes using NICAM-TM 4D-Var. 日本地球惑星科学連合2019年大会
- ⑦ Sasakawa M., Tsuda N., Machida T., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2019) Working standard gas saving system for in-situ CO₂ and CH₄ measurements and calculation method for concentrations and uncertainty. 8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG8)
- ⑧ Tsuruta A., Maksyutov S., Janardanan achari R., Ito A., KAISER J., Maenhout G. J., Dlugokencky E., Sasakawa M., Machida T., Matsunaga T. (2019) Global high spatial resolution methane atmospheric inverse model NIES-TMFLEXPART- var. 8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG8)
- ⑨ Maksyutov S., Tsuruta A., Janardanan achari R., Ito A., KAISER J., Maenhout G. J., Dlugokencky E., Sasakawa M., Machida T., Yoshida Y., Matsunaga T. (2019) Inverse modeling of anthropogenic methane emissions based on ground-based monitoring and GOSAT satellite retrievals. 8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG8)
- ⑩ Sasakawa M., Tsuda N., Machida T., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A. (2019) Working standard gas saving system for in situ CO₂ and CH₄ measurements and calculation method for concentrations and their uncertainty. GGMT2019
- ⑪ Sasakawa M., Wang F., Tsuruta A., Maksyutov S., Janardanan achari R., Ito A., Janssens-Maenhout G., Dlugokencky E.J., Arshinov M., Krasnov O., Kaiser J.W., Matsunaga T., Machida T. (2019) Top-down estimates of methane emissions in Russia using regional tower network observations. AGU Fall Meeting2019
- ⑫ Wang F., Maksyutov S., Tsuruta A., Janardanan achari R., Ito A., Sasakawa M., Morino I., Yoshida Y., Kaiser J.W., Janssens-Maenhout G.G.A., Dlugokencky E. J., Matsunaga T. (2019) Inversion estimates of regional methane emissions and its trends in 2010-2017 by a global high-resolution model. American Geophysical Union Fall Meeting 2019
- ⑬ Wang F., Tsuruta A., Maksyutov S., Janardanan achari R., Ito A., Sasakawa M., Machida T., Morino I., Yoshida Y., Kaiser J.W., Janssens-Maenhout G., Dlugokencky E., Matsunaga T. (2019) Comparing national methane emissions inventories with estimates by the global high-resolution inverse model. The 15th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Abstract Collection, 103
- ⑭ Fukuda Y., Wada C., Tsukada Y., Zeng J., Shirai T. (2020) Activities toward research data management at NIES/CGER. JpGU - AGU Joint Meeting 2020.
- ⑮ Fukuda Y., Shirai T. (2020) Activities towards Open Data and Research Data Management at NIES/CGER. International Symposium on Data Science 2020

- ⑩ Wittig S., Berchet A., Paris Jean-Daniel., Arshinov M., Machida T., Sasakawa M., Worthy D., Pison I. (2020) Assessment of CH₄ sources in the Arctic using regional atmospheric measurements and their link to surface emissions. EGU General Assembly 2020
- ⑪ Maksyutov S., Sasakawa M., Janardanan achari R., Wang F., Tsuruta A., Terenteva I., Sabrekov A., Glagolev M., Machida T., Arshinov M., Davydov D., Krasnov O., Belan B., Dlugokencky E., Lavric J.V., Ito A., Janssens-Maenhout G., Kaiser J., Yoshida Y., Matsunaga T. (2020) Natural and anthropogenic methane emissions in West Siberia estimated using a wetland inventory, GOSAT and a regional tower network. 22nd EGU General Assembly
- ⑫ Shirai T., Misa I., Sasakawa M., Ito A., Machida T., Maksyutov S. (2020) Top-down estimation of surface terrestrial CO₂ flux in Northern Eurasia. [JpGU-AGU Joint Meeting 2020.]
- ⑬ 町田敏暢, 遠嶋康徳, 梅澤拓, 寺尾有希夫, 野村渉平, 笹川基樹, 丹羽洋介, 坪井一寛, 石島健太郎, 松枝秀和, 澤庸介, 向井人史 (2020) 大気中の温室効果ガス観測から推定する放出源変動. 第432回生存圏シンポジウム 第14回生存圏フォーラム特別講演会「ポストコロナ時代の生存圏科学」
- ⑭ 梅澤拓, 遠嶋康徳, 野村渉平, 西橋政秀, 寺尾有希夫, 向井人史, 中岡慎一郎, 笹川基樹, 町田敏暢, MUELLER Astrid, 奈良英樹, 杉田考史, 谷本浩志, 丹羽洋介, 伊藤昭彦, 大山博史, 森野勇, 佐伯田鶴, 野田響, 齊藤誠, 松永恒雄 (2021) 全球メタン濃度の2020年の急増加の原因を探る-NIES観測ネットワークによるメタン濃度の時空間変動の解析-. 第26回大気化学討論会, 同予稿集
- ⑮ Maksyutov S., Sasakawa M., Machida T., Oda T., Zeng J., Matsunaga T., Kaiser J.W., Arshinov M., Belan B., Dlugokencky E. (2021) Evaluation of a revised global high-resolution inverse model with CO₂ observations over Siberia.. Japan Geoscience Union Meeting 2021

(3) 出願特許

なし。

(4) 受賞等

なし。

(5) 一般への公表・報道等

2017年、2018年の4月に行われた国立環境研究所「春の環境講座」と、2017-2019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。

(6) 研究分野における成果の発展・牽引

ロシアの機関以外で、ロシア国内の温室効果ガスの継続的な観測を行うことができるのは、国立環境研究所が唯一であるため、データの提供を通して、本研究分野で国際的に大きな貢献を行っている。データは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>) を通して公開している。年度ごとに以下のダウンロード数があった；2017年度：63、2018年度：106、2019年度：43、2020年度：52、2021年度：42。ここではアクセス元をユーザーIDで区別し、同じIDから24時間以内のダウンロードはカウントしていない。直接問い合わせのあった大学・研究所は以下である；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)、NASA Goddard Space Flight Center (アメリカ)。全球のCO₂フラックスのインバース解析プログラム (CarbonTracker) の2019年版 (https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/CT2019_doc.php) (2020/5/27リリース) にJR-STATIONの2017年までのCO₂データが使用されている。CarbonTrackerはアメリカのNOAAが中心になり数年ごとに行っているプログラムで、2017年版からJR-STATIONのデータが使用されている。

(7) 政策への寄与・貢献

「GEOSS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、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、シベリアにおける温室効果ガスの観測は国立環境研究所が1990年代に世界に先駆けて取り組んできた研究である。本研究はこの分野における日本の存在感を高めることに貢献し、我が国の独自性を示しリーダーシップを発揮している。ロシアでは国外研究者の観測活動に年々厳しい制限がかかり、新たな観測研究の展開は非常に難しいという点で、本課題の観測を実施し長期データを蓄積することは世界の温室効果ガス観測網の中での日本の役割として極めて重要である。

「第5期科学技術基本計画」(平成28年1月22日)の“第3章 経済・社会課題への対応 (3) 地球規模課題への対応と世界の発展への貢献 ①地球規模の気候変動への対応”で、“気候変動の監視のため、人工衛星、レーダ、センサー等による地球環境の継続的観測や、…気候変動メカニズムの解明を進め、全球地球観測システムの構築に貢献する”とあり、本研究はこの内容にも合致する。また“北極域観測技術の開発を含めた観測・研究…を行う”とあり、周北極域であるシベリア域での本研究は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。

「環境研究・環境技術開発の推進戦略」（令和元年5月21日）の第3章（今後5年間で取り組むべき環境分野の研究・技術開発）の2.（重点的に取り組むべき課題（重点課題）の具体的な内容）の(2)気候変動領域の重点課題⑨【地球温暖化現象の解明・予測・対策評価】には、“国際的な環境協力等にも資する地球温暖化現象の「解明」、「予測」、「対策評価」に焦点を当てた研究が必要とされている。”と述べられている。本研究はこの重点課題に該当するものである。

「今後10年の我が国の地球観測の実施方針のフォローアップ報告書」（令和2年8月28日）の“3-2 観測及び観測・予測データ利活用の課題解決等に向けた主な取組と課題”には“雪氷圏や極域においては…短寿命気候強制因子（SLCF）の現場観測の密度が不足しており、現場観測の拡充も望まれている。”とあるが、本研究は観測データが不足している雪氷圏のシベリアでのSLCF の一種であるCH₄濃度の観測体制を維持しており、この点で実施方針に沿った研究である。また“3-3 予測情報の創出”には数値モデルによる予測に関して、“…短寿命気候強制因子（SLCF）を含む二酸化炭素以外の気候影響要因の重要性が相対的に増すなど、従来とは異なった問題にも注意を向ける必要…”のあることが指摘されているが、本研究ではインバース解析によりCO₂フラックスに加えてCH₄フラックスの推定値の精度を向上させることにより気候変動の予測精度を向上させている。“4. 実施方針を進める上での今後の方向”の4-2章では、“…継続的な観測を実施するとともに長期のデータを蓄積し、持続的に必要な観測データを提供できることが必要である。…このためには、観測設備・機器の老朽化への対応や計画的な更新、機器開発を含む、より効率的な観測網の構築等、観測体制の維持・継続・発展を図っていくことが不可欠である。”とあるが、本研究は長期のデータを蓄積しており、持続的に貴重な観測データを提供している。本試験研究費により、観測システムの老朽化にも対応し、より長期的な観測の体制を整えている。“4-4（5）国際的な取組の推進”では“地球観測は我が国のみで実施可能な取組ではなく、国際枠組等の下での国際協力や国際貢献の観点が必要である。”と述べられているが、本研究は、日ソ環境保護協力協定（1991年4月）の枠組み内の課題「湿地からのメタン放出のモデル化に関する共同研究」及び、日露科学技術協力協定（2000年9月）の枠組み内の課題「シベリア生態系の影響を受けた温室効果気体の観測」と「シベリアにおけるランド・エコシステムの温室効果ガス収支」に基づくロシアとの長期にわたる国際共同研究であり、今後も両国で協力して継続することが想定されているプロジェクトである。

上記のように本研究は、世界のCO₂とCH₄の観測網で極めて不足しているシベリアのデータを著しく増やし、モデルの制約条件を増やすばかりでなく衛星観測の検証、モデル輸送の検証を通して地域別のCO₂収支とCH₄収支の不確定性を低減し、炭素循環予測の確度を向上させることによってグローバル・ストックテイク、並びにパリ協定における目標の達成に貢献することも期待される。