

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

独立行政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 町田敏暢・笹川基樹

地球環境研究センター 物質循環モデリング・解析研究室 佐伯田鶴

| | |
|-----------------|-----------|
| 平成19～23年度合計予算額 | 129,925千円 |
| (うち、平成23年度当初予算額 | 25,100千円) |

[要旨] シベリアにおける既存の7ヶ所のタワーサイトに、2ヶ所のサイトを新たに設置し、タワー観測ネットワーク (JR-STATION: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) としてCO₂およびCH₄濃度の連続測定を行った。観測システムの確度を評価し、CO₂測定に関しては問題の無いことを確認した。CH₄測定に関しては、シベリア域での観測値の中心となる高濃度領域 (2265 ppb) では問題の無いことを確認できたが、低濃度領域 (1913 ppb) ではセンサー感度の非直線性のためにやや高く計算されることがわかった。

西シベリアタイガに位置するタワー観測サイト (Berezorechka) 上空において小型航空機 (An-2) を用いてCO₂濃度の鉛直分布を観測した。フライト日に観測されたタワーデータの日中平均値 (13:00-17:00 LST) とAn-2で観測された大気境界層内の平均CO₂濃度を比較すると、高度20 m以上のインレットで得られた日中平均値は大気境界層内の代表的な値を示すことが分かった。

CO₂濃度の日中平均値から、2009年夏季にCO₂濃度上昇が停滞し、2010年夏季には再び増加を示す変動が観測された。これはNOAAの沿岸域のサイトでも約1ヶ月位相が遅れて観測され、シベリア域の植生によるCO₂吸収の影響が全球規模で広がる様子が捉えられた。

タイガと湿地が混在する2つのサイト (KRS: Karasevoe, DEM: Demyanskoe) において、CO₂とCH₄の夜間の蓄積量と植生によるCO₂呼吸量の準気候値を利用して、CH₄放出量の季節変動を明らかにした。放出量は7月に極大をとり、KRSで降水量の異常に高かった期間 (2007年7月) に通常より2倍近くの放出量があったことが分かった。降水量のアノマリーを考慮した陸域生態系モデル (VISIT) によるCH₄放出量のシミュレーション結果から、降水量増加によって引き起こされた地下水深度の上昇により、CH₄放出量が増えたということが示唆された。

JR-STATIONにおいて観測されたCO₂濃度観測値と米国NOAAの観測値を用いて、NIES TMを使った逆計算によりシベリア域の炭素収支を推定した。北方ユーラシアのCO₂フラックスは、NOAAの観測データだけで推定した値より3割以上も吸収が減る結果となった。CO₂フラックスの年々変動を計算し、シベリア域では2007年と2008年の吸収量が特に小さくなっていることがわかった。

[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

1. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) の陸域による吸収・放出の空間分布を明らかにし、その季節変動、年々変動の現状とその駆動力を解明するには、微気象・生態学的観測研究から陸域生態系の炭素収支を推定する方法 (ボトムアップアプローチ) と大気中の CO₂ 濃度の観測からその地表面での吸収・放出

量の分布を推定する方法（トップダウンアプローチ）とがある。

渦相関法に代表される森林上の CO₂ フラックス観測は炭素収支と気候要因、生態系活動との関係を導き出すためには非常に有効な手段であるが、その代表的空間スケールが数百メートルほどであり、大陸規模の CO₂ 交換の全体像を把握するためには他のアプローチが必要である。

トップダウンアプローチによる CO₂ 収支の推定は比較的良く混合された大気中の CO₂ 濃度観測値をインバースモデルに代入して CO₂ 収支を推定するので空間代表性に秀でた手法である。これまで行われてきたインバースモデル計算は主に海洋性大気の観測を使った全球規模の解析であり、その空間分解能は大陸規模が限界であった^{1) 2) 3)}。大陸内部において千～数千キロスケール（亜大陸規模）で CO₂ 収支の分布とその時間変動を明らかにすることができれば、気候変動に対する陸上生態系の応答を気候帯ごとに地理的分布として知ることが可能となり、また将来の国別炭素収支の監視に応用することも期待できる。

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収支推定を世界に先がけて手法的に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と地域規模インバースモデルの開発を行ってきた。最終年である18年度には西シベリアの2000 kmスケールの領域内における一年分のCO₂収支分布が推定できたが、この手法を使って実際にCO₂収支の年々の変動およびその気候変動との関係を示すことが真に推定手法を確立したことになり、世界に先駆けた観測・解析として認知されることになる。

2. 研究目的

本研究では世界の観測空白域の1つであり、今後の気候変動に対して脆弱であると危惧されているシベリア域において、タワー観測ネットワークを用いてトップダウンアプローチによる亜大陸規模のCO₂とCH₄の収支分布とその年々変動を推定することが目的である。

具体的には、地球環境研究総合推進費による研究で18年度までに構築されたシベリア域における7ヶ所のタワーサイトに加え西シベリア南部2ヶ所のタワーによる観測ネットワーク（JR-STATION: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network）⁴⁾を用いたCO₂濃度およびCH₄濃度の連続観測と、そのうちの1ヶ所のタワー上空において地球一括課題で推進してきた小型航空機による定期的なCO₂濃度鉛直分布観測を継続して行い、高密度で高時間分解能、かつ高い精度のデータを長期的に取得する。これらのデータをインバースモデル（大気輸送モデルを用いて作った行列を使って逆行列計算する方法）に代入してCO₂とCH₄の収支計算を行う。本研究は5年間の観測継続を目指し、少なくとも1サイクルのエルニーニョ・ラニーニャに伴う気候変動に対する、シベリア域の陸上生態系によるCO₂吸収・放出量およびCH₄放出量の応答を明らかにすることを目標とする。

西シベリアには広大な湿地と天然ガス田およびガスを輸送するパイプラインが存在し、グローバルなCH₄濃度の変動にとって重要な役割を果たしている。冬季のCH₄フラックスからCH₄の人為発生量を、夏季のフラックスからCH₄の自然発生量を分離して推定することに挑戦する。CH₄濃度の短期的変動と大気輸送データから天然ガス漏洩の検知にも貢献する。

3. 研究方法

(1) 観測地点

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」による研究で18年度までに観測を開始した西シベリア6ヶ所、東シベリア1ヶ所のサイトにおいて、既存のタワーを利用したCO₂およびCH₄濃度の連続測定を継続して行った。これらのサイトに加えて2007年12月からは西シベリア南部Omsk近郊のAzovoにおいて、2008年6月からは西シベリア南部Chelyabinsk近郊のVaganovoにおいて、同様のタワーを使った観測システムを立ち上げJR-STATIONとして観測を続けている（図1）。

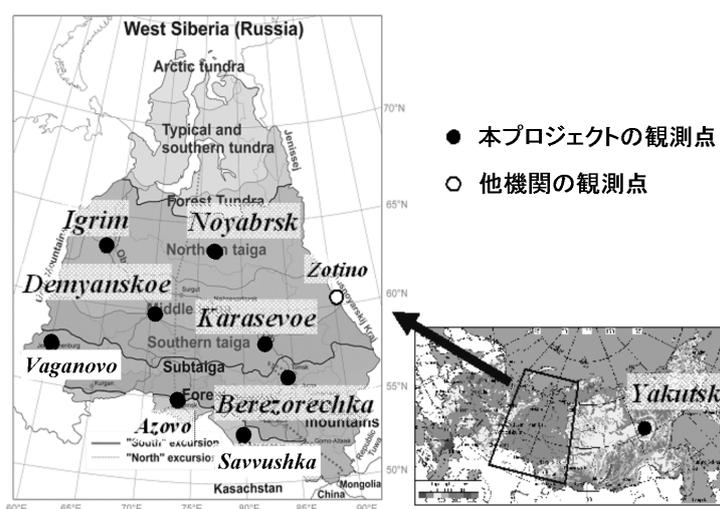


図1. 本プロジェクト（JR-STATION）の観測点。

小型航空機による大気境界層（Planetary Boundary Layer; PBL）・自由対流圏大気のCO₂観測はBerezorechkaタワーの上空において月に約1回の頻度で実施した。各サイトの緯度、経度および空気採取高度を表1に示す。以降、タワーサイト名は表1のIDコードで表す。

表1. JR-STATIONの位置および空気採取高度。

| Identifying Code | Location | Latitude | Longitude | Air inlet heights (m) | Elevation at tower base (m a. s. l) ¹ |
|------------------|--------------|-------------|--------------|-----------------------|--|
| BRZ | Berezorechka | 56° 08' 45" | 84° 19' 49" | 5, 20, 40, 80 | 150 |
| KRS | Karasevoe | 58° 14' 44" | 82° 25' 28" | 35, 67 | 50 |
| IGR | Igrim | 63° 11' 25" | 64° 24' 56" | 24, 47 | 25 |
| NOY | Noyabrsk | 63° 25' 45" | 75° 46' 48" | 21, 43 | 100 |
| DEM | Demyanskoe | 59° 47' 29" | 70° 52' 16" | 45, 63 | 75 |
| SVV | Savvushka | 51° 19' 30" | 82° 07' 40" | 27, 52 | 400 |
| AZV | Azovo | 54° 42' 18" | 73° 01' 45" | 29, 50 | 100 |
| VGN | Vaganovo | 54° 29' 50" | 62° 19' 29" | 42, 85 | 200 |
| YAK | Yakutsk | 62° 05' 19" | 129° 21' 21" | 11, 77 | 210 |

¹地形図から求めたおおよその高度。

JR-STATION のデータと他のバックグラウンドサイトのデータを比較するため、同緯度帯のアメリカ大気海洋局 the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) / Earth System Research Laboratory (ESRL) / Global Monitoring Division (GMD) のフラスコサンプリングデータと Max Planck Institute が管理している ZOTTO のデータを使用した。使用した各サイトの位置と情報を図 2 と表 2 に示す。

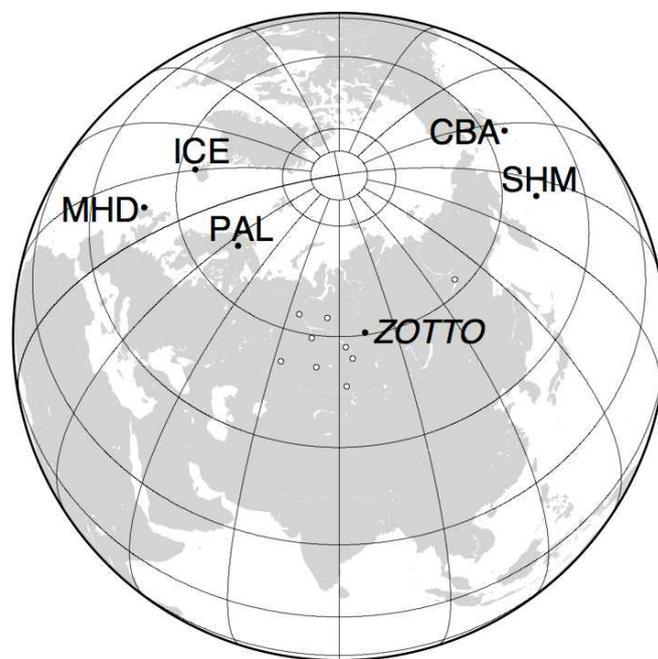


図 2. 比較に用いた NOAA のサンプリングサイトと Max Planck Institute のタワー観測サイト。略記は表 2 を参照。白丸は JR-STATION のタワー観測サイト。

表 2. 比較に用いた NOAA サンプリングサイトの情報。

| Identifying Code | Location | Latitude | Longitude | Elevation at sampling site (m a. s. l) |
|---------------------|-------------------------------|----------|-----------|--|
| CBA | Cold Bay, Alaska | 55.21° N | 162.72° W | 21 |
| ICE | Storhofdi, Iceland | 63.34° N | 20.29° W | 118 |
| MHD | Mace Head, Ireland | 53.33° N | 9.90° W | 25 |
| PAL | Pallas-Sammaltunturi, Finland | 67.97° N | 24.12° E | 560 |
| SHM | Shemya Island, Alaska | 52.72° N | 174.10° E | 40 |
| ZOTTO ¹⁾ | Zotino, Russia | 60.80° N | 89.35° E | 114 ²⁾ |

1) Max Planck Institute が観測を行っているタワーサイト。

2) 4, 52, 92, 227, 300 m の高度にインレットが設置されている。

(2) 観測装置

①タワー観測システム

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アフラムポンプで加圧され、ガラス製の水分

トラップ、ナフィオン薄膜ドライヤー、および過塩素酸マグネシウム除湿剤の3段で除湿され、マスフローコントローラで流量を一定（40 ccm）に保った状態でCO₂計である非分散型赤外分析

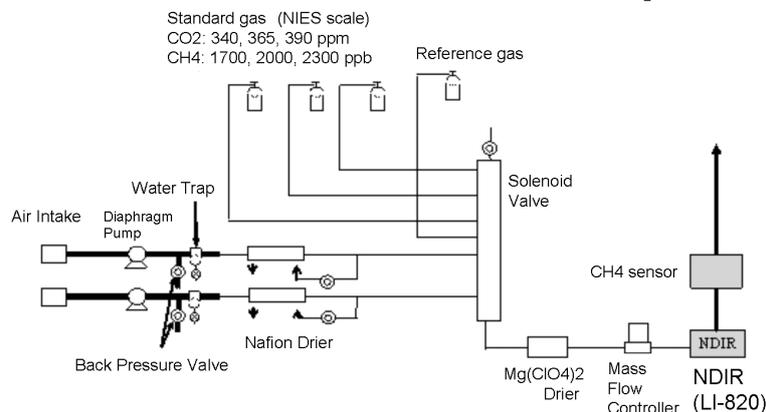


図3. タワー観測システムの概略図

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ヶ月以上の過塩素酸マグネシウムの連続使用ができる⁵⁾。NDIRの出口は直接CH₄計（SnO₂半導体センサー）⁶⁾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NIES95 CO₂スケール⁷⁾、NIES94 CH₄スケール⁸⁾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。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⁵⁾。CO₂濃度およびCH₄濃度の総合的な分析精度はそれぞれ±0.3 ppm、±5 ppb以下⁴⁾と見積もられている。

②航空機観測システム

BRZ上空の観測に使用している航空機用CO₂濃度観測装置は、シングルセル型のNDIR（LI-COR, LI-800）に小型の流量調整装置と圧力調整装置を組み込んだもので（図4）、ポンプやデータロガーを合わせて約3 kgと軽量で取扱いを容易にしている。電源投入後の動作は自動であり、5分に1回の頻度で濃度340 ppmと390 ppmの2本の標準ガス（NIES95 スケールで検定したもの）がNDIRに導入される。測定システムの応答時間は約10秒、ノイズレベルは2秒平均値を利用した場合±0.3 ppm、10秒平均値を利用した場合±0.15 ppmである。

観測に使用した航空機は小型の複翼機（An-2機）であり、2枚の左翼間のステーに空気取入口と

温度計、湿度計を設置している。装置の小型化と自動化によって現地ではパイロットとメカニックのみで観測飛行を行うことが可能になり、高頻度の観測を実現可能にした。

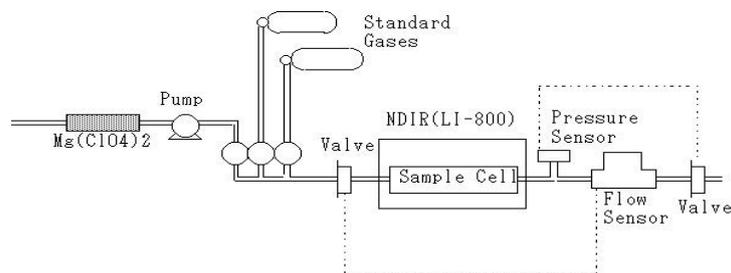


図4. 航空機搭載用CO₂濃度観測装置の概略図

観測飛行の際、航空機は飛行場を離陸後、観測空域上空の最高観測高度をめざして上昇する。航空機用CO₂濃度観測装置の暖機運転は航空機の上昇中に完了することになっている。BRZでは最高高度は通常2 kmであるが、夏季には混合層の発達高度が高くなるために3 kmまで観測を行っている。観測空域ではスパイラル飛行を行いながら高度0.15 kmまで観測を継続する。

(3) 大気輸送モデルを用いた逆計算による炭素収支推定

JR-STATIONにおいて観測されたCO₂濃度観測値とその他の観測値を用いて、逆計算によりシベリア域の炭素収支を推定した。計算方法の概要を以下に述べる。

① 大気輸送モデル

逆計算で用いるCO₂濃度を計算するために、国立環境研究所で開発されたオフライン大気輸送モデル（以下NIES TM）⁹⁾を使用した。モデルの水平解像度は緯度経度2.5° x 2.5°であり、鉛直方向はハイブリッド等温位（ $\sigma - \theta$ 座標系で32レベルである。等温位座標は350K以上で採用されており、 σ 座標系よりも成層圏の大気年代の再現性に優れているという特徴がある。移流項は、van Leer¹⁰⁾の方法により補間関数展開を二次項まで考慮したフラックス型で計算した。モデルに入力する気象データは、気象庁によるthe Japanese 25-year reanalysis (JRA-25)/ the Japan Meteorological Agency (JMA) Climate Data Assimilation System (JCDAS)¹¹⁾を用い、モデル内で質量が保存されるように調整を行った。この結果、本モデルは非常に良い線形性を保つことが確認されている。また、PBL高度は、JRA-25/JCDASに含まれていないため、ECMWF Interim Re-analysisを用いた。積雲による鉛直対流は、JCDASにより提供される対流性降水量を用いてKuoスキームにより計算した。鉛直拡散はPBL高度によりパラメータ化を行い実装した。

② 逆計算手法

大気CO₂濃度から炭素フラックスを推定するための逆計算の手法として、固定ラグカルマン smoother (Fixed-lag Kalman smoother)を用いた。具体的な逆計算の手法は以下のとおりである。まず、線形モデル

$$z = \mathbf{H}s + v$$

仮定し（ z は観測値ベクトル、または観測値とモデル予測値との差のベクトル； \mathbf{H} は観測演算子； s は領域毎のCO₂吸収・放出量、 v はシステムのノイズ）、 z , s , v が正規分布に基づくとの仮定の

もと、ベイズ統計により吸収・放出の領域毎の事前(a priori)情報 s_0 を考慮すると、評価関数 J は次のとおりとなる。

$$J = \frac{1}{2} \left[(z - \mathbf{H}s)^T \mathbf{R}^{-1} (z - \mathbf{H}s) + (s - s_0)^T \mathbf{Q}^{-1} (s - s_0) \right]$$

ここで、 \mathbf{R} と \mathbf{Q} は各々観測値と a priori 炭素フラックスについての誤差分散共分散行列である。この評価関数 J を最小化すると、求める CO_2 吸収・放出量の推定値 s 及びその分散共分散行列 \mathbf{Q}' は各々次式で求められる。

$$s = s_0 + \mathbf{K}(D - \mathbf{H}s_0)$$

$$\mathbf{Q}' = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{Q}$$

ここで、 \mathbf{K} はカルマンゲイン

$$\mathbf{K} = \mathbf{Q}\mathbf{H}^T (\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^T)^{-1}$$

である。 $(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^T)$ の逆行列は、LAPACKライブラリのLU分解を用いて解いた。

固定ラグの形式では、上記観測ベクトル z の線形モデルは、

$$z_t = [\mathbf{H}_u \mathbf{H}_v] [s_u^T s_v^T]^T + v$$

で表せる。ここで、 t は現在考慮している時刻、添字 u 、 v は各々オンライン及びオフラインの状態ベクトル・行列を示す。固定ラグ長を L とすると、オフラインベクトル・行列は時刻 $[1]$ から時刻 $[t-L]$ までの状態を表し、オンラインベクトル・行列は時刻 $[t-L+1]$ から $[t]$ までの状態を表すこととなる。固定ラグカルマン smoother の手法は、従来の炭素フラックス推定にしばしば用いられている「バッチ」型の逆計算手法よりも、少ない計算コストで収支推定ができるという利点がある。

一方、本研究では正則化(regularization)の手法として、切断特異値分解法 (truncated singular value decomposition; t-SVD) も採用した。t-SVDでは、任意の行列 \mathbf{A} は次式で近似される。

$$\tilde{\mathbf{A}}_k = \mathbf{U}_k \Sigma_k \mathbf{V}_k^T$$

$$\Sigma^k = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_k, 0, \dots, 0)$$

ここで \mathbf{U} と \mathbf{V} は 直行行列、 Σ_k は行列 \mathbf{A} の固有値 σ のうち 1 から k 番目を要素として持つ対角行列である。 k を切断パラメータあるいはランクと呼ぶ。

③ 炭素吸収・放出の地域区分

本研究では、全球を 68 区分した領域毎について炭素吸収・放出を推定した。全球 68 領域の図、並びに西シベリア領域の拡大図を図 5 に示す。従来、ベイズ統計に基づく逆計算を含む炭素吸収・放出の逆計算では、計算コストや観測量の観点から、全球を亜大陸規模 (例えば海陸合計 22 地域) に分割することが多かった。本研究では、固定ラグカルマン smoother を用いて計算コストを削減することができ、またシベリア地域の多くの観測サイトを利用できることから、全

球を68地域に分割し、特に観測サイトの多い西シベリア域での領域を細分化した。これにより、シベリアの8地域毎に炭素収支が推定されることになる。観測演算子 \mathbf{H} の各要素は、各領域から単位量の炭素 (1GtC/yr/region) を放出し、大気輸送モデルで順方向に計算することで求められる。

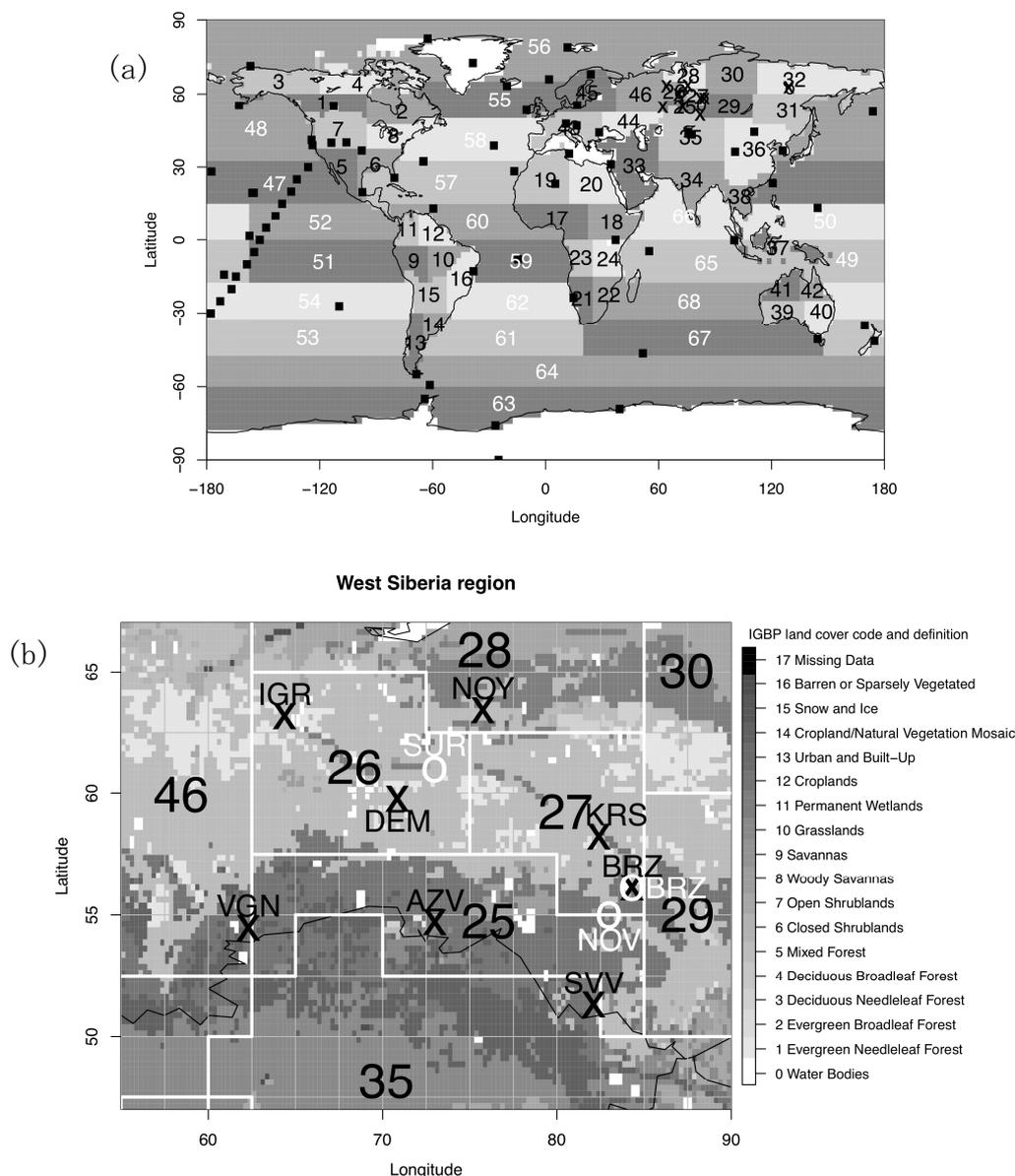


図5. 本研究の逆計算で用いた68領域区分。(a)全球、(b)西シベリア。計算に用いた NOAA/ESRL サイト(四角)、NIES/CGER シベリアネットワークサイト(丸、タワーサイト; クロス、航空機サイト)も同時に示す。図(b)には IGBP 土地被覆分類図も重ねて示す。

④ 炭素フラックスの事前情報

逆計算のために大気輸送モデルを用いて CO_2 濃度を計算する際のフラックス (a priori フラックス) として、次の4種類のフラックスを使用した。(i) 月毎の化石燃料起源フラックスデータベース Open source Data Inventory of Anthropogenic CO_2 emission (ODIAC)¹²⁾、(ii) プロセ

スペースモデル VISIT (the Vegetation Integrative Simulator for Trace gases) から計算された日毎の正味生態系 CO₂ 交換量 (net ecosystem exchange; NEE)¹³⁾、(iii) バイオマス燃焼データベース GFED (the Global Fire Emissions Database; version 3.1)¹⁴⁾ からの月毎の CO₂ 放出量、(iv) 海洋輸送モデル OTTM (the Offline ocean Tracer Transport Model) と pCO₂ 観測値を同化して得られた月毎の大気—海洋交換量¹⁵⁾。各々のフラックスは NIES TM の入力用に 1°x1°グリッドに整備された形式で 2000 年から 2009 年までの期間について用意された。なお、本 a priori フラックスデータセットでは、土地利用変化に伴う CO₂ フラックス変化は明に考慮していない。また、背景誤差分散共分散行列 **Q** は、対角行列と仮定し、陸域は VISIT、海域は OTTM のフラックスデータセットを基に各領域について計算した。

⑤ CO₂ 観測データ

逆計算には、JR-STATION に於いて観測された CO₂ 濃度観測値 (9 地点での連続データ)、BRZ 上空の航空機観測値に加え、国立環境研究所により 1990 年代から Surgut (SUR)、Yakutsk (YAK)、Novosibirsk (NOV) 上空で行われている月に 1 回の頻度の航空機観測値¹⁶⁾ を使用した。表 3 に航空機観測の概要を示す。その他、全球をカバーする観測網として、NOAA/ESRL/GMD のフラスコサンプリングデータ¹⁷⁾ も使用した。観測サイトの位置を図 5 に示す。これを見ると、NOAA/ESRL による観測網は、主としてバックグラウンド CO₂ の観測を主目的としているため、内陸のサイトは少なく、特にシベリア内部のサイトは皆無であることが分かる。なお、JR-STATION による連続データは、空間代表性の高い午後のデータ (現地時刻 13:00-17:00) の日平均値を使用した。BRZ 上空による航空機観測は高度 500m 毎に平均を取り逆計算に使用した。逆計算に用いるこれら観測値の総数は、図 6 に示すとおり、2000 年当初で月に約 200 点であった合計観測点数は、ほぼ NOAA フラスコサンプリングによるものであるが、2002 年からタワーサイトが拡充されるにつれ、連続観測のタワー観測点数は、ほぼ週一回のフラスコサンプリングの総数に匹敵するものとなり、2008 年頃には合計観測点数は約 400 前後となっている。

表 3. CO₂ 逆計算に使用したシベリア航空機データ。

| Identifying code | Location | Latitude | Longitude | Sampling heights (m) | Period | Frequency |
|------------------|--------------|----------|-----------|---|-----------|---------------------|
| SUR | Surgut | 61°N | 73°E | 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5500, 7000 | 2000-2009 | Once per month |
| YAK | Yakutsk | 62°N | 130°E | 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 | 2000-2009 | Once per month |
| NOV | Novosibirsk | 55°N | 83°E | 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5500, 7000 | 2000-2009 | Once per month |
| BRZ | Berezovochka | 56°N | 84°E | 0-500, 500-1000, 1000-1500, 1500-2000, 2000-2500, 2500-3000 | 2001-2009 | 2-4 times per month |

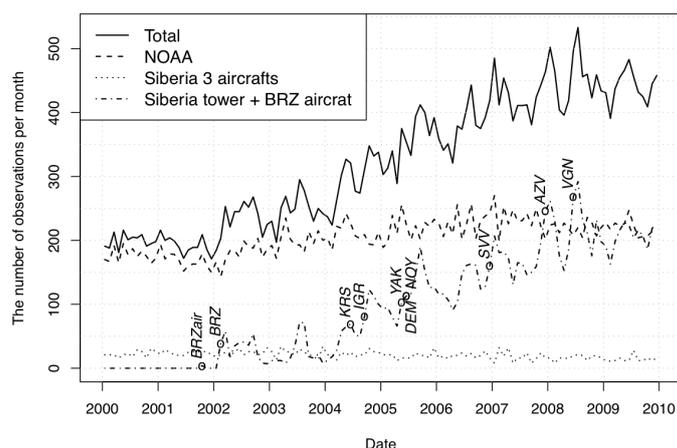


図6. 逆計算に使用した観測点数[個数/月]。図中のサイトコードは各タワー観測またはBRZ航空機観測の開始月を示す。

観測データの誤差分散共分散行列 \mathbf{R} についても、対角行列を仮定し、フィッティングカーブからの残差標準偏差の月平均気候値とした。また、分散共分散行列 \mathbf{R} は輸送モデルそのもののエラーも含むことをふまえ、TransCom 3 intercomparison¹⁸⁾に習い、 \mathbf{R} の最低値は0.25 ppmvと仮定した。逆計算の過程において、観測値とモデル予測値の差が15 ppmvを超える観測値については、フラックスやモデルのエラーにより再現性が低い事とし、当該観測値の標準偏差を大きくし、逆計算への寄与を減ずることとした。

⑥ 逆計算実験

本研究では3種類の観測データセットと2種類の正則化法を組み合わせ、下記に挙げる合計4種類の逆計算を実施した。

- 1) Case 1 : NOAA/ESRL フラスコデータのみを用いた逆計算。
- 2) Case 2 : NOAA データと 3つのシベリア航空機データ (SUR, YAK, NOV) を用いた逆計算。
- 3) Case 3 : NOAA と全てのシベリアデータを考慮した逆計算。
- 4) Case 4 : Case 3 と同じ、ただし、 t -SVD で解く。ランク k は 37 とする (固有値 2 に相当)。

逆計算は、NIES TM を 2000 年 1 月 1 日の CO_2 濃度場で初期化した後、固定ラグ長 $L=4$ ヶ月で 2000 年 1 月から 2009 年末まで行われた。これにより、2000 年 1 月から 2009 年 9 月までの各月の炭素吸収・放出量が推定される。なお、 CO_2 初期濃度場は、 CO_2 観測値と時空間補間により求めた CO_2 濃度の三次元気候値 Gap-filled and Ensemble Climatology Mean (GECM)¹⁹⁾を使用した。

4. 結果・考察

(1) タワー観測システムの検証実験

JR-STATIONで初めに設置されたサイト (BRZ) では10年間以上データが得られており、その間改良を加えながら現在に至っている。他の観測サイトでも3年以上の長期にわたり連続してシステムが稼働しているので、この5年間のプロジェクトでは現地においてシステムの安定性を確認した。特に、数年単位の長期作動後に CH_4 測定に用いている SnO_2 半導体センサーに内蔵された触媒の劣化

が起きる可能性が、国立環境研究所に設置されている装置で確認されたため、2009年以降、濃度既知の2本の混合ガスで現地のシステムを検証した。

① CO₂測定システムの検証実験

2本の混合ガスはCH₄の検証を第一に考えて作られたため、CO₂濃度はほぼ同じであるが、CO₂の検証も行った。初めにCO₂の結果を表4に示す。KRSとDEMでは分析精度内(±0.3 ppm)で一致している。VGNのデータに関してはわずかに低い値(-0.4 ppm)を示したが、これは測定直後にリファレンスタンクの切り替えが起こったため、12間毎に測定する現地標準ガスの片側のみによる濃度計算になったことで誤差が大きくなったと考えられる。しかし今回確認のできた各タワーサイトでは、長期ドリフトも無く測定が行われている事が確認できた。他のサイトに関しては後述するCH₄センサーの検証と同時に順々に行っている。

表4. 2種類の混合ガスのタワー観測システムでのCO₂の測定結果。

| Site | Date | In-situ measurement (ppb) | |
|------------------|-----------------------------|--|---|
| | | Low CH ₄ mixed gas (CO ₂ ; 392.44 ppm) ¹ | High CH ₄ mixed gas (CO ₂ ; 392.45 ppm) ¹ |
| KRS | 2009/9/11 (6:20, 6:40 GMT) | 392.5 | 392.6 |
| VGN ² | 2010/10/12 (6:20, 6:40 GMT) | 392.0 | 392.1 |
| DEM | 2010/10/20 (9:20, 9:40 GMT) | 392.2 | 392.5 |

¹国立環境研究所で検定したCO₂濃度。

²測定直後にリファレンスタンクの切り替えがあったため、測定以前の標準ガスのみ使用した濃度計算。

② CH₄測定システムの検証実験

KRSの観測システムで測定した混合ガスの値は、高濃度CH₄混合ガスの測定値は分析精度内(±5 ppb)で一致した(表5の2009/9/7)。センサー内蔵の触媒が劣化すると半導体センサーに感度のある一酸化炭素(CO)や水素(H₂)もCH₄として検出され、測定値が高くなると予想される。高濃度CH₄混合ガスに含まれるCO濃度とH₂濃度はそれぞれ475.69 ppb、573.00 ppbであり、CO + H₂のこのセンサーに対する感度はCH₄と比較して約10%と見積もられている⁶⁾ので、もし内蔵の触媒が劣化していた場合は、約100 ppb以上は高い値が測定されるはずである。従って、KRSにおけるCH₄センサー内蔵の触媒は劣化していなかったと考えられる。一方で低濃度CH₄混合ガスの測定値は既知濃度より約16 ppb高い値を示した。この混合ガスにも高濃度CH₄混合ガスと同程度のCOとH₂が含まれているので、内蔵の触媒の劣化の可能性は低い。タワー観測システムでは3本の標準ガスの出力値を用いて2次曲線で検量線を作成するが、現在KRSでは1703.45 ppb、2013.16 ppb、2259.21 ppbの濃度の標準ガスが使用されている。低濃度CH₄混合ガスの濃度が、それを挟む濃度の2つの標準ガスとそれぞれ210 ppbと100 ppb離れていたため、誤差が大きくなった可能性がある。

KRSはCH₄センサーが最も長く稼働しているサイトなので他のサイトでもセンサー内蔵の触媒は劣化していなかったと考えられるが、KRSでの検証実験後、念のために全てのサイトに外付けの温調付き触媒装置(0.5% Ptアルミナペレットを使用したもの)を設置した。KRSでの触媒装置設置後の混合ガスの測定値は、取り付け前と比較して分析精度内で一致している(表5)。

AZVとDEMでも、高濃度CH₄混合ガスの測定値は分析精度内(±5 ppb)で一致した。一方で低濃

度CH₄混合ガスの測定値は既知濃度よりそれぞれ14 ppbと6 ppb高い値を示した。KRSと同様に現地標準ガス濃度との差が原因と考えられる。将来的には1800 ppb前後の標準ガスを導入する必要がある。VGNとNOYでは高濃度CH₄混合ガスの結果が30 ppb以上大きくなった。VGNでは測定直後にリファレンスタンクの切り替えが自動で起こり、10時間以上離れた現地標準ガスによる濃度計算になったためセンサーのドリフトを抑えきれなかった可能性がある。NOYでは2010年8月の終わりからリファレンスガスに定期的にノイズが入るようになり、その影響を強く受けていたと考えられる。

表5. 2種類の混合ガスのタワー観測システムでの測定結果。

| Site | Date | In-situ measurement (ppb) | |
|------------------|-----------------------------|---|--|
| | | Low CH ₄ mixed gas (CH ₄ ; 1913.39 ppb) ¹ | High CH ₄ mixed gas (CH ₄ ; 2265.49 ppb) ¹ |
| KRS ² | 2009/9/7 (6:20 6:40 GMT) | 1929 | 2269 |
| KRS | 2009/9/11 (6:20, 6:40 GMT) | 1927 | 2264 |
| AZV | 2010/10/10 (5:20, 5:40 GMT) | 1927 | 2271 |
| VGN ³ | 2010/10/12 (6:20, 6:40 GMT) | 1918 | 2298 |
| NOY ⁴ | 2010/10/19 (5:20, 5:40 GMT) | 1946 | 2310 |
| DEM | 2010/10/20 (9:20, 9:40 GMT) | 1919 | 2261 |

¹国立環境研究所で検定したCH₄濃度。

²外付けの触媒装置設置前。

³測定直後にリファレンスタンクの切り替えがあったため、測定以前の標準ガスのみ使用した濃度計算。

⁴標準ガス測定後のリファレンスガスの出力値に2mVの飛びがあった。

混合ガスを用いた現場での検証実験と同時に、ガラスフラスコによるリファレンスガスのサンプリングも行った。同じリファレンスタンクから連続して2本のフラスコに採取した。サンプリングした試料は国立環境研究所に持ち帰り、ガスクロマトグラフィー (GC) により濃度測定を行った。現場の観測システムではシステムのドリフトを補正するためにリファレンスガスを毎時間測定しているが、12時間毎の3本の標準ガス測定直後のリファレンスガスの出力値から、その濃度を計算した。GCでの測定結果と現地システムによる濃度の計算結果を表6に示す。

表6. リファレンスガスの現場システムでの計算濃度とサンプリング法によるGCでの測定値。

| Site | Sampling Date | Sample ID | In-situ measurement (ppb) | GC measurement (ppb) ¹ |
|------|---------------|-----------|---------------------------|-----------------------------------|
| KRS | 2009/9/7 | MS001 | 2015 | 2009.81 ± 0.96 |
| | | MS002 | | 2008.06 ± 0.40 |
| DEM | 2010/10/20 | MS013 | 1942 | 1934.46 ± 0.55 |
| | | MS014 | | 1935.83 ± 0.16 |
| AZV | 2010/10/10 | MS007 | 1933 | 1922.85 ± 1.06 |
| | | MS008 | | 1922.93 ² |
| SVV | 2009/10/29 | MS011 | 1936 | 1911.32 ± 1.12 |
| | | MS022 | | 1911.90 ± 0.80 |

| | | | | |
|------------------|------------|---------|------|--------------|
| SVV ³ | 2010/11/11 | MS001-2 | 2019 | 1889.83±0.82 |
| | | MS002-2 | | 1889.24±0.00 |
| NOY ³ | 2010/10/19 | MS011-2 | 2094 | 2000.51±0.02 |
| | | MS012-2 | | 1999.71±1.04 |

¹国立環境研究所のGCによる3回測定の結果。

²サンプリング圧が低く1回測定。

³標準ガス測定の直後にリファレンスガスの出力値が上昇するノイズが入った。

KRSのリファレンスガスの測定値は分析精度内で一致した。DEMとAZVではGCによる測定結果より現場のシステムでの計算値は7-10 ppb高い値を示した。これは混合ガスでの検証実験の結果と同じ理由で誤差が大きくなった可能性がある。2009/10/29のSVVの測定では25 ppbの差がみられるが、SVVでは現地標準ガス測定の直後にリファレンスガスの出力値が異常に大きくなる原因不明の現象がここ数年頻繁に現れており、センサーに原因不明の問題を抱えている。2010/11/11の測定ではその差が更に大きくなり（100 ppb以上）、状態はひどくなっている。NDIRの出力値にこの現象は見られないので、半導体センサー特有の問題が発生している可能性がある。このためGCによる測定結果と大きく離れた濃度が計算されたと考えられる。NOYの半導体センサーは2010年夏にCH₄測定を再開したのだが、まもなくSVVと同じ現象が現れ、同様に異常に大きな濃度を示した。今後これらのセンサーは修理あるいは交換が必要である。SVVとNOYのCH₄のデータは解析から外す。

（2）CO₂濃度の観測結果

①タワー観測データの代表性の評価

タワー観測で得られるデータは、インレット高度が低いほど現場の影響を受けやすく、より広範囲の代表値を得るためには、より高い位置からのサンプルを測定することが求められる。そこでBRZタワー上空においてAn-2を用いて観測されたCO₂濃度の鉛直分布とBRZタワーの4つの高度で測定されたCO₂濃度を比較する事により、タワー観測値の代表性を考察した。

2001年から2011年にかけてAn-2を用いて観測されたCO₂濃度の鉛直分布を図7(a)に示す。冬季から春季にかけて高濃度を示し、夏季には低濃度になる傾向を示す。鉛直勾配は冬季に下層で高くなり、逆に夏季には下層で低くなる。これはCO₂濃度が地表の影響を強く受けていることを示しており、主に冬季には植生の呼吸による放出量、夏季には光合成による吸収量を反映していると考えられる。

タワー観測値が反映すると考えられるPBLと、自由対流圏を分けるため、CO₂濃度と同時に観測した気象データを用いて、以下のメソッドでPBL高度を決定した。

- 1) Surface Based Inversion (SBI) ; 最低観測高度 (150 m) を基準とした接地逆転層の最上端。
- 2) Potential Temperature (PT) ; 温位の鉛直勾配の最大点。
- 3) Specific Humidity (SH) ; 絶対湿度の鉛直勾配の最大点。

SBIの時は他のメソッドは使用しないが、PTとSHのどちらも有効な場合はCO₂濃度の変化と対応するメソッドを採用した。どのメソッドでもPBLの頂点が見られない時は、その日のPBL高度は観測

高度より上と判断した。PBL高度を各観測日に応じて図7 (b)に示す。夏季に高く冬季に低い明瞭な季節変動がみられる。内陸では季節によってPBL高度が大きく変わることが知られており、シベリアのZOTTOでは冬季に200-600 mで夏季に2800 mまで上がったという報告がある²⁰⁾。本研究でも近いPBL高度が求められたが、夏季には観測高度 (3000 m) 以上であることが多かった。

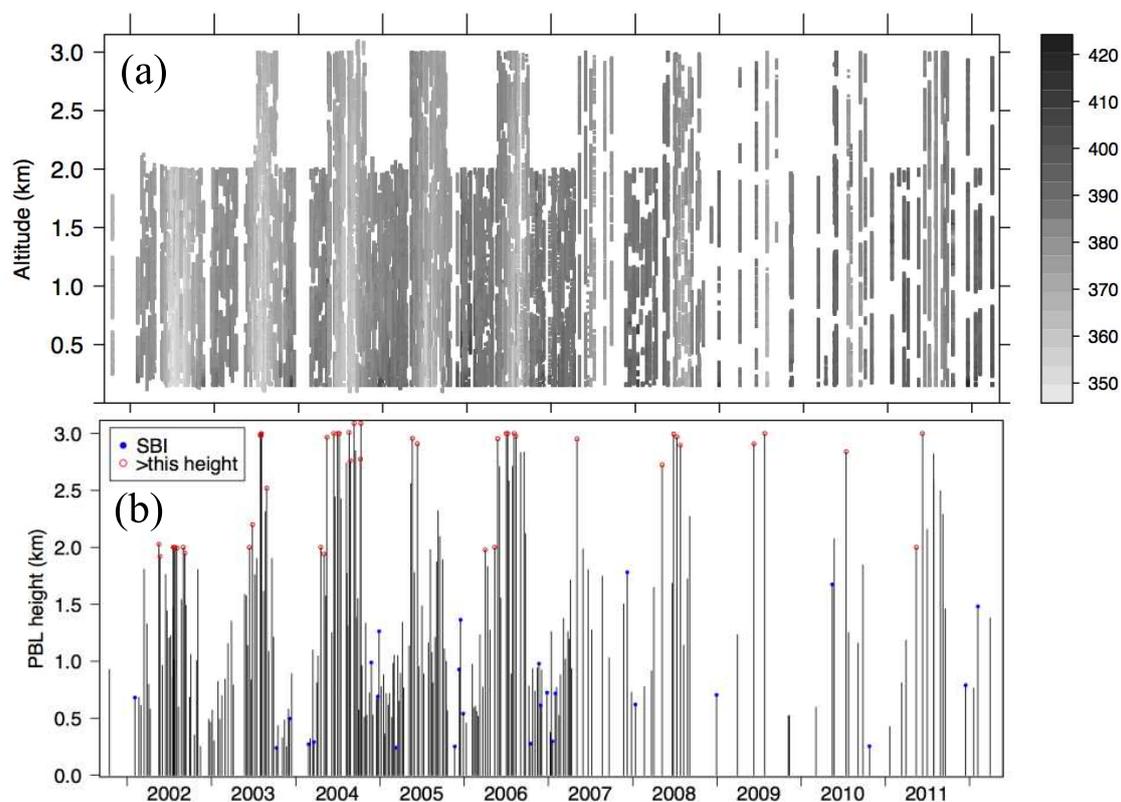


図7. (a) An-2によって観測されたCO₂濃度の鉛直分布。(b)各フライトで得られた気象データから求められたPBL高度。白丸はPBL高度が観測高度以上、黒丸はSBIの時。

PBL高度ではCO₂濃度が急激に変化するため、PBL高度から下に100 mの緩衝領域を設け、それ以下の高度で観測されたCO₂濃度を平均することでPBL内の平均CO₂濃度を導出した。フライトを行った同日に得られたタワー観測データの、大気がよく混合する日中の時間 (13:00 -17:00 LST) の値を平均し (4. (2) ②章参照)、An-2によるPBL内の平均CO₂濃度と比較した (図8)。両平均値はよく相関しているが、5 mインレットで得られた近似直線の90 %信頼区間は一部1:1のラインから外れる。インレットの高度が上がるとともに1:1のラインに近づくが(20 m、40 mは図なし)、20 mインレットで1:1ラインが90 %信頼区間に入る。本結果から20 m以上の高度で得られた値の日中平均値であれば、タワー観測データはPBL内の代表値を表すことが示された。

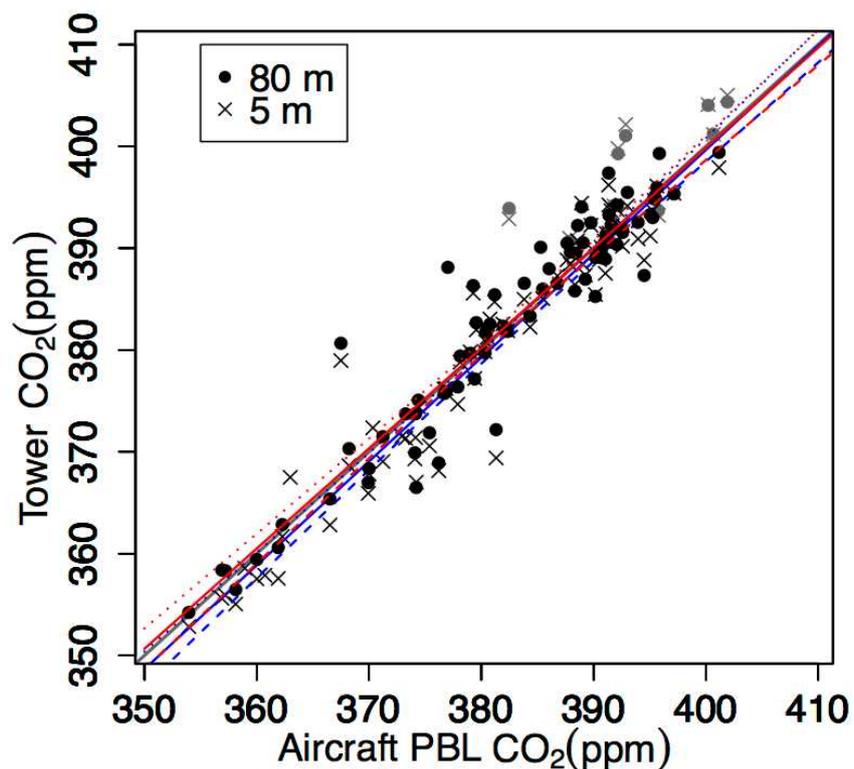


図8. An-2で観測されたPBL内の平均CO₂濃度と同日にタワー観測で得られた日中平均値との比較。青線（赤線）は5 m（80 m）インレットのデータの近似直線と90%信頼限界。灰線は1:1のライン。SBIの時に得られたデータは灰色で示してあり、近似直線の計算には用いていない。

②タワー観測データの結果

2002年から2011年にかけてJR-STATIONで観測されたCO₂濃度の1時間値を図9に示す。各観測地点で共通して、ベースライン濃度は夏季に低く冬季に高い季節変動を示す。これは夏季には植生の光合成による吸収が強く見えるためである。夏季には冬季よりも高濃度を示すデータも見られるが、夜間は森林生態系の呼吸によってCO₂が放出され更に大気が上下に混合しにくくなるため、大気下層にCO₂が蓄積する現象を捉えている。

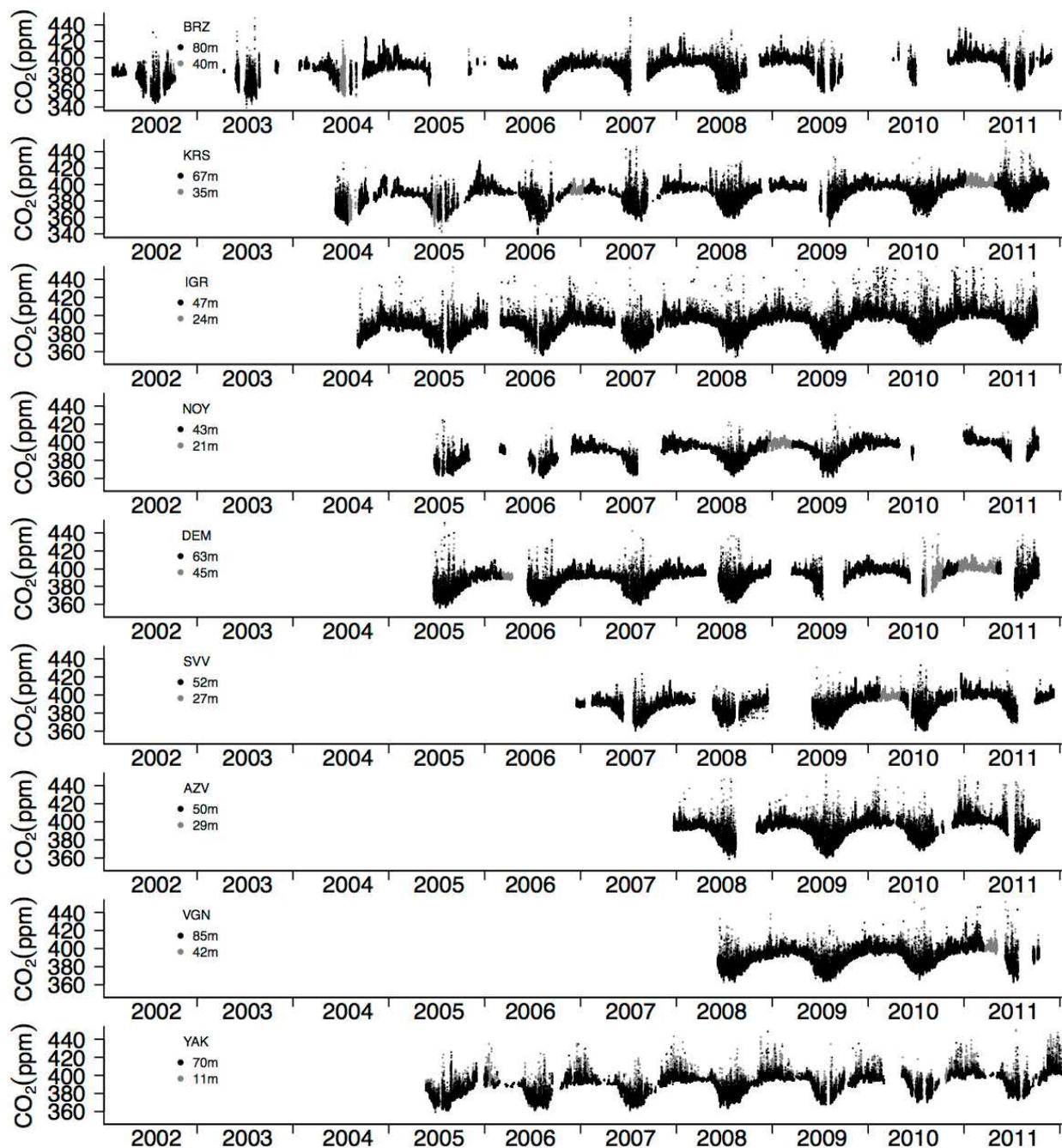


図9. 各タワーサイトにおけるCO₂濃度 (ppm) の1時間値。

CO₂濃度の日変動の例としてKRSにおける2010年の月平均値を図10に示す。春季から夏季にかけて、夜間は濃度が上昇し、日中は徐々に減少し午後と比較的安定する明瞭な日変動を示す。これは日の入りと共に光合成が始まり、植生の呼吸による正のフラックスが徐々に相殺されることを反映している。夜間は低高度 (35 m) で得られたデータの方が高々度 (67 m) で得られたデータより高濃度を示し、日中はわずかに逆転する傾向が見られる。これは4. (2) ①章で述べたように低高度の方が地表の影響を強く受けることを表している。

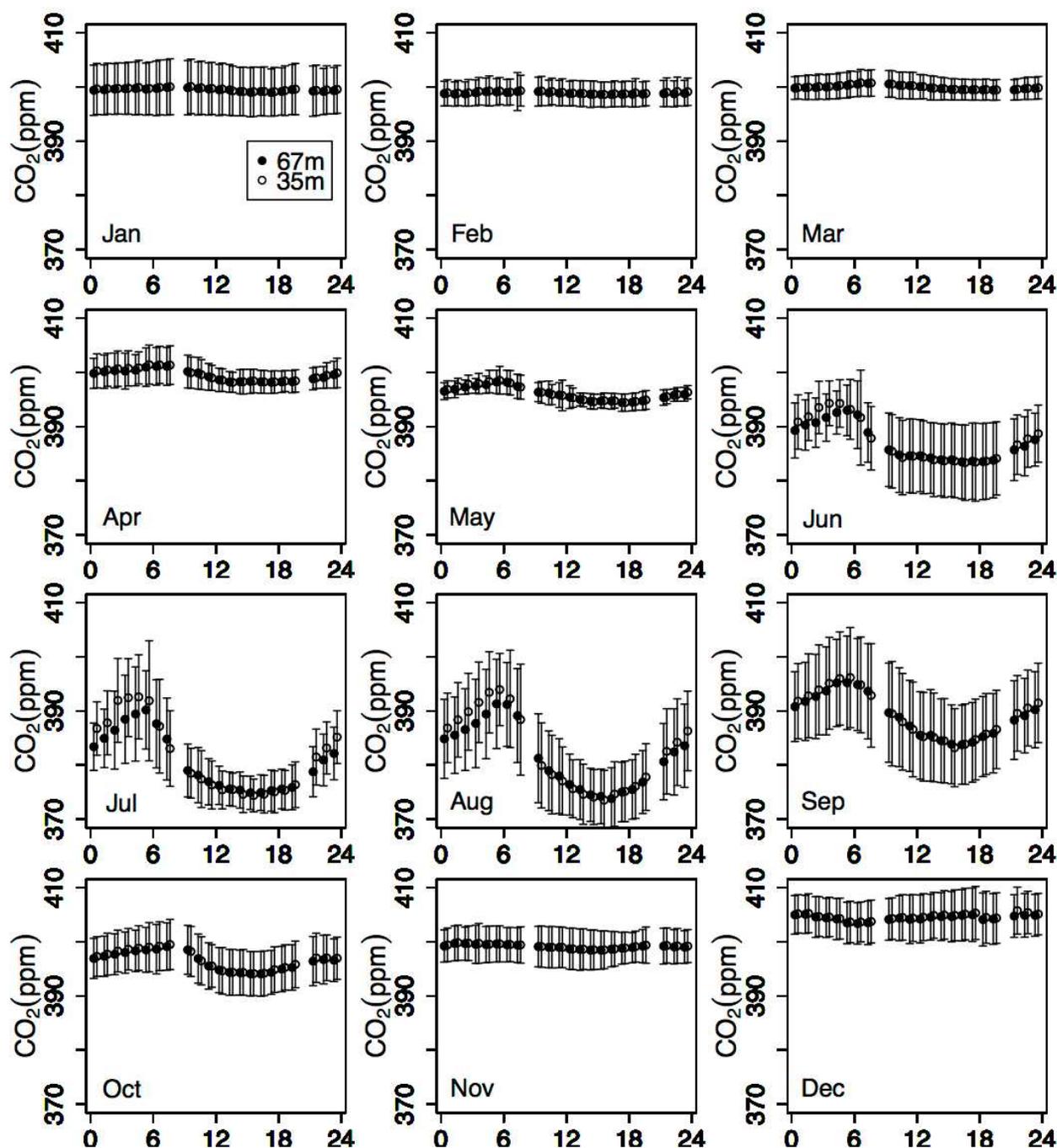


図 10. KRSにおける2010年のCO₂濃度の月平均した日変動。横軸は地方標準時 (LST)。

エラーバーは1 σ 。

このようにタワーで得られた1時間観測値は日中と夜間で異なる性質の大気を捉えたものである。一般的に夜間の成層化した大気層(夜間境界層)は、観測地点付近のローカルな情報を含むため、本研究の目的である数100 kmスケールの地域的な影響を議論するためには適さない。一方、比較的安定した日中のデータは、PBLが発達した状態で観測された値であると考えられる。PBLは日の出とともに地表面が加熱されることによって形成され、日中にかけて徐々に発達し、その高度は午後には数 km にまで達する。しかしながら、PBL 高度が低い状況(午前中)では、地表面

の影響が相対的に強くなるため、また混合のスケールが小さいために、数 100 km スケールの空間代表性が得られない。一方、午後になって十分に発達した PBL は、より空間代表性を持ったデータであるといえる。13:00~17:00 LST のデータは、濃度の時間変化が小さいことから、また鉛直方向の濃度差も小さいので、十分に PBL が発達した状況で観測された値であると判断できる。従ってこの時間帯の高々度のデータを平均して日中平均値としたものを、空間代表性を持ったデータとして用いることにする。ただし、偶然ローカルな汚染を拾った時を省くため、この時間帯に得られたデータの最大値と最低値の差が 10 ppm を超えるものについては採用しなかった。

各サイトの日中平均値から Thoning et al. (1989)²¹⁾ の手法でフィッティング曲線を作成した (図 1 1)。比較のために JR-STATION と同緯度帯の NOAA の沿岸域のサイトでのフラスコサンプルのデータ¹⁷⁾ から計算したフィッティング曲線も示す。2009 年の夏季の極小データは 2008 年と同程度かサイトによってはそれ以下であり、それまで観測されていた増加傾向に停滞が見られる。これは NOAA のサイトにも約 1 ヶ月遅れて見られ、シベリアで観測された比較的低濃度の CO₂ を含む大気が全球的に広がったことを示唆している。2010 年夏は再び増加傾向を示す (BRZ では 2010 年あまりデータが得られなかったもののフィッティングカーブの信頼度は低い)。2009 年夏はエルニーニョであったため (図 1 2 (b))、シベリアの植生にも影響が見えた可能性が考えられる。2010 年夏はヨーロッパで気温が異常に高かったことが報告され²³⁾、Martivariate ENSO index は顕著に強く低いラニーニャが現れている (図 1 2 (b))。2009/2010 の冬には AO index が大きくマイナスにふれている。寒帯前線ジェットが弱まった状態となり、極域からの寒気が流入したことを示している。

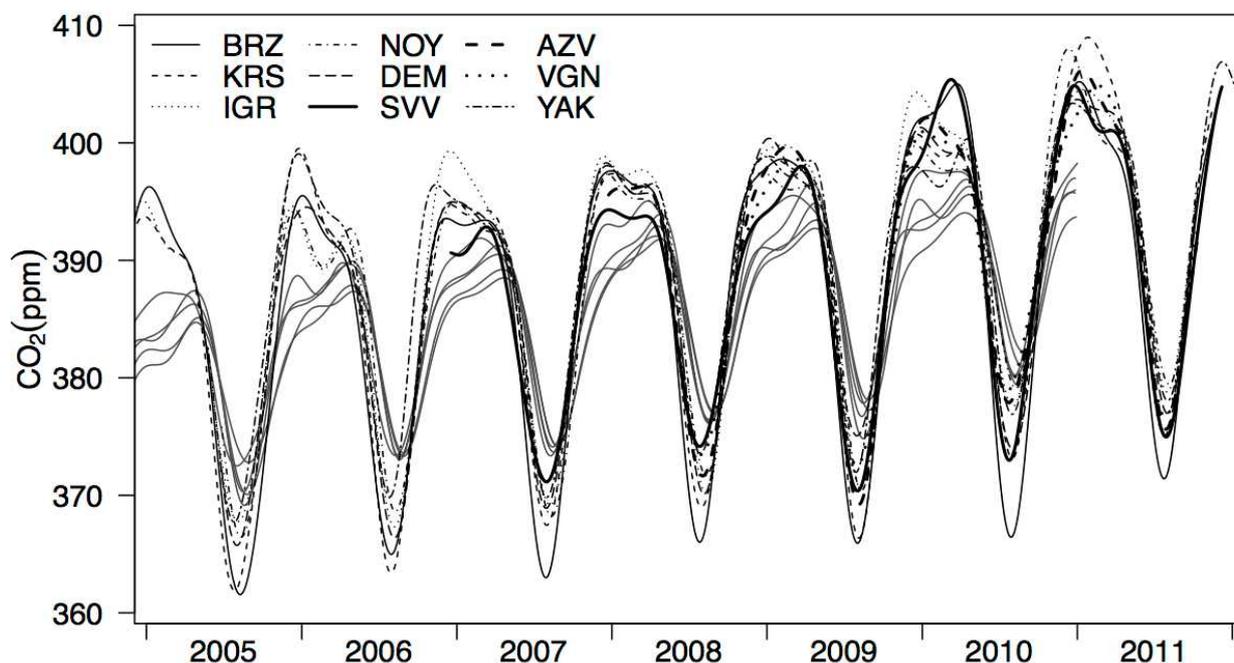


図 1 1. CO₂濃度の日中平均値から計算したフィッティング曲線。灰色のラインは NOAA のサイト (CBA、ICE、MHD、PAL、SHM) のフラスコデータ¹⁷⁾ から計算。

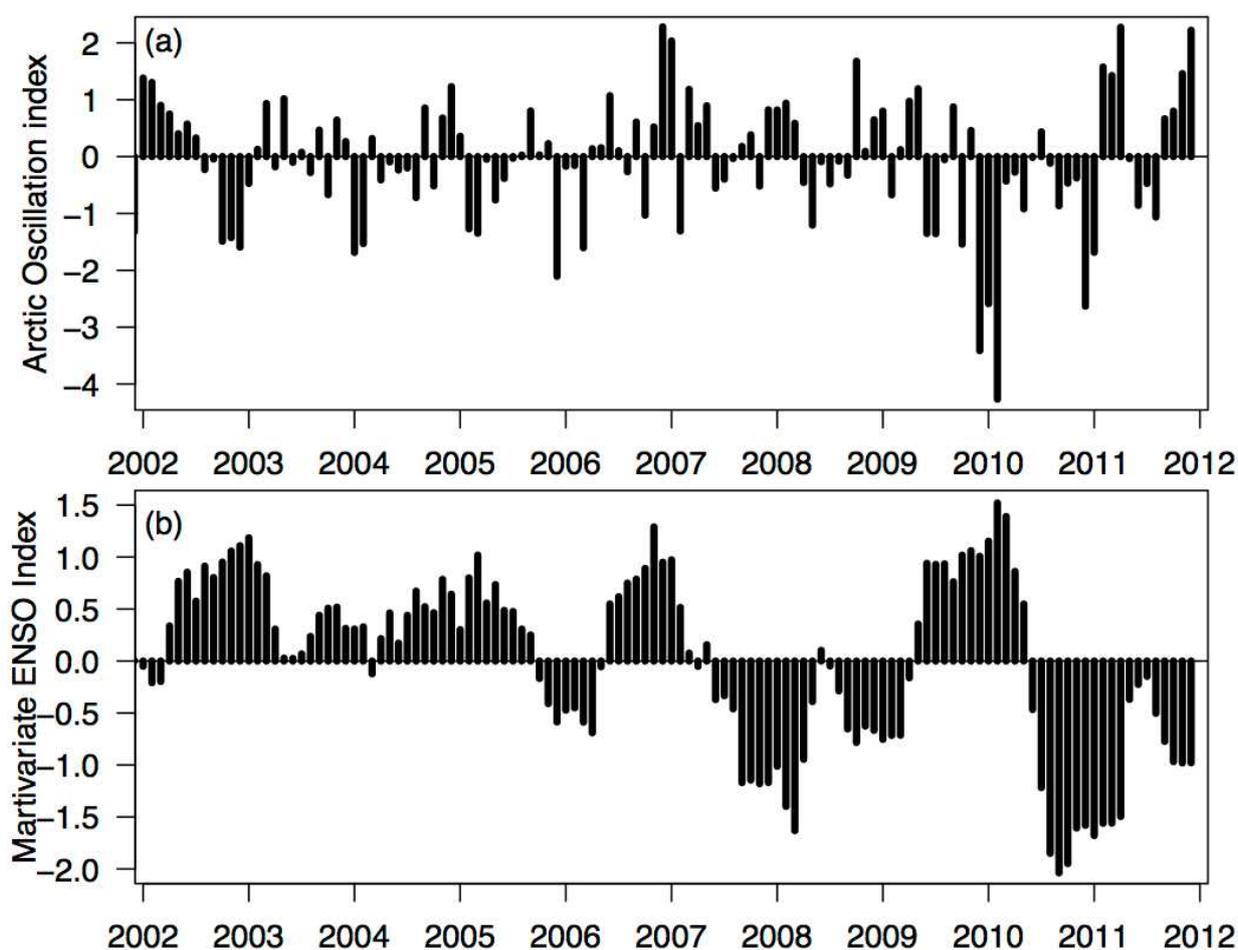


図12. (a) Arctic Oscillation index²⁴⁾、(b) Martivariate ENSO index²²⁾。

図13に、高々度の日中平均値から計算された経年変動を示す。どのサイトでもNOAAのバックグラウンドサイトと同様に約2 ppm/yearの増加がみられる。JR-STATIONによる値の方が数ppm高いのは、内陸部ではPBL高度が季節によって大きくかわり（夏季に高く、冬季に低い）、それと地表面からのCO₂フラックスの大きさ（夏季に負のフラックス、冬季に正のフラックス）が逆相関することによって見かけ上起こる現象であると考えられる (Rectifier effect)。前述したように2009年夏に停滞傾向が見られるが、その後再び増加している。

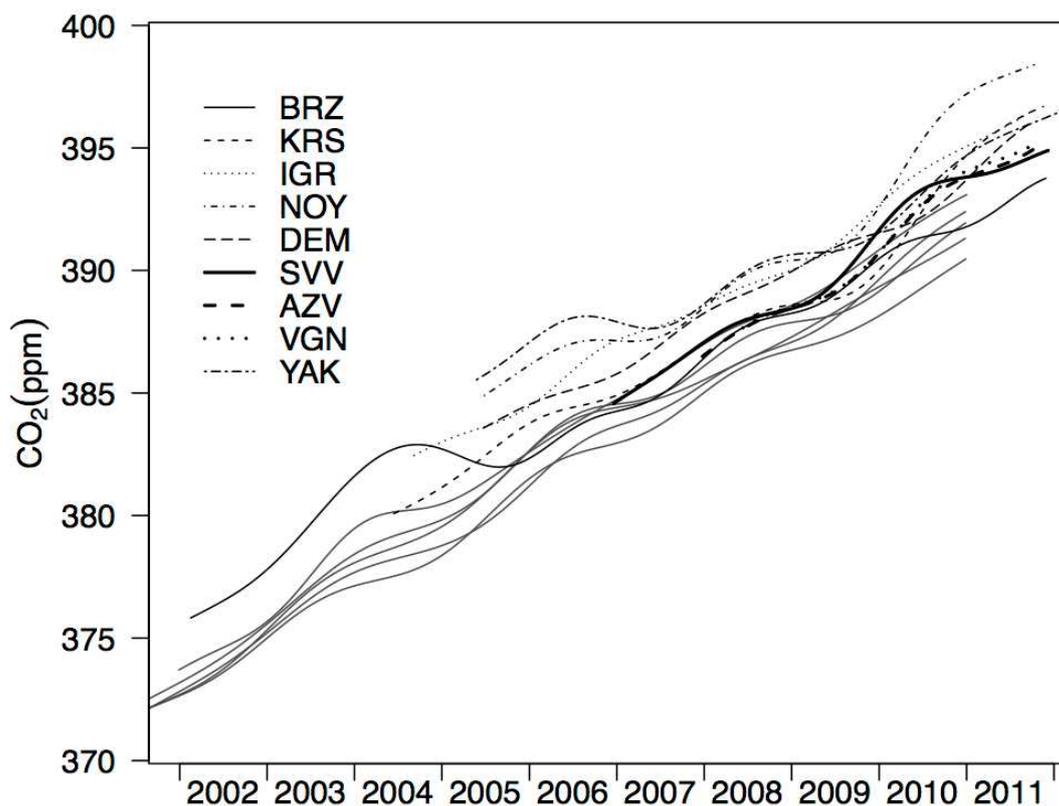


図1 3. CO₂濃度の経年変動曲線。灰色のラインはNOAAのサイト（CBA、ICE、MHD、PAL、SHM）のフラスコデータ¹⁷⁾から計算。

観測地点間の季節変動を比較するため、得られた全観測データから季節変動成分を取りだしたものを図1 4に示す。タイガ域を含む北の5サイト（BRZ, KRS, IGR, NOY, DEM）では最もCO₂濃度が高くなるのは12月であり、最も低くなるのは7月下旬から8月上旬である。ステップ域の南の3サイト（SVV, AZV, VGN）では比較的遅れて12月から3月の間に極大値を示すが、極小値は北のサイトと同様に7月下旬から8月上旬である。5月にはどのサイトでも急激なCO₂濃度の低下が始まり、単調に減少して極小値に達する。NOAAのバックグラウンドサイトと比較すると極小の時期が早く季節振幅が大きい。これは夏季にシベリアタイガにより大きなCO₂吸収が起こり、それが同緯度帯に徐々に広がったことを示唆している。特に中央タイガに位置するBRZとKRSでは一番大きな季節振幅を示している。

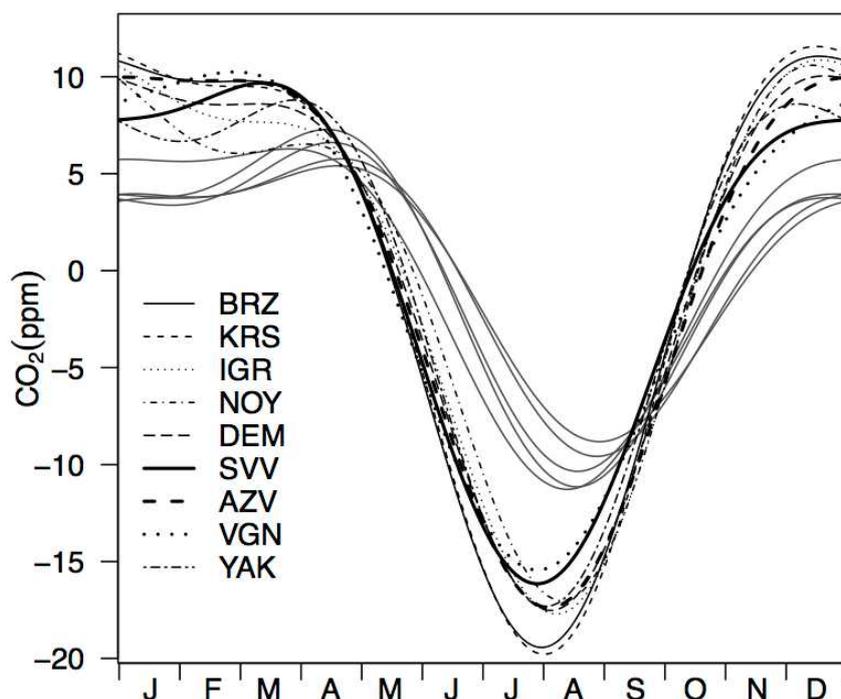


図 1 4. CO₂濃度の季節変動曲線。灰色のラインはNOAAのサイト（CBA、ICE、MHD、PAL、SHM）のフラスコデータ¹⁷⁾から計算。

(3) CH₄濃度の観測結果

CH₄濃度の観測はロシア政府からの許可取得がCO₂観測よりも遅れたため、BRZ、KRSでは2004年、IGR、NOY、DEMでは2005年、SVV、YAKでは2007年、AZV、VGNでは2008年に開始した。CH₄測定はシベリアでの観測のため新たに開発したSnO₂半導体センサー⁶⁾を用いた装置により行っているため、ノウハウの蓄積が浅く装置にトラブルがあっても改善までに時間のかかる事が多い。BRZとAZVでは観測開始直後からシステムトラブルによりデータが欠測していたが、現在では観測が継続している。一方でKRS、IGR、DEMでは長期にわたり連続観測が成功している。ただし2010年夏のハリケーンによりDEMでの電源システムにトラブルが起りデータが欠測した。現在は回復している。4. (1) ②章で述べたようにNOYとSVVのセンサーは原因不明のトラブルにより使用できない。

① タワー観測データの結果

JR-STATIONで観測されたCH₄濃度の1時間値を図15に示す。全サイトで、同緯度帯のNOAAの沿岸サイト（CBA、ICE、MHD、SHM）で観測される1900 ppb以下のバックグラウンド大気レベル²⁵⁾を大きく上回る、高濃度CH₄が見られる。特に北部のサイト（IGR、DEM）で年中高濃度ピークが観測されている。2高度間で約20分のタイムラグはあるが、低高度の値が高々度の値より高い場合が頻繁に観測されており、これはタワー近傍からの極めてローカルな放出源の影響を受けた場合や、地表面付近に形成される安定成層が鉛直混合を抑制し地上から放出されたCH₄が地表面付近に溜まり続ける時に起こると考えられる。

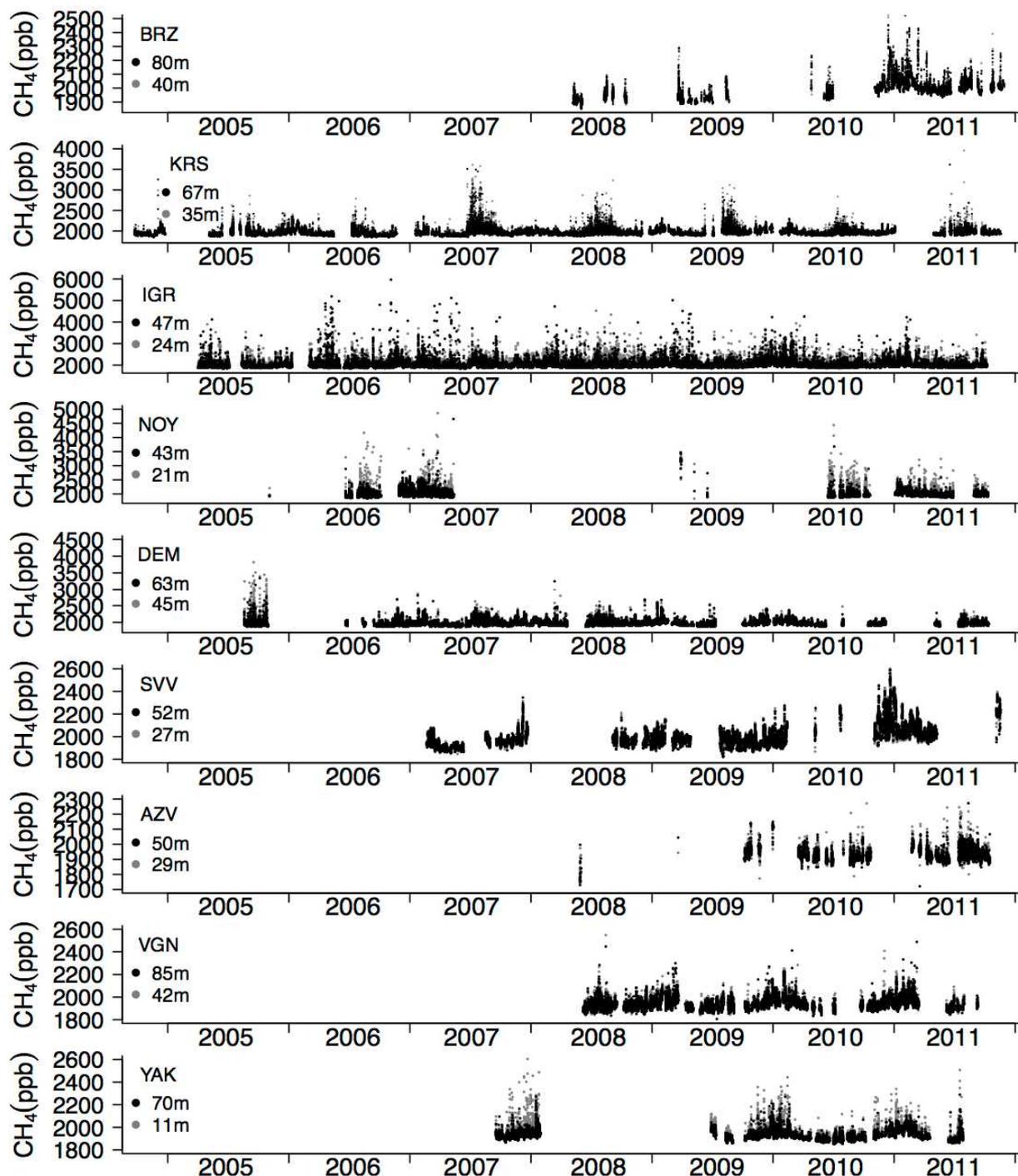


図15. JR-STATIONにおけるCH₄濃度(ppb)の1時間値。縦軸はサイトごとに適度な幅を選んでいるので注意。SVVとNOYはセンサー不調のため参考値。

CH₄濃度の日変動の例としてKRSにおける2009年の月平均値を図16に示す。CO₂の濃度変動と同様に春季から夏季にかけて、夜間は濃度が上昇し、日中は徐々に減少し午後に比較的安定する明瞭な日変動を示す。これは夏季には湿地帯から正のフラックスがあり、夜間には安定成層によってCH₄が蓄積するが、日中には混合層が発達し上空のCH₄濃度の低い大気とよく混合されることに起因する。CO₂と違うのは、地表が絶えず放出源になるため高々度インレットで得られる濃度が低

高度インレットの値を逆転することは無いことである。

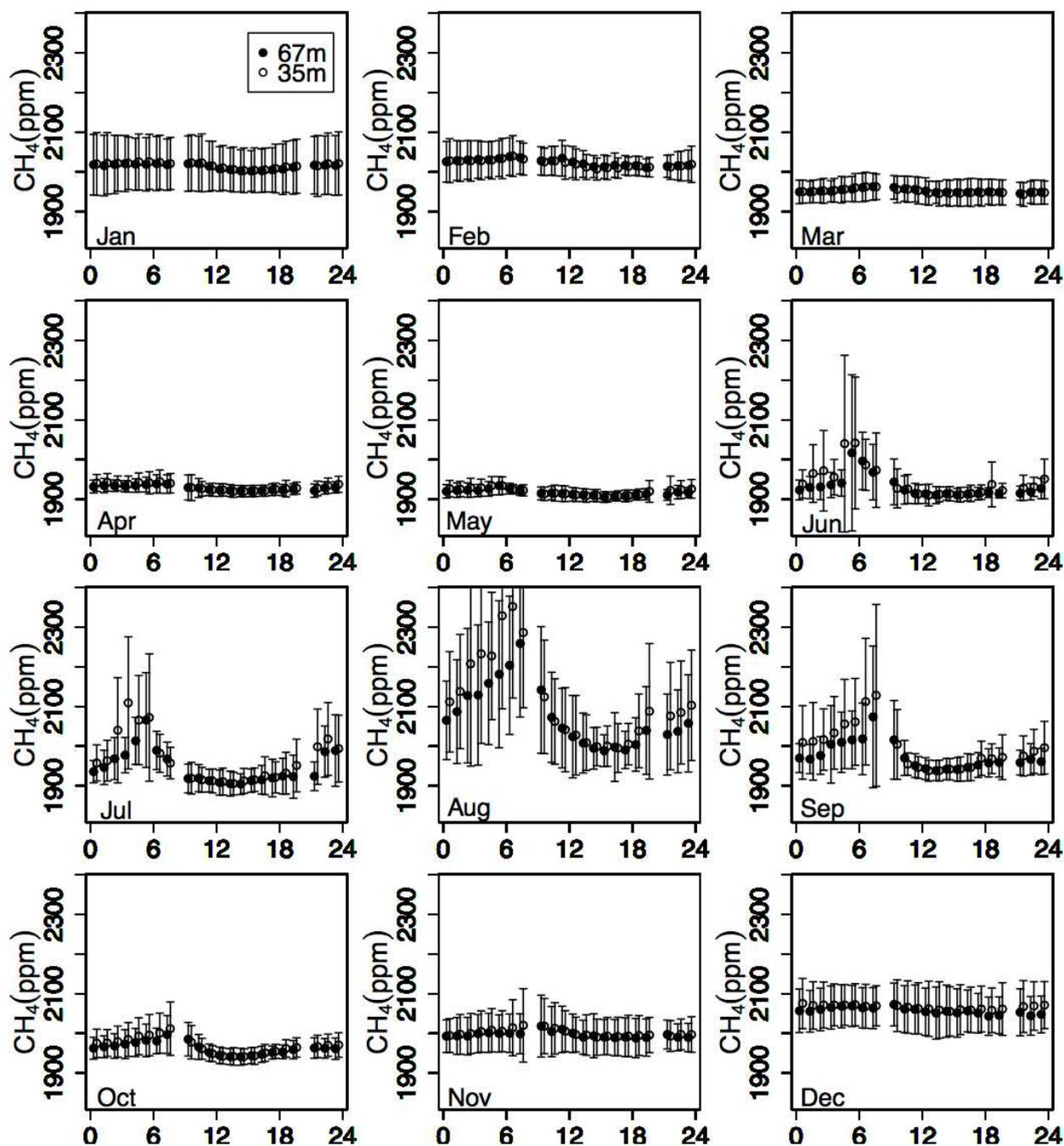


図 16. KRSにおける2009年の CH_4 濃度の月平均した日変動。横軸は地方標準時 (LST)。

エラーバーは 1σ 。

シベリアの広範囲にわたる代表的な CH_4 の特徴を調べるため、 CO_2 の解析と同様に日中値 (13:00 ~17:00) を抽出し、その間の最大値と最低値の差が設定した値以下の場合に、日中平均値を求めた。 CH_4 濃度のばらつきは JR-STATION の中でもサイトによって大きく異なり、例えば湿地帯に位置する IGR では大きいため、サイト毎に閾値を設けた (KRS; 100 ppb, IGR; 600 ppb, DEM; 100 ppb, VGN; 70 ppb, YAK; 60 ppb)。以上の処理でタワー近傍の局所的な影響やパイプラインの漏洩な

どからの一時的な影響を強く受けたデータは省くことができる。以下の解析ではこのデータ処理を行った後の高々度のデータを扱う。

以上の方法で求めた日中平均値から Thoning et al. (1989)²¹⁾の手法でフィッティング曲線を作成した(図17)。湿地帯に位置する IGR と DEM で大きな変動を示す。ステップ域の VGN と東シベリアの YAK では他のサイトと比較すると低い濃度で推移しているが、NOAA のバックグラウンドサイトよりは高濃度である。NOAA のサイトでの季節変動とは異なった特徴として、西シベリアのサイトでは夏季に極大が見られた。夏季には OH ラジカルによる CH₄ の分解が進むため、一般に濃度が下がるので、この現象はシベリアの観測域で夏季に強い CH₄ の放出源がある事を示唆している。西シベリアには世界最大の湿地帯が存在するのでそこからの放出が考えられる。

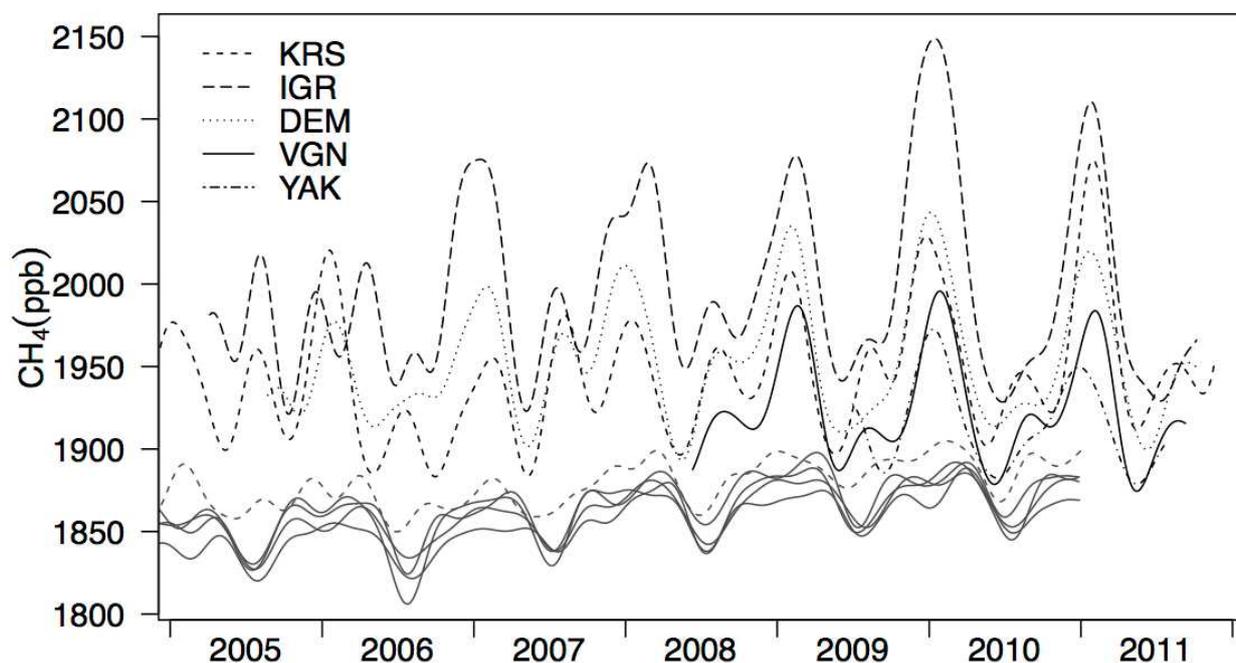


図17. CH₄濃度の日中平均値から計算したフィッティング曲線。灰色のラインは NOAA のサイト (CBA、ICE、MHD、SHM) のフラスコデータ²⁵⁾から計算。灰色の点線は PAL のデータから計算。

より詳細に季節変動を見るために、得られた全観測データから季節変動成分を取りだしたものを図18に示す。IGR では年中高濃度イベントが観測されたため夏季の極大は目立たなくなっている。一方で KRS や VGN は明瞭な夏季の極大が見られる。また NOAA のサイトの中でもフィンランドの標高 560 m にあるサイト (PAL) では、8 月あたりに小さな極大が見られる。フィンランドにも広大な湿地帯が存在するので、シベリアのサイトと同様に夏季の湿地からの CH₄ 放出の影響を受けているのだろう。一方で東シベリアの YAK でもわずかな夏季のピークは見られるが、YAK の夏季のそろったデータは 2010 年に限られるので、更なる議論には今後のデータの蓄積が必要とされる。

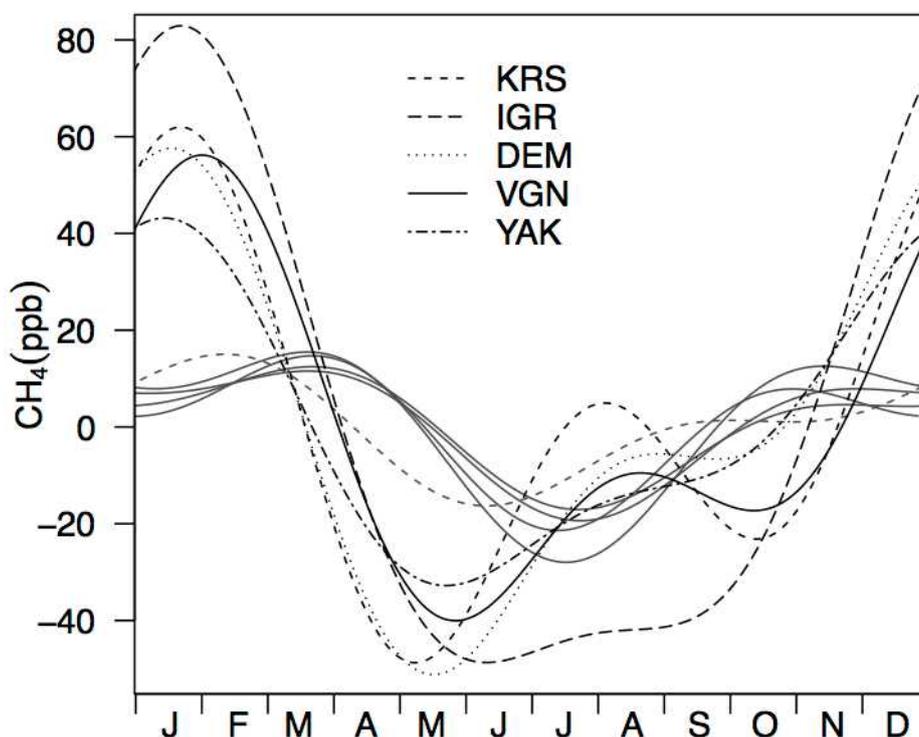


図18. CH₄濃度の季節変動曲線。灰色のラインはNOAAのサイト（CBA、ICE、MHD、SHM）のフラックスデータ²⁵⁾から計算。灰色の点線はPALのデータから計算。

② CH₄フラックスの経年変化

図10と図16に示したようにCO₂とCH₄は共に夜間に濃度極大をとるが、これは主に日々の大気の安定度と地表のフラックス量を反映した上昇量となる。ここで21:30 LSTを基準とした濃度から7時間の蓄積濃度をそれぞれ Δ CO₂、 Δ CH₄とする。ここで日々の大気の安定度はどちらの成分にも同じ影響を与えるので Δ CH₄/ Δ CO₂比はそれぞれのフラックス比を反映すると考えられる。そこでCASA植生モデルによるCO₂フラックス (F_{CO_2}) の同時間帯（夜間）の値を用いることにより以下の式よりCH₄フラックスを見積もった。

$$F_{CH_4} = F_{CO_2} \times \Delta CH_4 / \Delta CO_2$$

CH₄フラックスは7月に極大をとり、KRSで降水量の異常に高かった期間（2007年7月）に通常より2倍近くのフラックスのあったことが分かった（図19）。降水量のアノマリーを考慮したプロセスベースの陸域生態系モデル（VISIT）²⁶⁾によるCH₄フラックスのシミュレーション結果から、降水量増加によって引き起こされた地下水面深度の上昇により、CH₄放出量が増えたということが示唆された。モデルによってKRSからの年間（2005年～2009年）CH₄放出量が計算され（0.54、0.31、0.94、0.44、0.41、TgCH₄ yr⁻¹）、全球規模でCH₄濃度の上昇が観測された2007年には他の年より2倍近くの値を示した。しかしその値は全球の濃度上昇を説明できる量ではなく、またDEMでは2007年の増加は観測されていないので、2007年から始まった全球規模での増加を西シベリア域の湿地帯からの放出量変化によってのみで説明することは難しいことを示唆した。

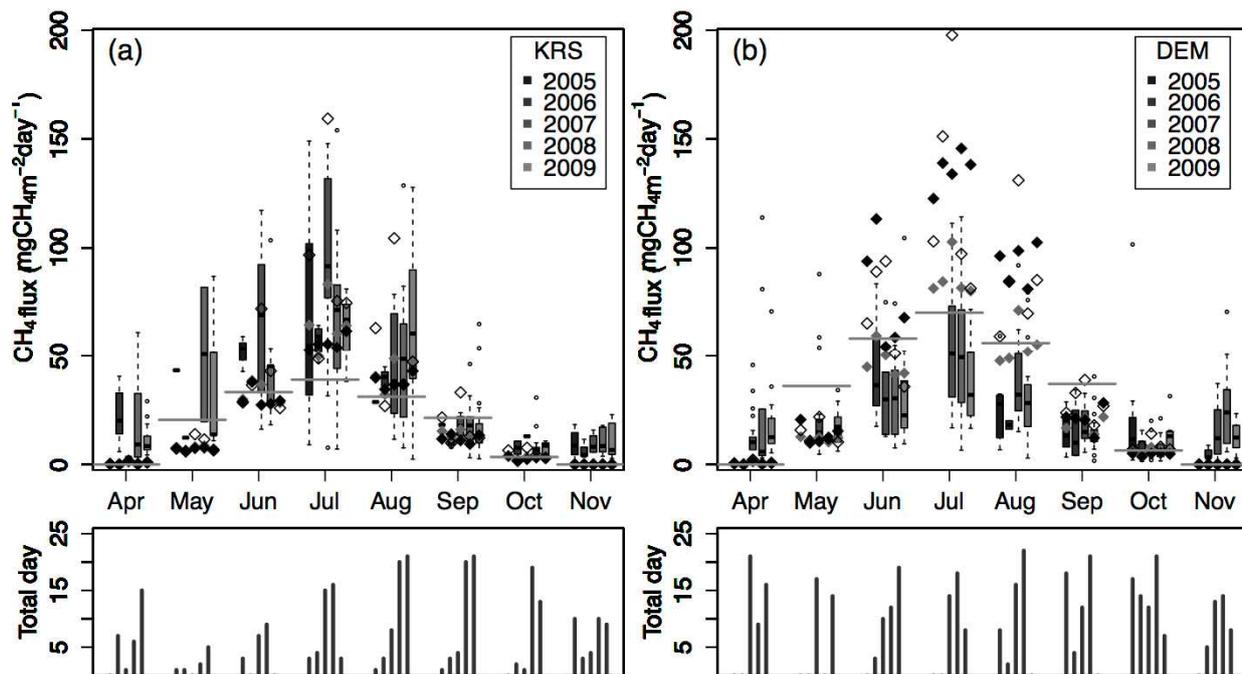


図 19. KRS (a)とDEM (b)における CH_4 フラックスの箱ひげ図(上段)。下段は各月の計算に用いたデータ数。◆はVISITによる計算値。降水アノマリーを考慮した結果；高感度(◇)と低感度(灰色◆)。

(4) 大気輸送モデルを用いた逆計算による炭素収支推定の結果

① 全球分布図と全球収支

図 20 に、Case 3 の逆計算により推定された炭素フラックスの年平均の全球分布図を示す。一般的に、陸域は吸収源となっているが、中央アジアや熱帯アメリカ、北アメリカの一部では放出となっている。海洋については、a priori フラックスの OTTM による推定値と同じ傾向を持つ。

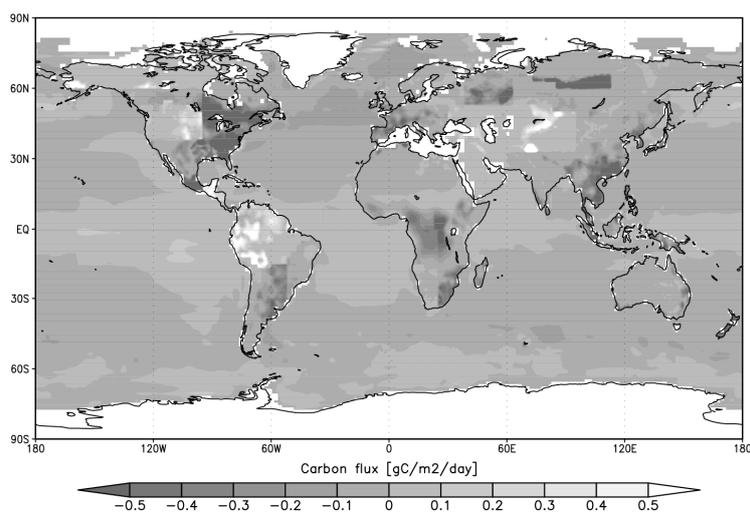


図 20. 推定された炭素フラックス (Case 3) の分布図 [$\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$]。2000年1月から2009年9月の平均値。水平解像度は $1^\circ \times 1^\circ$ 。化石燃料とバイオマス燃焼起源の放出は除く。

すなわち、北太平洋、赤道域、南極沿岸海域で放出となり、その他の領域では吸収となる。シベリアを含むユーラシア大陸北部に着目すると、ほとんどの地域で吸収となっており、特に、広大な混合樹林帯や針葉樹林を抱える中央シベリアで強い吸収となっている。一方、レナ川以東の一部の北東シベリア山岳地帯では、弱い放出となっており、これは、a prioriフラックスのVISITでも同様の傾向が見える。

表7に、a prioriフラックス、4ケースの推定フラックスについて、2000年から2009年の全球平均値、陸域平均値、海洋平均値をそれぞれ示す。バイオマス燃焼による放出（平均1.7 GtC/yr/global）は数値に含まれる。数値に含まれない化石燃料起源の放出量は、2000年から2009年で、約6.7から8.1 GtC/yr/globalと推移している。ここで、68領域を大きな領域（表2では全球、陸域、海域）に総計した際の不確実性は、次式で計算した。

$$\Sigma = \left(\sum_i^n \sum_j^n \sigma_{ij} \right)^{1/2}$$

ここで σ_{ij} は小領域（68の各領域） i と j の共分散、 n は総計領域に含まれる小領域数である。2000年から2009年の平均全球炭素収支はa prioriフラックス（-1.80 GtC/yr）と比較して、いずれの逆計算のケースでも低く（-3.50～-3.51 GtC/yr）推定された。また、推定フラックスに伴う不確実性は若干減少している。一方、陸域と海域の吸収量の分割は、逆計算のケース毎で若干異なる。陸域での差異は散在しているが、海域のCase 1（-1.55 GtC/yr）とCase 3（-1.61 GtC/yr）の違いは、主として北太平洋の吸収量の違いに起因しており、シベリアの観測値の影響が示唆される。t-SVDで解かれたCase 4では、海域の吸収が-2.03 GtC/yrと、他の逆計算ケースよりも大きな吸収を示しており、これは、Case 4で南極沿岸海洋での吸収が大きいことに起因する。

表7. a prioriフラックス、逆計算による推定フラックス4ケースについての全球炭素収支と不確実性（ 1σ ） [GtC/yr/region]。2000年から2009年の平均値。バイオマス燃焼は数値に含み、化石燃料起源の放出は除外している。

| Region | a priori flux [Gt/yr/reg.] | Estimated flux [Gt/yr/reg.] | | | |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
| Global total | -1.80 ± 5.28 | -3.50 ± 3.26 | -3.50 ± 3.21 | -3.51 ± 3.18 | -3.51 ± 4.00 |
| Global land | -0.39 ± 5.04 | -1.95 ± 3.08 | -2.00 ± 3.03 | -1.90 ± 3.00 | -1.48 ± 3.78 |
| Global ocean | -1.41 ± 1.58 | -1.55 ± 1.06 | -1.51 ± 1.06 | -1.61 ± 1.06 | -2.03 ± 1.31 |

シベリアタワー観測網がほぼ稼働した2008年における、1月と7月のCase 1とCase 3の推定フラックス、並びにそれら推定フラックスの差（Case 3 - Case 1）を図21に示す。炭素収支推定におけるシベリア観測ネットワークの寄与は、北方ユーラシアだけでなく、東ヨーロッパ、北アメリカ、温帯ユーラシアに及んでいることがわかる。シベリアデータを用いたCase 3の推定値では、東ヨーロッパと南シベリアの一部の地域において、NOAAデータのみCase 1よりも振幅が大きく推定されている。一方、北東シベリアにおいては、Case 3において、1月と7月の両月においてCase 1よりも放出量が大きく推定されている。従来のTransCom 3 experiment¹⁸⁾などでは1つの亜大陸にまとめられていた”Boreal Eurasia”地域が、領域を細分化すること並びにシ

ベリア観測値を用いることで、時空間に不均一であることが逆計算の結果でも示された。

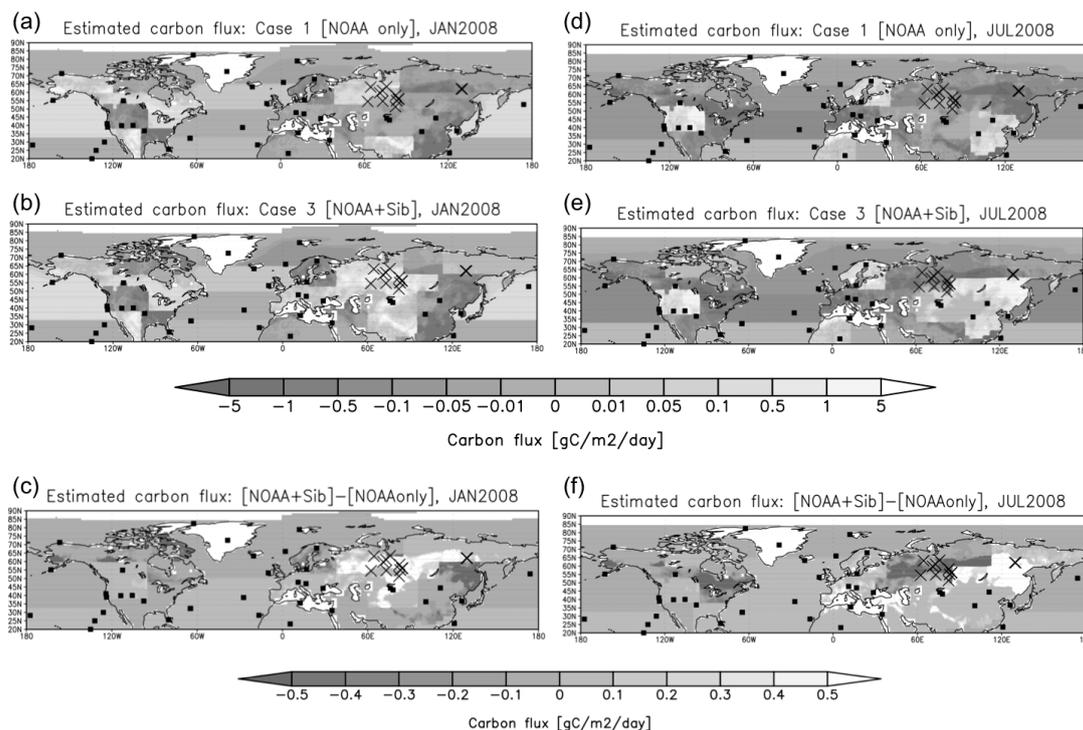


図 2 1. 2008年1月(a)-(c)と7月(d)-(f)における、Case 1 とCase 3の逆計算による推定フラックス及びそれらの差。フラックスの水平解像度は $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。クロスと丸は、それぞれシベリアサイトとNOAAサイトを示す。

推定フラックスの不確実性 (1σ) の低減に対するシベリア観測ネットワークデータの寄与を見るために、不確実性低減率 (Uncertainty Reduction) を次式で定義した。

$$UR = (1 - \sigma_{A11} / \sigma_{NOAA}) \times 100 \text{ [%]}$$

ここで、 σ_{A11} と σ_{NOAA} はそれぞれ Case 3 と Case 1 の推定誤差である。図 2 2 に、逆計算実行時期における不確実性低減率 [%] の最大値を各領域毎に示す。期待されたとおり、低減率は北方ユーラシアと周辺域で大きくなり、南半球を主とした他の地域では大きな差は見られない。これは NOAA サイトがシベリア地域にないこと、並びに a priori フラックスデータセットから求めた背景誤差分散共分散行列 \mathbf{Q} が、北方タイガに起因する変動により、もともと大きいことに起因すると思われる。不確実性低減は東シベリアや西シベリアの一部で約 80% に達する。特に東シベリアでは、YAK のタワー観測が開始されてから、不確実性低減が顕著であった。またシベリア観測ネットワークは風上の東ヨーロッパの不確実低減にも寄与していることが分かる。逆計算の期間 (約 10 年) を平均した不確実性低減率は、北方ユーラシアと東ヨーロッパの平均で約 22 % であった。

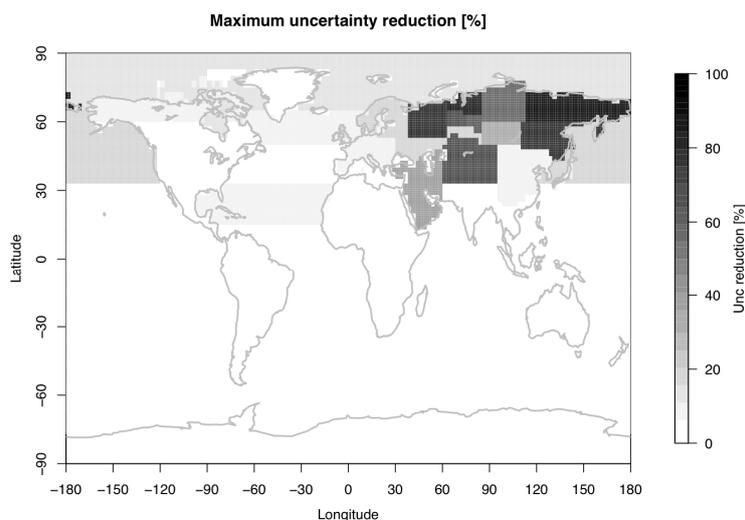


図 2 2. 逆計算に用いた68の各領域での2000年1月から2009年9月における最大の不確実性低減率[%]。

② シベリアとその周辺地域の推定フラックス

北方ユーラシアと東ヨーロッパの a priori フラックスと逆計算による推定フラックスの 2000 年から 2009 年の平均値を表 8 に示す。表 7 と同様に、バイオマス燃焼は陸域に含み、化石燃料起源の放出は除外した値である。北方ユーラシアの平均値は、a priori の -0.05 ± 1.39 GtC/yr に対して、Case 1 と Case 2 でそれぞれ -0.56 、 -0.52 GtC/yr、シベリアの全データを用いた Case 3、4 では、 -0.35 GtC/yr が得られた。これは Case 1 (NOAA データのみ) と Case 2 (NOAA とシベリア航空機データ) と比較して、弱い吸収量であり、NOAA データのみを使用した場合、シベリア森林地帯の大きな variance と相まって、吸収量を過大評価する可能性を示唆している。逆計算の Case 3、Case 4 では、正則化の手法が異なるものの、同程度の吸収量が得られ、この吸収量は正則化手法に対してはかなり堅牢 (robust) であると言える。一方、Case 3、Case 4 でも、8 つの小領域の見積もりは地域毎に差異が見られる (表 8、図 2 3)。西シベリアでは、全般的に、夏季に吸収、冬季に放出またはネットでゼロの季節変化を示すが、cropland の多い南部の Region 25 では、a priori の不確実性が少ないために、逆計算による推定差は小さく、混合樹林帯に位置する西シベリア中部 (Region 26, 27) では夏の吸収量、冬の放出量に若干の差が見られる。また、西シベリア北部 (Region 28) では、a priori の不確実性が他の西シベリア域と比較して大きいいため、逆計算の結果にばらつきが見られるものの、a priori フラックスでは最小値が 6 月であったものが、逆計算の結果ではいずれも 7 月が最小となった。中央シベリアから東シベリア (Region 29-32) は、夏季の吸収量が $1 \sim 2$ GtC/yr と大きく、逆計算の推定値でも 1 GtC/yr 程度の差があった。しかしいずれも吸収の最大値は 7 月と推定された。YAK サイトの位置する東シベリア北部 (Region 32) とその南部 (Region 31) では、シベリアの全データを用いた Case 3 の逆計算では、吸収量が最小となった。東ヨーロッパ (Region 46) では、a priori フラックス、推定フラックスのいずれもが 6 月に最小値を示し、シベリアの全領域で逆計算の推定値が 7 月に最小となったことと対照的である。

表8. a priori フラックス、逆計算による推定フラックス4ケースについての北方ユーラシア (Boreal Eurasia) と各領域の炭素収支と不確実性 (1σ) [GtC/yr/region]。2000年から2009年の平均値。バイオマス燃焼は数値に含み、化石燃料起源の放出は除外している。小領域 (Region 25~32, 46) では[gC/m²/yr]への換算値も併せて示す。

| Region | Unit | a priori flux | Estimated flux | | | |
|---|-------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
| Aggregated Boreal Eurasia | [GtC/yr] | -0.05 ± 1.39 | -0.56 ± 0.79 | -0.52 ± 0.69 | -0.35 ± 0.61 | -0.35 ± 0.87 |
| 8 small regions in Boreal Eurasia | | | | | | |
| Region 25 (southern west Siberia) Area: 6.41E+11 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.0059 ± 0.052 | -0.0066 ± 0.0023 | -0.0078 ± 0.011 | -0.0055 ± 0.03 | -0.0053 ± 0.0048 |
| | | 81.12 | -10.30 ± 3.59 | -12.17 ± 17.16 | -8.58 ± 46.80 | -8.27 ± 7.49 |
| Region 26 (middle-western west Sib.) Area: 4.74E+11 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.0070 ± 0.15 | -0.015 ± 0.020 | -0.024 ± 0.063 | -0.0042 ± 0.09 | -0.0071 ± 0.046 |
| | | 316.46 | -31.65 ± 42.19 | -50.63 ± 132.91 | -8.86 ± 189.87 | -14.98 ± 97.05 |
| Region 27 (middle-eastern west Sib.) Area: 4.07E+11 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.010 ± 0.12 | -0.015 ± 0.012 | -0.023 ± 0.070 | -0.0081 ± 0.11 | -0.014 ± 0.048 |
| | | 294.84 | -36.86 ± 29.48 | -56.51 ± 171.99 | -19.90 ± 270.27 | 117.94 |
| Region 28 (northern west Sib.) Area: 7.45E+11 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.00058 ± 0.23 | -0.037 ± 0.072 | -0.064 ± 0.13 | -0.039 ± 0.14 | -0.019 ± 0.11 |
| | | 308.72 | -49.66 ± 96.64 | -85.91 ± 174.50 | -52.35 ± 187.92 | 147.65 |
| Region 29 (southern central Sib.) Area: 1.77E+12 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.024 ± 0.26 | -0.051 ± 0.067 | -0.044 ± 0.12 | -0.026 ± 0.15 | -0.032 ± 0.052 |
| | | 146.89 | -28.81 ± 37.85 | -24.86 ± 67.80 | -14.69 ± 84.75 | 29.38 |
| Region 30 (northern central Sib.) Area: 2.10E+12 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.013 ± 0.58 | -0.18 ± 0.31 | -0.25 ± 0.49 | -0.29 ± 0.49 | -0.10 ± 0.26 |
| | | 276.19 | -85.71 ± 147.62 | -119.05 ± 233.33 | -138.10 ± 233.33 | -47.62 ± 123.81 |
| Region 31 (southern east Sib.) Area: 3.34E+12 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.012 ± 0.99 | -0.13 ± 0.71 | -0.052 ± 0.81 | -0.0073 ± 0.82 | -0.082 ± 0.57 |
| | | 296.41 | -38.92 ± 212.57 | -15.57 ± 242.51 | -2.19 ± 245.51 | -24.55 ± 170.66 |
| Region 32 (northern east Sib.) Area: 3.83E+12 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | 0.024 ± 0.68 | -0.13 ± 0.45 | -0.058 ± 0.46 | 0.028 ± 0.39 | -0.095 ± 0.48 |
| | | 6.27 ± 177.55 | -33.94 ± 117.49 | 0.46 ± 15.14 | 7.31 ± 101.83 | -24.80 ± 125.33 |
| | | 269.91 | 120.10 | 120.10 | 120.10 | 120.10 |
| Region 46 (East Europe) Area: 2.26E+12 m ² | [GtC/yr] [gC/m ² /yr] | -0.022 ± 0.61 | -0.18 ± 0.33 | -0.29 ± 0.61 | -0.19 ± 0.61 | -0.0086 ± 0.37 |
| | | 0.61 | -79.65 ± 146.02 | -128.32 ± 269.91 | -84.07 ± 269.91 | -3.81 ± 163.72 |
| | | 269.91 | 146.02 | 269.91 | 269.91 | 163.72 |

2000年から2008年の推定フラックスの年変動(図24)は、全般的に、Case 1よりもCase 3で大きくなっている。北方ユーラシアでは、推定フラックスは年間ネットで、吸収またはほぼゼロ(2006年のCase 3のみ)である。特にCase 3は、2002-2003年にCase 1よりも強い1 GtC/yr弱の吸収を示しており、これは、中央シベリアの2002-2003年の吸収に起因する。中央シベリアにおいては、逆計算の期間の各年において、Case 1、Case 3とも他地域よりも大きな吸収を示すが、西シベリアと東シベリアは放出と推定される年もあり、特に東シベリアは年変動が大きい。これは、植生分布とともに、東シベリアに多く見られるバイオマス燃焼の影響を強く受けていると言える。一般に、CO₂フラックスの年変動は、局地的な気象場とともに、エルニーニョ・ラニーニャ、大規模な火山噴火(1991年のピナツボ火山等)などの全球規模の気象場の変動に影響を受けると言われている。この点で、シベリアネットワークによる観測値を逆計算に取り入れることにより、これらの気象変動を反映し、シベリアの年変動が大きく推定されたと解釈できる。しか

