

地球一括計上

課題名	タワー観測ネットワークを利用したシベリアにおけるCO ₂ とCH ₄ 収支の推定		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成19-23年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	129,925千円 (うち23年度 25,100千円)
研究体制	独立行政法人国立環境研究所		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>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。</p> <p>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。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。</p> <p>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。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>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とメタン(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。</p> <p>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</p>		

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. 研究の内容と成果

(1) タワー観測ネットワーク

(JR-STATION: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network)

地球環境研究総合推進費による研究で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)。

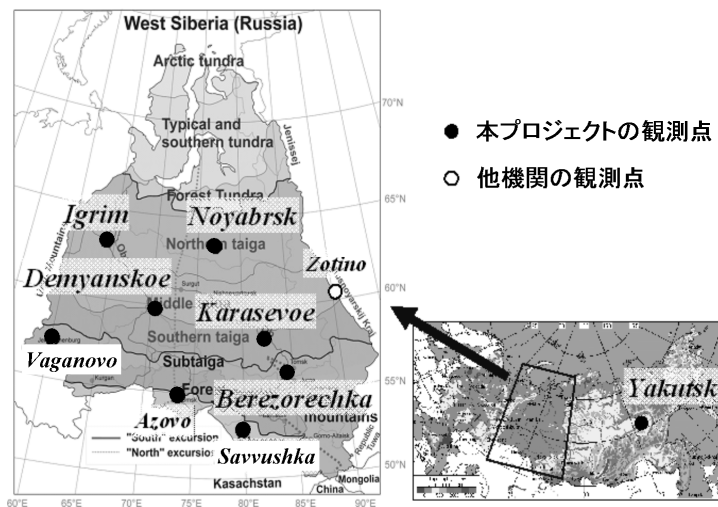


図1. 本プロジェクト(JR-STATION)の観測点。

(2) CO₂濃度の観測結果

2002年から2010年にかけてJR-STATIONで観測されたCO₂濃度の1時間値を図2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。

各サイトの日中平均値(13:00~17:00 GLT)からThoning et al. (1989)の手法でフィッティング曲線を作成した(図3)。比較のためにJR-STATIONと同緯度帯のNOAAの沿岸域のサイト(CBA: Cold Bay, USA; ICE: Iceland; MHD: Mace Head, Ireland; PAL: Finland; SHM: Shemya Island, USA)でのフラスコサンプルのデータ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。2009年夏はエルニーニョであったため、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、Martivariate ENSO indexは顕著に強く強いラニーニャが現れている。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。

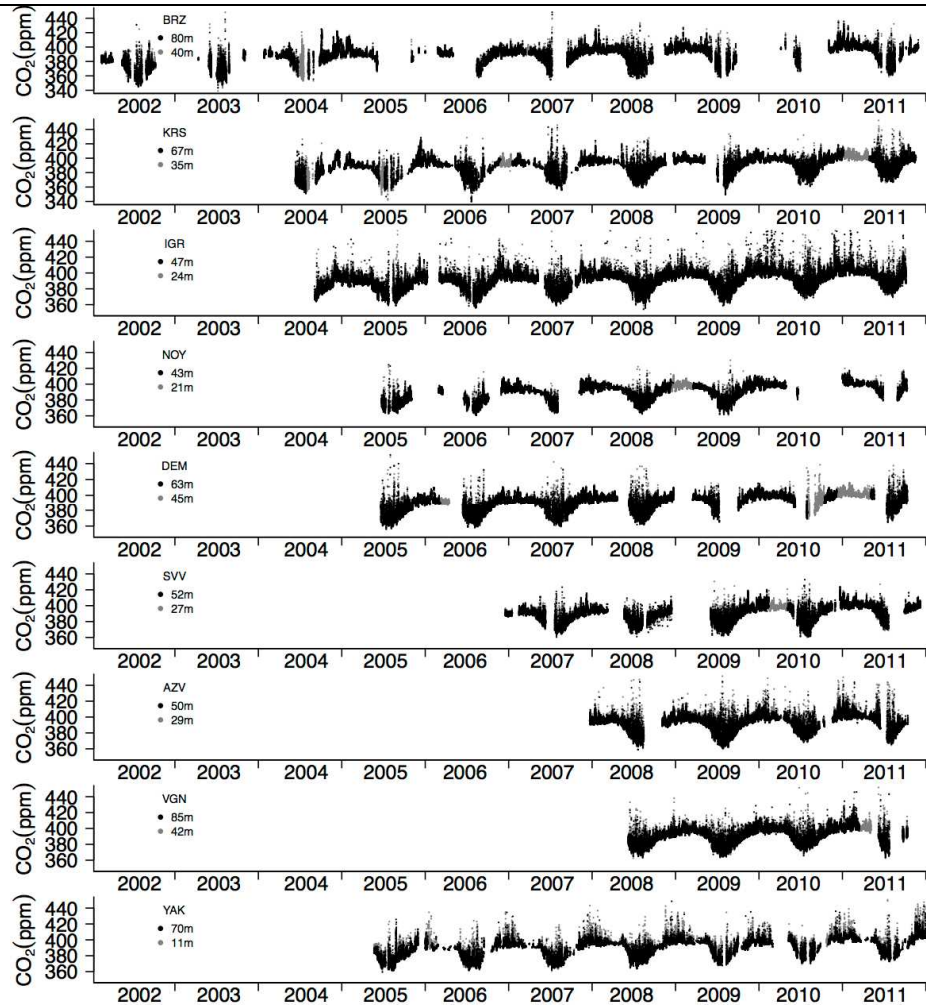


図2. 各タワーサイトにおけるCO₂濃度 (ppm) の1時間値。

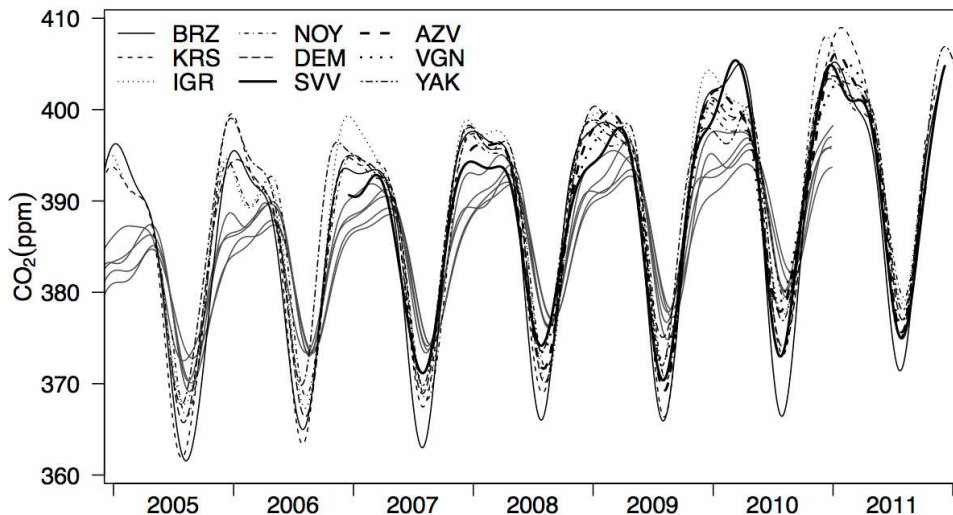


図3. CO₂濃度の日中平均値から計算したフィッティング曲線。灰色のラインはNOAAのサイト (CBA、ICE、MHD、PAL、SHM) のフラスコデータ²²⁾から計算した。

(3) CH₄フラックスの経年変化

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。

$$F_{\text{CH}_4} = F_{\text{CO}_2} \times \Delta \text{CH}_4 / \Delta \text{CO}_2$$

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4）。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）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。

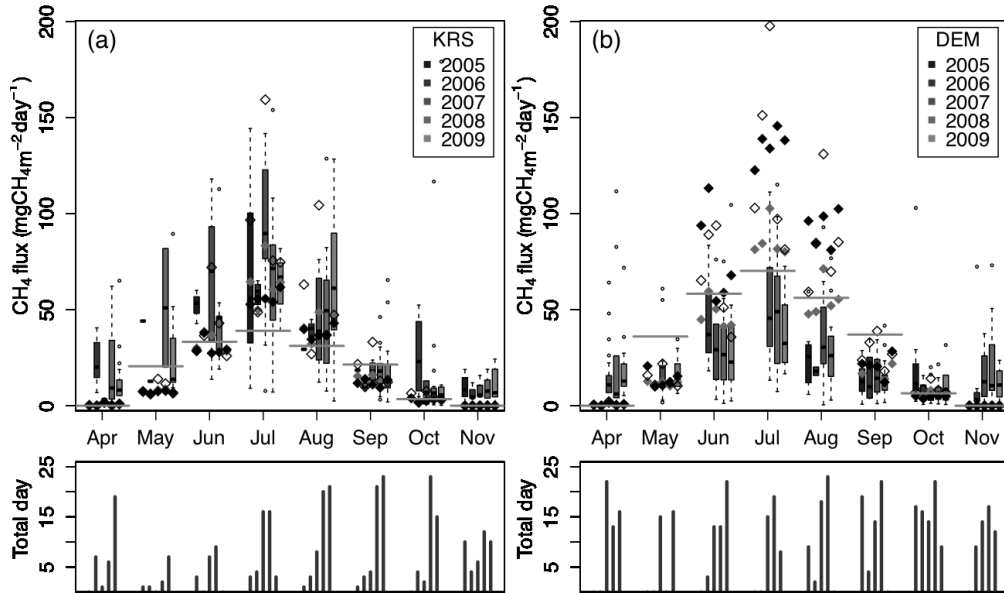


図4. KRS (a)とDEM (b)におけるCH₄フラックスの箱ひげ図(上段)。下段は各月の計算に用いたデータ数。◆はVISITによる計算値。降水アノマリーを考慮した結果；高感度(◇)と低感度(灰色◆)。

(4) 大気輸送モデルを用いた逆計算による炭素収支推定

JR-STATIONにおいて観測されたCO₂濃度観測値とNOAA/GMD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。北ユーラシアのフラックス推定値はNOAAの観測値のみを用いた場合は-0.56GtC/yrであったが、シベリアの観測値を加えると-0.35GtC/yrとなった。これまでのフラックス推定はシベリアが観測の空白域となっており、このことによってCO₂の吸収量を過大評価していたと言える。

2000年から2008年の推定フラックスの年変動(図5)は、全般的に、NOAAの観測値から推定したものよりもシベリア観測値を加えた推定の方が大きくなっている。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。北ユーラシアでは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。

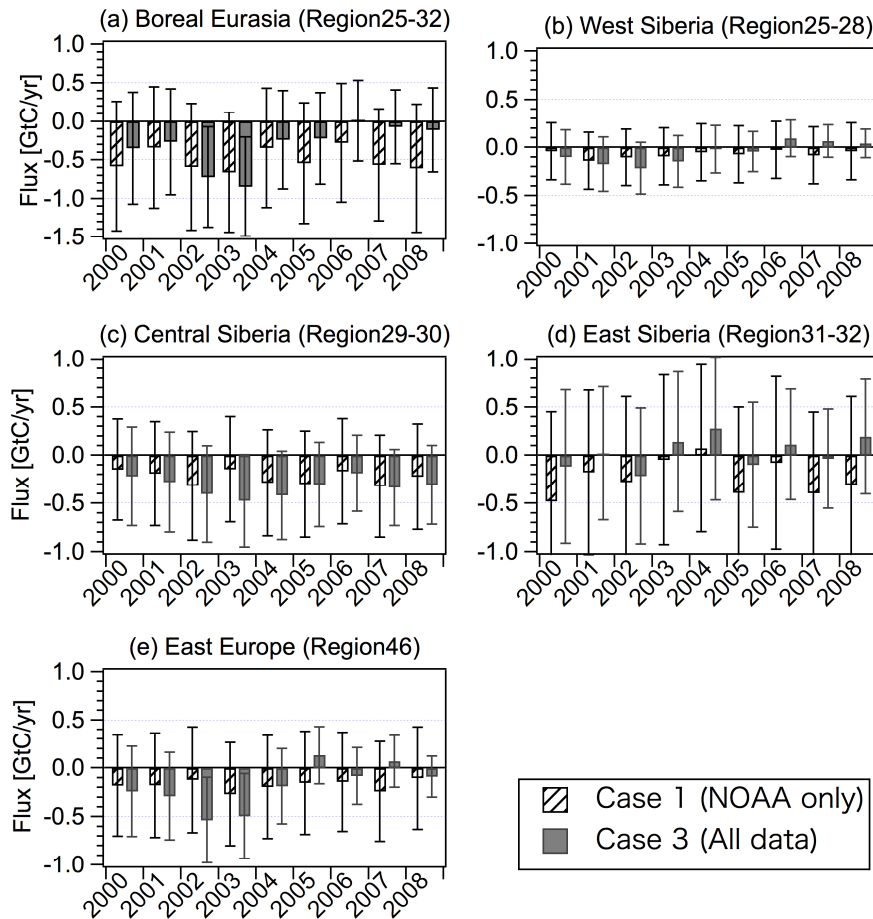


図 5. 逆計算より推定された 2000 年から 2008 年の年間フラックス。Case 1 と Case 3 の結果。エラーバーは推定誤差 (1σ) を示す。(a) 北方ユーラシア (Boreal Eurasia) (Region 25~32)、(b) 西シベリア (Region 25~28)、(c) 中央シベリア (Region 29~30)、(d) 東シベリア (Region 31~32)、(e) 東ヨーロッパ (Region 46)。バイオマス燃焼による放出を含む。

4. まとめ

・タワー観測で得られた CO_2 の日中平均濃度から求めたフィッティング曲線により、2009年夏季に経年増加が停滞し、2010年夏季には再び増加したことを捉えた。2009年夏はエルニーニョであったためシベリアの植生にも影響が見えた可能性がある。またこの停滞傾向・増加傾向がNOAAの沿岸域のサイトに1ヶ月ほど遅れて伝わったことが分かった。

・An-2による CO_2 濃度の鉛直分布の観測から得られた大気境界層内の平均 CO_2 濃度との比較から、タワーの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値を示すことが明らかになった。

・西シベリアの2つのサイト (KRS、DEM) に関して、 CO_2 と CH_4 の夜間の蓄積量と植生による CO_2 呼吸量の準気候値を利用して、西シベリア域からの CH_4 放出量の季節変動を明らかにした。 CH_4 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。

・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) による CH_4 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深度の上昇により、 CH_4 放出量が増えたということが示唆された。

・VISITによってKRSからの年間 CH_4 放出量が計算され、全球規模で CH_4 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。

- ・シベリア観測ネットワークを用いた逆計算を世界に先駆けて行い、シベリア領域を小分割することにより、推定フラックスに地域差があることを見いだした。

- ・逆計算によって、2000年～2009年平均の全球炭素収支は～3.51 GtC/yr/globalと推定された。また、北方ユーラシア領域（Boreal Eurasia）では、バックグラウンド観測値（NOAAネットワーク）のみを用いた逆計算の推定値は -0.56 GtC/yr/region、シベリア観測値を加えると-0.35 GtC/yr/regionとなり、吸収量が減少する結果となった。この差異は特にシベリアの7月に顕著に見られた。

- ・バックグラウンド観測値（NOAAネットワーク）のみの逆計算結果と比較することにより、シベリア観測値が、シベリア及び周辺地域の推定フラックスの不確実性低減に寄与することが実際に明らかとなった。

- ・逆計算で得られた結果を用いてフォワード計算を行い、独立観測値（中央シベリアZOT上空）と比較した結果、a prioriフラックスのみ計算結果よりも、統計的に良い一致が得られた。この結果は、逆計算の結果が妥当であることを示すものである。