

課題名 2A-1202 GOSATデータ等を用いた全球メタン発生領域の特性抽出と定量化

課題代表者名 林田佐智子（奈良女子大学研究院自然科学系 教授）

研究実施期間 平成24～26年度

累計予算額 122,196千円（うち26年度41,422千円）  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード GOSAT、メタン、地球温暖化、インバース解析、収支推定、シベリア、アジア、フラックス、  
現地観測、航空機観測

## 研究体制

- (1) GOSATデータ利用手法の開発と人工衛星データの複合的解析による全球メタン濃度分布の特徴抽出（奈良女子大学）
- (2) GOSAT熱赤外センサーのメタン高度分布データを用いた対流圏メタンの動態把握（千葉大学・環境リモートセンシング研究センター）
- (3) 主要メタン発生域におけるメタン放出量推定の高度化（千葉大学）
- (4) GOSAT短波長赤外データと現地観測による大気中メタン濃度解析と収支推定（独立行政法人 国立環境研究所）

## 研究概要

### 1. はじめに（研究背景等）

大気中のメタン濃度は、産業革命までは最大で700 ppbv程度であったと考えられているが、現在では約1800ppbv以上へと増加している。放射強制力の推定では、メタンは二酸化炭素に次ぐ第二位の温室効果ガスである。このため、メタン発生量の全球的分布を定量的に導出することが強く求められている。これまでの観測ステーションのほとんどが海洋上の島や海岸沿いにおいて、バックグラウンド濃度を知ることが主目的であったため、メタンの発生地域の特徴は未解明な部分が多い。これに対して、2005年以降には、衛星観測によって発生源のある内陸も含めた全球的メタン分布が知られるようになった。全球的には、シベリア、アフリカ中部、南米とともにモンスーンアジアがメタンの大発生地であることが明らかになってきている。

我が国では2009年に温室効果ガス観測に特化した世界初の衛星GOSAT（温室効果ガス観測技術衛星：Greenhouse gases Observing SATellite、愛称「いぶき」）が打ち上げられ、現在まで5年以上にわたってメタンと二酸化炭素の全球分布の観測データを蓄積することに成功している。GOSATでは温室効果ガスの垂大陸スケールでの吸収・排出量の推定精度を高め、地域ごとの吸収・排出状況の把握に貢献することが期待されている。またGOSATは、二酸化炭素のみの観測を目的としている米国のOCO-2（Orbiting Carbon Observatory-2）衛星とは異なり、メタンの観測が可能であることが大きな特徴である。さらにGOSATは、地上付近まで感度のある短波長赤外バンドによって気柱平均濃度が観測できることに加え、同一の視野で熱赤外バンドによってメタン濃度の鉛直分布を観測できる世界で唯一の衛星である。このような特徴からGOSATのメタン観測データの有効利用にはとりわけ大きな期待が寄せられている。

一方、国立環境研究所地球環境研究センターでは、長年にわたって、定期貨物船による太平洋上観測や、メタンの大放出源であるシベリアにおける航空機観測ならびにタワーネットワーク観測を行ってきた。このような長期観測を行っているグループは世界でも他に例が無く、貴重なデータの蓄積がなされている。また平行して、これまで蓄積されてきた衛星と現地観測データを利用して地域毎のメタン発生量を推定するために、インバース解析システムの開発研究が精力的に進められてきた。

このような背景のもと、本研究は衛星で観測される大気メタン濃度の情報を最大限活用し、これに直接観測で得られたメタン濃度データを加えてインバース解析を行い、メタン放出の分布特性と定量的評価を目的として開始された。本研究期間中に、GOSATの観測データをインバース解析に投入して、全球の月別メタン収支が推定された、その結果は、環境省と国立環境研究所、JAXAによってすでに報道発表されている（2014年3月27日）。

## 2. 研究開発目的

本研究では、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)で観測される大気中メタン濃度の情報を最大限活用し、これに長年積み上げてきた大気の詳細観測で得られたメタン濃度データを加えて総合的に解析することにより、全球メタン発生領域の特性抽出を行う。観測データに基づく知見に基づき、インバースモデルから全球的なメタンの発生源の定量化を行うことが最終目的である。

このために本研究では、GOSATの短波長赤外(SWIR)バンドから得られる気柱平均濃度データの詳細な解析を行うと共に、熱赤外(TIR)バンドからメタン鉛直分布データを導出する手法(リトリーバル手法)を開発・検証する。またGOSATだけでなく他の衛星データも活用して、全球的にメタン放出源領域における特徴を抽出する。また、これまで国立環境研究所で実施してきた、シベリアにおける航空機観測とタワーネットワーク観測データ、および太平洋における船舶観測データを総合的に解析し、インバースモデルへ投入するための手法を確立する。さらにこれまでデータの空白地帯であったアジアの湿地・水田地帯に大気観測拠点を新設し、大気濃度の観測態勢をこれまでもまして強化する。

これらの解析結果をインバースモデルに投入し、メタンの放出分布の定量化を行う。特に水田についてはインバースモデルのアプリオリとしても使われているボトムアップ式の推定量を修正するために、メタン発生過程の解明に踏み込んだ現地観測を実施する。また、インバース解析で推定されたフラックス推定量を、独立なデータと比較し、その信頼性の確認に貢献する。

## 3. 研究開発の方法

### (1) GOSATデータ利用手法の開発と人工衛星データの複合的解析による全球メタン濃度分布の特徴抽出

#### 1) アジア地域におけるメタン分布の特性解析

GOSATなどの短波長赤外波長で観測されたメタン気柱平均混合比を、冠水率などの地表面情報やエミッションインベントリマップと比較し、稲作とメタン発生の関係の特徴を解析した。

#### 2) アフリカ地域におけるメタン分布の特性解析

GOSATで発見されたアフリカ上空のメタン高濃度について解析した。

#### 3) シベリアにおける航空機観測データとGOSAT/SWIRバンドから導出されたXCH<sub>4</sub>の比較

メタン発生源地域である高緯度帯シベリアのノボシビルスクとスルグートで観測された航空機データを用いて、高緯度帯におけるGOSAT/SWIRで得られたXCH<sub>4</sub>の信頼性を確かめることを目的として比較解析を行った。

#### 4) インバース解析で得られたGOSAT/L4BデータとGOSAT 熱赤外(TIR)バンドで観測されたメタン鉛直分布との比較解析

本研究実施期間中に、サブテーマ4の成果としてインバース解析による全球メタンフラックスの推定量が導出され、本プロジェクトの目指すべき最重要の目標が達成された。しかし、インバース解析の結果を検証する確立した手法はなく、得られた成果の信頼性を担保するためには、さらに様々な実測値との比較が重要となる。その一つのアプローチとして、インバース解析に含まれていない観測結果と、インバース解析の結果得られたL4B(推定したエミッションに合わせた濃度分布)とを比較することがある。GOSAT/TIRから導出されたメタンプロファイルのデータは本研究で行ったインバース解析に含まれていないため、独立なデータとして検証の対象となる。

### (2) GOSAT熱赤外センサーのメタン高度分布データを用いた対流圏メタンの動態把握

#### 1) GOSAT/TIRバンドからのメタン導出アルゴリズムの開発

GOSAT/TIRバンドから可能な限り高い高度分解能でメタン濃度を導出するためのメタン導出アルゴリズムを開発・改良した。アルゴリズムバージョンV00.01からV01.0xへの改良の主要点は表(2)-1の通りである。

表(2)-1. TIRバンドのメタンリトリーバルの改良点。左は旧アルゴリズム(V00.01)、右はメタン濃度の高精度導出を目的に改良したアルゴリズム(V01.0x)。

V00.01(旧)	V01.00(新)
■ 1210-1360 cm <sup>-1</sup>	■ 1140-1220, 1220-1370 cm <sup>-1</sup> (N <sub>2</sub> O弱吸収帯の追加)
■ CH <sub>4</sub> プロファイルのみ導出	■ CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> 気温プロファイルの同時導出
■ N <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> O, 気温プロファイルはモデルパラメータ誤差	■ モデルパラメータ誤差なし
■ 全波長一律のSNRを設定	■ 熱真空試験時のSNRを使用
■ チャンネルを選択(情報量基準、バイアスが大きいチャンネルは恣意的に除外)	■ 上記の波長範囲内の全チャンネルを使用
■ スペクトルバイアスは考慮せず波数位置の補正なし	■ 同時導出の地表温度で非放射輝度依存のスペクトルバイアス、同時導出の地表放射率で放射輝度依存のスペクトルバイアスの補正、中心波数位置の補正

#### 2) 導出されたメタン高度分布データのデータ質検証

グアム、シベリアおよび太平洋上空の航空機観測との比較を行い、GOSAT/TIRバンドで導出されたデータ質の検証を行った。

### (3) 主要メタン発生域におけるメタン放出量推定の高度化

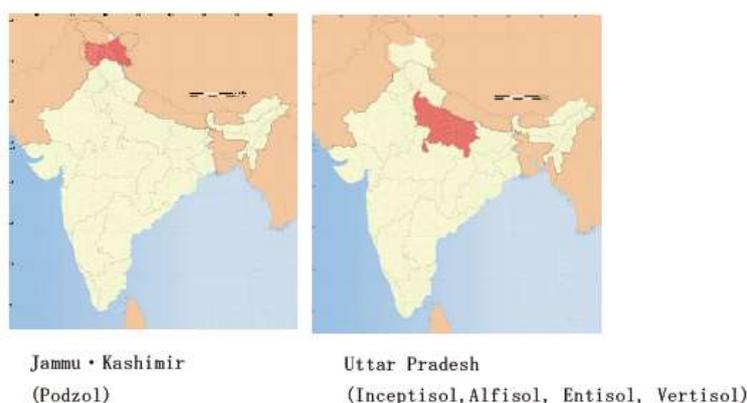
#### 1) フラックス測定 of 精緻化

ベトナム・アンジャン省チャウドック市郊外ヌイサン付近ではフルダイクでの水稲栽培とセミダイクでの洪水・養殖漁業のコントラストがみられる。この地域でフラックス測定と平行し、近辺のヌイサン山頂で大気ガス試料採集を行った。

#### 2) 土壌培養によるメタン生成能解析

南～東アジアの各地域における代表的な稲作形態下の土壌を採取し、室内培養試験を行い、メタン生成能を測定した。インド北部、土壌種が異なる5か所の水田より土壌を採取し、土壌理化学性・微生物性分析および室内培養試験によるメタン生成能の解析を行った。調査地概要は図(3)-1、表(3)-1の通りである

採取した土壌試料を培養瓶に充填し、蒸留水を加えて湛水状態で30℃の恒温器内にて20日間培養した。培養開始後から、60時間ごとにガスを採取し、生成したメタン濃度を測定した。各生成量の積算推移を解析し、土壌種ごとのメタン生成能を比較した。土壌理化学性については、土壌pH、土壌全炭素(TC)・全窒素(TN)含有率、硝酸態窒素・アンモニア態窒素含有量、過マンガン酸可酸化性炭素量(POXC)をそれぞれ測定した。また、土壌微生物性として、メタン生成古細菌に特異的な遺伝子(mcrA領域)のコピー数をリアルタイムPCRで測定し、メタン生成古細菌の定量を行った。



図(3)-1 土壌採取地域概要

表 (3)-1 土壌区分情報と採取地点詳細

	土壌区分				
	Podzol	Inceptisol	Alfisol	Entisol	Vertisol
採取地点	Jammu and Kashmir	Banaras Hindu University campus, UP	Mirzapur, UP	Maharajganj, UP	Chandauli, UP
緯度	32° 5' - 33° 3' N	25° 16' N	25° 09' N	27° 10' N	25° 14' N
経度	70° 0' - 74° 4' E	83° 03' E	83° 34' E	83° 32' E	83° 15' E
土性 (%)	Sand 33; Silt 65; Clay 6	Sand 32; Silt 65; Clay 3	Sand 34; Silt 64; Clay 5	Sand 31; Silt 64; Clay 7	Sand 6; Silt 82; Clay 12

### (4) GOSAT短波長赤外データと現地観測による大気中メタン濃度解析と収支推定

#### 1) 北インド水田地帯における大気サンプリングサイトの新設

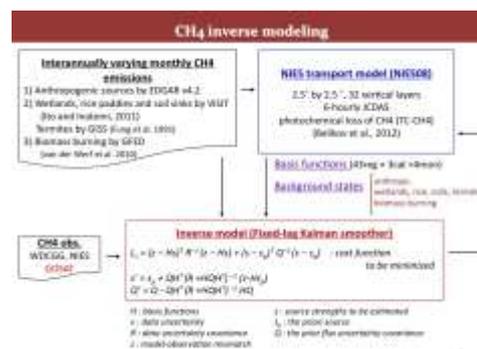
北インド水田地帯での大気中メタン濃度を観測するため、国際稲作研究所(IRRI)の協力のもと、ハリアナ州カルナル市において2013年8月から2014年8月まで大気サンプリングを実施した。2014年9月以降は、デリー大学ならびに東京大学大気海洋研究所の協力を得て、ハリアナ州ソーニーパットにサンプリング装置を移設し、大気サンプリングを継続した。

## 2) シベリアにおける航空機観測、タワーネットワーク観測、チャンパー観測、および太平洋における定期船舶観測

国立環境研究所・地球環境研究センターでは、シベリアの3地点(スルグート、ノボシビルスク、ヤクーツク)において、1ヶ月に1度程度の頻度で航空機を利用してメタンの鉛直プロファイルを観測している。また、シベリアの8箇所において、タワー観測ネットワーク(JR-STATION: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network)を構築しており、タワー上の複数高度でメタンや二酸化炭素濃度の現地連続観測を行っている。さらに、太平洋を日本-オーストラリア-ニュージーランド間で往復する定期船舶、ならびに日米間を往復する定期船舶を利用して、広域大気試料採取を行っている。本研究では、これらの大気モニタリングデータをインバースモデルを用いたメタン収支推定にも入力データとして利用した。

## 3) GOSATデータとインバースモデルを用いた全球メタン収支推定

GOSAT/SWIRメタンメタン気柱平均濃度データ( $XCH_4$ ) (V02.21)に加え、WMOによる温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)地上地点観測データ、および上記の国立環境研究所が実施しているシベリアにおける大気モニタリングプロジェクトによる航空機観測およびタワー観測データを入力にして、月別の地上メタンフラックス推定値を算出した。図(4)-1に概要を示す。



図(4)-1 メタンのインバースモデルの概要

## 4) 地上観測データとインバースモデルを用いた南アジアのメタン収支推定

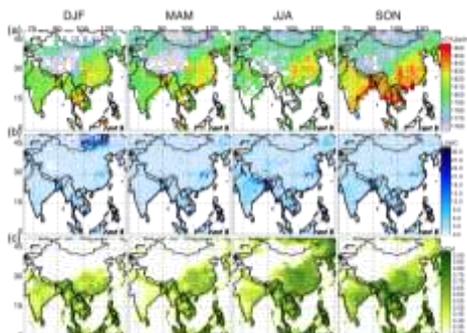
細かい時空間スケールのメタン濃度変動を解析することが可能な、オイラー型とラグランジュ型の大気輸送モデルを結合したモデル GELCA (Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model) を用いて、地上観測から得られたメタン濃度データから領域メタンフラックス推定を行った。

## 4. 結果及び考察

### (1) GOSATデータ利用手法の開発と人工衛星データの複合的解析による全球メタン濃度分布の特徴抽出

#### 1) アジア地域におけるメタン分布の特性解析

GOSATなどの衛星から短波長赤外波長で観測されたメタン気柱平均混合比( $XCH_4$ )を、冠水率などの地表面情報やエミッションインベントリマップと比較し、特に稲作とメタン発生の関係の特徴を解析した。図(1)-1は2009年から2014年までのGOSAT/SWIRバンドの観測値 $XCH_4$ (上段)を冠水率(中段)と植生指数(下段)の分布と比較したものである。通常、バックグラウンド地域においてメタン濃度は、OH濃度の高い夏に低く、冬に高くなるのがよく知られている。しかし、図(1)-1からわかる通り、この領域ではメタン濃度は雨季(夏)に高く乾季(冬)に低い。一方、冠水率と植生指数は明らかに雨季に高く、地表面被覆の様態にもなってメタンの発生が変動し、大気中メタンの変動を支配していることが推定できる。稲作周期とメタン濃度の季節変動の間には強い相関関係が得られた。SCIAMACHYの観測時期とGOSATの観測時期は異なっているが、両者のメタン分布の地理的特徴・季節変動はおおむね整合的であった。

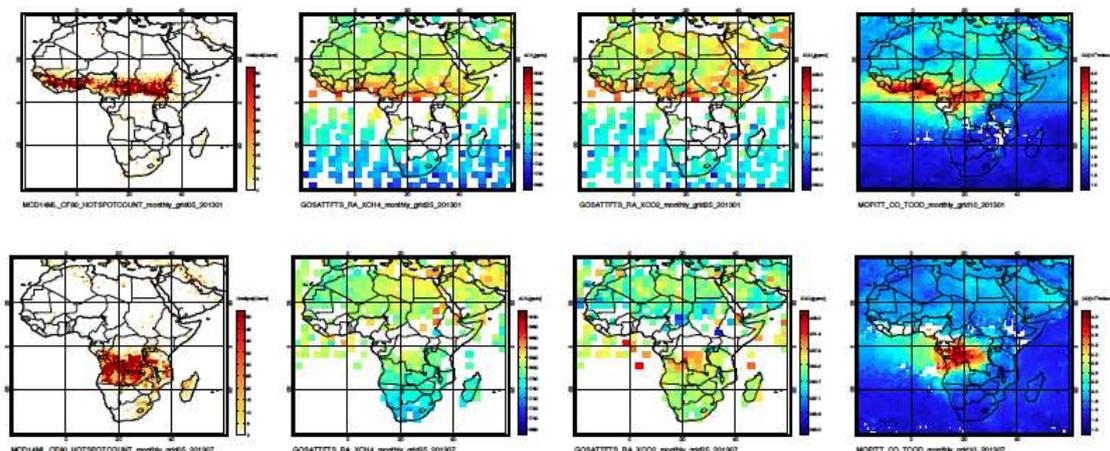


図(1)-1

(a)GOSAT/SWIRバンドで得られたメタン気柱平均混合比( $XCH_4$ )、(b)冠水率(land-surface water coverage :LSWC)、(c)規格化した植生指数(normalized difference vegetation index :NDVI)の3ヶ月平均のマップ。いずれも期間は2009年から2014年の平均を示す。縦の列は左から12-2月(DJF)、3-5月(MAM)、6-8月(JJA)、9-11月(SON)に対応する。雨季はほぼJJA-SONに対応、乾季はほぼDJFに対応する。

## 2) アフリカ地域におけるメタン分布の特性解析

アフリカ地域におけるメタンの高濃度現象を解析した。赤道直下のニジェール湾周辺では1月にバイオマス燃焼に伴うとみられるメタンの濃度上昇が顕著であったが、7月に南半球中緯度のコンゴ周辺ではバイオマス燃焼に対応したメタン濃度の上昇は比較的少なく、対照的な変化を示した。アフリカ内陸部におけるこのような現象はGOSATによる観測で初めて明らかになった。



図(1)-2 バイオマス燃焼と、メタン、二酸化炭素、一酸化炭素濃度との対応。

左から順に、MODISの火災検知数データ、TANSO-FTSで得られたXCH<sub>4</sub>、同様にXCO<sub>2</sub>、MOPITTのCOデータ。上から順に2013年の1月、7月のそれぞれ月平均値である。

### 3) シベリアにおける航空機観測データとGOSAT/SWIRバンドから導出されたXCH<sub>4</sub>の比較

シベリアのスルグートとノボシビルスクにおける航空機観測データとGOSAT/SWIRバンドで観測された気柱平均混合比の比較を行ったところ、両者の差はノボシビルスクでは $0.7 \pm 19.3$ ppbv、スルグートでは $2.5 \pm 13.9$ ppbvであり、バイアスは1%以下という、良好な結果を得た。

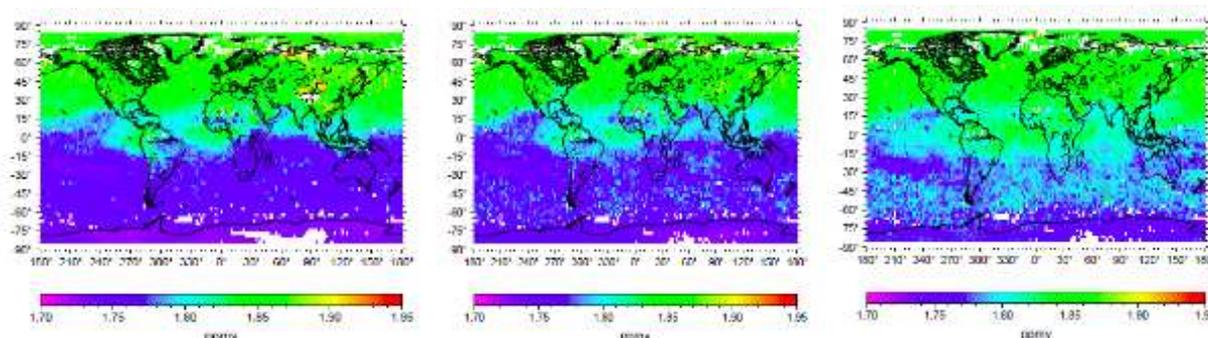
### 4) インパース解析で得られたGOSAT/L4BデータとGOSAT 熱赤外(TIR)バンドで観測されたメタン鉛直分布との比較解析

インパース解析で求められたGOSAT/L4BとGOSAT/TIRから導出されたメタンプロファイルの比較解析を行った。結果を今後一般ユーザーに公開する予定である。これは本研究のアウトプットの一つとして広く利用されることが期待できる。

## (2) GOSAT熱赤外センサーのメタン高度分布データを用いた対流圏メタンの動態把握

### 1) GOSAT/TIRバンドからのメタン導出アルゴリズムの開発

改良アルゴリズムで導出したTIRバンドのメタンデータは、改良前のアルゴリズムで導出したメタンデータに比べて濃度のバラつきが小さくなっており、全般に良好な結果が得られた(図(2)-1)。このアルゴリズムによるリトリバルプロダクトはV01.0xとして公開された。



図(2)-1 TIRバンドの2010年4月のメタン濃度の月平均値(V01.0x)。左から700 hPa、500 hPa、300 hPa高度における全球分布。緯度・経度2.5度ごとにデータを平均している。

### 2) 導出されたメタン高度分布データのデータ質検証

改良されたアルゴリズムでGOSAT/TIRバンドから導出されたメタンプロファイルを、グアム、シベリアおよび太平洋上空の航空機観測と比較し、データ質の検証を行った。TIRバンドのメタン濃度の高度プロファイルは、アプリアリ(NIES輸送モデル)のメタン濃度プロファイルよりも、観測値であるCONTRAILプロジェクトおよびHIPPOプロジ

エクトの航空機のメタンデータとよりよい一致を示しており、観測スペクトル情報が有意に付加されたことを示している。

### (3) 主要メタン発生域におけるメタン放出量推定の高度化

#### 1) フラックス測定の高精度化

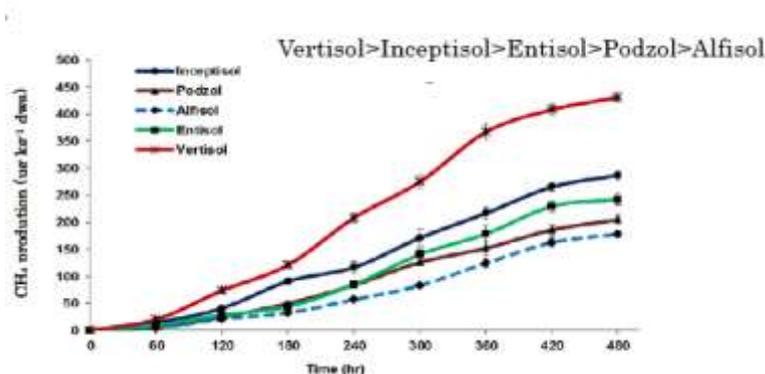
ベトナム・アンジャン省チャウドック市郊外近辺のヌイサン山頂で2013年2月14日、大気ガス試料採集を行ったところ、常時2ppmvを超える値が観測された。メコン川下流の推移変化からも判るようにこの時期は洪水期から春作に移行する時期で、水田での耕作やわら燃焼が進んでいる時期である。この結果をGOSAT/L4Bの結果と比較したところ、同じ地点での値としてはほぼ対応しており、GOSAT/L4の信頼性を示している。

#### 2) 土壌培養によるメタン生成能解析

表(3)-1で示した土壌サンプルに対し、培養試験の結果、480時間(20日間)中のメタン生成量積算値は、図(3)-2のグラフのように推移した。メタン生成量は、培養60時間以降、Vertisol試験区において高い値で推移した。また、Inceptisol試験区はVertisol試験区に次いで比較的生成量が高い傾向にあった。培養期間全体を通し、土壌区分では Vertisol>Inceptisol>Entisol>Podzol>Alfisolの順でメタン生成量積算値は増大した。土壌理化学性、微生物性との関係を比較すると、全炭素量、POXC(過マンガン酸可酸化性炭素量)はメタン生成量積算値と関係性が見られた。同様にメタン生成古細菌の遺伝子数もメタン生成量積算値に対応する傾向にあった。

以上より、各土壌種の含有有機物量がメタン生成の活性に影響を及ぼし、そのポテンシャルとしてはVertisolやInceptisolなどが高く、一方でAlfisolは低い可能性が示唆された。

土壌区分情報で比較すると、インド南東部を中心としてAlfisolが分布し、西部にVertisol、Inceptisolが分布していると見られるため、各地域間で土壌種を反映したメタン生成能を有する可能性があると考えられる。

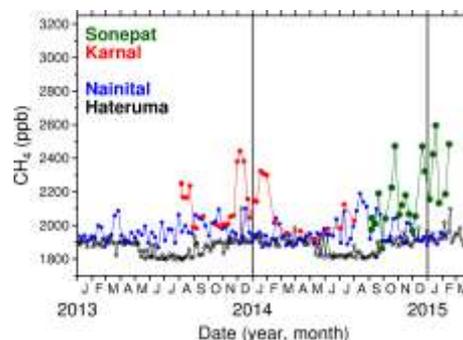


図(3)-2 室内湛水培養試験によるメタン生成量(0~20日間)積算値の推移

### (4) GOSAT短波長赤外データと現地観測による大気中メタン濃度解析と収支推定

#### 1) 北インド水田地帯における大気メタン濃度観測

図(4)-1に、これまでに北インド水田地帯のカルナルとソーニーパットで採取された大気試料のメタン濃度の時系列を示す。比較対象として、北インドの山岳地帯ナイニタール(標高約2000m)と、沖縄県波照間島で採取された大気試料のメタン濃度も示した。図(4)-1で示すカルナルとソーニーパットのデータは、ボトムアップインベントリで示唆されている夏の大きなメタン放出とは異なる季節変動を示しており、現段階では解釈は困難であるが、北インドの大気メタン濃度変動を解明するための手法として、水田地帯における大気サンプリングを継続する道筋をつけることができた。今後の長期的な継続観測が重要と考えられる。



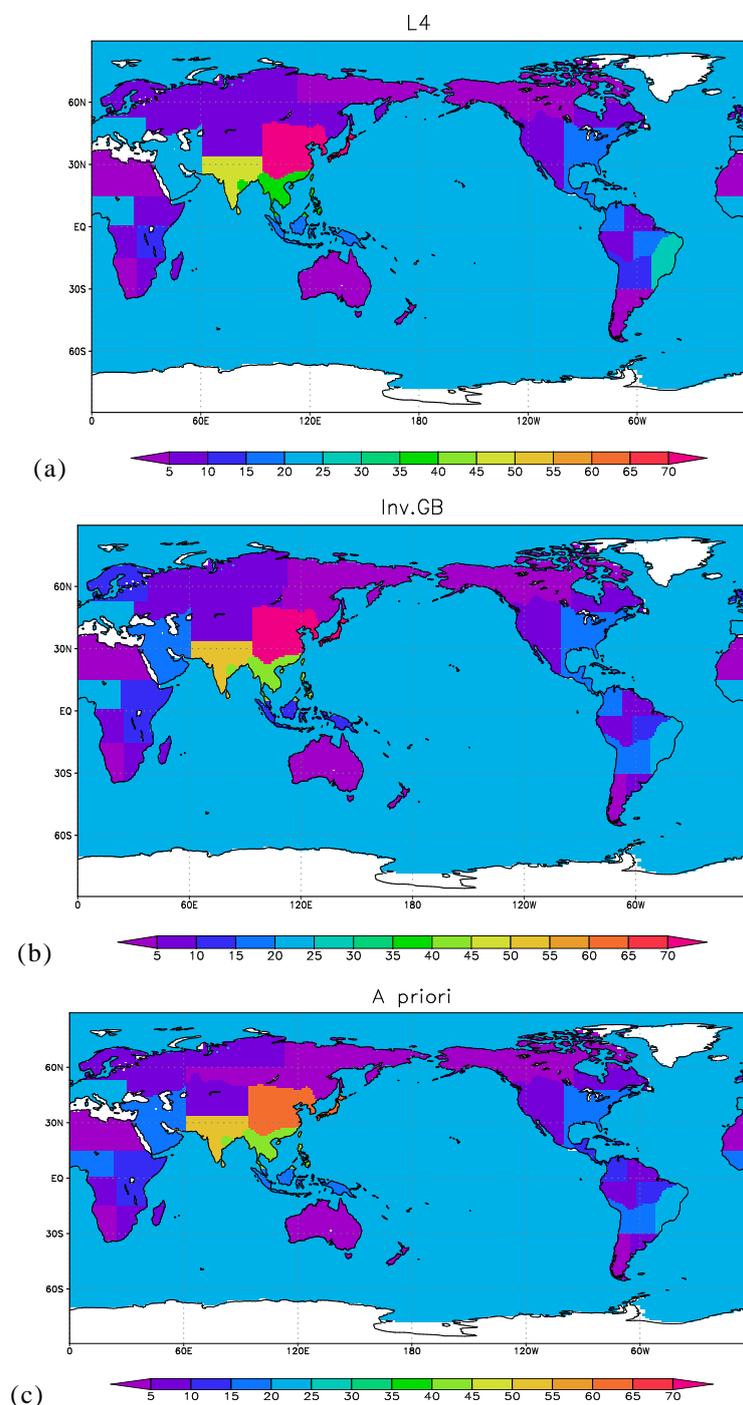
図(4)-2 カルナル、ソーニーパット、ナイニタール、波照間で観測されたメタン濃度

#### 2) シベリアにおける航空機観測、タワーネットワーク観測、チャンパー観測、および太平洋における定期船舶観測

3.で述べた通り継続的に各種の観測を継続し、その結果はインバース解析に投入した。

### 3) GOSATデータとインバースモデルを用いた全球メタン収支推定

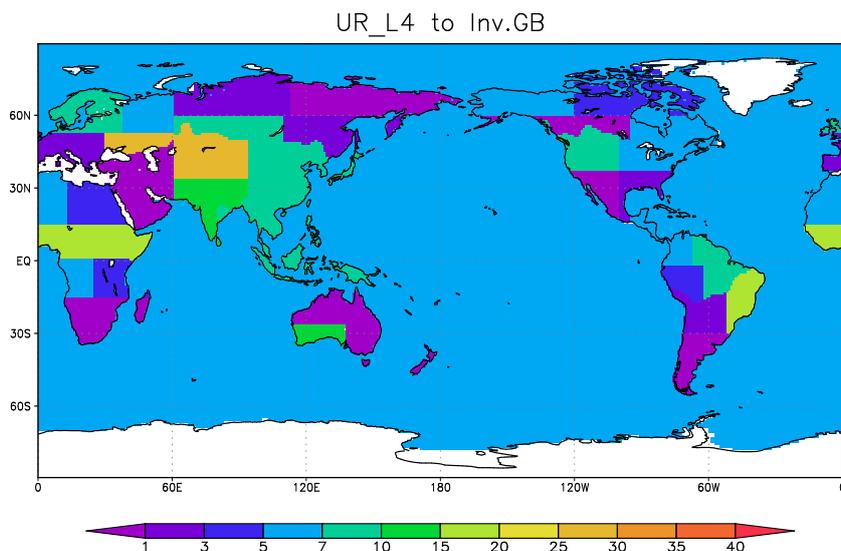
図(4)-3に、バイアス補正したGOSATデータと地上観測データから推定した、全球43地域における年間メタンフラックス(GOSAT/L4)、地上観測データのみから推定したメタンフラックス、およびインバースモデルに入力した先見値フラックスデータを示す。地球全体で見るとメタン放出量の多い地域が複数分布しており、それらの地域は人口密度の高い地域とおおよそ一致していること、東南アジア・南アジア域や、南米及びアフリカの南亜熱帯地域のメタンの放出が特に多いことがわかった。地上観測データのみを用いたフラックス推定値の2009年6月から2012年5月の期間平均値の地域分布は、CarbonTracker-CH<sub>4</sub>などの他研究と一致していた。



図(4)-3 2009年6月から2012年5月の期間平均した全球43地域における(a)バイアス補正したGOSAT L2データと地上観測データから推定した年間メタンフラックス(GOSAT L4)、(b) 地上観測データのみから推定したメタンフラックス、および(c)インバースモデルに入力した先見値フラックスデータ。単位はTgCH<sub>4</sub> region<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>。

GOSATデータを付加することによる地上メタンフラックス逆数値解法推定値への効果を図(4)-4に示す。GOSATデータを付加することによって、先験値や地上観測データのみを用いたフラックス推定値より、熱帯域(南アメリカ、アフリカ、東南アジア)の不確実性が大幅に低減したとともに、フラックス推定値が増加した。この結果は

他研究でも見られた。また、これらの領域で推定されたメタンフラックスの季節変動を調べると、先見値や地上観測データのみ用いた推定と比べ、GOSATデータを加えたことで、全季節で放出量が増えるわけではなく、季節変動のピーク時の放出量が大きくなっている傾向があった。



図(4)-4

地上観測データにGOSATデータを付加したことによるフラックス推定値の誤差低減率(%)

#### 4) 地上観測データとインバースモデルを用いた南アジアのメタン収支推定

大気結合モデルGELCAメタンインバージョンシステムを用いて、地上観測メタン濃度データから領域メタンフラックス推定を行い、大気採集を行っているナイニータルでは(図(4)-2参照)でのメタン変動の解釈が可能となった。

### 5. 本研究により得られた主な成果

#### (1) 科学的意義

GOSATは世界で初めて温室効果気体観測に特化して打ち上げられた我が国独自の衛星で、二酸化炭素のみの観測を目的としている米国のOCO-2衛星とは異なり、メタンの観測が可能であることが大きな特徴である。さらにGOSATは、熱赤外バンドによってメタン濃度の鉛直分布を観測できる世界で唯一の衛星である。本研究では、その特性を十分に活用するための手法開発において先導的役割を果たしてきた。

本研究では、熱赤外バンドからメタン鉛直プロファイルを導出するリトリバルアルゴリズムの開発を行い、プロダクト公開にまで至った。また様々な現地観測・航空機との比較解析を通じて、GOSATメタンデータの信頼性を丁寧に証明してきた。GOSATで観測されたアジアやアフリカでメタン濃度の変動を詳細に解析し、これまで理解されていなかった現象を発見した。本研究の実施によって、これまで実態がよく理解されていなかった、内陸部を含むメタン発生領域の分布や季節変動の実態が少しずつ解明されつつある。アジア域で稲作によるメタン放出が季節変動に対して大きな影響を持っていること、アフリカにおいてバイオマス燃焼によるメタンの発生が赤道直下のナイジェリア湾沿岸部で大きいことなどが示された。これはGOSATで得られた新しい発見で、人工衛星でメタンを観測することの意義を強く示したといえよう。

本研究では、「温室効果ガスの亜大陸スケールでの吸収・排出量の推定精度を高める」という、GOSATプロジェクトの主たる目標に沿って、GOSATデータを活用してインバース解析を行い全球的なメタンの発生源の定量化を行うという、最終目的を達成できた。GOSATは我が国が打ち上げた世界で唯一の温室効果ガス観測に特化した衛星であり、GOSATのメタンデータを最大限利用して成果を出したことで、世界の気候変動研究への我が国の貢献を示すことができた。さらに、インバース解析の結果(GOSAT L4プロダクト)をGOSAT/TIRと比較する解析も行ったが、これは本研究のアウトプットの一つとして、広く利用されることが期待できる。

また、国立環境研究所地球環境研究センターでは、長年にわたって、太平洋を航行する定期貨物船を利用して洋上バックグラウンド大気の観測を継続してきた。またメタンの大放出源であるシベリアにおいて、航空機観測ならびにタワーネットワーク観測を行ってきた。シベリアで長期観測を行っているグループは世界でも他に無く、貴重なデータとして世界中の研究者に利用されている。本研究において、これらの貴重なデータを科学的に活用できたことにも大きな科学的意義がある。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

本研究で得られたGOSATの観測データを用いた全球の月別メタン収支の推定結果は、環境省が国立環境研究所とJAXAと共同で行った報道発表に使用された(2014年3月27日)。これにより、環境省が力を入れて推進してきたGOSATプロジェクトの成果を国民に還元することにつながった。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で開発したGOSATの観測データを用いたメタン収支の推定手法は、改良を続けながら今後もGOSAT L4メタンプロダクトの作成に使用されるため、GOSAT L4メタンデータを利用する全ての環境政策には必須のツールとなる。

## 6. 研究成果の主な発表状況(別添.報告書作成要領参照)

### (1) 主な誌上发表

#### <査読付き論文>

- 1) N. Saitoh, M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa: SOLA, 8, 145-149 (2012) "Comparisons between XCH<sub>4</sub> from GOSAT Shortwave and Thermal Infrared Spectra and Aircraft CH<sub>4</sub> Measurements over Guam"
- 2) S. E. Belova, I. Yu. Oshkin, M. V. Glagolev, E. D. Lapshina, Sh. Sh. Maksyutov, S. N. Dedysh: Microbiology, Vol. 82, No. 6, 731-738, DOI: 10.1134/S0026261713060040 (2013) "Methanotrophic Bacteria in Cold Seeps of the Floodplains of Northern Rivers"
- 3) A. F. Sabrekov, M. V. Glagolev, I. E. Kleptsova, T. Machida, S. S. Maksyutov : Eurasian Soil Science, Vol. 46, No. 12, 1182-1193, DOI: 10.1134/S1064229314010098 (2013) "Methane Emission from Bog Complexes of the West Siberian Taiga"
- 4) T. J. Bohn, E. Podest, R. Schroeder, N. Pinto, K. C. McDonald, M. Glagolev, I. Filippov, S. Maksyutov, M. Heimann, X. Chen and D. P. Lettenmaier : Biogeosciences, 10, 6559-6576, doi:10.5194/bg-10-6559-2013 (2013) "Modelling the large-scale effects of surface moisture heterogeneity on wetland carbon fluxes in the West Siberian Lowland"
- 5) A. F. Sabrekov, B. Runkle, M. V. Glagolev, I. E. Kleptsova, T. Machida, S. S. Maksyutov : ERL, 9 (4), 045008 (2014) "Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH<sub>4</sub> flux upscaling"

### (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Y. Terao, H.-S. Kim, H. Mukai, Y. Nojiri, T. Machida, Y. Tohjima, T. Saeki, And S. Maksyutov: AGU Fall Meeting, USA, 2012 "Trends, interannual variability, and seasonal cycle of atmospheric methane over the western Pacific observed using voluntary observing ships"
- 2) H.-S. Kim, T. Machida, M. Sasakawa, D. Belikov, T. Saeki, A. Ito, and S. Maksyutov : AGU Fall Meeting, USA, 2012 "Recent variation of Siberian CH<sub>4</sub> fluxes estimated from atmospheric observations of CH<sub>4</sub>"
- 3) S. Maksyutov, H. -S. Kim, T. Saeki, D. A. Belikov, A. Ito, I. Morino, Y. Yoshida, T. Yokota, and the WDCGG Team : Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-3796, 2013 "Regional CH<sub>4</sub> flux estimates based on GOSAT and ground-based observations"
- 4) S. Maksyutov, O. Krasnov, V. Shelevoi, A. Nadeev, and M. Glagolev : Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-3779, 2013 "Observations of wetland methane fluxes in West Siberia with automated chamber system"
- 5) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子: 日本地球惑星科学連合2013年大会 (2013)「メタン高度分布比較のための衛星および航空機観測と同期したGPS掩蔽測定による気温高度分布の整備」
- 6) 町田敏暢、笹川基樹、M. Arshinov、B. Belan、S. Mitin、S. Maksyutov、松枝秀和、澤庸介、佐伯田鶴: 第19回大気化学討論会(2013)「航空機を利用したシベリア上空の温室効果ガスの長期観測」
- 7) S. Maksyutov, V. Sedykh, I. Kleptsova, A. Frolov, A. Silaev, E. Kuzmenko, N. Kuzmik, V. A. Sokolov, A. Fedorov, S. Nikolaeva: AGU Fall Meeting, 2013 "Mapping forest succession types in Siberia with Landsat data"
- 8) Y. Terao, S. Nomura, H. Mukai, T. Machida, S. Sharma, S. Hayashida, K. Inubushi, M. Naja, and P. Patra : Asia Oceania Geoscience Society 2014, Sapporo, 2014 "Observations of

atmospheric methane concentrations over rice paddies at Karnal, India: Comparison with Nainital, India and Comilla, Bangladesh”

- 9) M.Sasakawa, T.Machida, A.Ito, N.Tsuda, M.Arshinov, D.Davydov, A.Fofonov, O.Krasnov, N.Fedoseev, M.Nesterova, A.Galanin, P.Patra, K.Ishijima : 7th International Symposium on Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases (NCGG7) ,2014 “Long-term variations of atmospheric CH<sub>4</sub> concentration over Siberia derived from aircraft and tower measurements.”
- 10) Y. Terao, M. Ishizawa, H. Mukai, M. Naja, S. Nomura, T. Machida, R. Zhuravlev, A. Ganshin, S. Maksyutov : AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, (2014) “Investigation of methane flux in South Asia using atmospheric measurements at Nainital, India and global Eulerian-Lagrangian coupled atmospheric model”
- 11) S. Maksyutov, H. Takagi, H-S Kim, M. Saito, K. Mabuchi, T. Matsunaga, A. Ito, D. Belikov, T. Oda, V.Valsala, I. Morino, Y. Yoshida, T. Yokota: EGU General Assembly, 2014 “Interannual variability of the regional CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes estimated with GOSAT observations”

## 7. 研究者略歴

課題代表者：林田 佐智子

京都大学理学部卒業、名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程単位取得満了、理学博士、国立環境研究所・主任研究員、現在・奈良女子大学 研究院自然科学系 教授

研究分担者

1) 齋藤尚子

奈良女子大学大学院卒業、博士(理学)、国立環境研究所NIESポスドクフェロー、東京大学気候システム研究センター(現大気海洋研究所)特任助教、現在、千葉大学環境リモートセンシング研究センター助教

2) 犬伏 和之

東京大学農学部卒業、農学博士、現在、千葉大学園芸学研究科教授

3) 寺尾有希夫 筑波大学大学院地球科学研究科修了、ハーバード大学工学応用科学部ポスドクトラルフェロー、現在、国立環境研究所地球環境研究センター主任研究員

**2A-1202 GOSATデータ等を用いた全球メタン発生領域の特性抽出と定量化****(1) GOSATデータ利用手法の開発と人工衛星データの複合的解析による全球メタン濃度分布の特徴抽出**

奈良女子大学  
研究院自然科学系

林田佐智子

研究協力者  
奈良女子大学  
研究支援員

荒木 晶

平成24～26年度累計予算額：44,811千円

(うち、平成26年度予算額：15,037千円)

予算額は、間接経費を含む。

**[要旨]**

本サブテーマでは、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)のデータを最大限活用し、これまでの既存のデータと共にインバースモデルに投入することによって、全球メタン発生領域の特性抽出と定量化を行うことを目標としている。その中でサブテーマ1では、全球メタン濃度分布の特徴抽出を行うことを目的としている。本サブテーマで得られた成果は以下の通りである。

(1) アジア地域における衛星で観測された気柱平均混合比を、冠水率、植生指数と比較したところ、雨季にメタン高濃度領域が水田密集領域上空で高濃度であることを明瞭に示した。エミッションインベントリマップと季節変化のパターンを比較し、稲作周期とメタン濃度の季節変動の間に強い相関関係を示した。

(2) アフリカ地域におけるメタンの高濃度現象を火災検知信号と比較し、二酸化炭素や他の衛星センサーで得られた一酸化炭素など大気微量成分観測結果と比較した。赤道直下のニジェール湾周辺では1月にバイオマス燃焼に伴うとみられるメタンの濃度上昇が顕著であったが、7月に南半球中緯度のコンゴ周辺ではバイオマス燃焼に対応したメタン濃度の上昇は比較的少なく、対照的な変化を示した。このような現象はGOSATによる観測で初めて明らかになった。

(3) シベリアのスルグートとノボシビルスクにおける航空機観測データとGOSAT/SWIRバンドで観測された気柱平均混合比の比較を行ったところ、両者の差はノボシビルスクでは $0.7 \pm 19.3$ ppbv、スルグートでは $2.5 \pm 13.9$ ppbvであり、バイアスは1%以下という、良好な結果を得た。

(4) インバース解析で得られたGOSAT/L4BとGOSATの熱赤外(TIR)バンドで得られたメタン濃度との比較解析を行った結果、北半球高緯度冬季(12-2月頃)に、モデルでは再現されない高濃度のメタンがGOSATから検出された。この結果はこれまでの理解で説明できない何らかの現象をGOSAT/TIRバンドでとらえた可能性を示している。

## [キーワード]

GOSAT、温室効果ガス観測技術衛星、メタン、全球分布、メタン発生源

### 1. はじめに

メタンは二酸化炭素に次ぐ第二位の温室効果ガスであり、大気中濃度は産業革命までは最大で700 ppbv程度であったと考えられているが、現在では1800 ppbv以上に増加している。これまでに地域・起源毎に放出量のインベントリが作られているが、メタン発生源の多くが生物由来であることから、これらの推定には大きな不確実性が伴う。また、メタン発生の気候変動応答メカニズムは複雑であり、実態は十分理解されていない。地上観測などで全球的なメタン分布についてはある程度わかってきたが、発生源のある内陸も含めた全球的メタン分布は、衛星観測が行われるようになって初めて知られるようになった。現在では、シベリア、アフリカ中部、南米、モンソーンアジアがメタンの大発源地であることが明らかになりつつある。

我が国では、温室効果気体の全球的分布の解明を目的として、2009年に温室効果ガス観測に特化した世界初の温室効果ガス観測技術衛星（Greenhouse gases Observing SATellite、愛称「いぶき」）が打ち上げられた。温室効果ガスの亜大陸スケール（数千km 四方）での吸収・排出量の推定精度を高め、地域ごとの吸収・排出状況の把握や森林炭素収支の評価などの環境行政に貢献することが期待されている。GOSATは、二酸化炭素のみの観測を目的としている米国のOCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2) 衛星とは異なり、二酸化炭素と同時にメタンの観測が可能であることが大きな特徴である。さらにGOSATは短波長赤外(SWIR)バンドによる観測と熱赤外(TIR)バンドによる観測を同一の視野で行うことが可能な世界で唯一の衛星であり、両者の情報を組み合わせることでこれまでに得られなかった大気メタンの現象を解明できる可能性を持っている。SWIRバンドでは放出源付近のメタン濃度の情報を含む気柱平均濃度が取得され、TIRバンドでは上空に輸送されたメタン濃度の鉛直分布をとらえることが可能と期待されている。上記のような背景から、本研究では、GOSATのデータを最大限活用し、これまでの既存のデータと共にインバースモデルに投入することによって、全球メタン発生領域の特性抽出と定量化を行うことを目標として遂行された。その中でサブテーマ1では、全球メタン濃度分布の現状とその特性を把握するため、GOSATなど複数の人工衛星データを複合的に用いて、冠水率などの地表面情報やエミッションインベントリマップなどと比較して詳細な解析を行った。

GOSATなど衛星データの利用についての概念をここで述べておく。一般に太陽光を光源とした短波長赤外波長域での衛星観測では、地表面からの反射光のスペクトルを観測する。従って、SWIRバンドで観測されるメタンの濃度は観測する光路あたりの積分量であり、これを鉛直量に変換して地上気圧で割って気柱平均混合比( $XCH_4$ )に変換する。図(1)-1は衛星観測とその結果の解釈の概念図を示している。左端に示す通り、SWIRバンドの観測では大気中での太陽光の吸収量から気柱量が観測され、高度分布情報は得られない。しかし、メタン発生の強い地域では混合層内あるいは下層大気でのメタン濃度が高濃度になると考えられているため、地上付近にまで感度のあるSWIRバンドでの観測は、メタン放出の強い場所を検知することには有効に活用できる。これに対して、TIRバンドでは大気からの放射スペクトルから対象とする化学種濃度の高度分布を求める。メタンの場合、地上付近の感度は弱いが中部対流圏から下部成層圏にかけては感度が高い。そこ

で、短波長赤外で得られる気柱量情報に、中・上部対流圏から下部成層圏に感度を持つTIRバンドからの情報、さらに地上付近での現地観測（大気採集）を組み合わせることでメタン発生量の推定の精緻化につながる情報が得られると期待できる。

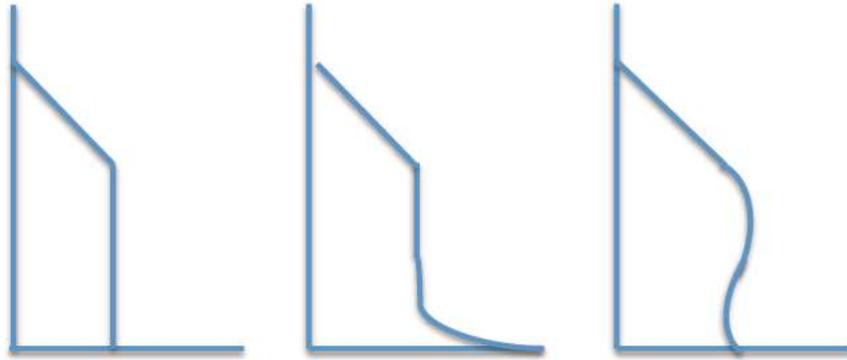


図(1)-1

衛星から得られる観測量および地上観測データの活用方法の概念図

図(1)-2の模式図では様々な土地被覆状況下での予想されるメタンの鉛直分布を示している。一般にバックグラウンド地域では図（左）のような鉛直分布が予想される。一方メタン発生領域においては図（中央）の鉛直分布で示す通り、境界層内で高濃度になることが予想される。しかし、特定の領域に於いては図(右)のように上空にメタンの高濃度プルームが持ち上げられるような場合があり、必ずしもメタンの発生量の多い場所でメタン気柱量（気柱平均混合比）が高いとは限らない。特に北インド、ガンジス河流域では、夏季モンスーンの時期にヒマラヤ山脈にあたる気流が上昇することが知られている（図(1)-3）。実際に衛星AIRSでメタンの高濃度プルームが高度 200hPa付近で報告された事例がある<sup>1)</sup>。このような場所では、上に述べたようにメタンの高度分布情報が得られる赤外波長領域での観測が有効になる。

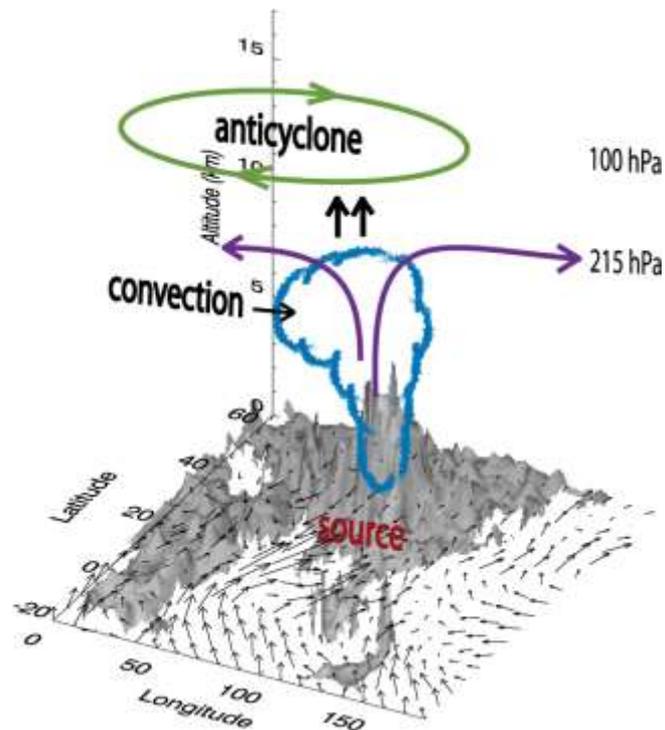
なお、本報告書では、短波長赤外領域をSWIR、熱赤外波長領域をTIRと記述する。また、SWIRで求められる気柱平均混合比をXをつけて表記して、メタンについては $XCH_4$ 、二酸化炭素については $XCO_2$ と表記する。



横軸：メタン混合比

図(1)-2 予想されるメタン混合比の鉛直分布の模式図。

(左) バックグラウンド地点、(中)メタン発生領域、(右)上空にメタンが輸送されている場合。



図(1)-3

インドや東南アジアから放出される物質のアジアモンスーン高気圧による輸送経路の模式図。チベット高原の南側斜面に描かれた雲はモンスーンの強い収束を示している。225hPaに描かれた矢印は水平方向の物質移流を示している。100hPaに描かれているのはアジアモンスーン高気圧の循環。地上に描かれているのは風のデータ(Park et al., 2009<sup>2)</sup>, Fig. 14から引用)。

## 2. 研究開発目的

本研究では、GOSATのデータを最大限活用し、これまでの既存のデータと共にインバースモデ

ルに投入することによって、全球メタン発生領域の特性抽出と定量化を行うことを目標としている。その中でサブテーマ1では、全球メタン濃度分布の特徴抽出を行うことを目的としている。具体的にはGOSATなど複数の人工衛星データを複合的に用いて、大気中メタン濃度の動態を調べ、冠水率などの地表面情報やエミッションインベントリマップなどと比較して詳細な解析を行った。また同時に未だ十分活用されていないGOSATのメタン観測データの利用方法を開拓することが本サブテーマの目的でもある。

### 3. 研究開発方法

本サブテーマでは、上記の目的のため以下の様な方法で研究を行った。

#### (1) アジア地域におけるメタン分布の特性解析

GOSATなどの衛星から短波長赤外波長で観測されたメタン気柱平均混合比( $XCH_4$ )を、冠水率などの地表面情報やエミッションインベントリマップと比較し、特に稲作とメタン発生の関係の特徴を解析した。その際、高高度にメタンが持ち上げられていると考えられる北インドにおいては特に大気採集地点を開拓してサブテーマ4に協力した。

解析に用いたデータセットについては本節の最後にまとめて示す。

#### (2) アフリカ地域におけるメタン分布の特性解析

メタンの大発生地の一つであるアフリカ地域において、GOSATで観測されるメタンの高濃度現象に焦点をあてて解析した。これまでにSCIAMACHYで得られたメタンデータの解析によって、メタン濃度が高濃度になる領域として、アフリカのギニア湾の周囲とスッドと呼ばれるナイル河上流が指摘されている<sup>3)</sup>。また、ギニア湾沿岸に高濃度の人為起源の微量成分(二酸化窒素など)が衛星から観測されている<sup>4)</sup>。しかし、これまで二酸化炭素を衛星から観測した先例が少ないため、メタンと二酸化炭素の関連についてアフリカ上空について報告した先行研究はない。

GOSATではアフリカ地域で顕著にメタンの高濃度がしばしば観測されており、これは新たな発見である。そこで、GOSATでメタンと同時に得られる二酸化炭素や他の衛星センサーで得られた一酸化炭素など大気微量成分観測結果と比較・分析しその関係を調査した。

#### (3) シベリアにおける航空機観測データとGOSAT/SWIRバンドから導出された $XCH_4$ の比較

一般に、GOSAT/SWIRデータの検証には地上赤外フーリエ分光器(FTS)のネットワークとして知られているTCCON(Total Carbon Column Observing Network)データを用いて行われることが多い<sup>5)6)7)</sup>。しかし、シベリアのような高緯度地域はTCCONの観測サイトがなく、シベリアにおいてGOSATデータの検証を行った例はあまりない。そこでサブテーマ4と連携し、メタン発生源地域である高緯度帯シベリアのノボシビルスクとスルグートで観測された航空機データを用いて、高緯度帯におけるGOSAT/SWIRで得られた $XCH_4$ (V02.21)の信頼性を確かめることを目的として比較解析を行った。

また冒頭で述べたように、GOSAT/SWIRバンドで観測されるのは気柱平均量であり、高度分布情報は得られない。湿地の上空では湿地からのメタン発生の影響を受けて図(1)-2の中央に示すように境界層でメタン濃度が高くなる鉛直分布になると予想される。そのため、インバース解析に

GOSAT/SWIRデータを加えた場合、メタン気柱量の増大が実際に境界層における高濃度のメタンをとらえているかどうかを吟味することは重要である。なお、この航空機観測データはサブテーマ4でメタンのインバース解析にも用いられており、ここでの比較検証はインバース解析の信頼性の確認のために有効である。

#### (4) インバース解析で得られたGOSAT/L4BデータとGOSAT 熱赤外(TIR)バンドで観測されたメタン鉛直分布との比較解析

本研究実施期間中に、サブテーマ4の成果としてインバース解析による全球メタンフラックスの推定量が導出され、本プロジェクトの目指すべき最重要の目標が達成された。しかし、インバース解析の結果を検証する確立した手法はなく、得られた成果の信頼性を担保するためには、さらに様々な実測値との比較が重要となる。その一つのアプローチとして、インバース解析に含まれていない観測結果と、インバース解析の結果得られたL4B（推定したエミッションに合わせた濃度分布）とを比較することがある。GOSAT/TIRから導出されたメタンプロファイルのデータはインバース解析に含まれていないため、独立なデータとして検証の対象となる。平成26年11月に行われたアドバイザー会合に於いて、GOSAT/L4BとGOSAT/TIRデータの比較検証を行うことがアドバイザーから進言され、サブテーマ1において、GOSAT/L4BとGOSAT/TIRの比較のための解析を行うこととなった。

以下に、本サブテーマで扱うGOSAT搭載TANSO-FTS他のメタン観測センサー、および比較に用いる衛星データ、エミッションインベントリデータについての概要をまとめて示す。

#### 本サブテーマで扱うメタンの人工衛星観測データについて

##### ●GOSAT搭載Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer (TANSO-FTS) センサーで観測されたメタンおよび二酸化炭素データ

温室効果気体観測衛星 (Greenhouse gases Observing SATellite :GOSAT) は2009年1月23日に、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) と メタン (CH<sub>4</sub>) のモニタリングを行うために打ち上げられた。GOSAT 衛星は地上約 666 km の高度を飛行して約100分で地球を一周し、3日間で同じ軌道に戻る太陽同期準回帰軌道である。搭載されたTANSO-FTS は 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)とメタン(CH<sub>4</sub>) の観測を行うための主センサーで、短波長赤外領域 (SWIR) における太陽放射の地球表面からの反射を測定する。チャンネル 1、 2、 3 の中心波長はそれぞれ 0.76、 1.6、 2.0 $\mu$ m に対応する。またチャンネル4は熱赤外波長 (TIR) で 5.5-14.3 $\mu$ m である。TANSO-FTSセンサーの観測視野は直径10 km程度で、降下点地方時は約13時である。3日間の完全回帰軌道をとるため、観測点は刈り幅 (swath) として経度約5度に対して、数点の固定点において観測される。ここで解析した期間はほぼ3点モードで観測が行われており、それぞれの観測点の間隔はおよそ250 kmである。解析に用いたデータプロダクトのバージョンはメタン、二酸化炭素とも主として国立環境研究所の公開しているFull Physics法によるリトリーバルV02.21を使用した。

● Scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography (SCIAMACHY) センサーによる観測データ

SCIAMACHY センサーは欧州航空宇宙局の打ち上げたENVISAT衛星に搭載されたセンサーの一つである。ENVISAT衛星は軌道高度800kmを持つ太陽同期の準極軌道衛星である。おおよそ午前10時に赤道を通過する。センサーは8つのチャンネルを持った回折格子型分光器で、紫外可視から短波長赤外をカバーしている(240nm -2380nm)。直下視モードでは刈り幅 (swath) は960kmで、全球を網羅するのに6日かかる。典型的な地上でのSCIAMACHYのピクセルサイズは進行方向 30 km、直角方向で60-120kmである。使用したプロダクトは IMAPV.5.5<sup>8)</sup>である。

### 比較に用いる地上被覆情報

● 冠水率(the Land-Surface Water Coverage: LSWC)

Takeuchi and Gonzalez (2009)<sup>9)</sup>によって導出されたもので、水によって被覆される土地面積の割合を示す。Terra/Aqua 衛星搭載の moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) と Aqua衛星搭載の advanced microwave scanning radiometer-EOS (AMSR-E) のデータから得られる。

● 植生指数 (the Normalized Difference Vegetation Index:NDVI)

植生を表す際によく利用される指標で、衛星で観測される可視(赤)における反射率と近赤外領域における反射率の差を両者の和で規格化したものである。NDVIを定量的に解釈することは困難であるが、観測対象物が緑色であるかどうかを定性的に表すのによい指標となっている<sup>10)</sup>。ここではゴダード地球科学データ・情報サービスセンター (GES DISC) でアーカイブされた月平均の緯度経度1度のグリッドデータを用いた<sup>11)</sup>。

● 火災検知数データ

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) で得られた熱異常検知データ Collection 5 active fire product (MCD14ML) を用いる。MODISの熱異常検知アルゴリズムは昼間赤外と熱赤外波長における輝度温度の閾値を設定して得られる<sup>12)13)</sup>。データはメリーランド大学のwebsite (<ftp://fuoco.geog.umd.edu/>) からダウンロードした。

### 比較に用いる他の大気微量成分データ

● 一酸化炭素(CO)

MOPITT(Measurements Of Pollution In The Troposphere)はNASAの地球観測衛星であるTerra衛星に搭載されたセンサーである。ここではVersion 6 Level 3 TIR/NIR multispectral products (Deeter et al., 2011<sup>14)</sup>, 2013<sup>15)</sup>)の昼間の一酸化炭素全量を用いた。

## 4. 結果及び考察

### (1) アジア地域におけるメタン分布の特性解析

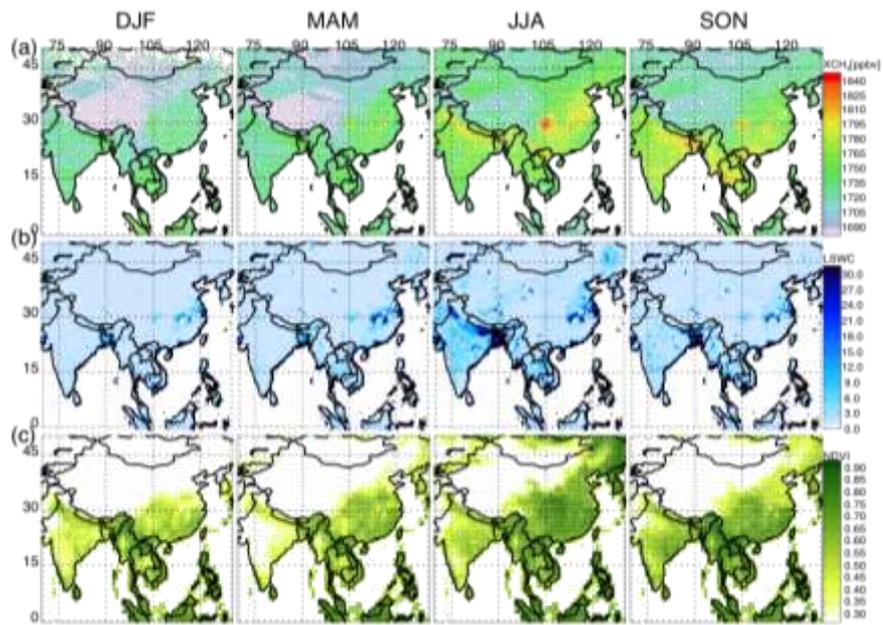
本節では、SCIAMACHYセンサーおよびGOSAT/SWIRバンドで得られた大気中メタンの気柱平均混合比(XCH<sub>4</sub>)の解析結果を示す。図(1)-4は2003年から2011年まで観測を行ったSCIAMACHYセ

ンサーで得られたXCH<sub>4</sub>(上段)を冠水率(中段)と植生指数(下段)の分布と比較したものである。図(1)-4では左から順に、12月から2月、3月から5月、6月から8月、9月から11月についての3ヶ月毎の平均値を描いている。さらに2009年から2014年までのGOSAT/SWIRバンドの観測値を用いて同様の解析を行った結果を図(1)-5に示す。ただし、観測期間は2009年から2014年までで、冠水率、植生指数も同時期のデータにそろえて解析している。

表(1)-1 図(1)-4、(1)-5に示されたメタンおよび衛星観測から導出される指標のリスト

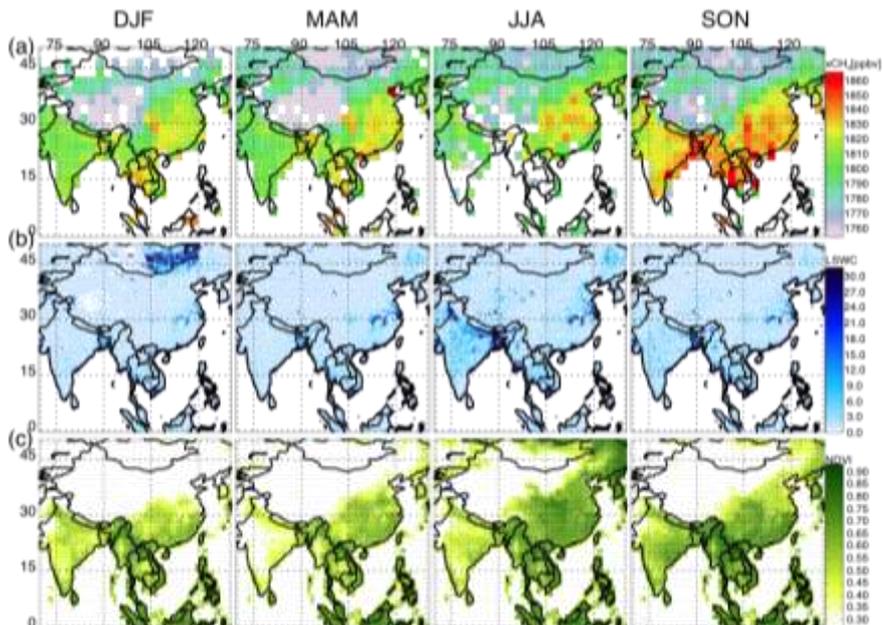
	Satellite	Sensor	Spatial Resolution (grid size archived in this study)	Reference
XCH <sub>4</sub>	ENVISAT	SCIAMACHY	30 km x 60 km (0.5° x 0.5°)	Algorithm Version 5 <sup>8)</sup>
XCH <sub>4</sub>	GOSAT	TANSO-FTS	10 km in diameter (2.5° x 2.5°)	Algorithm Version 02.21 <sup>7)</sup>
Land Surface Water Coverage (LSWC)	Terra/Aqua	MODIS AMSER-E	2 km x 2 km (0.5° x 0.5°*)	Takeuchi and Gonzalez, (2009) <sup>9)</sup>
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Terra/Aqua	MODIS	1 km x 1 km (1° x 1°)	Huete et al, (2002) <sup>11)</sup>
Fire Detection Index	Terra/Aqua	MODIS	0.5° x 0.5°	Justice et al. (2002) <sup>12)</sup> Giglio et al. (2003) <sup>13)</sup>

\*1/12° x 1/12° in the original dataset



図(1)-4

(a)SCIAMACHY XCH<sub>4</sub>、(b)冠水率 (land-surface water coverage :LSWC) 、(c) 規格化した植生指数 (normalized difference vegetation index :NDVI) の3ヶ月平均のマップ。いずれも2003年から2008年の6年間の平均をとったもの。縦の列は左から12-2月 (DJF) 、 3-5月 (MAM) 、 6-8月 (JJA) 、 9-11月 (SON) に対応する。雨季はほぼJJA-SONに対応、乾季はほぼDJFに対応する。



図(1)-5

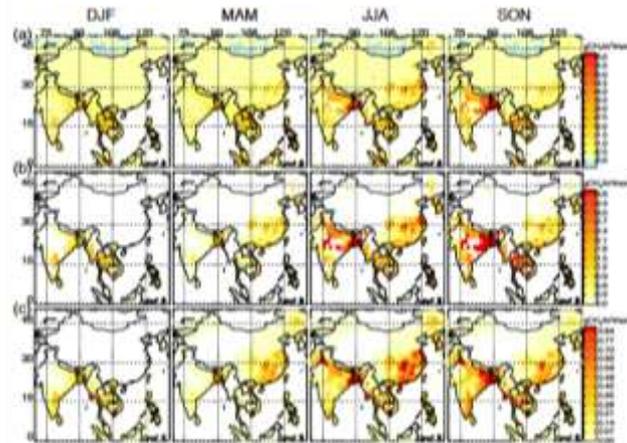
図(1)-4と同様だが、GOSAT/SWIRバンドによって得られたXCH<sub>4</sub>(a)とその観測期間にあわせてLSWC(b)とNDVI(c)を示した。平均した期間は2009年から2014年。

通常、バックグラウンド地域においてメタン濃度は、OH濃度の高い夏に低く、冬に高くなることがよく知られている。しかし、図(1)-4と5からわかる通り、この領域ではメタン濃度は雨季(夏)に高く乾季(冬)に低い。一方、冠水率と植生指数は明らかに雨季に高く、地表面被覆の様態ともなってメタンの発生が変動し、大気中メタンの変動を支配していることが推定できる。SCIAMACHYの観測時期とGOSATの観測時期は異なっているが、全体の分布の地理的特徴はよく似ており、季節変動も類似していることがわかる。

比較のために、同じ領域について求められているメタンのエミッションインベントリを図(1)-6の上段に示す。さらに、中段と下段にはメタンの発生カテゴリーとして、稲作のみを取り出して示した。ここで解析したエミッションインベントリの詳細は表(1)-2の通りで、上段と中段はNASAゴダードのデータベース<sup>16)</sup>、下段はYan et al. (2009)<sup>17)</sup>のデータである。図(1)-4および5で示されるXCH<sub>4</sub>は、稲作からのエミッションの高い領域とよい対応をしていることがわかる。特に季節変動の特徴は稲作のエミッションの季節性に大きく影響されていることがわかる。なお、SCIAMACHYのデータについてのこれらのデータ間の相関の詳細はHayashida et al. (2013)<sup>18)</sup>を参照されたい。

表(1)-2 図(1)-6に示されたメタンのボトムアップインベントリのリスト

Database	Emission Category	Grid archived	Reference
(a) GISS	All	1°x 1°	Matthews et al. (1991) <sup>16)</sup>
(b) GISS	Rice paddies	1°x 1°	Matthews et al. (1991) <sup>16)</sup>
(c) Yan2009	Rice paddies	0.5° x 0.5°	Yan et al. (2009) <sup>17)</sup>



図(1)-6

表(1)-2で示したエミッションインベントリの3ヶ月平均のマップ。上段：GISSのメタンエミッションデータの内、すべてのカテゴリーからのエミッションを含む。中段：GISSのデータの内、稲作からのメタンエミッションのみを示す。下段：Yan et al., (2009)<sup>17)</sup>の求めた稲作からのメタンエミッションを示す。縦の列は左から12-2月 (DJF)、3-5月 (MAM)、6-8月 (JJA)、9-11月 (SON)に対応する。

稲作によるメタンエミッションの高い地域ではメタン濃度が際立って高いことがわかったので、稲作地帯における大気メタン濃度を時系列で詳細に解析した。稲作によるメタンエミッションの高い地域の選択方法として、まず、Yan et al.(2009)<sup>17)</sup>によって報告されている水田からのメタンエミッションデータから、メタンフラックスが $1.5\text{g CH}_4/\text{m}^2/\text{yr}$ 以上の領域を抽出した。これらの地域をさらに季節変化の似たグループに分けるため、クラスター解析手法によって15分類にまとめた。これらの領域の国別名称と記号を表(1)-3にまとめた。これらの地域は水田密集地域と見なすことができる。このようにして選別した水田上空の領域について、領域毎に衛星で得られたメタン濃度とエミッションインベントリ、冠水率、植生指数の月平均値の時系列を図(1)-7に示した。図中、各パネルの上段に衛星センサーで得られたメタンの気柱平均混合比データを示している。SCIAMACHYの結果は赤色で、TANSO-FTSの観測結果は青色で示されている。両者にはバイアスがあるが、類似の季節変動と年々変動が両センサーによって明瞭にとらえられている。

図(1)-7を見ると、ほとんどの領域において、雨季の季節進行に従って冠水率と植生指標が増加し、それにつれてメタン濃度も上昇することが明らかである。特にガンジス河流域である領域2-2や2-3でその傾向が顕著である。ただし、ベトナム(領域8)については、季節変動が必ずしも稲作と連動していない

図(1)-7の領域番号2-1と2-2は、北インド、2-3はバングラデシュでいずれもガンジス河流域における典型的な水田地帯を示している。この領域ではメタン濃度とエミッション等との関係が非常に明瞭で、SCIAMACHYの $\text{XCH}_4$ とYan et al.(2009)<sup>17)</sup>のエミッション量で相関係数を取ると1に近い値となる<sup>18)</sup>。

ただし、図(1)-7の各パネルの上段に示す通り、GOSAT/SWIRバンドで得られた $\text{XCH}_4$ の季節変動はSCIAMACHYから得られた $\text{XCH}_4$ の季節変動と比べてやや異なっており、TANSO-FTSの $\text{XCH}_4$ のほうが季節変動の振幅は小さい。両者の結果の違いを解釈する上で検討しておかなければならないのは、観測場所が異なる点である。GOSATの観測視野は直径10kmでSCIAMACHYよりはるかに空間分解能に優れているが、一方でデータのサンプリング箇所は3日の完全回帰となり、同じ場所を3日毎に繰り返し観測するため非常に偏る。雲が少しでも観測視野内に存在する場合は良好なスペクトルが観測できないので、すべての観測点でデータが得られるわけではなく、観測点は非常にまばらとなる。従って、同じ領域に対して期間を区切って平均操作をしても、同じ空間代表性を持っているわけではない。

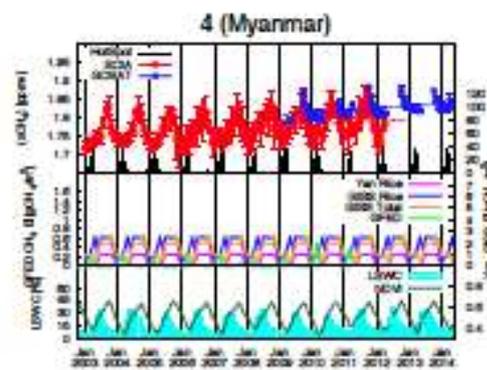
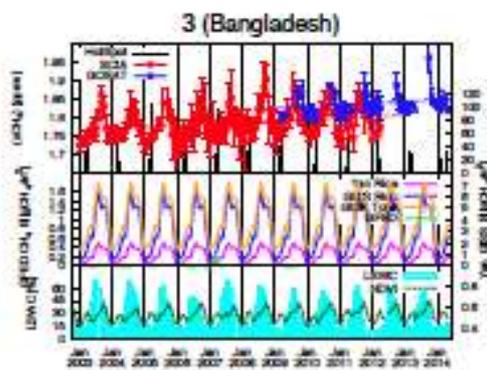
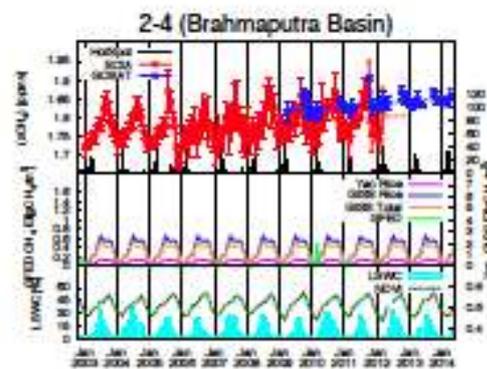
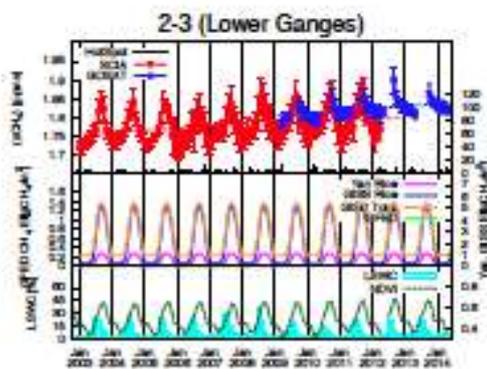
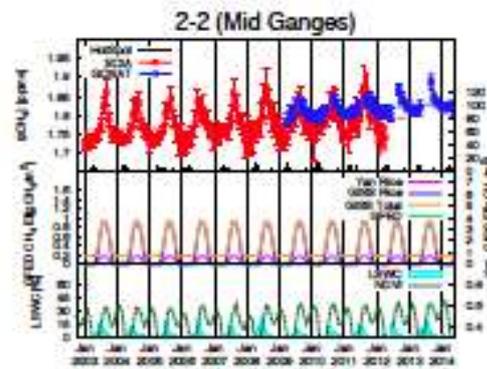
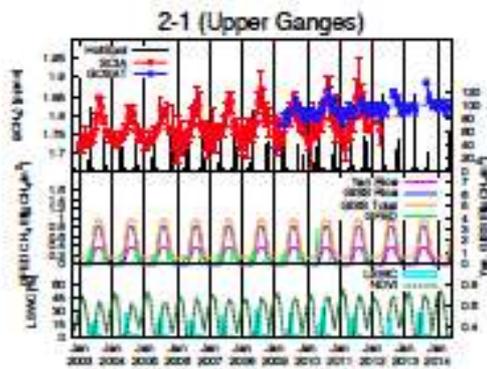
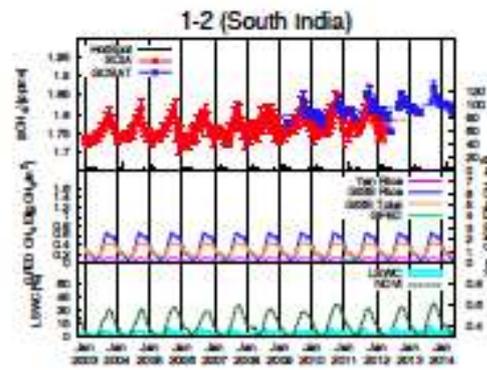
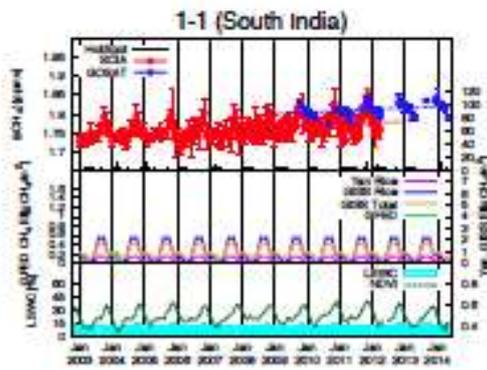
空間代表性の違いを確認するために、GOSATがどの領域を観測したかを詳細に解析した。その一例を図(1)-8に示す。ここでは領域3を例として示す。SCIAMACHY(右)に比べ、GOSATでは図に示されるとおりサンプリング領域が非常に偏っている。従って領域スケールで解析を行う上で空間代表性については、解析対象に沿って綿密な検討が不可欠であることが示されている。この点はこれまで詳しく検討されてこなかったデータ解析上の問題点で、本研究で始めて詳細に検討された結果である。

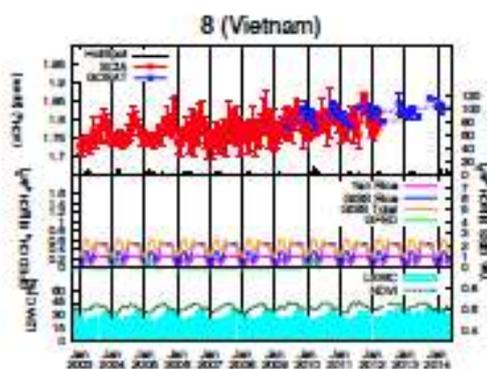
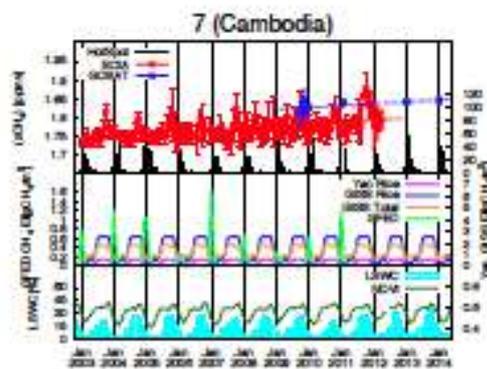
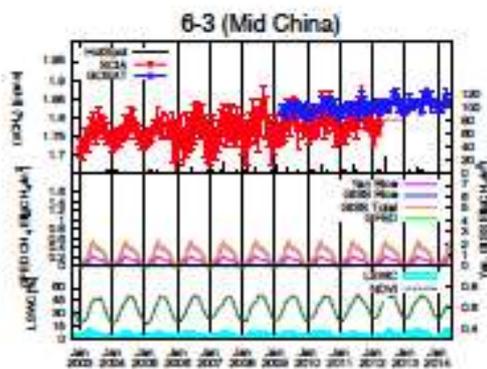
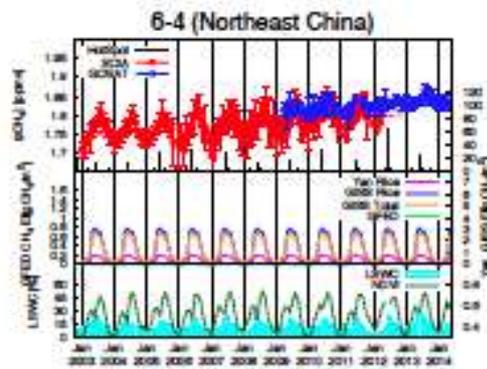
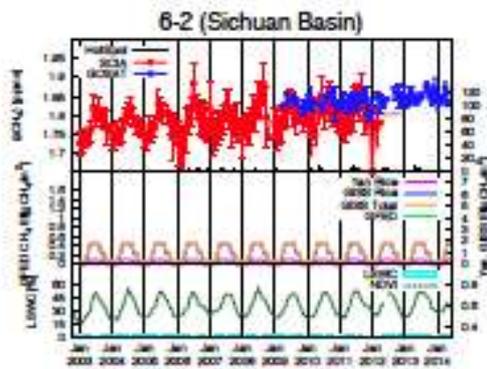
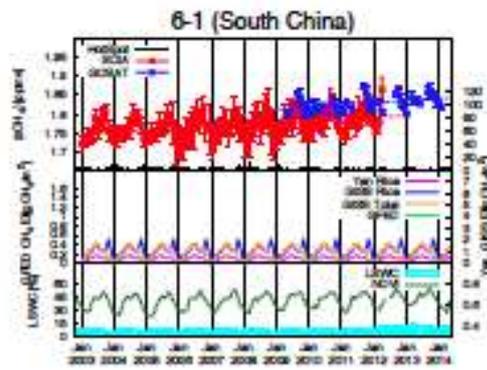
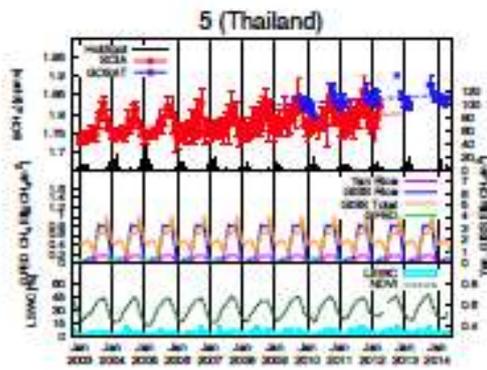
表(1)-3 領域名一覧

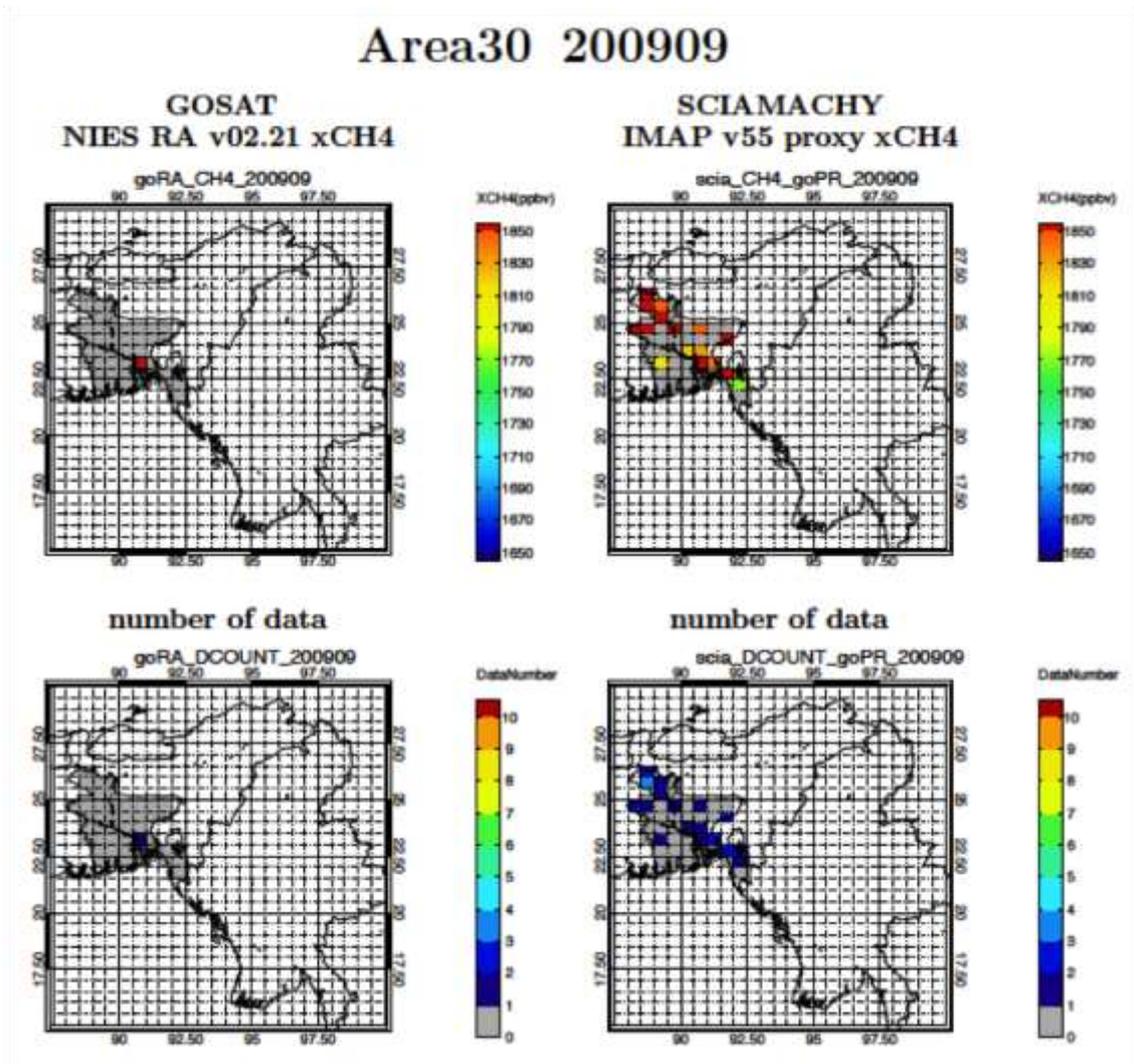
Code	Name	Sub areas
1	South India	1-1, 1-2
2	North India	2-1, 2-2, 2-3, 2-4
3	Bangladesh	
4	Myanmar	
5	Thailand	
6	China	6-1, 6-2, 6-3, 6-4
7	Cambodia	
8	Vietnam (Mekong Delta)	

図(1)-7 (次頁)

水田上空のメタン濃度( $XCH_4$ )とエミッションインベントリ、冠水率、植生指数の月平均値の時系列。各パネルの上に表示している領域名は表(1)-3に対応する。各パネルのうち、上段：衛星センサーSCIAMACHY（赤）、GOSAT/SWIRバンド（青）で得られたメタン気柱量（月平均値）の時系列。黒点で火災検知数を併せて示している。中段：エミッションインベントリデータセットから得られたメタン放出フラックスの時系列（月単位）。Yan et al.(2009)<sup>17)</sup>から、GISSのデータベース(Matthews et al., 1991)<sup>16)</sup>から得られたデータである。下段：冠水率LSWC（淡青）と植生指数NDVI（緑）の時系列。







図(1)-8

GOSATの観測地点とSCIAMACHY/ENVISATの観測地点の比較。領域は3のバングラデシュ付近を示す。SCIAMACHY（右）に比べ、GOSAT（左）のデータサンプリング地点が著しく偏っていることを示している。

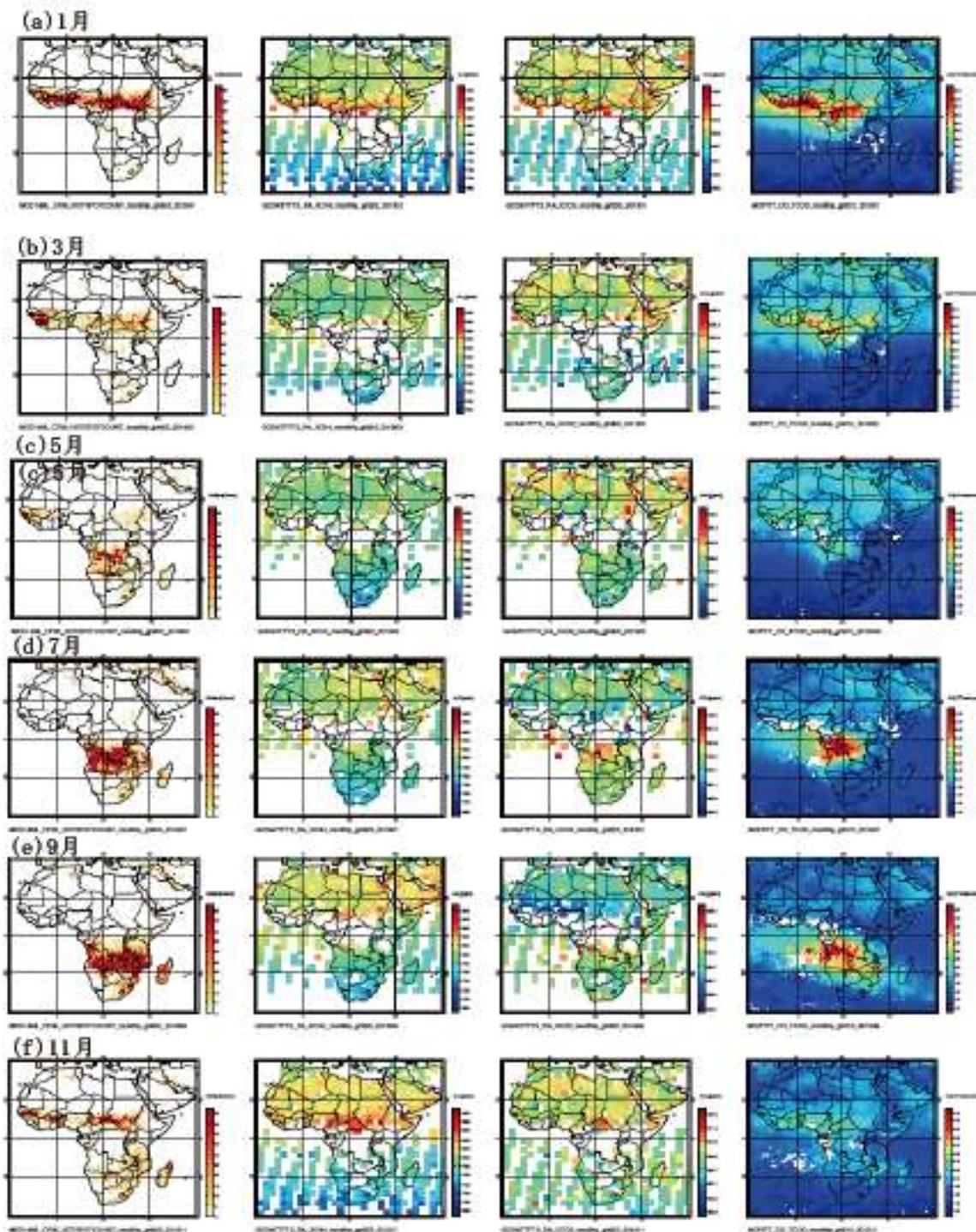
## 大気採集拠点の開拓

始めに述べたとおり、北インドでは夏のモンスーンの時期にチベット高原の南斜面で強い上昇流があり、メタンの高濃度プルームが上部対流圏にまで輸送されることがある<sup>1)</sup>。このため、北インドでの $\text{XCH}_4$ の変動を解釈するためには、メタンの鉛直プロファイルの情報が不可欠である。また、大気輸送モデル内で鉛直風を再現することは極めて難しく、上昇流が強くメタンの発生強度の強い北インドのような地域において、GOSAT/SWIRから得られる気柱量平均値のみの情報だけからインバース解析を行ってメタン発生量を推定した場合、信頼性を確保するためには情報が不足している。そこでサブテーマ4と連携して北インドの水田地帯にフラスコサンプリングのサイトを開設し、継続的に大気採集を実施した。平成24年度に試験観測を実施し、最終的にカルナルで大気採集を行い、平成25年8月から平成26年8月まで大気採集を実施した。しかし、カルナルでは現地の支援体制が十分でなかったため、平成26年9月に、デリー大学と東京大学の協力を得て、ソーニーパットにフラスコサンプリングの拠点を移し、観測を継続した（平成27年5月現在も継続中）。結果の詳細はサブテーマ4で報告しているためここでは省略する。また、サブテーマ2と協力して、メタン鉛直プロファイルの観測結果を論文化を目指して解析中である。

### (2) アフリカ地域におけるメタン分布の特性解析

図(1)-9は左からMODISで得られた火災検知数、TANSO-FTSで得られた $\text{XCH}_4$ と $\text{XCO}_2$ 、およびMOPITTで得られた一酸化炭素(CO)について月平均のマップを並べたものである。図(1)-9(a)は1月、図(1)-9(d)は7月のマップである。1月には熱帯付近で火災発生件数が多くなっており、同じ地域でメタン、二酸化炭素、一酸化炭素の濃度が高くなっている。12月から2月頃まで、このようにアフリカ熱帯付近では、バイオマス燃焼が多く発生しており、一酸化炭素、メタン共に濃度が高くなる傾向にある。対応して二酸化炭素もわずかながら上昇しているのがわかる。一方、図(1)-9(d)に示すように7月では様相が大きく異なる。火災検知数は南半球中緯度のコンゴ付近で際だって多くなっており、一酸化炭素、二酸化炭素濃度は高くなっているが、メタンの濃度はそれほど高くない。

このように、熱帯付近と南半球中緯度に火災発生件数の多い地域があるが、対応するメタン濃度の特徴が異なることが分かった。考えられる可能性として、植生の違いや土壤水分の違いによって、燃焼効率が異なることが考えられる。現在、他の化学種の解析を追加すると共に、二酸化炭素に対する一酸化炭素やメタンの比率をを調査中である。この研究成果は当初の計画になかったもので、GOSAT観測による新しい発見の一つである。



図(1)-9

バイオマス燃焼と、メタン、二酸化炭素、一酸化炭素濃度との対応。左から順に、MODISの火災検知数データ、TANSO-FTSで得られたXCH<sub>4</sub>、同様にXCO<sub>2</sub>、MOPITTのCOデータ。上から順に2013年の(a)1月、(b)3月、(c)5月、(d)7月、(e)9月、(f)11月のそれぞれ月平均値である。

### (3) シベリアにおける航空機観測データとGOSAT/SWIRバンドから導出されたXCH<sub>4</sub>の比較

本節ではシベリアのノボシビルスクとスルグートで観測された航空機データを用いて、高緯度帯における GOSAT/SWIRで得られたXCH<sub>4</sub> (V02.21)の検証を行った結果を述べる。

航空機ではおよそ 7km より高高度では観測ができないので、それ以上の高度のメタン濃度分布に適切な仮定をおき、気柱平均量を算出してGOSATのXCH<sub>4</sub>と比較する。その際、成層圏でのメタン濃度分布設定には HALOE の気候値データ<sup>19)</sup> を、気象データには GPV データを使用した。

航空機観測と衛星観測のマッチングについては、GOSAT/SWIRバンドデータに対し、航空機観測地点から±300 km 以内、かつ航空機観測日と同日または航空機観測日の前後1日という条件でデータを選択した。このようにして選択すると、1つの航空機観測データに対し、複数の GOSAT 観測データが対応することがある。そこで、以下のようにして、1つの航空機観測データに対して比較する GOSAT データの個数を絞った。(1) GOSATの3点観測モードのうち、スペクトルフィッティング残差  $\chi^2$  が最も小さなデータを選択する。(2)1つの航空機観測データに対して、同日に上記(1)の条件を満たす複数のGOSAT 観測データが存在する場合は、航空機観測地点との距離が最短になる GOSAT データを選択した。(3)航空機観測に対して、同日に該当する GOSATデータが存在しない場合は、前後1日観測の GOSAT観測データのうち、航空機観測地点との距離が最短となるGOSATデータを選択した。

このようにしてマッチング処理を行った結果、ノボシビルスクで12日分（同日観測: 3日分、前後1日観測: 9日分）、スルグートで10日分（同日観測: 6日分、前後1日観測: 4日分）のデータが選別された。マッチングが取れた GOSATのXCH<sub>4</sub> と航空機観測データから換算した XCH<sub>4</sub>（以下 GOSAT/XCH<sub>4</sub>、航空機/XCH<sub>4</sub>と表記）とを組み合わせ作成した散布図を 図(1)-10(a)に示す。GOSAT/XCH<sub>4</sub>（縦軸）は航空機/XCH<sub>4</sub>（横軸）に較べて値の変動幅が大きいことがわかる。マッチングが取れた全てのデータペアの個数については 表(1)-4に示す。ここで、GOSATデータのうち、RA は公募研究者のみに公開されているデータ、GU は一般ユーザに公開されているデータであるが、マッチングが取れたほとんどが GU データであった。

GOSAT/XCH<sub>4</sub> から航空機観測データから換算した XCH<sub>4</sub> を引いた差と、差の標準偏差は、ノボシビルスクで $0.7 \pm 19.3$  ppb、スルグートで $2.5 \pm 13.9$  ppb であった。両地点での全てのデータを合わせると GOSAT/XCH<sub>4</sub> と航空機/XCH<sub>4</sub> の差は $1.5 \pm 17.1$  ppb ( $0.08 \pm 0.96$  %) となりバイアスが1%未満に収まることを確認できた。

同日と前後一日観測の結果を比較すると、ノボシビルスクでは同日観測が $-13.9 \pm 16.9$  ppb、前後一日観測が $5.5 \pm 17.5$  ppb となり、必ずしも同日観測で XCH<sub>4</sub> の差が小さくなるわけではなかった。一方、スルグートにおいては、同日観測が $-3.0 \pm 14.0$  ppb、前後一日観測が $10.6 \pm 8.6$  ppb となり、同日観測の方が良好な結果を得た。

航空機で観測される地上付近のメタン濃度は夏季(6-7月)に高く、7月の GOSAT XCH<sub>4</sub> と航空機観測で得られた XCH<sub>4</sub> の差は観測日によって値のばらつきが大きい、月平均値を取ると両者の差は小さくなった。月別の結果を見ると、他の月に較べて9月の XCH<sub>4</sub> の差が大きな値を示している。これらは、各月の特徴だけでなく、各月の比較データ個数の違いも影響していると考えられる。

また、航空機観測地点と TANSO-FTS 観測地点との距離差との関係についても調べた。結果を 図(1)-10(b)に示す。ノボシビルスクでは距離差が大きいほど XCH<sub>4</sub> の差が大きくなる傾向が見ら

れたが、スルグートではそのような関係が見られなかった。

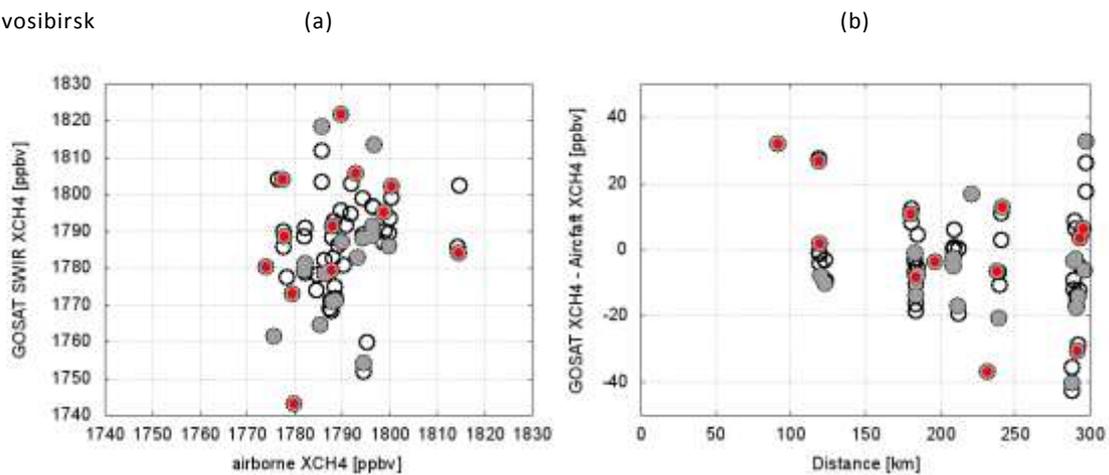
先行研究において地上観測ネットワーク TCCON データを用いた GOSAT/XCH<sub>4</sub> (V02.xx) の精度検証が行われており、 $-5.9 \pm 12.6$  ppb と報告されているが<sup>7)</sup>、TCCON が設置されているのはメタンのバックグラウンド地域がほとんどであって、本解析のようなメタン発生領域における検証はほとんどされていない。Inoue et al. (2014)<sup>20)</sup>はロシアの ヤクーツクの航空機観測データを用いて GOSAT/XCH<sub>4</sub> (V02.00) の比較検証を行い、 $\pm 2^\circ$  ( $\pm 5^\circ$ ) の範囲内で  $9.2 \pm 15.2$  ppb ( $3.7 \pm 16.7$  ppb) という結果を得ている。今回の解析でメタン発生源地域であるシベリアでも、GOSAT/XCH<sub>4</sub> (V02.21) と航空機データの差が  $1.5 \pm 17.1$  ppb ( $0.08 \pm 0.96$  %) となり、GOSAT/SWIR バンドの XCH<sub>4</sub> プロダクトは高緯度帯シベリア領域におけるメタンの収支推定に利用できるだけの信頼性を持っていると考えられる。

ここで行った比較においてメタン濃度が不確定になる要因として、成層圏メタンの仮定の取り方、気象データ、マッチング条件などを挙げることができる。今回の解析では、成層圏での仮定はHALOEで得られた気候値<sup>19)</sup>を、気象データにはGPV データを使用した。それぞれを他のデータに置き換えて感度解析を行った。HALOEの気候値を AFGL<sup>21)</sup>の気候値に置き換えたところ、航空機/XCH<sub>4</sub> は約6.3 ppb ほど値が小さくなることがわかった。これに対し、気象データを GPV から NCEP/NCAR 再解析データに置き換えても航空機 XCH<sub>4</sub> の値はほとんど変わらないという結果が得られた。感度解析の結果から、成層圏での仮定に使用するデータについては特に吟味する必要があると考えられる。

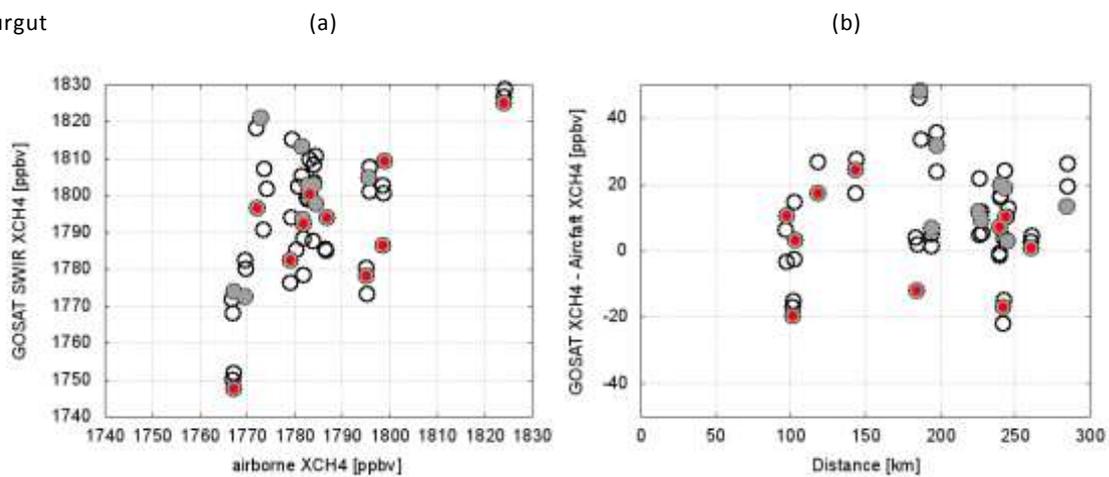
表(1)-4 航空機観測データとGOSATデータの比較結果

Site location	Average values					
	Novosibirsk			Surgut		
	Number of data	Difference of XCH <sub>4</sub> T-A (ppb)	Ratio of Difference (T-A)/A (%)	Number of data	Difference of XCH <sub>4</sub> T-A (ppb)	Ratio of Difference (T-A)/A (%)
All	12	$0.7 \pm 19.3$	$0.04 \pm 1.08$	10	$2.5 \pm 13.9$	$0.14 \pm 0.78$
Category of TANSO-FTS data	GU	$4.1 \pm 16.4$	$0.23 \pm 0.91$	10	$2.5 \pm 13.9$	$0.14 \pm 0.78$
	RA	-36.8	-2.06	0	-	-
Measurement date	same day	$-13.9 \pm 16.9$	$-0.78 \pm 0.95$	6	$-3.0 \pm 14.0$	$-0.17 \pm 0.79$
	$\pm 1$ day	$5.5 \pm 17.5$	$0.31 \pm 0.98$	4	$10.6 \pm 8.6$	$0.60 \pm 0.49$
Measurement Month	April	-	-	1	7.1	0.40
	May	-6.5	-0.37	2	$-18.3 \pm 1.3$	$-1.03 \pm 0.08$
	June	$-16.6 \pm 20.1$	$-0.94 \pm 1.13$	2	$6.8 \pm 3.7$	$0.38 \pm 0.20$
	July	$-0.8 \pm 15.9$	$-0.04 \pm 0.88$	2	$-5.6 \pm 6.5$	$-0.31 \pm 0.36$
	Aug.	$14.2 \pm 12.4$	$0.80 \pm 0.70$	1	10.3	0.57
	Sep.	-32.0	1.79	2	$20.8 \pm 3.6$	$1.17 \pm 0.21$
Oct.	-8.5	-0.47	0	-	-	
Total average of both sites	$1.5 \pm 17.1$ ppb ( $0.08 \pm 0.96$ %)					

(i) Novosibirsk



(ii) Surgut



- : マッチングが取れた全てのデータ
- : 同地点3回観測データを1点に絞った結果
- : Aircraft データに対して1点の GOSAT データを選択した結果

図(1)-10

(a) 航空機XCH<sub>4</sub>データとGOSAT SWIR XCH<sub>4</sub>の散布図。(b) XCH<sub>4</sub>プロダクト精度と観測サイトまでの距離差の散布図。

#### (4) インバース解析で得られたGOSAT/L4BデータとGOSAT 熱赤外(TIR)バンドで観測されたメタン鉛直分布との比較解析

GOSAT/L4BとGOSAT/TIRバンドデータの比較を行うために、以下のようなマッチングを行った。

- ① 鉛直層の対応: GOSAT/TIR のプロダクトとインバースモデルのアウトプットの、鉛直層の対応は表(1)-5 に示す通りである。表の左3つのカラムは TIR のデータ内の層番号を示しており、対応する気圧範囲に対応するインバースモデルのアウトプットと比較した。
- ② 空間対応: 緯度経度 2.5 度に設定された L4 のグリッドのうち、GOSAT/TIR データが取得された地点を含むグリッドを選択した。
- ③ 時間対応: L4 は 6 時間毎に計算を行っているため、TIR の観測時刻を最も近い時刻の L4 データと対応させた (表(1)-6)。

表(1)-5

TIR配列番号	TIR層番号	TIR気圧範囲 (hPa)	L4B層(hPa)
0	1	1165.9～857.7	900
1	2	857.7～735.6	850
2	3	735.6～631.0	700
3	4	631.0～541.2	600
4	5	541.2～464.2	500
5	6	464.2～398.1	400
7	8	341.4～287.3	300
8	9	287.3～237.1	250
9	10	237.1～195.7	200
11	12	161.6～133.4	150
12	13	133.4～100.0	100
14	15	75.0～51.1	70
15	16	51.1～34.8	50
16	17	34.8～23.7	30
19	20	10.0～5.6	10

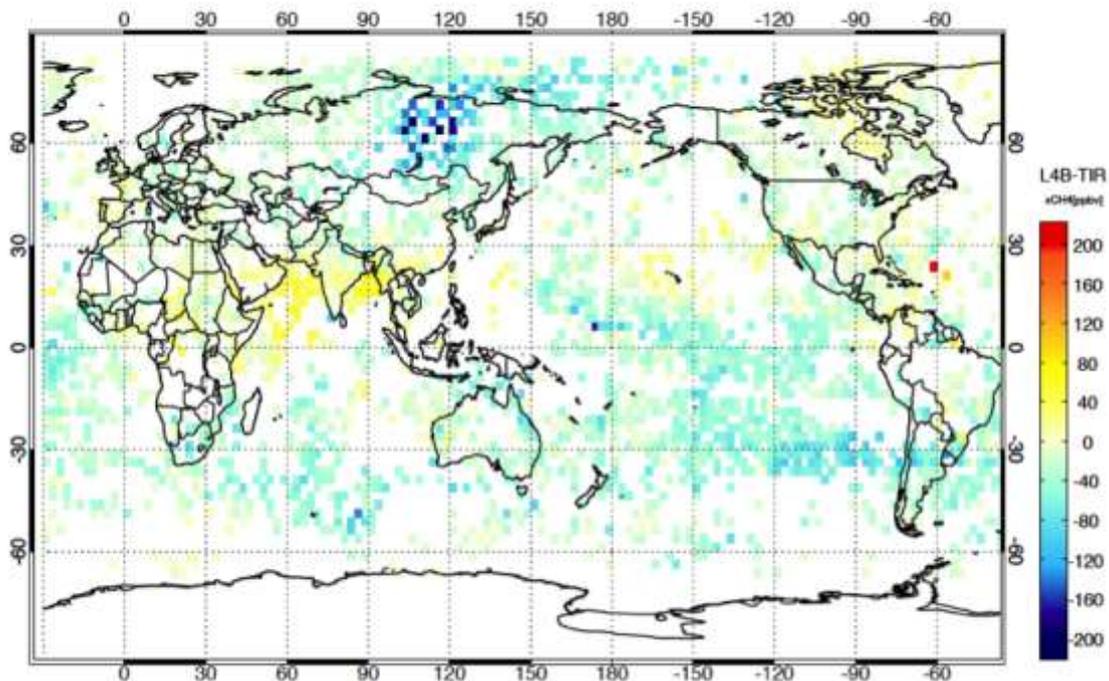
表(1)-6

L4B時刻	TIR観測時刻
00:00	(前日 21:00～23:59 の) 0:00～ 2:59
6:00	3:00～ 8:59
12:00	9:00～14:59
18:00	15:00～20:59

図(1)-11は2011年1月29から31日の3日間について、200hPa高度に対応するGOSAT/L4BとGOSAT/TIR（夜間の観測データ）の差を示した事例である。L4BからTIRのデータを差し引いている。北半球高緯度で特に冬季（12月から2月頃）、TIRで高濃度が検出されている（図でL4Bとの差が負になっている領域）。このようにL4Bでは再現されていない、すなわちモデルでは表現しきれないメタンの高度分布が現れていると考えられる。高度200 hPa付近は上部対流圏から下部成層圏に対応しており、低緯度側からの輸送機構が関係している可能性を示唆している。

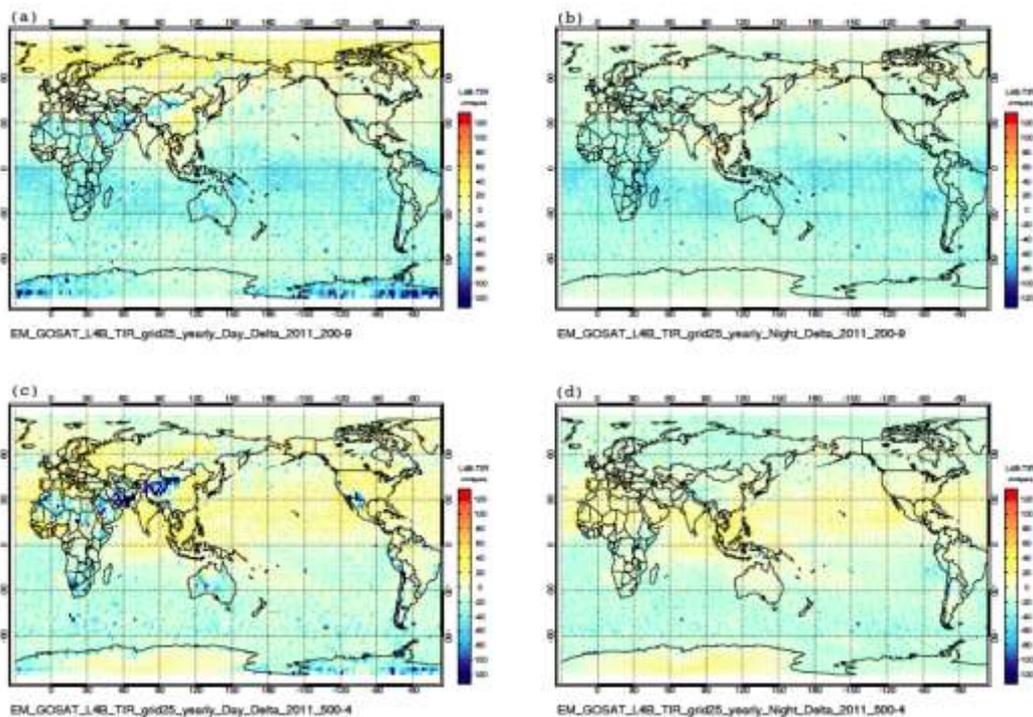
このように両者の差を、データが公開されている全期間に於いてすべて解析し、年平均値と標準偏差などの統計解析を行った。図(1)-12は2011年における年間を通してのバイアスの平均値、図(1)-13は同じ期間のバイアスのばらつきを求めたものである。高度はそれぞれ200hPa(図中のa、b)と500hPa(図中のc、d)である。また、昼間・夜間に分けて解析を行った。

図(1)-11から13で示した解析はL4が公開されているすべての期間について完了しており、今後一般ユーザーに対して結果を公開し、本研究のアウトプットの一つとしたいと考えている。今後の関連研究に対して有用な情報をもたらすと期待できる。



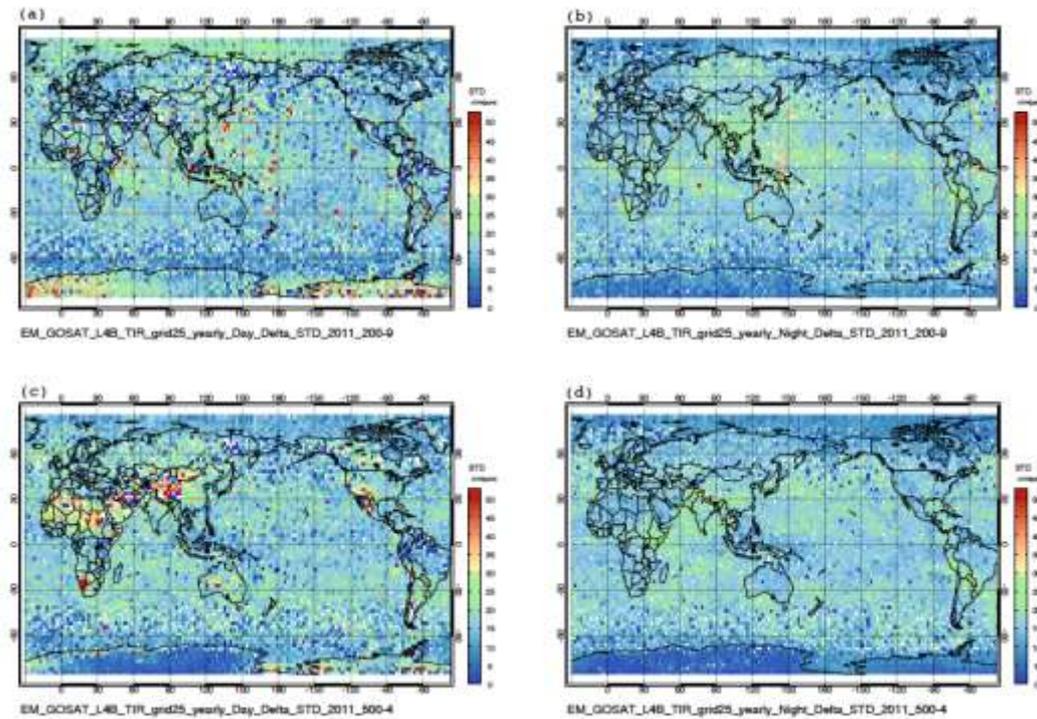
図(1)-11

2011年1月30日 GOSAT-L4B – GOSAT-TIR(夜間の観測値)



図(1)-12 2011年の年間のバイアスの平均値。

(a)200hPa (昼間の観測値)、 (b)200hPa (夜間の観測値)、 (c)500hPa (昼間の観測値)、 (d)500hPa (夜間の観測値)



図(1)-13 2011年のバイアスのばらつき。

(a)200hPa (昼間の観測値)、 (b)200hPa (夜間の観測値)、 (c)500hPa (昼間の観測値)、 (d)500hPa (夜間の観測値)

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマでは、全球メタン濃度分布の特徴抽出を行うことを目的として、SCIAMACHYセンサーおよびGOSAT搭載のTANSO-FTSセンサーで観測されたデータを詳細に解析した。衛星でメタンの観測データが利用されるようになったのはSCIAMACHYが初めてであり、世界的に見ても衛星データの利用研究はまだ十分に進んでいない。GOSATについても、二酸化炭素に比べメタンデータの解析はまだ緒に就いたばかりである。そのような状況下で本サブテーマ研究はGOSATメタンデータの科学的活用において先導的役割を果たしてきた。

本サブテーマでは、これまで実態がよく理解されていなかった、内陸部を含むメタン発生領域の分布や季節変動の実態が解明された。アジア域では稲作によるメタン放出が季節変動に対して大きな影響を持っていること、アフリカにおいてバイオマス燃焼によるメタンの発生が赤道直下のナイジェリア湾沿岸部で大きいことが示された。これらはGOSATで得られた新しい発見で、人工衛星でメタンを観測することの意義を強く示したといえよう。またインバース解析の結果を保証するために、メタン鉛直分布に注目して航空機観測との比較解析を行い、メタンの発生領域として知られるシベリアにおいて、GOSAT/SWIR観測で大気下層までメタンの増加が正確に捉えられていることを確認した。

一方、本サブテーマでは、SCIAMACHYとGOSATのデータの違いに注目し、GOSATの観測点を詳細に調査し、その空間代表性の問題点を指摘した。これはGOSAT-2の設計に向けての基礎データとして活用できると考えられる。

また、本サブテーマでは、インバース解析の結果(GOSAT L4プロダクト)をGOSAT/TIRと比較する解析を行い、その結果を今後一般ユーザーに公開する予定である。これは本研究のアウトプットの一つとして広く利用されることが期待できる。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で開発したGOSATのメタン観測データの活用手法は、GOSATメタンデータを利用する全ての環境政策の基盤となる。

## 6. 国際共同研究等の状況

- 1) 共同研究：SCIAMACHYのメタンプロダクトの解析的研究。C. Frankenberg博士、米国（もとはドイツ）。SCIAMACHYのメタンプロダクトの提供を受け、共同研究を行い論文を発表した（業績Hayashida, S., A. Ono, S. Yoshizaki, C. Frankenberg, W. Takeuchi, and X. Yan (2013), Methane concentrations over Monsoon Asia as observed by SCIAMACHY: Signals of methane emission from rice cultivation, Remote Sensing Environ., 139, 246-256.)
- 2) N2Jプロジェクト：GOSATメタンリトリーバルの相互比較。ドイツKITとオランダSRONのグループ(RemoTeC)のリトリーバルしたプロダクトについて提供を受け、NIESのプロダクトと平行して解析を行った。
- 3) インドIRRI:大気の採集補助。平成25年8月から平成26年8月。
- 4) インドデリー大学:大気の採集補助。平成26年8月から現在。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) N. Saitoh, M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa: SOLA, 8, 145-149 (2012) “Comparisons between XCH<sub>4</sub> from GOSAT Shortwave and Thermal Infrared Spectra and Aircraft CH<sub>4</sub> Measurements over Guam“
- 2) S. Hayashida, A. Ono, S. Yoshizaki, C. Frankenberg, W. Takeuchi, and X. Yan : Remote Sensing of Environment, Vol.139, 246-256 (2013) “Methane concentrations over Monsoon Asia as observed by SCIAMACHY: Signals of methane emission from rice cultivation”

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) X. Xiong, N. Saitoh, C. Barnet, E. Maddy, S. Hayashida, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa,

- T.S.Pagano : The 4th GOSAT RA PI Meeting, California Institute of Technology (Caltech), USA, 2012 “Comparison of CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT TANSO TIR, AIRS and aircraft measurements“
- 2) S. Hayashida, W.Takeuchi, A.Ono, and M. Kuji with RemoTeC-N2J joint project members: A.Butz, O.Hasekamp, Y.Kasai, A.Kuze, K.Shiomi, and H.Suto : The 4th GOSAT RA PI Meeting, California Institute of Technology (Caltech), USA, 2012 “Analysis of GOSAT methane data to characterize the methane source from rice paddies in Asia“
  - 3) N. Saitoh, M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa : The 8<sup>th</sup> International Workshop of Greenhouse Gas Measurements from Space, USA, 2012“Simultaneous observations of column abundances and profiles of CH<sub>4</sub> by GOSAT: Validation of GOSAT CH<sub>4</sub> products using aircraft measurements over Guam“
  - 4) 林田佐智子 : 招待講演、CSSRI(Central Soil Salinity Research Institute) (2012) “Atmospheric CH<sub>4</sub> distribution observed by satellites“
  - 5) 石川沙穂、林田佐智子、小野朗子 : 日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学 (2012) 「SCIAMACHYセンサ・TANSO-FTSセンサで観測されるメタンの時空間的分布変動の研究」
  - 6) 林田佐智子、齋藤尚子、犬伏和之、寺尾有希夫、Shamil Maksyutov、町田敏暢、笹川基樹、杉田孝史、横田達也、向井人史 : 日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学 (2012) 「GOSAT データなどを用いた全球メタン発生領域の特性抽出と定量化 ～環境省推進費プロジェクトの紹介と進捗状況報告(第一報)～」
  - 7) 林田佐智子、石川沙穂、東良美、小野朗子、久慈誠 : 日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学 (2012) 「衛星観測データから得られた東南アジアのメタン変動バイオマスバーニングの影響検知について」
  - 8) 杉田孝史、齋藤尚子、林田佐智子 : 日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学 (2012) 「衛星からの熱赤外域天底測定によるメタン導出のための気温・水蒸気高度分布の整備」
  - 9) 齋藤尚子、今須良一、杉田孝史、林田佐智子、塩見慶 : 日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学 (2012) 「GOSAT/TANSO-FTS TIRからのメタン濃度高精度導出のための同時推定アルゴリズムの検討」
  - 10) 齋藤尚子、今須良一、杉田孝史、林田佐智子 : 第18回大気化学討論会 (2012) 「GOSAT/TANSO-FTS TIRセンサーからのメタン濃度高精度導出アルゴリズムの検討」
  - 11) 林田佐智子、齋藤尚子、犬伏和之、寺尾有希夫、Shamil Maksyutov、町田敏暢、笹川基樹、杉田孝史、横田達也、向井人史、野原精一 : 第18回大気化学討論会 (2012) 「全球メタン発生領域の特性抽出と定量化へのアプローチ～環境省環境研究総合推進費プロジェクトの紹介～」
  - 12) 林田佐智子 : The 3rd GEMS Workshop、ヨンセイ大学、韓国 (2012) “Plan of Japanese ISS mission of Atmospheric Chemistry (APOLLO) “
  - 13) N. Saitoh, R. Imasu, T. Sugita, S. Hayashida, K. Shiomi : AGU Fall Meeting, USA, 2012 “Algorithm improvement toward better retrieval of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> profiles from GOSAT/TANSO-FTS thermal infrared spectra“
  - 14) S. Hayashida, A. Ono, S. Ishikawa, Y. Terao, W. Takeuchi : AGU Fall Meeting, USA, 2012 “Comparison of atmospheric CH<sub>4</sub> concentration observed by GOSAT and in-situ measurements in

## Thailand and India“

- 15) 山本めぐみ、林田佐智子、町田敏暢：日本気象学会2013年度春季大会（2013）「GOSAT衛星と航空機で観測されるシベリア域大気中メタン濃度の比較解析」
- 16) 長瀬友美、林田佐智子、小野朗子、竹内渉：日本気象学会2013年度春季大会（2013）「クラスター解析を用いたアジアにおけるメタン変動の研究」
- 17) S. Hayashida, W. Takeuchi, A. Ono, M. Kuji and Y. Kasai : The 5th GOSAT RA PI meeting, Yokohama, 2013 “Analysis of GOSAT methane data to characterize the methane source from rice paddies in Asia”
- 18) M. Yamamoto, S. Hayashida, A. Ono, T. Machida, and T. Sugita : 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Yokohama, 2013 “Comparison of GOSAT XCH<sub>4</sub> and airborne measurements over Siberia”
- 19) S. Hayashida, A. Ono and T. Nagase : Workshop on Atmospheric Composition and the Asian Summer Monsoon, Kathmandu, Nepal, 2013 “Methane concentrations observed from space over monsoon Asia: Signals of methane emissions from rice cultivation and biomass burning”
- 20) S. Hayashida : 招待講演、Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences (ARIES), 2013 “Methane concentrations over Monsoon Asia as observed by satellite sensors: Signals of methane emission from rice cultivation”
- 21) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子：日本地球惑星科学連合2013年大会（2013）「メタン高度分布比較のための衛星および航空機観測と同期したGPS掩蔽測定による気温高度分布の整備」
- 22) 齋藤尚子、今須良一、杉田考史、林田佐智子、塩見慶、川上修司、町田敏暢、松枝秀和、澤庸介：日本気象学会2013年度秋季大会(2013) 「改良版アルゴリズムによるGOSAT/TANSO-FTS TIR CO<sub>2</sub> および CH<sub>4</sub> リトリバル」
- 23) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子：日本気象学会2013年度秋季大会(2013) 「シベリア上空の気温・水蒸気高度分布の比較」
- 24) N. Saitoh, R. Imasu, T. Sugita, S. Hayashida, K. Shiomi, S. Kawakami, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, Y. Terao : AGU Fall Meeting, 2013 “New products of GOSAT/TANSO-FTS TIR CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> profiles: Algorithm and initial validation results.”
- 25) 岩崎千沙、林田佐智子、小野朗子、町田敏暢：日本地球惑星科学連合2014年大会 大気化学セッション（2014）「GOSAT SWIR xCH<sub>4</sub>の検証（地上観測ネットワークTCCONと航空機観測を用いて）」 [ポスター]
- 26) S. Hayashida, W. Takeuchi, A. Ono, M. Kuji and Y. Kasai: GOSAT-PI meeting, Tsukuba, 2014 “Analysis of GOSAT methane data to characterize the methane source from rice paddies in Asia”
- 27) S. Hayashida, A. Ono, T. Nagase, Y. Niwa, R. Imasu : Asia Oceania Geoscience Society 2014, Sapporo, 2014 “Methane Concentration Over Monsoon Asia Observed from Space: Comparison with Model Simulation” [Poster]
- 28) C. Iwasaki, S. Hayashida, A. Butz, T. Machida : Asia Oceania Geoscience Society 2014, Sapporo, 2014 “Validation of GOSAT SWIR xCH<sub>4</sub> using TCCON and Airborne Measurement” [Poster]
- 29) S. Hayashida, A. Ono, Y. Niwa, R. Imasu, iCACGP/IGAC2014, 2014 “Comparison of methane

concentrations observed from space with model simulation over Monsoon Asia” [Poster]

- 30) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子、町田敏暢：日本気象学会2014年度秋季大会（2014）「西シベリア上空の水蒸気・気温・メタン高度分布の比較」
- 31) 長瀬友美、林田佐智子、今須良一、丹羽洋介：日本気象学会2014年度秋季大会（2014）「アジアにおけるメタン変動の研究 -NICAM-TM-CH<sub>4</sub>モデルと衛星データの比較-」 [ポスター]
- 32) S. Hayashida, A. Ono, X. Liu, K. Yang, Y. Kanaya and K. Chance : AGU fall meeting, San Francisco, 2014 “Ozone Enhancement in the Lower Troposphere over East Asia Observed by OMI: Evidence of Transboundary Pollution Transport from China to Korea and Japan” [Poster]

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 「大気中のメタンの発生をさぐる」奈良女子大学理学部公開講座「地球温暖化研究の最前線を語る」を開催。財団法人日航財団共催、日本航空協力（2012年11月29日、奈良女子大学記念館、観客50名）
- 2) NPO法人ならストップ地球温暖化の会（奈良県地球温暖化防止活動推進センター）の総会で講演。「～地球温暖化～二酸化炭素だけじゃない！」（2014年5月25日、奈良女子大学）
- 3) 国立環境研究所公開講座への協力とパネル展示など。
- 4) NPO法人ならストップ地球温暖化の会で講評。環境省の事業「まほろば青垣流省エネ道場」の助言者として報告書に外部有識者の所見を書くなど、活動に助言を行った。（2015年1月24日、奈良女子大学）

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞（2012年11月8日、奈良版、26頁、公開講座「地球温暖化研究の最前線を語る」の紹介）

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Xiong, X., S. Howelling, J. C. Wei, E. Maddy, F. Sun, and C. Barnet (2009), Methane plume over south Asia during the monsoon season: satellite observation and model simulation, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 783–794.
- 2) Park, M., W. J. Randel, L. K. Emmons, and N. J. Livesey (2009), Transport pathways of carbon monoxide in the Asian summer monsoon diagnosed from Model of Ozone and Related Tracers (MOZART), *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2008JD010621.
- 3) Frankenberg, C., I. Aben, P. Bergamaschi, E. J. Dlugokencky, R. van Hees, S. Houweling, P. van der Meer, R. Snel, and P. Tol (2011), Global column-averaged methane mixing ratios from 2003 to 2009

- as derived from SCIAMACHY: Trends and variability, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2010jd014849.
- 4) Marais, E. A., D. J. Jacob, K. Wecht, C. Lerot, L. Zhang, K. Yu, T. P. Kurosu, K. Chance, and B. Sauvage (2014), Anthropogenic emissions in Nigeria and implications for atmospheric ozone pollution: A view from space, *Atm. En*, 99, 32-40.
  - 5) Butz, A., et al. (2011), Toward accurate CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observations from GOSAT, *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011gl047888.
  - 6) Morino, I., et al. (2011), Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1061-1076.
  - 7) Yoshida, Y., et al. (2013), Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1533-1547.
  - 8) Frankenberg, C., J. F. Meirink, P. Bergamaschi, A. P. H. Goede, M. Heimann, S. Körner, U. Platt, M. van Weele, and T. Wagner (2006), Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004, *J. Geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JD006235
  - 9) Takeuchi, W., and L. Gonzalez (2009), Blending MODIS and AMSR-E to predict daily land surface water coverage, *Proceedings of International Remote Sensing Symposium (ISRS)*, Busan, South Korea, 2009 Oct. 29.
  - 10) Tucker, C. J. (1979), Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *RSEnv*, 8, 127– 150.
  - 11) Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, and L. G. Ferreira (2002), Overview of radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *RSEnv*, 83, 195-213.
  - 12) Justice, C. O., L. Giglio, S. Korontzi, J. Owens, J. T. Morisette, D. Roy, J. Descloitres, S. Alleaume, F. Petitcolin, and Y. Kaufman (2002), The MODIS fire products, *RSEnv*, 83, 244-262.
  - 13) Giglio, L., J. Descloitres, C. O. Justice, and Y. J. Kaufman (2003), An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, *RSEnv*, 87, 273-282.
  - 14) Deeter, M. N., Worden, H. M., Gille, J. C., Edwards, D. P., Mao, D., and Drummond, J. R. (2011), MOPITT multispectral CO retrievals: Origins and effects of geophysical radiance errors, *J. Geophys. Res.*, 116, D15303, doi:10.1029/2011JD015703.
  - 15) Deeter, M. N., Martínez-Alonso, S., Edwards, D. P., Emmons, L. K., Gille, J. C., Worden, H. M., Pittman, J. V., Daube, B. C., and Wofsy, S. C. (2013), Validation of MOPITT Version 5 thermal-infrared, near-infrared, and multispectral carbon monoxide profile retrievals for 2000-2011, *J. Geophys. Res.*, 118, 6710-6725, doi:10.1002/jgrd.50272.
  - 16) Matthews, E., I. Fung, and J. Lerner (1991), Methane emission from rice cultivation: Geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions, *GBioC*, 5, 3-24.
  - 17) Yan, X., H. Akiyama, K. Yagi, and H. Akimoto (2009), Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines, *GBioC*, 23.

- 18) Hayashida, S., A. Ono, S. Yoshizaki, C. Frankenberg, W. Takeuchi, and X. Yan (2013), Methane concentrations over Monsoon Asia as observed by SCIAMACHY: Signals of methane emission from rice cultivation, *RSEnv*, 139, 246-256.
- 19) Grooß, J.-U. and J. M. Russell III (2005), Technical note: A stratospheric climatology for O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl and HF derived from HALOE measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2797–2807.
- 20) Inoue, M., et al. (2014), Validation of XCH<sub>4</sub> derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2987-3005.
- 21) Anderson, G. P., S. A. Clough, F. X. Kneizys, J. H. Chetwynd, and E. P. Shettle, 1986: AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0-120km), Tech. Rep. AFGL-TR-86-0110, Air Force Geophysics Laboratory, Hansom AFB, MA, USA.

## (2) GOSAT熱赤外センサーのメタン高度分布データを用いた対流圏メタンの動態把握

千葉大学 環境リモートセンシング研究センター

齋藤尚子

平成24～26年度累計予算額：9,835千円（うち、平成26年度予算額：3,468千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

本サブテーマでは、GOSATによって同時に同一視野で観測されたメタンのカラム平均濃度（XCH<sub>4</sub>）と濃度の高度分布の複合利用を目的として、GOSATのTIRバンドからメタンの濃度高度分布を高精度に導出（リトリーバル）するためのリトリーバルアルゴリズムを開発した。メタンの高度分布の導出には、線形写像付き非線形最大事後確率推定法を用い、ラインバイライン計算およびフォワード計算の高精度化を図った。開発したアルゴリズムで導出したメタン濃度高度分布データをグアム上空のCONTRAILプロジェクトの航空機のメタンデータと比較した結果、TIRバンドのXCH<sub>4</sub>およびSWIRバンドのXCH<sub>4</sub>と航空機のXCH<sub>4</sub>の差は、それぞれ $-5 \pm 15$  ppbv、 $-8 \pm 10$  ppbvであり、両者ともに航空機のメタンデータとカラム平均濃度にして0.5%以内で一致することがわかった。これにより、GOSATのSWIRバンドとTIRバンドのメタンデータは少なくとも海上では同程度のデータ質であることが確認できた。さらに、TIRバンドのスペクトルに含まれるバイアス誤差の影響を軽減するために、メタンと同時に水蒸気、一酸化二窒素、オゾンの濃度および地表面温度、地表面射出率を推定するアルゴリズムを考案した。改良したアルゴリズムで導出したTIRバンドのメタンデータの方が、改良前のアルゴリズムで導出したメタンデータに比べて、濃度のバラつきが小さくなっており、TIRバンドのメタン濃度の高度プロファイルは、アプリアオリ（NIES輸送モデル）のメタン濃度プロファイルよりも、CONTRAILプロジェクトおよびHIPPOプロジェクトの航空機のメタンデータとよりよい一致を示していることがわかった。これらの結果から、NIESメタン輸送モデルを用いたメタン発生源・吸収源のインバージョンを行うにあたり、SWIRバンドのメタンのカラム平均濃度データとTIRバンドのメタンの高度プロファイルデータを複合利用することで、メタン発生源・吸収源のインバージョンのフラックス推定精度が有意に向上する可能性が高いと言える。

### [キーワード]

GOSAT、リトリーバルアルゴリズム開発、データ検証解析

### 1. はじめに

大気中のメタンは、湿地、水田、反芻動物の消化管、化石燃料、バイオマス燃焼等の地上放出源から放出され、OHによる酸化反応で減少しながら上部対流圏や下部成層圏に輸送される<sup>1),2)</sup>。そのため、大気中のメタンの動態解析には、気柱量（カラム平均濃度; XCH<sub>4</sub>）の観測だけでは十分とはいえず、濃度の高度分布を精度よく観測することが極めて重要だと言える。2009年1月23日に打ち上げられた日本のGreenhouse gases observing Satellite (GOSAT) に搭載されているThermal

and Near infrared Sensor for Carbon Observation Fourier Transform Spectrometer (FTS) には、短波長赤外 (short wave infrared; SWIR) に3つ (0.76、1.6、2.0  $\mu\text{m}$ )、熱赤外 (thermal infrared; TIR) に1つ (5.5-14.3  $\mu\text{m}$ ) の観測バンドがあり、GOSATはメタンのカラム平均濃度をSWIRバンドから、濃度の高度分布をTIRバンドから同一視野で導出することができる唯一の衛星である<sup>3),4)</sup>。同一視野内で同時に観測されたXCH<sub>4</sub>と自由対流圏以上で積算されたメタン高度プロファイルの差分から、境界層内のメタン濃度の情報を抽出することも可能である。また、同一視野内で観測されたXCH<sub>4</sub>とメタン高度プロファイルの情報は、地上で放出されたメタンの上空への伝搬を議論する上で有益であり、大気輸送モデルを介したメタンの地上の発生源・吸収源解析においても有用な観測データセットとなりうる。本サブテーマでは、TIRバンドからメタン濃度の高度分布を高精度に導出 (リトリーバル) するためのアルゴリズムの開発および改良を行った。さらに、リトリーバルアルゴリズム改良の有効性を検証するために、他の独立なメタン濃度データとの比較・検証解析を実施した。

## 2. 研究開発目的

メタンのカラム平均濃度と濃度の高度分布を同時に同一視野で観測することができる唯一の衛星であるGOSATの特徴を最大限に活用し、地上で発生したメタンがどのように鉛直・水平方向に輸送されていくのかを調べるために、線形写像付き非線形最大事後確率推定法<sup>5),6)</sup>という手法を用いてGOSATのTIRバンドからメタンの濃度高度分布の高精度導出を試み、導出したメタン高度分布のデータ質の検証を航空機のメタン濃度データとの比較を通して行う。

## 3. 研究開発方法

本サブテーマの研究開発方法は、(1) GOSAT/TIRバンドからのメタンプロファイル導出アルゴリズムの開発とその改良と、(2) 導出されたプロダクトの検証という二つのカテゴリに分かれる。アルゴリズム開発は、研究の進捗に伴い、1) NIESのGOSAT/TIRバンドプロダクトのTIR V00.01 CH<sub>4</sub>データのリトリーバルアルゴリズム開発、2) TIR V01.0x CH<sub>4</sub>データのリトリーバルアルゴリズム改良の段階に大別される。

### (1) GOSAT/TIRバンドからのメタン導出アルゴリズムの開発

1) GOSATのTIRバンドから可能な限り高い高度分解能でメタン濃度を導出するためのメタン導出アルゴリズムを開発し、GOSATのTIRバンドからメタン濃度の高度分布を導出した。このアルゴリズムによって導出されたメタンデータセットはTIR V00.01 CH<sub>4</sub>データとして一般に公開された。

2) 気温の高度分布の誤差がメタン濃度の導出精度に与える影響の検討とリトリーバルアルゴリズムの改良

(a) 気温の高度分布の誤差がメタン濃度の導出精度に与える影響について、サブテーマ4と連携して検討した。GOSATのレベル1スペクトルデータとフォワードスペクトルの残差を解析し、スペクトル残差に対する客観解析データの気温と水蒸気の誤差の寄与を調べた。

(b) 上記の検討結果を踏まえて、GOSATのTIRバンドのメタン濃度リトリーバルアルゴリズムのさらなる改良を行った。Kataoka et al. [2014]<sup>7)</sup>は、TIRバンドの観測スペクトルとGOSAT観測地点の近傍で取得された地上のフーリエ分光計の観測スペクトルを理論スペクトルを介して比較し、

TIRバンドのメタンのリトリーバルに用いる7.8  $\mu\text{m}$ 付近のスペクトルには1-2 K程度の負バイアスがある可能性を示した。このことから、TIRバンドのスペクトルからメタンを高精度に導出するためには、スペクトルバイアスの補正を濃度リトリーバルと同時に実施することが重要であるといえる。そこで、改良版のリトリーバルアルゴリズムでは、便宜上、スペクトルバイアスのうち放射輝度依存項を地表面射出率で、放射輝度非依存項を地表面温度で表すことを考案し、地表面射出率と地表面温度を同時に解くことでスペクトルバイアスの補正を試みた。表(2)-1に、メタンのリトリーバルアルゴリズムの改良点を示す。

TIRバンドの7.8  $\mu\text{m}$ 付近のスペクトルは信号雑音比（SN比）が70程度と非常に低く、さらにスペクトルにはメタン以外に水蒸気や一酸化二窒素の吸収帯も含まれている。V00.01時のアルゴリズムではこれらの「干渉成分」（同じ波長帯に吸収線を持つ分子）は「モデルパラメータ」としてスペクトルノイズの一部として扱っていたため、これらの分子の推定誤差に起因するメタン濃度の不確定性が存在していた。そこで、改良版アルゴリズムでは、これらのモデルパラメータとしてきた分子と気温を陽に扱い、メタンと同時に濃度を推定することにした。さらに、従来の1210-1370  $\text{cm}^{-1}$ のスペクトル帯に加えて、新たに1140-1210  $\text{cm}^{-1}$ のスペクトル帯を追加で用いることにより、メタンリトリーバルの干渉成分である一酸化二窒素の濃度推定精度を高めることでメタンの濃度推定精度を向上させることを試みた。また、リトリーバル毎に個別にリトリーバルチャンネルを選択することをやめて、リトリーバル結果に含まれる観測の情報量がリトリーバル毎に大きく変わることがないようにし、観測の情報量を最大限活用できるようにした。このようにして改良したリトリーバルアルゴリズムで導出されたデータセットはTIR V01.0x CH<sub>4</sub>データとして一般に公開されている。

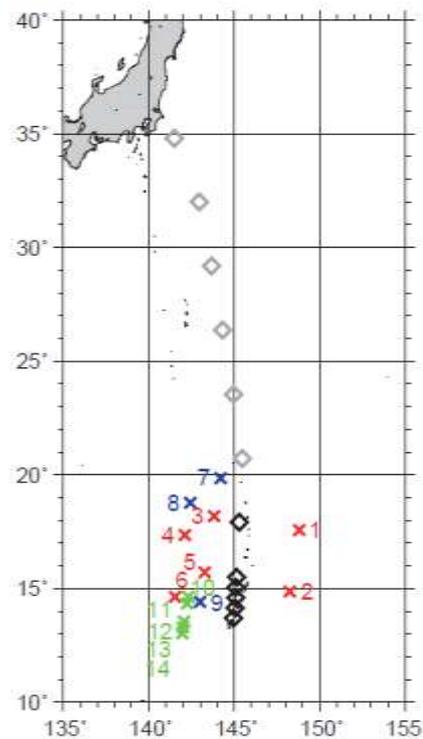
表(2)-1 TIRバンドのメタンリトリーバルの改良点。左は旧アルゴリズム（V00.01）、右はメタン濃度の高精度導出を目的に改良したアルゴリズム（V01.0x）。

V00.01(旧)	V01.00(新)
■ 1210-1360 $\text{cm}^{-1}$	■ 1140-1220, 1220-1370 $\text{cm}^{-1}$ (N <sub>2</sub> O弱吸収帯の追加)
■ CH <sub>4</sub> プロファイルのみ導出	■ CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , 気温プロファイルの同時導出
■ N <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> O, 気温プロファイルはモデルパラメータ誤差	■ モデルパラメータ誤差なし
■ 全波長一律のSNRを設定	■ 熱真空試験時のSNRを使用
■ チャンネルを選択(情報量基準、バイアスが大きいチャンネルは恣意的に除外)	■ 上記の波長範囲内の全チャンネルを使用
■ スペクトルバイアスは考慮せず波数位置の補正なし	■ 同時導出の地表面温度で非放射輝度依存のスペクトルバイアス、同時導出の地表面射出率で放射輝度依存のスペクトルバイアスの補正、中心波数位置の補正

## (2) 導出されたメタン高度分布データのデータ質検証

### 1) CONTRAILプロジェクトによるグアム上空における航空機観測データとの比較

導出したTIRバンドのメタン濃度の高度分布を、Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner (CONTRAIL) プロジェクトで得られたメタン濃度データと比較した。CONTRAILとは、日本航空 (JAL) が運航する定期航空機に搭載された装置を利用して大気中の二酸化炭素やメタンなどの長寿命気体を観測するプロジェクトである<sup>8)</sup>。ここでは、成田ーグアム間を飛行するJAL機に搭載されているAutomatic Air Sampling Equipment (ASE)<sup>9)</sup>で取得されたメタンデータを使用した。成田ーグアム間のASEによるフラスコ採集は、2009年4月から2010年3月までの1年間に月に1回の頻度で実施された。比較にあたり、グアム空港着陸体勢時に取得されたASEのメタンプロファイルデータを用いた (以下、ASEメタンプロファイルと記す)。図(2)-1に、航空機とGOSATの観測日付が±1日以内、観測地点距離400 km以内の条件を満たしたASE (ダイヤ) とGOSAT (クロス) のそれぞれの観測地点を示す。2009年4月21日の航空機データに対して4月21日と22日の6つのGOSATデータ (赤クロス)、2009年6月9日の航空機データに対して3つのGOSATデータ (青クロス)、2010年3月15日の航空機データに対して5つのGOSATデータ (緑クロス) が条件を満たしていた。



図(2)-1 比較解析に使用した航空機観測とGOSAT観測地点を示す。灰ダイヤおよび黒ダイヤはJAL航空機に搭載されているASEでメタンデータが取得された場所、クロスは航空機観測場所から400 km以内の範囲にあるGOSATの観測地点を示している。黒ダイヤはグアム空港上空の「メタンプロファイル」データの一部、クロスはGOSATデータ。(赤クロス) 4月21日と22日、(青クロス) 6月9日、(緑クロス) 3月15日。

航空機データとの比較にあたり、TIRバンドのメタン高度プロファイルデータとSWIRバンドのXCH<sub>4</sub>データの同質性を確認するために、ここでは航空機で得られたプロファイルを積分してGOSAT/SWIRバンドで得られたXCH<sub>4</sub>についても併せて検証を行った。XCH<sub>4</sub>の計算は、Araki et al. [2010]<sup>10)</sup>の手法に倣い、ASEメタンプロファイルが得られている高度範囲ではそのデータを設定し、航空機観測で得られていない最下端（およそ0.81-2.07 km）以下の高度領域については最下端のASEメタン濃度をそのまま地表面まで一定値と仮定した。さらに航空機観測の最上端（11.81-12.50 km）から対流圏界面高度までは最上端のASEメタン濃度をそのまま対流圏界面高度まで一定値と仮定した。成層圏のメタンプロファイルの仮定については、GOSATのリトリバルに用いたメタン濃度のアプリオリ（先験値、NIES輸送モデルの出力値）の成層圏での濃度減少率を使用して、対流圏界面から成層圏界面（45 km）までの高度領域のメタン濃度を設定した。成層圏界面から大気上端まで（0.1 hPa）は、成層圏界面高度でのメタン濃度をそのまま大気上端まで一定値とした。次に、設定した航空機のメタンプロファイルからXCH<sub>4</sub>を計算した。乾燥大気の数密度の計算には、GOSATのリトリバルに使っている気象庁の気温、水蒸気データ（気象庁Grid Point Value（GPV）気象データ）を用いた。これらのGPV気象データは、航空機観測地点と対応した15地点のGOSAT観測地点に内挿したものである。10 hPaより上の高度の気温についてはCIRA-86データを利用し、水蒸気についてはGPV水蒸気混合比の対数を高度に対して線形に内挿したデータを用いた。計算した乾燥大気の数密度のプロファイルと設定した航空機のメタン混合比のプロファイルから航空機のXCH<sub>4</sub>を計算した。

## 2) シベリア域における航空機観測との比較

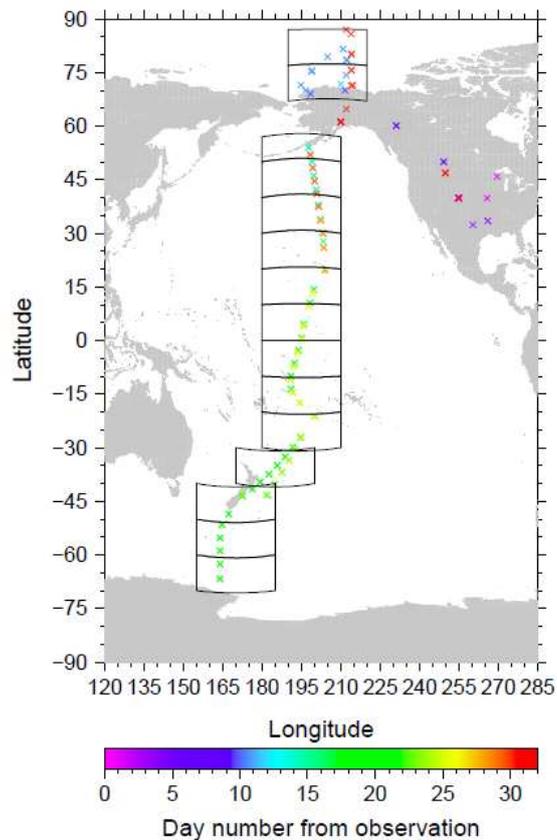
高緯度であるシベリア域においても、TIRバンドから導出されたメタンの高度分布のデータ質の初期検証を実施した。熱赤外波長帯のスペクトルを用いた濃度リトリバルでは、気温の鉛直勾配（"thermal contrast"）から分子の存在高度を決定するため、一般には、気温の鉛直勾配が緩やかな高緯度は低緯度に比べて観測からもたらされる情報量が減少する。しかしながら、太陽光を用いる短波長赤外観測では高緯度で太陽光の光量が減少することからさらに観測が難しくなるため、熱赤外スペクトルから高緯度の濃度分布をどの程度の確度・精度で導出することができるかを把握することは非常に重要である。そこで、サブテーマ4（国立環境研究所）と連携して、シベリア域（スルグート、ノボシビルスク）で国立環境研究所が実施しているメタンの航空機観測データと改良版アルゴリズムで導出したメタン濃度の高度分布の比較を行った。

## 3) HIPPOプロジェクトで得られた航空機観測データとの比較

精度の高い航空機観測プロジェクトであるHIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO) プロジェクト<sup>11)</sup>のメタン高度分布データと比較した。HIPPOは、北米および太平洋上空の様々な高度・緯度の大気をサンプリングすることにより、二酸化炭素や他の大気分子の濃度の全球分布を求めることを目的とした、アメリカ国立科学財団（National Science Foundation; NSF）、アメリカ大気研究センター（National Center for Atmospheric Research; NCAR）／地球観測研究所（Earth Observing Laboratory; EOL）などが参加する共同プロジェクトである。HIPPOは、全5つのミッションで構成され、2009年1月から2011年9月の期間で観測が行われた。比較に使ったデータはHIPPO3（2010

年3-4月)、HIPPO4(2011年6-7月)、HIPPO5(2011年8-9月)である。

図(2)-2に示すように、HIPPOの各プロファイルデータの最下端高度の観測位置を含むように、緯度約10度、経度30度の領域に分割し、10日ごとにTIRバンドのメタン濃度データ、アプリアリのメタン濃度データを平均し、各領域のHIPPOのメタン濃度データと比較した。ここでは、Quantum Cascade Laser Spectrometer(QCLS)で観測されたメタンデータをHIPPOメタンデータとして使用していた。QCLSはハーバード大学とAerodyne Corporationが開発した中赤外線センサーで<sup>11)</sup>、赤外分光法を用いてメタンの観測を行っている。



図(2)-2 HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO) プロジェクト (HIPPO5) の航空機によるメタン濃度プロファイル観測の最下端観測地点(クロス)。黒線はTIRデータとの比較に用いた領域の分割範囲を示し、シンボルのカラーは観測開始日からの通算日を表している。

#### 4) 同時導出される水蒸気・一酸化二窒素の検討

表(2)-1に示した通り、改良版アルゴリズムではメタンと同時に水蒸気や一酸化二窒素も導出されるため、それらの成分についてもデータ質を検討した。水蒸気プロファイルについては気象庁GPVの水蒸気プロファイルを用いて初期検証を行った。

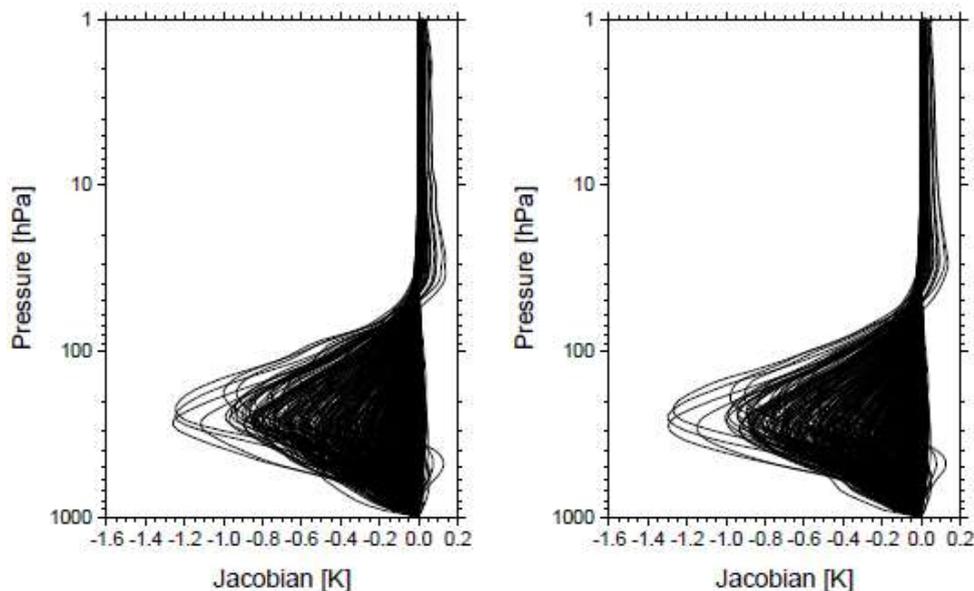
#### 4. 結果及び考察

##### (1) GOSAT/TIRバンドからのメタン導出アルゴリズムの開発

1) GOSATのTIRバンドから可能な限り高い高度分解能でメタン濃度を導出するため、メタン等の大気分子の吸収線を考慮して大気の光学的厚さを算出するラインバイライン計算コードと大気分子の吸収線パラメータを最新のものに置きかえて、フォワードスペクトルの計算精度の向上を図った。さらに、濃度導出の際に必要な種々のモデルパラメータの設定も見直し、GOSATのTIRバンドからメタン濃度の高度分布を導出した。このアルゴリズムによって導出されたメタンデータセットはTIR V00.01 CH<sub>4</sub>データとして一般に公開された。

##### 2) 気温の高度分布の誤差がメタン濃度の導出精度に与える影響の検討とリトリバルアルゴリズムの改良

(a) GOSATのレベル1スペクトルデータとフォワードスペクトルの残差を解析し、スペクトル残差に対する客観解析データの気温と水蒸気の誤差の寄与を調べ、これらの誤差がメタン濃度のリトリバル結果の精度に大きく影響することを明らかにした。図(2)-3に、現行のGOSATのメタン濃度導出の際に用いている気象庁GPVの気温および水蒸気データを用いて計算したメタンのヤコビアン行列（左）と、GPS（Global Positioning System）衛星のradio掩蔽観測による気温および水蒸気データセットを用いて計算したメタンのヤコビアン行列を示す（右）。気象データセット以外は両者全く同じ条件で計算したものであるが、ヤコビアンの絶対値や値がピークを取る高度が異なっており、この結果からリトリバルに用いる気象データセットを変えるとメタンの濃度導出結果が変わりうることを示唆される。今後は、GOSATのTIRバンドのスペクトルからメタンの濃度導出の際に気温や水蒸気も同時に推定するアルゴリズムの開発等も視野に入れて研究を進めて行く必要があると言える。

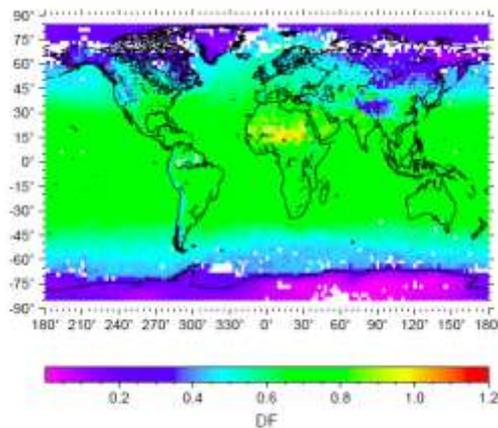


図(2)-3 GOSATのメタン濃度導出の際に用いている気象庁GPVの気温および水蒸気データを用いて計算したTIRバンドの7.6  $\mu$ m付近メタンのヤコビアン行列（左図）と、GPS衛星のradio掩蔽観測による気温および水蒸気データセットを用いて計算した

7.6  $\mu$  m付近メタンのヤコビアン行列（右図）。ヤコビアン行列とは、各波長、各高度で対象となる大気分子の濃度を単位量変化させた場合の大気上端での放射輝度（輝度温度）の変化量を計算したものである。

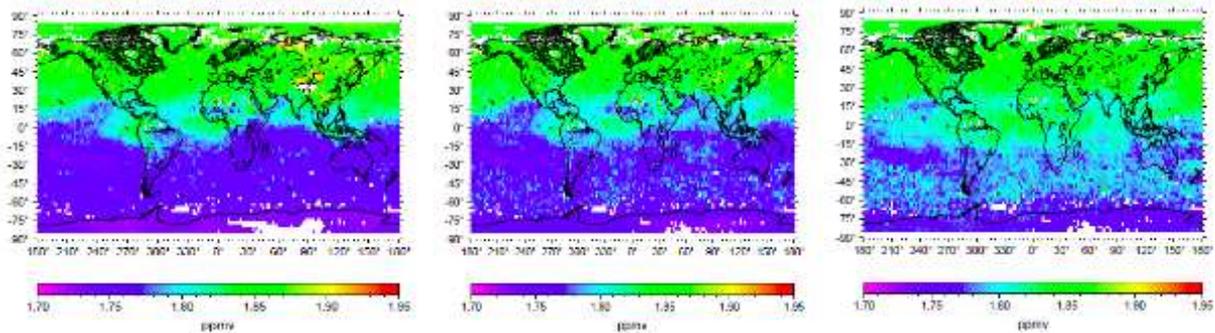
（b）上記の検討結果を踏まえて、GOSATのTIRバンドのメタン濃度リトリーバルアルゴリズムのさらなる改良を行った。改良アルゴリズムで得られたメタンプロダクトの概要を以下に示す。

図(2)-4に、改良版アルゴリズムによるTIRバンドのメタン濃度リトリーバル（V01.0x）の自由度（Degree of Freedom; DF）を示す。メタンのリトリーバルの自由度は中低緯度で0.8程度、高緯度では0.4程度と、前バージョン（V00.01）の自由度（0.6-1.1）と比較して低くなっており、相対的に観測からの情報量が少なくなっていることがわかる。今後のデータ解析では、自由度を参照して一定以上の観測情報が含まれていない場合は解析対象から外すなどの考察が必要である。

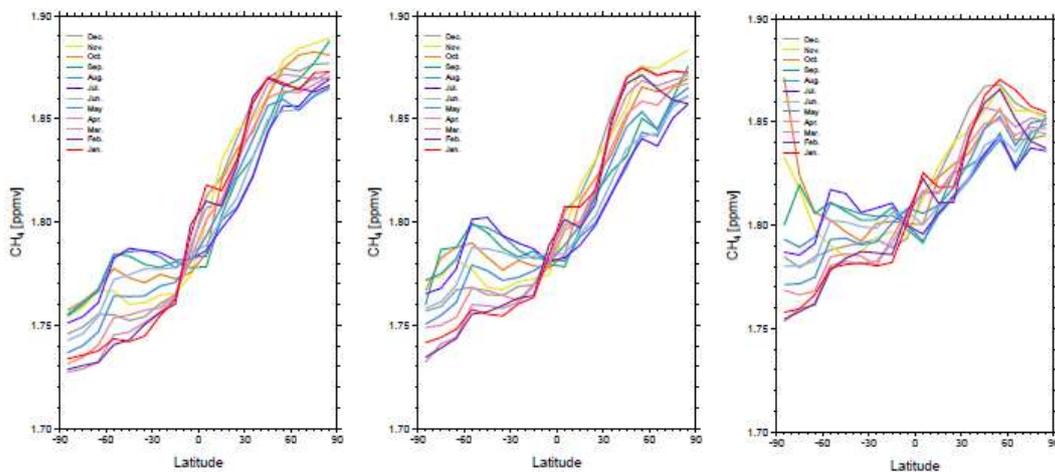


図(2)-4 改良版アルゴリズム（V01.0x）によるTIRバンドのメタン濃度リトリーバルの自由度（Degree of Freedom; DF）。2010年4月のデータの月平均値。緯度・経度2.5度ごとにデータを平均している。

図(2)-5および図(2)-6に、改良版アルゴリズムで導出されたTIR V01.0xのメタン濃度の緯度・経度断面図と緯度分布図を示す。まず、V01.0xのメタンデータの濃度の緯度分布や季節変動は概ね妥当であるといえる。V01.0xのメタンデータは、アприオリに比べて濃度の季節変動が大きくなっており、特に南半球でその傾向が顕著になっている。図(2)-6に示されているとおり、300 hPaの南半球高緯度のメタン濃度が春季（9-11月）に極端に大きくなっているが、これはメタンと同時推定しているオゾンの（表(2)-1）、春季極渦内の極端な濃度減少が影響しているものと考えられる。

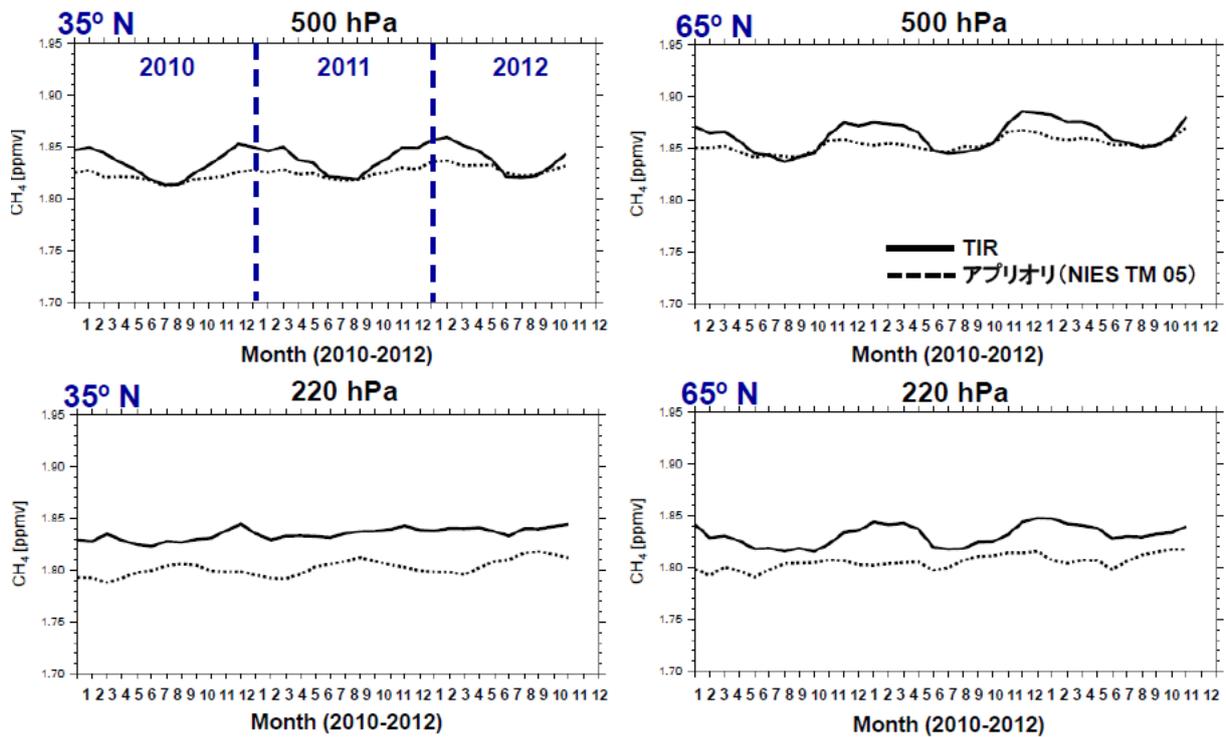


図(2)-5 TIRバンドの2010年4月のメタン濃度の月平均値 (V01.0x)。左から700 hPa、500 hPa、300 hPa高度における全球分布。緯度・経度2.5度ごとにデータを平均している。



図(2)-6 TIRバンドの2010年のメタン濃度の緯度分布の月平均値 (V01.0x)。左から700 hPa、500 hPa、300 hPa。緯度10度ごと、経度方向には帯状にデータを平均している。

図(2)-7に、TIRバンドのメタンデータとアプライオリのメタンデータの2010年から2012年10月までの濃度時系列を示す。先に述べたとおり、TIRバンドのメタン濃度はアプライオリのメタン濃度よりも全球で季節変動が大きくなっている。緯度帯別に見ると、シベリア域を含む北半球高緯度の上空のTIRバンドのメタン濃度の季節変動が中緯度よりも大きくなっており、これはアプライオリであるNIES輸送モデルデータのメタン濃度の方には見られない特徴である。高度別に見ると、500 hPa高度においては、北緯35度、北緯65度の双方共に、アプライオリデータのメタン濃度と比較して、TIRバンドのメタン濃度の季節変動の振幅が大きく表れている。220 hPa高度においては、中緯度と比較して高緯度で季節変動の振幅が大きく、冬期に特異的に高濃度が見られる。しかしながら、メタンは成層圏で急激に濃度が減少することから、対流圏性の空気塊を観測/モデル計算しているか成層圏性の空気塊を観測/モデル計算しているかで濃度は大きく変わりうる。今後は対流圏界面高度に注意して、対流圏の空気塊のみを抽出して時系列解析を行う必要がある。

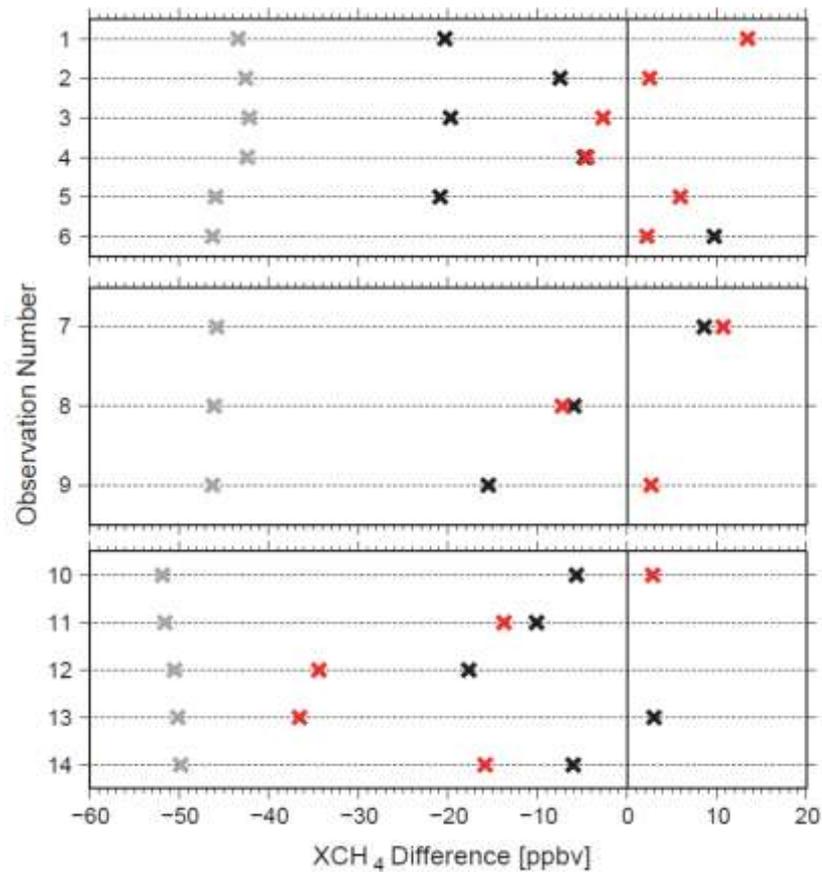


図(2)-7 TIRと先験値（アプリアリ）の2010年から2012年10月までの月平均値の時系列。上段は500 hPa高度、下段は220 hPa高度、左側は北緯35度、右側は北緯65度の時系列。

## (2) アルゴリズムで導出されたメタン高度分布データのデータ質検証

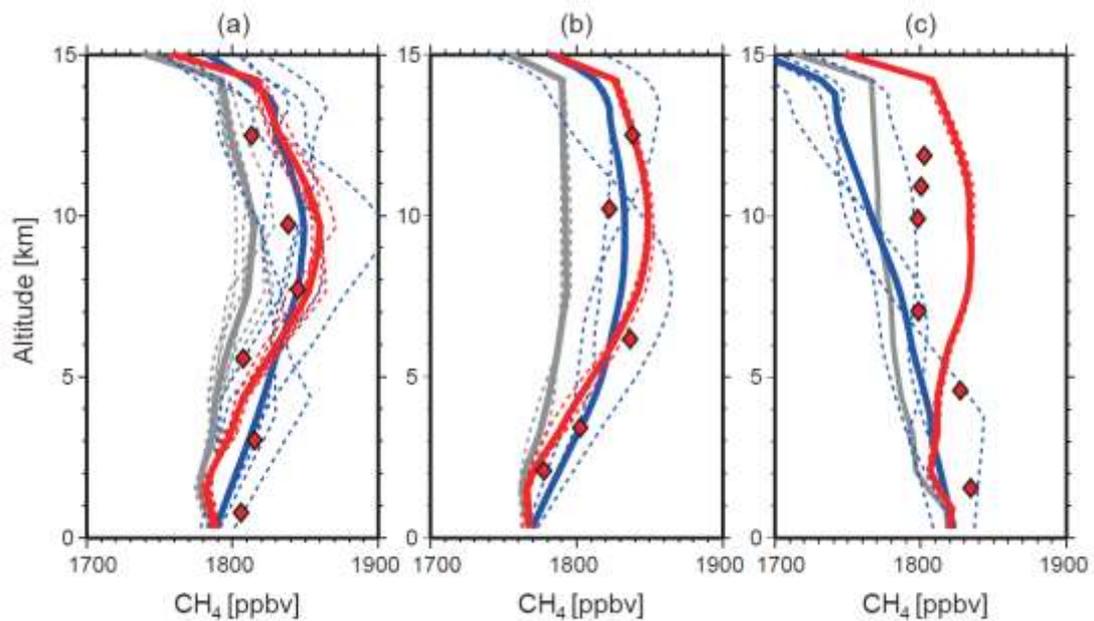
### 1) CONTRAILプロジェクトによるグアム上空における航空機観測データとの比較

図(2)-8に、TIRバンドのメタンの高度プロファイルデータ（V00.01）から計算したXCH<sub>4</sub>と航空機のXCH<sub>4</sub>の差分（赤クロス）、SWIRバンドのXCH<sub>4</sub>と航空機のXCH<sub>4</sub>の差分（黒クロス）、アプリアリのXCH<sub>4</sub>と航空機のXCH<sub>4</sub>の差分（灰クロス）を示す。なお、図(2)-8の比較においては、航空機のXCH<sub>4</sub>はTIRバンド、SWIRバンドのアベレージングカーネルを考慮して計算した値を用いている<sup>12)</sup>。TIRバンドのXCH<sub>4</sub>およびSWIRバンドのXCH<sub>4</sub>と航空機のXCH<sub>4</sub>との差は、それぞれ $-5 \pm 15$  ppbv、 $-8 \pm 10$  ppbvであり、両者ともに航空機のメタンデータとカラム平均濃度にして0.5%以内で一致することがわかった。また、図(2)-9に示すとおり、航空機のメタンの高度プロファイル（赤線はTIRバンドのアベレージングカーネルを考慮したプロファイル、赤ダイヤはオリジナルのASEデータ）と近傍のTIRバンドのメタンの高度プロファイル（青線）は、アプリアリのメタンの高度プロファイル（灰線）よりもよい一致を示し、V00.01データのリトリバルアルゴリズムにおいても、TIRバンドの観測情報がメタン濃度のリトリバル結果に有効に反映されていることが示された。



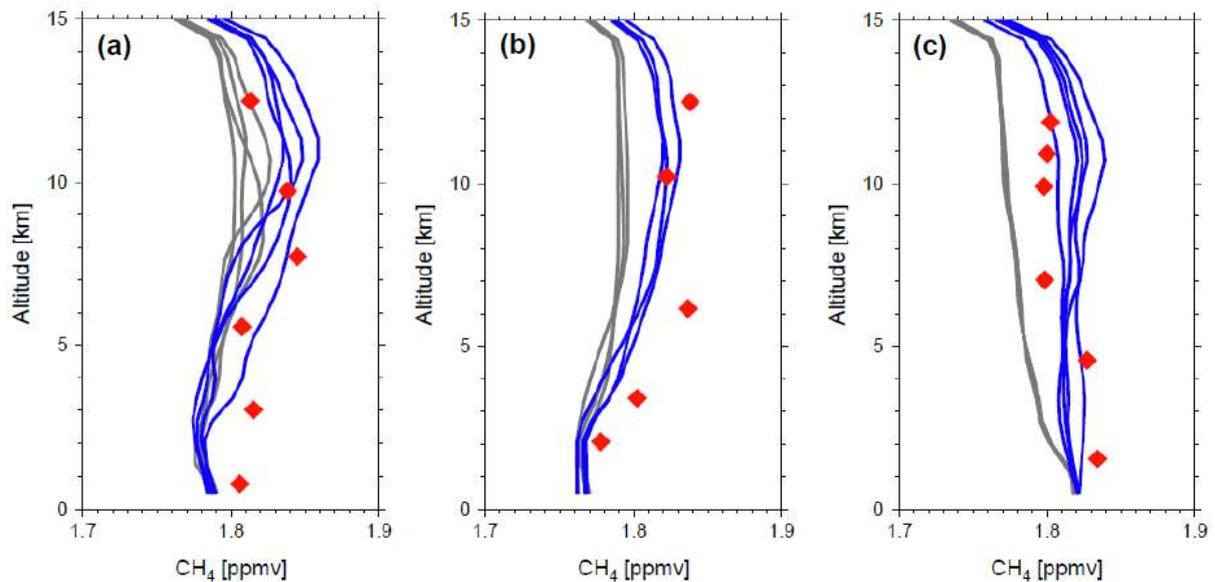
図(2)-8 航空機で観測されたメタン濃度を基に換算した $XCH_4$ （メタンカラム平均濃度）と、GOSATのTIRバンドおよびSWIRバンドで得られた $XCH_4$ との差。赤はTIRと航空機データとの差、黒はSWIRと航空機データとの差を表している。灰はアプリオリ（先験値）のNIES輸送モデルと航空機データとの差を表している。（a）4月21、22日、（b）6月9日、（c）3月15日。

さらに、成層圏メタン濃度の $XCH_4$ への寄与を調べた。複数のメタン濃度データセットを用いて成層圏のメタンの濃度減少率を設定し、 $XCH_4$ を計算した結果、成層圏メタン濃度の変動が $XCH_4$ に9 ppbv程度の変動をもたらしうることが明らかになった。また、対流圏界面の高さや気柱平均濃度を算出する際の気象データセットの違いによって $XCH_4$ の計算値に数ppbv（それぞれ3 ppbv、2 ppbv）の誤差を生じることがわかった。この成果をまとめて日本気象学会のレター誌SOLAに投稿した<sup>13)</sup>。



図(2)-9. 航空機のメタンデータ（赤ダイヤモンド）とTIRのアベレージングカーネルを考慮した航空機のメタン高度プロファイル（赤線）と、TIRバンドのメタン高度プロファイル（青波線、青実線は平均値）と、そのアプリアリの高度プロファイル（灰波線、灰）。（a）4月21、22日、（b）6月9日、（c）3月15日。

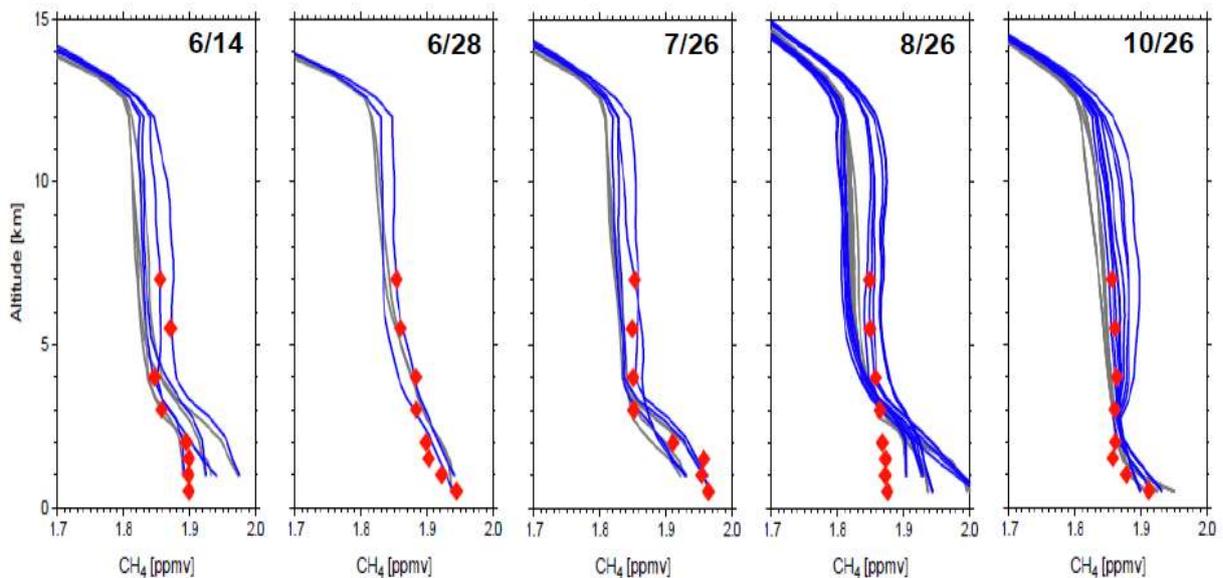
次に、改良版アルゴリズム（V01.0x）で導出したメタン濃度の高度分布を、同様に、2009年4月21、22日、6月9日、2010年3月15日の3日間にグアム空港着陸時にJAL航空機で取得されたメタン濃度データと比較した。図(2)-10の比較結果から、TIRバンドのメタン濃度の高度プロファイルは、アプリアリ（NIES輸送モデル）のメタン濃度プロファイルよりも、航空機のメタンデータとよりよい一致を示していることがわかる。V00.01のリトリーバルアルゴリズムによる解析結果（図(2)-9）と比較して、改良版アルゴリズムで導出したメタンデータの方が濃度のバラつきが小さくなっていることがわかる。これらの結果から、NIESメタン輸送モデルを用いたメタン発生源・吸収源のインバージョンを行うにあたり、GOSATのTIRバンドのスペクトルから導出されたメタンの高度プロファイルデータがよい観測拘束条件になりうることを示唆している。SWIRバンドのメタンのカラム平均濃度データを単独に利用するだけではなく、TIRバンドのメタンの高度プロファイルデータと組み合わせて利用することで、メタン発生源・吸収源のインバージョンのフラックス推定精度が有意に向上する可能性が高いと言える。



図(2)-10 航空機のメタンデータ（赤ダイヤ）、TIRバンドのメタン高度プロファイル（青実線）と、そのアприオリの高度プロファイル（灰実線）。（a）4月21、22日、（b）6月9日、（c）3月15日。

## 2) シベリア域における航空機観測との比較

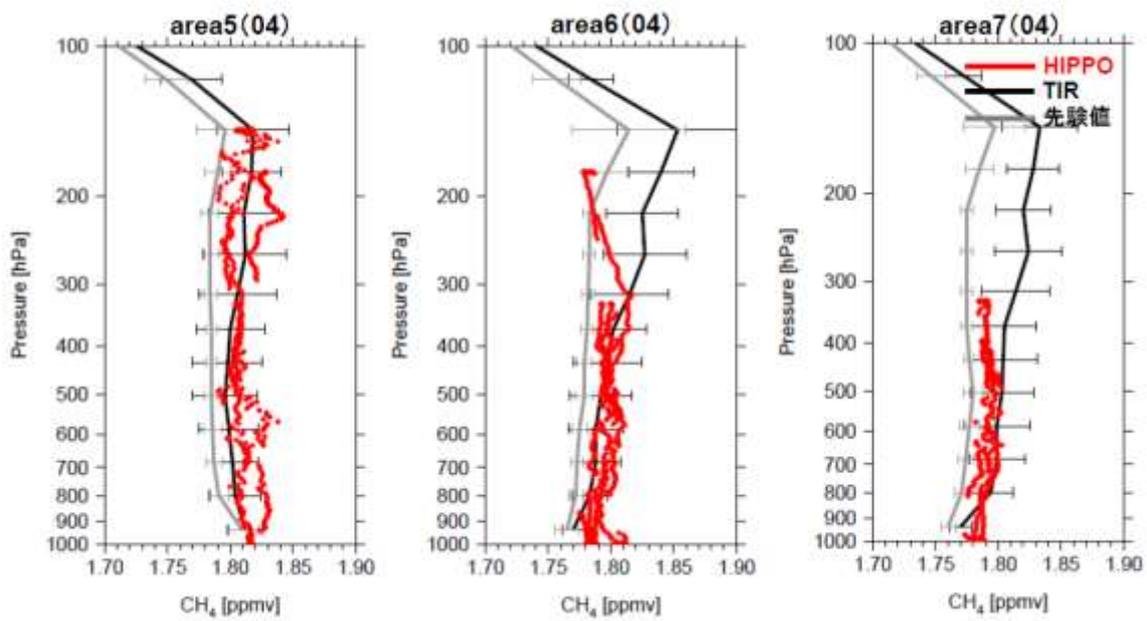
図(2)-11に、2010年のシベリア域（スルグート、ノボシビルスク）で国立環境研究所が実施しているメタンの航空機観測データ（赤）と、近傍のTIRバンドのスペクトルから導出されたメタン濃度の高度プロファイル（青線）の比較を示した。図(2)-11に示す通り、熱帯域のグアム上空での比較結果（図(2)-10）と比べると、TIRバンドのメタン高度プロファイルがアприオリであるNIES輸送モデルのメタン高度プロファイルと近い値を示していることがわかる。これは、メタンのリトリーバル結果がアприオリにより強く拘束されており、相対的に観測スペクトルからもたらされる情報量が少なくなっていることを意味している。今後は、さらにリトリーバルアルゴリズムを見直し、高緯度の観測スペクトルの情報量を増やす方向でアルゴリズムの改良を試みる必要があるといえる。しかしながら、航空機データに見られる中部対流圏で若干メタン濃度が増加するイベント（6/14など）がTIRバンドのメタン高度プロファイルにも見られるなど、シベリア域でのGOSATの熱赤外によるメタン観測が有意である可能性も示唆される。



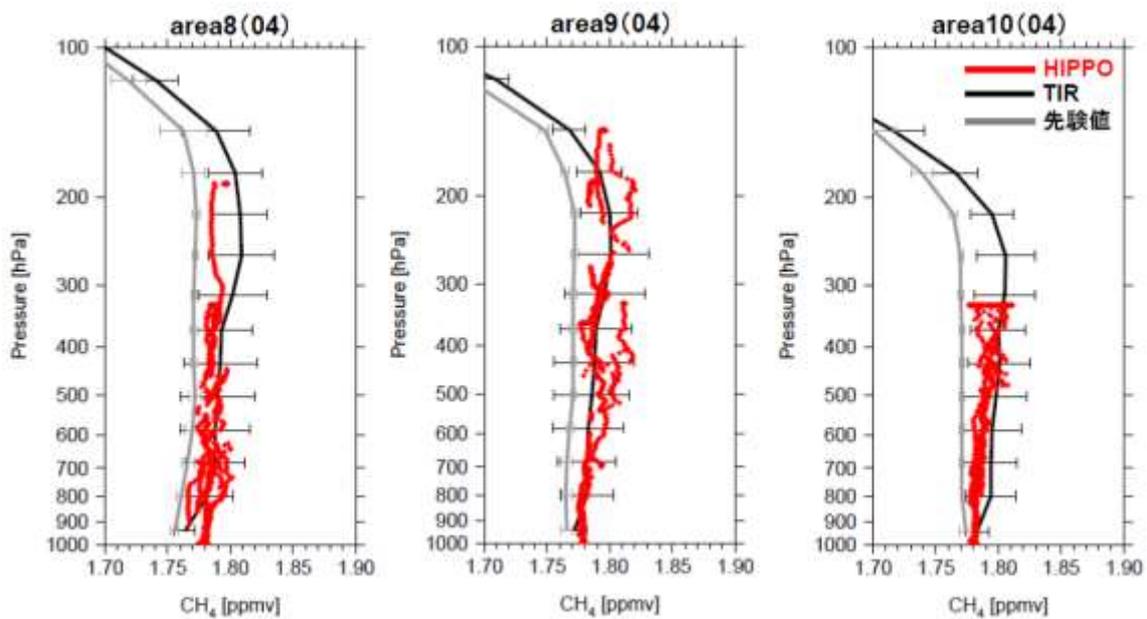
図(2)-11 2010年のシベリア域（スルグート、ノボシビルスク）で国立環境研究所が実施しているメタンの航空機観測データ（赤）と、近傍のTIRバンドのスペクトルから導出されたメタン濃度の高度プロファイル（青線）の比較。灰線はアプリオリ（NIES輸送モデル）のメタンプロファイル。

### 3) HIPPOプロジェクトで得られた航空機観測データとの比較

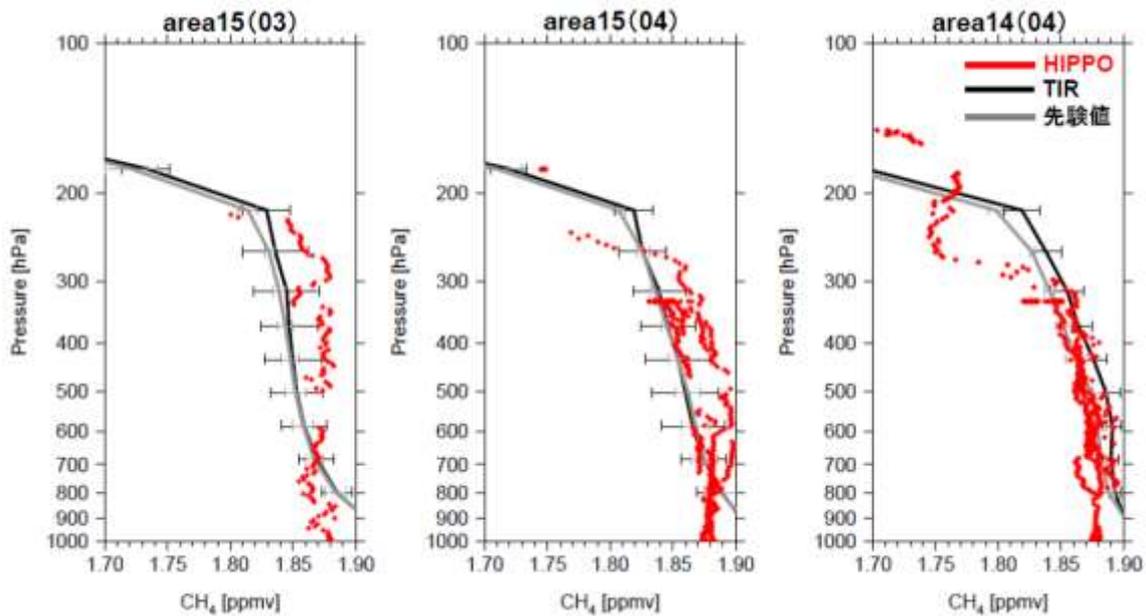
図(2)-12に、HIPPO5のメタン高度プロファイルとTIRバンドおよびアプリオリのメタン高度プロファイルの領域別平均値の比較結果を示す。低緯度については（図(2)-12a）、黒線で示されたTIRバンドのメタン濃度プロファイルデータは、赤線で示されたHIPPOのメタン濃度プロファイルデータとよい一致を示している。一方、灰線で示されたアプリオリのメタン濃度プロファイルデータは全体的に濃度が両者より低めになっている。中緯度についても同様のことが言え（図(2)-12b）、中低緯度のHIPPOのメタンデータの領域内の濃度のバラつきがTIRバンドのメタンデータの領域内平均値の1シグマと同程度の大きさであることがわかる。一方、北半球高緯度については（図(2)-12c）、もともとTIRバンドの観測スペクトルに含まれるメタン濃度の情報量が中低緯度に比べて乏しいため、HIPPOのメタンデータの濃度分布の特徴を十分に捉えられているとは言えない。このことは、衛星データを利用してシベリア域のメタンの動態に関する研究をするためには、リトリーバルアルゴリズム等をさらに改良し、衛星データ処理に利用する気温などの気象場データの高精度化を図って、観測確度・精度を向上させなければならないことを示唆している。



図(2)-12a 2011年夏の北緯20度から南緯10度の範囲におけるHIPPO（赤）、TIR(黒)およびアプリオリ（灰色）の領域ごとの比較（HIPPO5）。TIRとアプリオリのメタンデータについては領域内の平均値と一シグマを示している。領域は図(2)-2に基づく。



図(2)-12b 2011年夏の南緯10度から40度の範囲におけるHIPPO（赤）、TIR(黒)およびアプリオリ（灰色）の領域ごとの比較（HIPPO5）。TIRとアプリオリのメタンデータについては領域内の平均値と一シグマを示している。領域は図(2)-2に基づく。

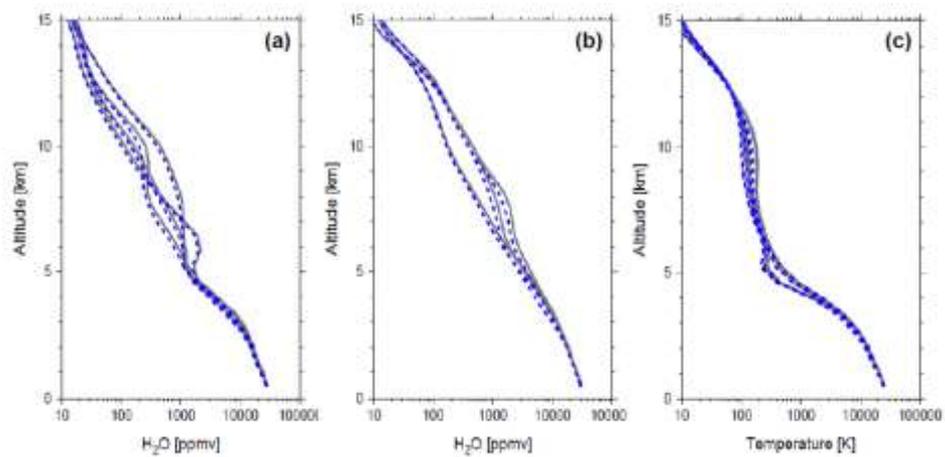


図(2)-12c 2011年夏の北緯67度から87度の範囲におけるHIPPO（赤）、TIR(黒)およびアプリオリ（灰色）の領域ごとの比較（HIPPO5）。TIRとアプリオリのメタンデータについては領域内の平均値と一シグマを示している。領域は図(2)-2に基づく。

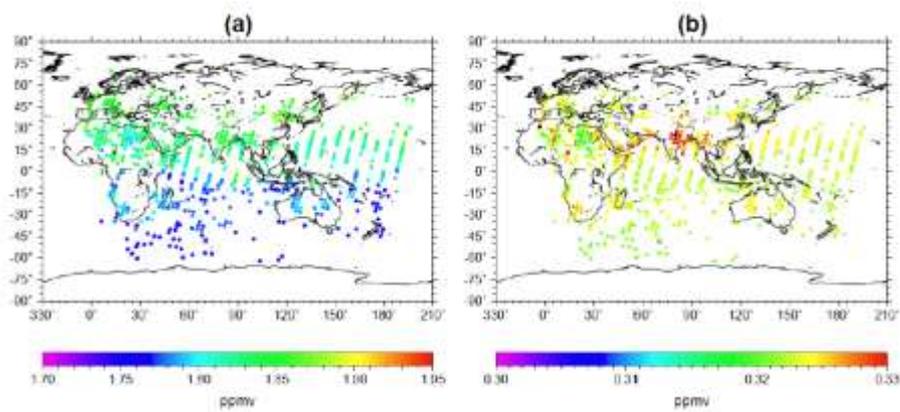
#### 4) 同時導出される水蒸気・一酸化二窒素の検討

改良版アルゴリズムでメタンと同時に導出される水蒸気について、サブテーマ4と連携してデータ質の初期検証を行った。ここでは、まず、メタンと同時に推定された水蒸気プロファイルと気象庁GPVの水蒸気プロファイルと比較した。GPVデータはメタンリターン時の大気条件として与えているデータであるため、GPVデータからの偏差は観測スペクトルからもたらされた濃度情報ということになる。図(2)-13に示すとおり、中部対流圏ではTIRバンドから同時推定された水蒸気プロファイルとGPV水蒸気データとの間に差が見られることから、今後は観測スペクトルからもたらされた濃度情報が有意かどうかについて、他の独立な水蒸気データを用いて継続的にTIRバンドの水蒸気プロファイルの検証を行っていく必要がある。

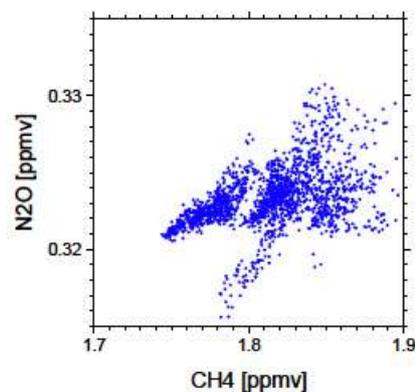
改良版のアルゴリズムでは、水蒸気以外に一酸化二窒素の濃度もメタンと同時に推定している。一酸化二窒素の同時推定の第一の目的はメタンの導出精度の向上であるが、一酸化二窒素自体が強力な温室効果気体であるため、ここでは、導出された一酸化二窒素のデータ質について考察した。図(2)-14に同時推定されたメタンと一酸化二窒素の濃度分布を示す。図(2)-15の両データの散布図でも示されているとおり、導出されたメタン濃度と一酸化二窒素濃度には明瞭な相関はなく、両者が少なくとも独立の情報量を持っていることがわかる。



図(2)-13 グアム上空でのTIRバンドのスペクトルからメタンと同時に導出された水蒸気濃度の高度プロファイル（青線）と気象庁GPV水蒸気データ（灰線）。（a）4月21、22日、（b）6月9日、（c）3月15日。



図(2)-14 TIRバンドのスペクトルから同時に導出された500 hPa面におけるメタン濃度（a）と一酸化二窒素濃度（b）。2010年4月の3日間の導出結果。



図(2)-15 図(2)-14で示した500 hPa面におけるメタン濃度と一酸化二窒素濃度の散佈図。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマでは、GOSATによって同時に同一視野で観測されたメタンのカラム平均濃度（XCH<sub>4</sub>）と濃度の高度分布の複合利用を目的として、GOSATのTIRバンドからメタンの濃度高度分布を高精度に導出するためのリトリバルアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムの有効性を航空機観測のメタンデータと比較することで検証し、リトリバルアルゴリズムのさらなる改良を行った。

開発したアルゴリズムで導出したTIRバンドのメタン高度分布データをカラム量に変換して、SWIRバンドのメタンデータおよびグアム上空で観測されたCONTRAILプロジェクトの航空機のメタンデータと比較した結果、TIRバンドのXCH<sub>4</sub>およびSWIRバンドのXCH<sub>4</sub>は、航空機のXCH<sub>4</sub>と0.5%以内で一致することがわかった。このことにより、GOSATのSWIRバンドとTIRバンドのメタンデータは少なくとも海上では同程度のデータ質であることが確認でき、SWIRバンドのメタンカラム平均濃度データとTIRバンドのメタン高度分布データを組み合わせて解析することで、メタン輸送過程の解明につながることを示すことができた。

さらに、TIRバンドから導出されたメタン高度分布データは、リトリバルのアプリオリ（NIES輸送モデルの出力値）よりも、CONTRAILプロジェクト、HIPPOプロジェクトの航空機メタンデータとよい一致を示していることから、GOSATのTIRバンドの観測によって大気中メタン濃度に関する有意な情報がもたらされたことが確認できた。このことは、TIRバンドのメタンデータが、メタン輸送モデルの改良に役立つこと、さらに、メタン輸送モデルを介したメタンの発生源・吸収源の推定に有益な情報をもたらしていることを示している。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

特に記載すべき事項はない。

## 6. 国際共同研究等の状況

### 1) GOSAT-AIRSのメタン濃度相互比較・検証解析

カウンターパート：National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)（米国）

参加、連携状況：GOSATのメタンデータとAIRSのメタンデータの全球比較解析を共同で実施、共著論文の執筆など。

### 2) GOSAT-ACE-FTSのメタン濃度相互比較・検証解析

カウンターパート：トロント大学（カナダ）

参加、連携状況：GOSATのメタンデータとACE-FTSのメタンデータの高緯度比較解析を共同で実施、共著論文の執筆など。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) N. Saitoh, M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa: SOLA, 8, 145-149 (2012) “Comparisons between XCH<sub>4</sub> from GOSAT Shortwave and Thermal Infrared Spectra and Aircraft CH<sub>4</sub> Measurements over Guam”

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) X. Xiong, N. Saitoh, C. Barnet, E. Maddy, S. Hayashida, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa, T.S.Pagano : The 4th GOSAT RA PI Meeting, California Institute of Technology (Caltech), USA, 2012 “Comparison of CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT TANSO TIR, AIRS and aircraft measurements”
- 2) N. Saitoh, M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa : The 8<sup>th</sup> International Workshop of Greenhouse Gas Measurements from Space, USA, 2012 “Simultaneous observations of column abundances and profiles of CH<sub>4</sub> by GOSAT: Validation of GOSAT CH<sub>4</sub> products using aircraft measurements over Guam “
- 3) 齋藤尚子、今須良一、杉田考史、林田佐智子、塩見慶：日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学（2012）「GOSAT/TANSO-FTS TIRからのメタン濃度高精度導出のための同時推定アルゴリズムの検討」
- 4) 齋藤尚子、今須良一、杉田孝史、林田佐智子：第18回大気化学討論会、和倉（2012）「GOSAT/TANSO-FTS TIRセンサーからのメタン濃度高精度導出アルゴリズムの検討」
- 5) N. Saitoh, R. Imasu, T. Sugita, S. Hayashida, K. Shiomi : AGU Fall Meeting, USA, 2012 “Algorithm improvement toward better retrieval of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> profiles from GOSAT/TANSO-FTS thermal infrared spectra”
- 6) 齋藤尚子、木本周平、杉村亮、今須良一、杉田考史、林田佐智子、塩見慶、川上修司、町田敏暢、松枝秀和、澤庸介：第19回大気化学討論会（2013）「GOSAT/TANSO-FTS TIR CO<sub>2</sub> およびCH<sub>4</sub> リトリーバルアルゴリズムの改良について」
- 7) 齋藤尚子、今須良一、杉田考史、林田佐智子、塩見慶、川上修司、町田敏暢、松枝秀和、澤庸介：日本気象学会2013年度秋季大会、仙台（2013）「改良版アルゴリズムによるGOSAT/TANSO-FTS TIR CO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>リトリーバル」
- 8) N. Saitoh, R. Imasu, T. Sugita, S. Hayashida, K. Shiomi, S. Kawakami, T. Machida, Y. Sawa, and H. Matsueda : AGU Fall Meeting, USA, 2013 “Algorithm improvement toward better retrieval of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> profiles from GOSAT/TANSO-FTS thermal infrared spectra”
- 9) 齋藤尚子、木本周平、杉村亮、今須良一、川上修司、塩見慶、杉田考史、町田敏暢、松枝秀和、澤庸介：日本気象学会2014年度秋季大会、福岡（2014）「GOSAT/TANSO-FTS TIRバンドの新バージョンCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>プロダクトのデータ質について」
- 10) N. Saitoh, R. Imasu, S. Kawakami, K. Shiomi, T. Sugita, T. Machida, Y. Sawa, and H. Matsueda : AGU Fall Meeting, USA, 2014 “Validation of GOSAT/TANSO-FTS TIR V01.00 CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> products “

**(3) 出願特許**

特に記載すべき事項はない。

**(4) 「国民との科学・技術対話」の実施**

特に記載すべき事項はない。

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

- 1) Lelieveld, J., P. J. Crutzen, and F. J. Dentener (1998), Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane, *Tellus (B)*, 50, 128-150.
- 2) IPCC (2007), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 3) Yokota, T., Y. Yoshida, N. Eguchi, Y. Ota, T. Tanaka, H. Watanabe, and S. Maksyutov (2009), Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: first preliminary results, *Scientific Online Letters on Atmosphere*, 5, 160-163.
- 4) Kuze, A., H. Suto, M. Nakajima, and T. Hamazaki (2009), Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring, *Applied Optics*, 48(35), 6716-6733.
- 5) Rodgers, C. D. (2000), *Inverse method for atmospheric sounding*, World Scientific Publishing.
- 6) Saitoh, N., R. Imasu, Y. Ota, and Y. Niwa (2009), CO<sub>2</sub> retrieval algorithm for the thermal infrared spectra of the Greenhouse Gases Observing Satellite: potential of retrieving CO<sub>2</sub> vertical profile from high-resolution FTS sensor, *Journal of Geophysical Research*, 114, 10.1029/2008JD011500.
- 7) Kataoka, F., Knuteson, R., Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Harada, M., Garms, E., Roman, J., Tobin, D., Taylor, J., Revercomb, H., Sekio, N., Higuchi, R., and Mitomi, Y. (2014), TIR Spectral Radiance Calibration of the GOSAT Satellite Borne TANSO-FTS with the Aircraft-Based S-HIS and the Ground-Based S-AERI at the Railroad Valley Desert Playa, *IEEE T. Geosci. Remote*, 52, 89-105, doi:10.1109/TGRS.2012.2236561.
- 8) Matsueda, H., T. Machida, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, H. Ikeda, N. Kondo, and K. Goto (2008), Evaluation of atmospheric CO<sub>2</sub> measurements from new flask air sampling of JAL airliner observations, *Papers in Meteorology and Geophysics*, 59, 1-17.
- 9) Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa, and T. Ogawa (2008), Worldwide measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> and other trace gas species using commercial airlines, *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 25, 1744-1754.

- 10) Araki, M., I. Morino, T. Machida, Y. Sawa, H. Hatsueda, H. Ohyama, T. Yokota, and O. Uchino (2010), CO<sub>2</sub> column-averaged volume mixing ratio derived over Tsukuba from measurements by commercial airlines, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 7659-7667.
- 11) Wofsy, S. C. et al. (2011), HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO): fine-grained, global-scale measurements of climatically important atmospheric gases and aerosols, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 369, 2073-2086, doi:10.1098/rsta.2010.0313.
- 12) Rodgers, C.D. and B. J. Connor (2003), Intercomparison of remote sounding instruments, *Journal of Geophysical Research*, 108, 10.1029/2002JD002299.
- 13) Saitoh, N., M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa (2012) , Comparisons between XCH<sub>4</sub> from GOSAT Shortwave and Thermal Infrared Spectra and Aircraft CH<sub>4</sub> Measurements over Guam, *SOLA*, 8, 145-149.

### (3) 主要メタン発生域におけるメタン放出量推定の高度化

千葉大学

園芸学研究科 土壌学研究室

犬伏和之

<研究協力者>

千葉大学

園芸学研究科 土壌学研究室

花澤俊祐・新井宏徳・

アンキット・シングラ

平成24(開始年度)~26年度累計予算額：10,322千円

(うち、平成26年度予算額：3,566千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本サブテーマでは、主要メタン発生域におけるメタン放出量推定の高度化、精緻化を目指し、アジア域のメタン放出源、特に水田付近の土壌水分や土地利用形態の季節変動と大気中メタン濃度の季節変動を比較解析した。まずメコン川流域下流域の南ベトナムの水田地帯で2月に大気を採取し、土地利用と水分環境の影響を考察した。その結果、常時2ppmvを超える値が観測された。メコン川下流の推移変化からこの時期は洪水期から春作に移行する時期で、水田での耕作やわら燃焼が進んでいる時期である。この結果をGOSAT/L4Bの結果と比較し、同じ地点での値としてはほぼ対応しており、GOSAT/L4の信頼性が確認された。次に、土壌培養によるメタン生成能解析のため、南～東アジアの各地域における代表的な稲作形態下の土壌を採取し、室内培養試験を行い、メタン生成能を測定して、稲作形態の差異が及ぼす影響や、各地域の土壌区分情報との比較を行った。その結果、インド土壌ではその含有有機物量がメタン生成の活性に影響を及ぼし、そのポテンシャルとしてはVertisolやInceptisolなどが高く、一方でAlfisolは低い可能性が示唆された。さらに異なる稲作形態土壌におけるメタン生成能の比較を行うため、日本・千葉県の水稲単作圃場およびインド・カルナルの二毛作圃場より土壌を採取し、それぞれの稲作形態の違いや、これに関与する水分状態の違いが土壌中のメタン生成能に及ぼす影響を比較検証することを目的として解析を行った。千葉土壌のメタン生成量積算値は、単作地帯のため稲わら添加により増加し、また湛水培養時に多くなったのに対し、インド土壌では、稲麦二毛作体系のため有機物含量が低下し、メタン生成量積算値は千葉土壌より低くなった。

#### [キーワード]

メタン、水田、アジア、土地利用、メタン生成活性

#### 1. はじめに

メタンの陸域での人為発生源の1つが水田であり、モンスーンアジアを中心に1億5千万平方キロ広がっている。今後の人口増加に伴い、主要稲作国はその拡大と高度利用を目指している。主要

なメタン発生源であるアジア各国のうち、ベトナムとインドに絞ってサブテーマ間の連携を強化しつつ、現地でのメタン放出量とその生成要因を解析した。また 南アジア～東アジアの各地域における代表的な稲作形態下の土壌を採取し室内培養試験を行い、メタン生成能を測定し、稲作形態の差異が及ぼす影響や、各地域の土壌区分情報との比較を行った。

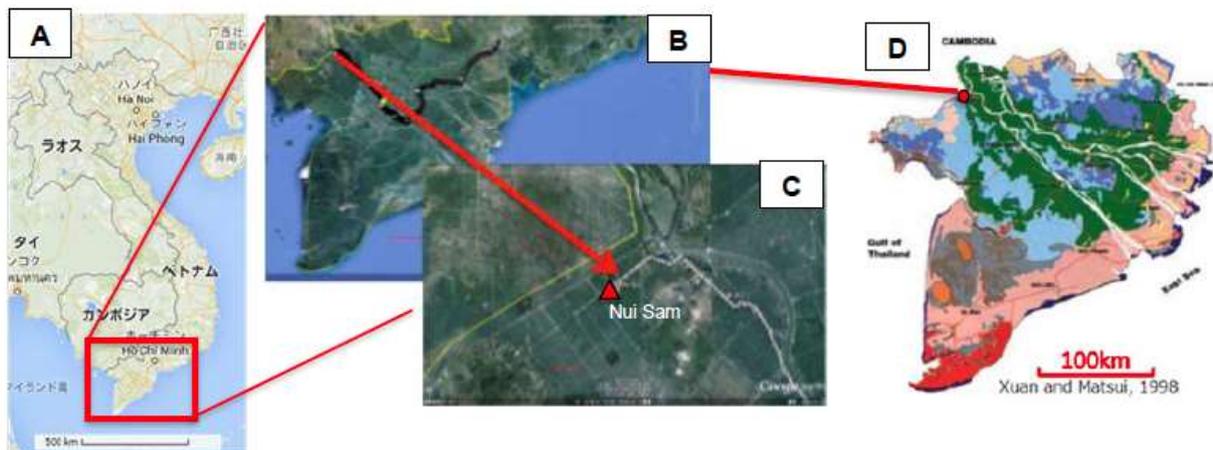
## 2. 研究開発目的

主要メタン発生源におけるメタン放出量推定の高度化、精緻化を目指し、(1) フラックス測定 of 精緻のため、アジアで最大の国際河川1つ、メコン川流域下流域の水田地帯で大気を採取し、土地利用と水分環境の影響を考察した。また(2) 土壌培養によるメタン生成能解析のため、南～東アジアの各地域における代表的な稲作形態下の土壌を採取し、室内培養試験を行い、メタン生成能を測定して、稲作形態の差異が及ぼす影響や、各地域の土壌区分情報との比較を行った。さらに異なる稲作形態土壌における温室効果ガス生成能の比較を行うため、日本・千葉県の水稲単作圃場およびインド・カルナルの二毛作圃場より土壌を採取した。それぞれの稲作形態の違いや、これに関与する水分状態の違いが土壌中メタンガス生成能に及ぼす影響を比較検証することを目的として解析を行った。

## 3. 研究開発方法

### (1) フラックス測定 of 精緻化：

ベトナム・アンジャン省チャウドック市郊外で水田からのメタンフラックスの測定を土壌区分情報と比較した。図(3)-1は大気採集地点のGoogleの画像と土壌図を示している。これらの図から、ヌイサン付近ではフルダイクでの水稲栽培とセミダイクでの洪水・養殖漁業のコントラストがみられる。この地域でフラックス測定と平行し、近辺のヌイサン山頂で2013年2月14日、大気ガス試料採集を行った。



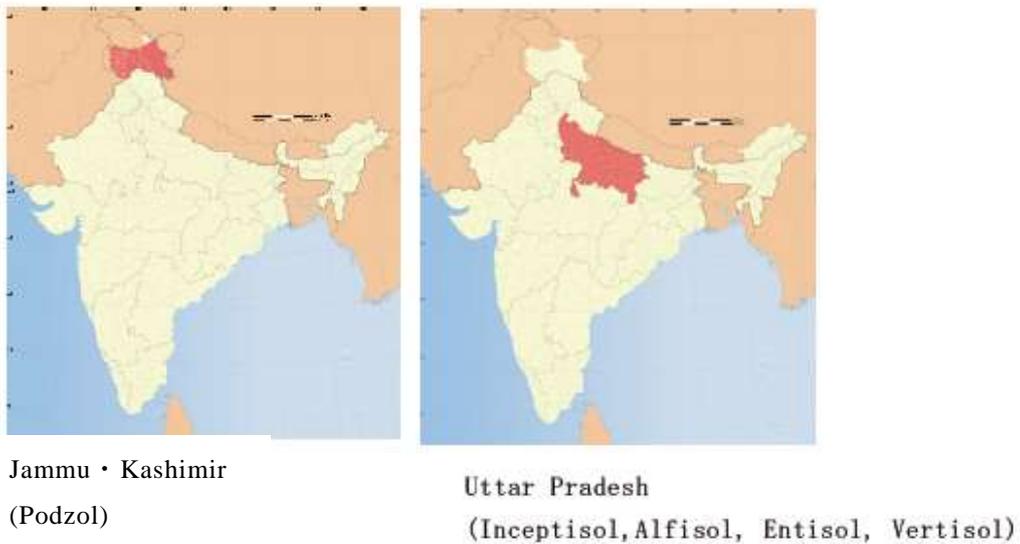
図(3)-1 [A] ベトナム全図、[B] ベトナム・アンジャン省チャウドック市郊外のGoogle 画像、[C] 大気採集地点の拡大図、 [D] 土壌区分図

## (2) 土壌培養によるメタン生成能解析：

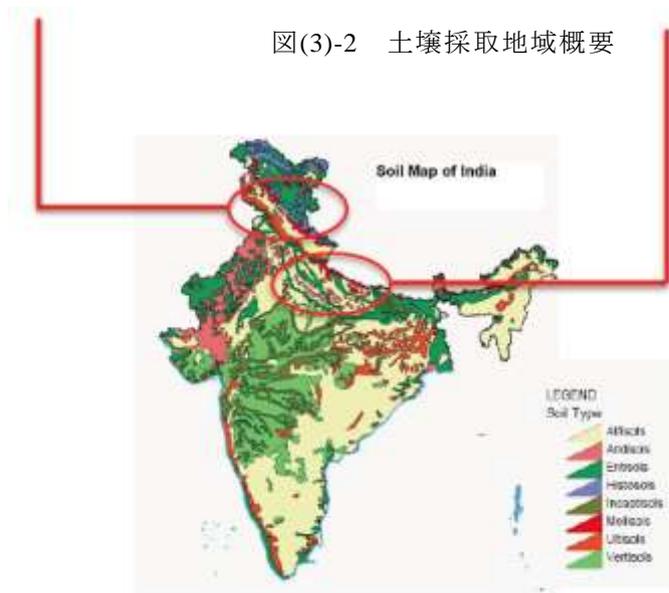
南～東アジアの各地域における代表的な稲作形態下の土壌を採取し、室内培養試験を行い、メタン生成能を測定して、稲作形態の差異が及ぼす影響や、各地域の土壌区分情報との比較を行った。

### 1) インド北部地域の土壌種間におけるメタン生成能比較

インド北部、土壌種が異なる5か所の水田より土壌を採取し、土壌理化学性・微生物性分析および室内培養試験によるメタン生成能の解析を行った。調査地概要は図(3)-2、表(3)-1の通りである。



図(3)-2 土壌採取地域概要



図(3)-3 インド全域土壌図

National Institute of Hydrology (India) ホームページより

表 (3)-1 土壌区分情報と採取地点詳細

土壌区分					
	Podzol	Inceptisol	Alfisol	Entisol	Vertisol
採取地点	Jammu and Kashmir	Banaras Hindu University campus, UP	Mirzapur, UP	Maharajganj, UP	Chandauli, UP
緯度	32° 5' - 33° 3' N	25°16' N	25°09' N	27°10' N	25°14' N
経度	70°0' - 74° 4' E	83°03' E	83°34' E	83°32' E	83°15' E
土性 (%)	Sand 33; Silt 65; Clay 6	Sand32; Silt 65; Clay 3	Sand 34; Silt 64; Clay 5	Sand 31; Silt 64; Clay 7	Sand 6; Silt 82; Clay 12

採取した土壌試料を培養瓶に充填し、蒸留水を加えて湛水状態で30℃の恒温器内にて20日間培養した。培養開始後から、60時間ごとにガスを採取し、生成したメタン濃度を測定した。各生成量の積算推移を解析し、土壌種ごとのメタン生成能を比較した。土壌理化学性については、土壌pH、土壌全炭素(TC)・全窒素(TN)含有率、硝酸態窒素・アンモニア態窒素含有量、過マンガン酸可酸化性炭素量(POXC)をそれぞれ測定した。また、土壌微生物性として、メタン生成古細菌に特異的な遺伝子(mcrA領域)のコピー数をリアルタイムPCRで測定し、メタン生成古細菌の定量を行った。

## 2) 異なる土壌種の日本およびインド水田土壌におけるメタン生成能と理化学性・微生物性比較

上述のインド水田土壌中のメタン生成能と比較するため、わが国水田土壌のメタン生成能を測定し比較した。長野県、千葉県の水田よりそれぞれRegosol、Andsolに分類される土壌試料を採取した。この土壌試料を培養瓶に充填し、蒸留水を加えて湛水状態にした。この培養試料を30℃の恒温器内で30日間培養し、3日ごとにガス試料を採取してメタン、および二酸化炭素の生成量を測定した。各測定値の積算量推移をグラフにし、湛水条件下のガス生成能を比較した。また、土壌pH、土壌全炭素(TC)・全窒素(TN)含有率、炭素率(C/N比)、アンモニア態窒素量、過マンガン酸可酸化炭素量(POXC)を測定し、ガス生成に対する影響因子の解析を行った。これらの土壌理化学性と温室効果ガス生成能の比較を行い、その影響因子について明らかにすることを目的とした。

千葉県山武市の山武市週辺5km半径内の理化学性が異なる3か所の水稲単作水田圃場およびインド・カルナルの二毛作圃場より土壌を採取し、理化学性とメタン生成能を測定した。



図 (3)-4 調査地概要地図

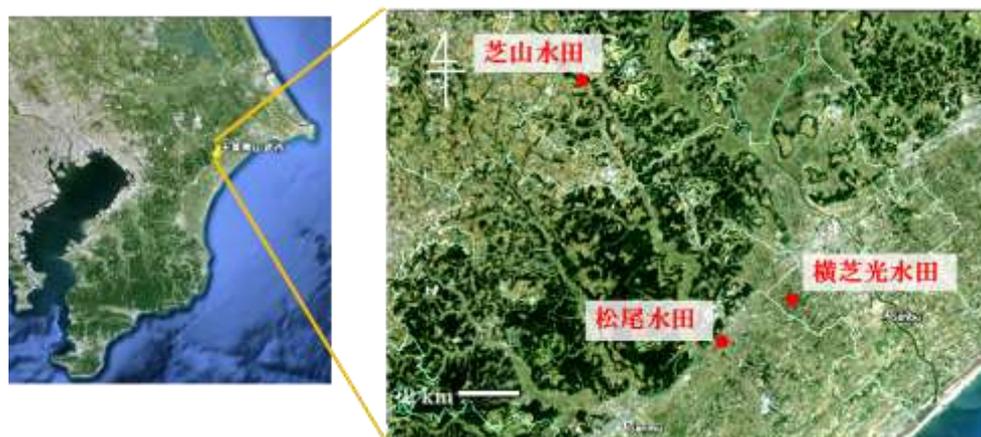
【インド・カルナル】

\*サブテーマ4で実施してきた大気採集地点の近傍



図(3)-5 インド現地調査位置 カルナル市：水稲・小麦二毛作圃場 圃場内より3か所 (Inceptisol)  
2013年12月26日 小麦栽培期採取

【千葉県・山武市】



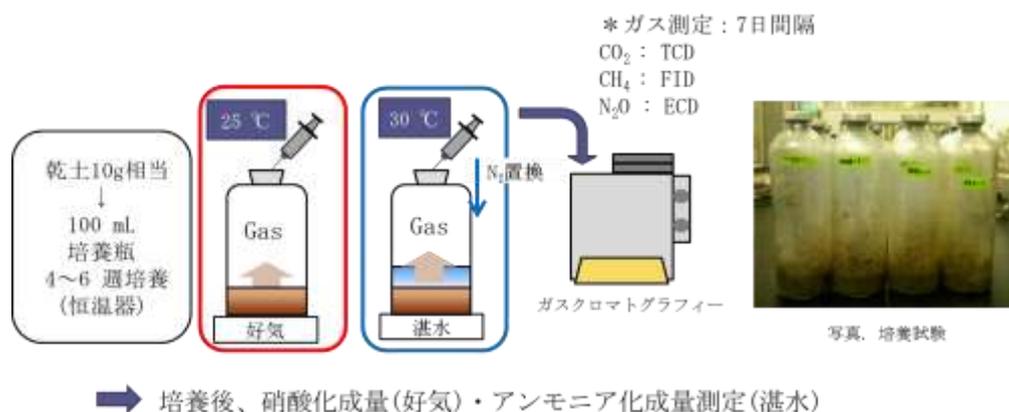
図(3)-6 千葉県現地調査位置 千葉県山武市：水稲単作栽培圃場(水田)山武市周辺5km半径内3か所の水田(松尾:Gray soil, 芝山:Andosol, 横芝光:Muck soil)  
2013年3月23日 春鋤き込み後・湛水前採取

表(3)-2 調査地概要

	カルナル(同一圃場内3点)	山武市(松尾・芝山・横芝光)
稲作形態	水稻・小麦二毛作	単作水田(乾田)
耕作周期	6-9月(雨期) 水稻(水田) 10-3月(乾期) 小麦	5-8月 水稻(水田) (9-3月 落水・農閑期)
年間降水量	767.7 mm	1387 mm
作期平均降水量(月平均)	6-9月 156.2 mm 10-3月 16.2 mm	5-8月 123.6 mm
年間平均気温	25.2 °C	15.7 °C
作期平均気温(月平均)	6-9月 31.1°C 10-3月 19.4 °C	5-8月 22.0 °C
施肥管理	DAP, 尿素12.5 kg/10aずつ (各作付前,) わら持ち出し	N:P:K=14:16:14 40kg/10a (基肥) 稲わら春鋤き込み
試料採取時期	2013年12月26日(小麦栽培期)	2013年3月27日(春鋤き込み後)

\*インド気象庁および気象庁横芝光気象観測所データより

土壌からのメタン生成に及ぼす影響因子を明らかにするため、培養試験にて温室効果ガスの生成能を比較した。図(3)-7のように培養瓶内に土壌を充填し、湛水しない好気条件と湛水条件を作成し、それぞれ7日ごとに生成ガス試料を採取して、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素濃度を測定した。また、培養終了後の土壌中アンモニア、硝酸についても測定した。それぞれの培養条件について、千葉県単作乾田土壌（山武市およびその周辺より採取）を用いた試験では、土壌のみの区と稲わらを添加した区を設け、好気14日間培養とその湛水28日間培養を行い、有機物の添加による影響も評価した。インド二毛作土壌、ウガンダ陸稲土壌では、好気、湛水を別々に作成し、28日間培養を行った。



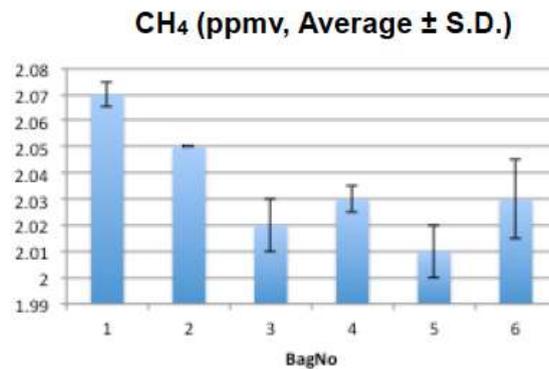
図(3)-7 土壌のメタン生成活性の測定方法

また、採取した土壌試料の理化学性、微生物性分析として土壌、pH・EC、土壌全炭素(TC)・全窒素(TN)含有率、炭素率(C/N)、陽イオン交換容量(CEC)、可溶性有機態炭素量(SOM)、過マンガン酸可酸化炭素量(POXC)、微生物バイオマス炭素量(MBC)・窒素量(MBN)を測定した。

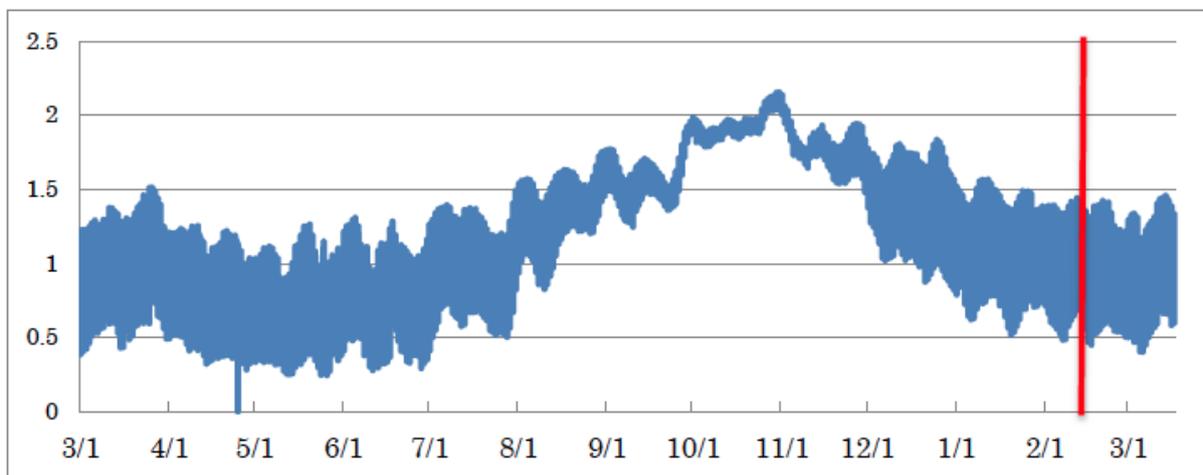
#### 4. 結果及び考察

##### (1) フラックス測定の詳細化：

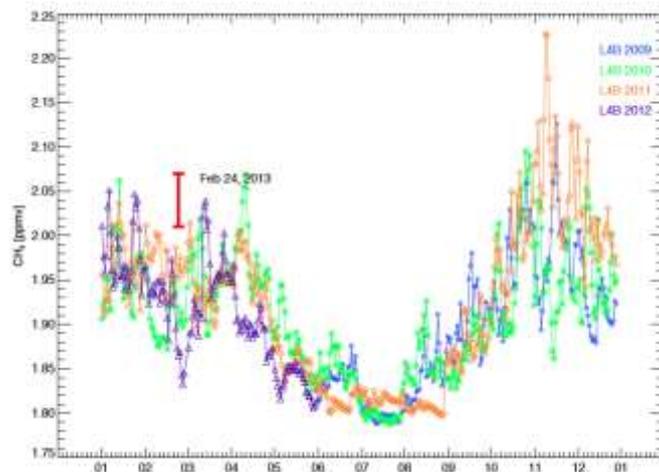
図(3)-8に示すように常時2ppmvを超える値が観測された。メコン川下流の推移変化（図(3)-9）からも判るようにこの時期は洪水期から春作に移行する時期で、水田での耕作やわら燃焼が進んでいる時期である。この結果をGOSAT/L4Bの結果と比較したのが図(3)-10である。同じ地点での値としてはほぼ対応しており、GOSAT/L4の信頼性を示している。



図(3)-8 ベトナム・アンジャン省チャウドック市郊外で採集した空気サンプルのメタン濃度。縦軸はメタン濃度（単位ppmv）。



図(3)-9 ベトナム・カントー市近郊の灌漑用運河の水位(m)



図(3)-10 GOSAT/L4Bにより、同地点で観測されたメタンと現場で観測された値との比較。横軸は月、縦軸はメタン濃度(ppmv)を示す。

青：2009年、緑：2010年、橙：2011年、紫：2012年のGOSAT/L4Bデータ。

## (2) 土壌培養によるメタン生成能解析：

### 1) インド北部地域の土壌種間におけるメタン生成能比較

培養試験の結果、480時間(20日間)中のメタン生成量積算値は、図(3)-11のグラフのように推移した。また、土壌理化学性・微生物性と培養終了時までの総積算値は、表(3)-3のように示された。

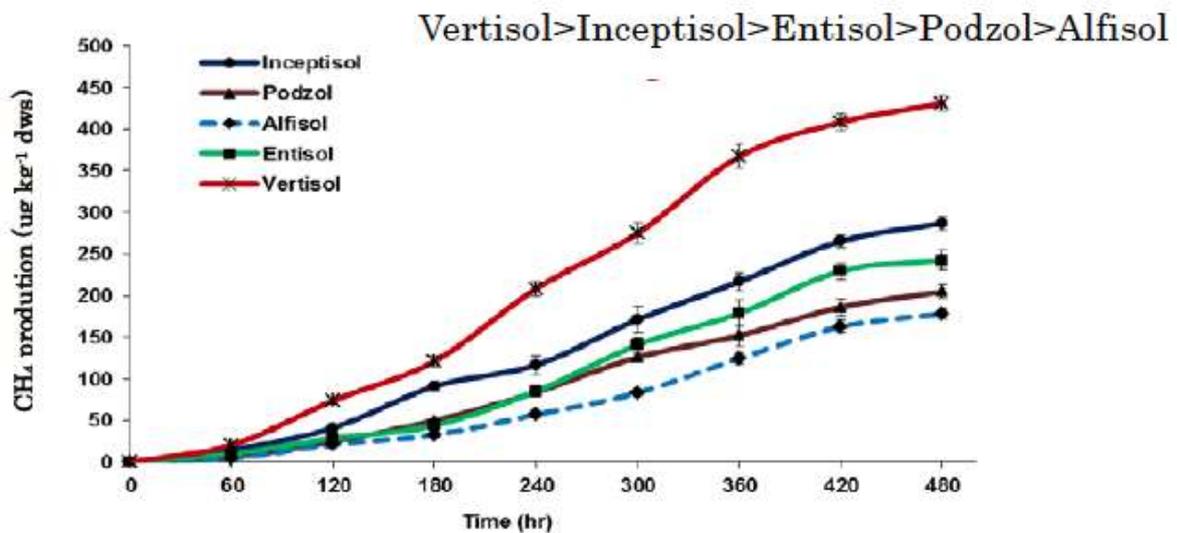


図 (3)-11 室内湛水培養試験によるメタン生成量(0~20日間)積算値の推移

表(3)-3 土壤理化学性・微生物性およびメタン総積算値の比較

理化学性	土壤区分				
	Podzol	Inceptisol	Alfisol	Entisol	Vertisol
pH	6.3	7.2	6.2	7.8	7.5
Organic C (%)	0.64±0.03 <sup>c</sup>	0.75±0.02 <sup>b</sup>	0.56±0.02 <sup>c</sup>	0.72±0.04 <sup>ab</sup>	0.84±0.04 <sup>a</sup>
Total N (%)	0.12±0.01 <sup>a</sup>	0.13±0.01 <sup>a</sup>	0.12±0.01 <sup>a</sup>	0.14±0.02 <sup>a</sup>	0.17±0.03 <sup>a</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (μg g <sup>-1</sup> )	5.8±0.09 <sup>c</sup>	7.6±0.26 <sup>ab</sup>	4.4±0.23 <sup>d</sup>	7.0±0.29 <sup>b</sup>	8.4±0.29 <sup>a</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (μg g <sup>-1</sup> )	4.4±0.23 <sup>a</sup>	4.1±0.23 <sup>ab</sup>	4.0±0.21 <sup>ab</sup>	4.5±0.15 <sup>a</sup>	3.3±0.26 <sup>b</sup>
POXC(μg g <sup>-1</sup> dws)	326.2±12.2 <sup>c</sup>	452.9 ±38.0 <sup>b</sup>	215.3±22.0 <sup>d</sup>	327.7±9.0 <sup>c</sup>	587.5±17.9 <sup>a</sup>
<i>mcrA</i> gene (×10 <sup>6</sup> copies g <sup>-1</sup> dws)	7.31±0.9 <sup>c</sup>	12.21±1.7 <sup>b</sup>	0.06±0.003 <sup>e</sup>	1.93±0.3 <sup>d</sup>	72.97±6.4 <sup>a</sup>
メタン総生成量 (μg kg <sup>-1</sup> dws)	204.0±7.8 <sup>cd</sup>	287.0 ± 8.1 <sup>b</sup>	178.4±6.9 <sup>d</sup>	242.3±11.4 <sup>c</sup>	431.2±9.3 <sup>a</sup>

メタン生成量は、培養60時間以降、Vertisol試験区において高い値で推移した。また、Inceptisol試験区はVertisol試験区に次いで比較的生成量が高い傾向にあった。培養期間全体を通し、Vertisol>Inceptisol>Entisol>Podzol>Alfisolの順でメタン生成量積算値は増大した。

土壤理化学性、微生物性との関係を比較すると、全炭素量、POXC(過マンガン酸可酸化性炭素量)はメタン生成量積算値と関係性が見られた。同様にメタン生成古細菌の遺伝子数もメタン生成量積算値に対応する傾向にあった。

以上より、各土壤種の含有有機物量がメタン生成の活性に影響を及ぼし、そのポテンシャルとしてはVertisolやInceptisolなどが高く、一方でAlfisolは低い可能性が示唆された。

土壤区分情報で比較すると、インド南東部を中心としてAlfisolが分布し、西部にVertisol、Inceptisolが分布していると見られるため、各地域間で土壤種を反映したメタン生成能を有する可能性があると考えられる。

## 2) 異なる土壤種の日本およびインド水田土壤におけるメタン生成能と理化学性・微生物性比較

pHについて、千葉県土壤が5.7~6.0であるのに対し、カルナル土壤は、8.2~8.6と高く、またECも同様に千葉県土壤<カルナル土壤となった。このことから、カルナル土壤は千葉県土壤に比べ、アルカリ質、塩類集積傾向の土壤であることが示唆された。

全炭素(TC)、全窒素(TN)は、千葉県土壤の横芝光で高い値となったが、カルナル土壤は千葉県芝山と同水準であり、千葉県乾田3か所と比較すると、比較的低い含有率となった。C/N比についても、千葉県横芝光土壤で比較的高く、他の地点と比べ新鮮有機物の影響が考えられるが、松尾、

芝山とカルナル土壤間で大きな差は見られなかった。

陽イオン交換容量(CEC)については、千葉県芝山土壤で比較的高い値となったが、その他の土壤間では大きな差異は無かった。

表 (3)-4 土壤理化学性・微生物性 I

		pH	EC (mS/m)	TC (%)	TN (%)	C/N	CEC (cmol/kg d.s)
千葉県乾田	松尾	5.7	4.6	1.9	0.2	11.8	6.4
	芝山	5.9	4.1	1.4	0.1	10.5	13.2
	横芝光	6.0	6.3	4.3	0.3	13.9	6.2
カルナル 二毛作	IR1	8.2	15.9	1.4	0.1	10.2	7.4
	IR2	8.6	15.5	1.4	0.1	9.9	8.4
	IR3	8.5	15.9	1.4	0.1	10.1	6.9

pHについて、千葉県土壤が5.7~6.0であるのに対し、カルナル土壤は、8.2~8.6と高く、またECも同様に千葉県土壤<カルナル土壤となった。このことから、カルナル土壤は千葉県土壤に比べ、アルカリ質、塩類集積傾向の土壤であることが示唆された。

全炭素(TC)、全窒素(TN)は、千葉県土壤の横芝光で高い値となったが、カルナル土壤は千葉県芝山と同水準であり、千葉県乾田3か所と比較すると、比較的低い含有率となった。C/N比についても、千葉県横芝光土壤で比較的高く、他の地点と比べ新鮮有機物の影響が考えられるが、松尾、芝山とカルナル土壤間で大きな差は見られなかった。

陽イオン交換容量(CEC)については、千葉県芝山土壤で比較的高い値となったが、その他の土壤間では大きな差異は無かった。

表(3)-5 土壤理化学性・生物性 II

		可溶性 有機態 炭素 (SOC) (mgC/kg d.s)	過マン ガン酸 可酸化 炭素量 (POXC) (mgC/kg d.s)	微生物 バイオマ ス炭素量 (MBC) (mgC/kg d.s)	微生物 バイオマス 窒素量 (MBN) (mgN/kg d.s)	微生物 バイオマス C/N (MBC/MBN)	土壤 微生物活性 (q-CO <sub>2</sub> ) (CO <sub>2</sub> -C/ MBC/7days)
千葉県 乾田	松尾	63.9± 12.8	414.2± 27.0	403±21.8	24.9±1.8	16.2	0.314
	芝山	64.39± 4.7	969.5± 25.7	386±14.2	22.6±2.2	17.1	0.354
	横芝 光	120.0± 12.3	711.5± 9.6	525±18.3	32.7±4.9	16.1	0.323
カルナル 二毛作	IR1	70.7± 2.1	440.9± 14.8	297±26.0	15.5±2.6	19.2	0.128
	IR2	57.6± 6.9	437.3± 23.3	270±38.9	11.8±1.5	22.9	0.144
	IR3	54.0± 3.2	445.8± 7.6	261±14.2	18.0±1.2	14.5	0.149

可溶性有機態炭素量は、横芝光土壤で高い値となり、次いでカルナルIR1地点が比較的高かった。松尾、芝山およびカルナルIR2、IR3はほぼ同水準の含有量となった。横芝光の高い可溶性有機態

炭素量については、全炭素量が比較的高かったことから、有機物含有量の多さを反映していることが考えられた。

過マンガン酸可酸化炭素量は千葉県土壤では芝山>横芝光>松尾となる一方、カルナル土壤は千葉県松尾土壤とほぼ同値となった。これらの結果も、有機物含有量(全炭素率)などが影響していると考えられたが、比較的低い全炭素量である芝山土壤で比較的高い値となったことから、過マンガン酸過酸化炭素画分の有機物に関しては、その他の要因によってもその存在量が左右されることが示された。

微生物バイオマス炭素量、窒素量は千葉県土壤>カルナル土壤となる傾向であった。また微生物バイオマスC/NはカルナルIR2で最も高い比となったが、採取地点で差が見られ、千葉県土壤の結果と比較するとIR1、IR2は高くなった。また、土壤微生物活性は千葉県土壤>カルナル土壤となり、各国内土壤採取地点間においては大きな違いは見られなかった。このことから、微生物バイオマス量に関しては千葉県土壤>カルナル土壤となり、比較的細菌が優先する(バイオマスC/N比低)土壤である千葉県土壤に対して、カルナル土壤は真菌が優先する傾向にあることが示された。一方で、微生物活性については、カルナル土壤は低く、高pH、ECなどがこの活性を抑制する可能性が示唆された。

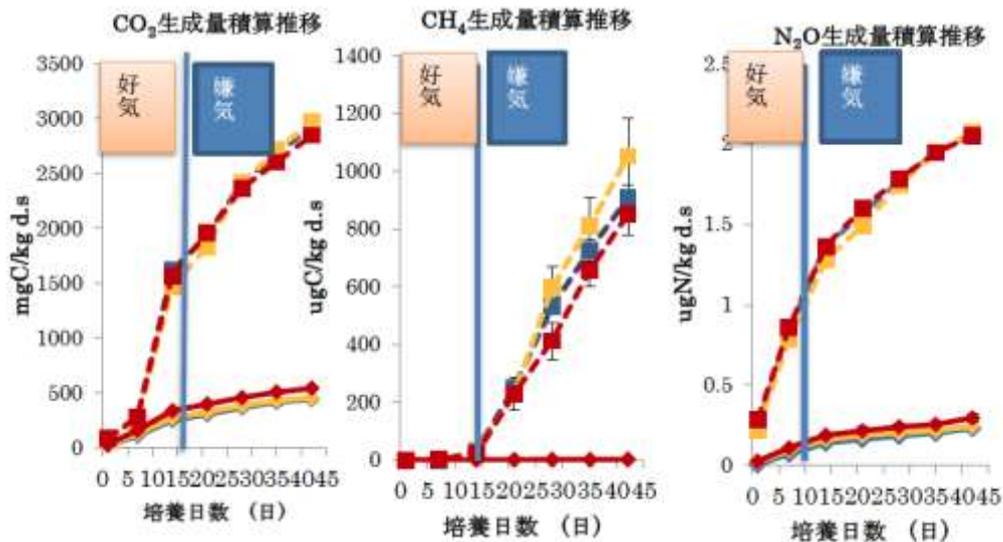
千葉県土壤の温室効果ガス生成量積算値は、稲わら添加の有無、培養条件の違いで異なった。CO<sub>2</sub>生成量は好気期間で値が大きく、稲わらの添加により5~6倍に増加した。CH<sub>4</sub>生成量積算値は、稲わら施用区で湛水培養時に多くなり、無添加区の約600~800倍となった。N<sub>2</sub>O生成量積算値は好気条件下で稲わら添加により7~9倍に増加した。地点間で比較すると、その生成量において有意な差は見られなかった。

一方、カルナル二毛作土壤では、千葉県土壤と同様に、好気条件下でCO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O生成量積算値が、湛水条件下ではCH<sub>4</sub>生成量積算値が多くなった。千葉県土壤と比較すると、全体的な生成量積算値はどのガスにおいてもカルナル土壤では低い値となる傾向となった。一方、CH<sub>4</sub>生成量積算値の培養条件間の差異は、千葉県土壤が好気14日間培養の積算値にも関わらず、カルナル土壤の方が大きく、この土壤では好気条件下ではその生成活性が速やかに低下する可能性が示唆された。またN<sub>2</sub>O生成能について、カルナル土壤で、千葉県土壤の1/2以下の生成量積算値となったことから、低いことが示された。

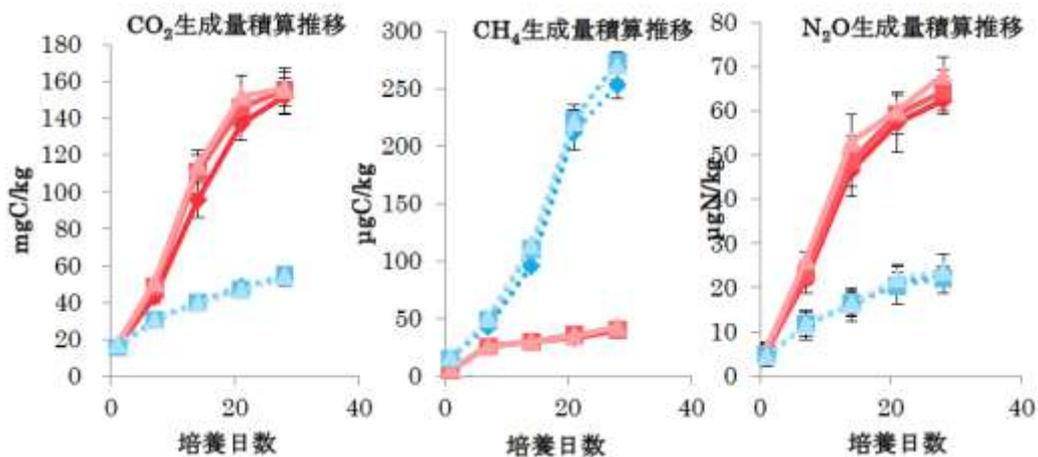
以上の土壤理化学性、生物性、および温室効果ガス生成能の解析より、以下のことが示された。すなわち、千葉県乾田土壤とカルナル二毛作土壤間で比較した場合、その土壤理化学性は、pH、ECにおいて大きな違いが見られる一方、全炭素含有量などで示される土壤有機物性においてはほぼ同等の水準であった。しかしながら、バイオマス炭素量や窒素量、微生物活性ではカルナル土壤が千葉県土壤に対し比較的低く、また優先するバイオマス種も異なる傾向にあった。加えて、その温室効果ガス生成能に関しては全体的にカルナル土壤が低く、特にN<sub>2</sub>Oに関しては、千葉県土壤の結果の半分以下であった。これらのことから、カルナル土壤が千葉県土壤に比べ、低い温室効果ガス生成能を持つことが示唆された。これには微生物活性を抑制するような高pH、ECなどの因子が関与することが考えられた。また、千葉県土壤への稲わら添加により、各温室効果ガス生成量は増大し、特にCH<sub>4</sub>生成では顕著な増加となった。このことから、稲わらなどの新鮮有機

物施用は土壌からの $\text{CH}_4$ 放出を促進することが示されたが、カルナル土壌においても、同様の生成量増大が見られることが推察され、現地での $\text{CH}_4$ 放出に対し、この様な有機物施用が大きな影響を与える可能性が予想された。

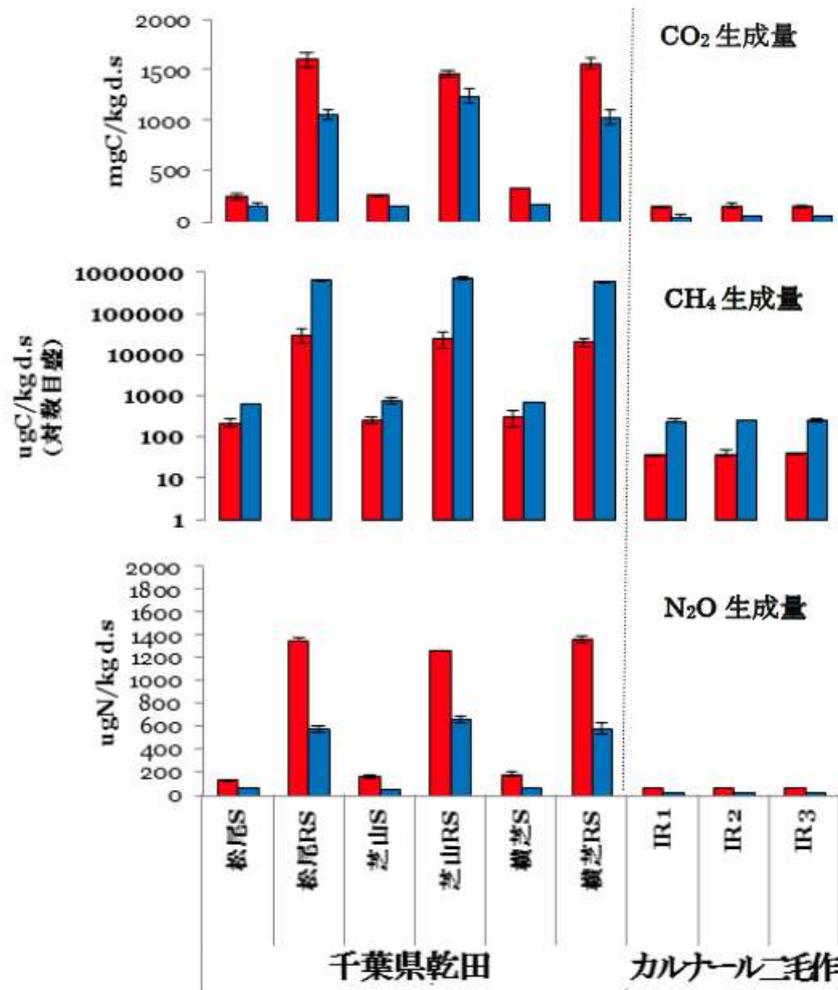
一方で、 $\text{CH}_4$ 生成に関しては、千葉県土壌よりカルナル土壌でその培養条件の違いによる生成量の差異が大きくなり、好気条件下では生成活性が速やかに低下する可能性が挙げられた。よって、現地の小麦・水稲栽培期の違いが及ぼす土壌環境の変化が、主要生成ガスの変動に、千葉県水田の耕作期・非作期間の変動以上に、大きく影響を及ぼすことが示唆された。



図(3)-12 千葉県土壌の温室効果ガス生成量積算推移グラフ



図(3)-13 カルナル土壌の温室効果ガス生成量積算推移グラフ



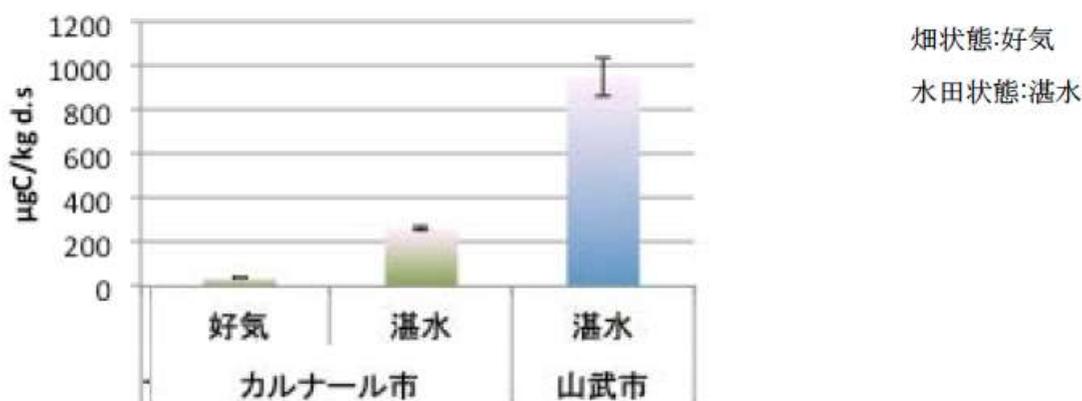
\*千葉県乾田土壌S:土壌培養区 RS:稲わら施用区 好気14日間・嫌気28日間

図(3)-14 培養試験温室効果ガス生成量積算値

#### 【まとめ】

図(3)-15で示す通り、インド、カルナルの二毛作土壌では、千葉県山武市の水田土壌に比べ相対的にメタン生成能は低いことが示された。また、作期の違いを反映した水分条件とメタン生成量の関係性についてまとめると、畑状態(好気)<<水田状態(湛水)となった。今後、全球メタン放出量分布との対応解析が期待される。

### CH<sub>4</sub> production potential (Average ± S.D.)



図(3)-15 調査地で採取された土壌からのメタン生成ポテンシャル

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマでは、主要メタン発生域におけるメタン放出量推定の高度化、精緻化を目指し、アジア域のメタン放出源、特に水田付近の土壌水分や土地利用形態の季節変動と大気中メタン濃度の季節変動を比較解析し、メタン濃度の季節変化や土地利用形態とGOSAT/L4Bの結果が、同じ地点での値としてはほぼ対応しており、GOSAT/L4の信頼性が確認された。次に、土壌培養によるメタン生成能解析のため、南～東アジアの各地域における代表的な稲作形態下の土壌を採取し、室内培養試験を行い、メタン生成能を測定して、稲作形態の差異が及ぼす影響や、各地域の土壌区分情報との比較を行った結果、インド土壌ではその含有有機物量がメタン生成の活性に影響を及ぼし、そのポテンシャルとしてはVertisolやInceptisolなどが高く、一方でAlfisolは低い可能性が示唆された。この結果から土壌情報や土地利用情報の活用も重要であることが見出された。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

特に記載すべき事項はない。

## 6. 国際共同研究等の状況

### 1) インドにおける土地利用情報の提供とガス採取地点の検討

カウンターパート：International Rice Research Institute, India Office

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) 花澤俊祐、高橋真亜沙、犬伏和之：日本土壤肥料学会関東支部大会(2014)「形態の異なる稲作土壌における肥沃度と温室効果ガスの比較」(講演要旨集 p.14 B-9),
- 2) 花澤俊祐、犬伏和之：第31回千葉土壤肥料研究会(2015)「耕作形態の異なる稲作土壌における温室効果ガスと土壌肥沃度の解析」(講演資料集 p.11-14)

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

#### (4) GOSAT短波長赤外データと現地観測による大気中メタン濃度解析と収支推定

独立行政法人 国立環境研究所

地球環境研究センター	炭素循環研究室	寺尾有希夫
地球環境研究センター	物質循環モデリング・解析研究室	Shamil Maksyutov
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	地球大気化学研究室	杉田考史
地球環境研究センター	衛星観測研究室	横田達也
地球環境研究センター	センター長	向井人史
生物・生態系環境研究センター	生態系機能評価研究室	野原精一

<研究協力者>

独立行政法人 国立環境研究所

地球環境研究センター	物質循環モデリング・解析研究室	金憲淑・石澤みさ
地球環境研究センター	炭素循環研究室	野村渉平

平成24～26年度累計予算額：57,228千円（うち、平成26年度予算額：19,351千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本サブテーマでは、国立環境研究所地球環境研究センターで実施している大気モニタリングから得られた高精度メタン濃度観測データを用いて、大きなメタン放出源であるシベリアや北インドにおける大気メタン濃度変動の解析を行った。また、直接観測データと、GOSATの短波長赤外波長（SWIR）から得られる気柱平均濃度データを合わせて、インバース解析を行うことにより、全球のメタン放出量推定を行った。その結果、地球全体で見るとメタン放出量の多い地域が複数分布しており、それらの地域は人口密度の高い地域とおよそ一致していること、東南アジア・南アジア域や、南米及びアフリカの南亜熱帯地域のメタンの放出が特に多いことがわかった。地上観測ネットワークデータのみを用いたフラックス推定値と比べ、GOSAT観測データを加えることで、熱帯域（南アメリカ、アフリカ、東南アジア）で不確実性が大幅に低減したとともに、フラックス推定値が増加した。さらに、細かい時空間スケールのメタン濃度変動を解析することが可能な大気結合モデルを用いてインバース解析を行った結果、国立環境研究所が実施している北インド・ナイニタールの大気観測から得られたメタン濃度データが南アジア地域のメタンフラックス推定に大きな影響を与えることが明らかになった。また、本サブテーマでは、北インドの代表的な農業形態（米と小麦の二毛作）であるハリアナ州カルナルとソーニーパットにおいて大気サンプリングサイトを新設し、観測データの取得を開始した。大気メタン濃度の分析結果は、ボトムアップインベントリで示唆されている夏の大きなメタン放出とは異なる季節変動を示し、冬期にメタン濃度の増加が観測された。本サブテーマで得られたGOSATの観測データを用いた全球の月別メタン収支の推定結果は、国立環境研究所・環境省・JAXAで行った報道発表に活用された。

## [キーワード]

GOSAT、大気モニタリング、南アジア、シベリア、インバース解析

### 1. はじめに

メタンは二酸化炭素に次ぐ第二位の温室効果ガスであり、人間活動の影響により産業革命前に比べて大気中濃度が約2倍以上に増加した。大気中メタン濃度は、1990年代から濃度増加が鈍化し2000年代前半に濃度増加が止まったが2007年以降再増加が始まったといった複雑な年々変動とトレンドを示すが、その原因の解明は未だ進んでいない。大気中メタン濃度の変化や地表からのメタンの放出量を把握することは、気候変動のメカニズムや地球温暖化への影響の理解に不可欠である。しかし、二酸化炭素と比べ、メタンの発生源は多岐にわたるうえ、地上観測点が百数十地点と少ないため、メタン濃度変動の原因やメタン収支の定量的な解明は遅れている。

メタン濃度の地上観測地点の多くは、沿岸域や離島などのバックグラウンド地域に限定されていて、メタンの放出源に近い内陸部における大気観測データは非常にわずかである。我々、国立環境研究所地球環境研究センターでは、長期にわたり、太平洋を航行する定期貨物船を利用して洋上バックグラウンド大気の観測を継続している。一方、我々は、メタンの大放出源であるシベリアにおいて、航空機観測ならびにタワーネットワーク観測を行ってきた。シベリアで長期観測を行っているグループは世界でも他に無く、貴重なデータとして世界中の研究者に利用されている。さらなるメタン濃度変動の原因解明には、大きなメタン放出源の一つである、アジアの水田地帯におけるメタン濃度観測が重要であると考えられる。

メタン放出量を推定するには、直接観測データと衛星観測データを利用したインバース解析（大気濃度から排出吸収量を逆計算する解析手法）が有効である。特に、衛星観測データを加えて解析することで、メタン放出量の推定に伴う不確実性が小さくなることが期待されている。国立環境研究所では、環境省と宇宙航空研究開発機構（JAXA）と共同で、温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) プロジェクトを推進している。大気メタンの直接観測データと、GOSATから得られる気柱平均濃度データを合わせて、インバース解析を行うことにより、より不確実性の小さい、領域毎のメタン放出量の推定が可能となる。

### 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、国立環境研究所で実施している、シベリアにおける航空機観測とタワーネットワーク観測データ、および太平洋における船舶観測データといった直接観測データと、GOSATの短波長赤外波長（SWIR）から得られる気柱平均濃度データを合わせて、インバース解析を行うことにより、全球のメタン放出量推定を行うことを目的とする。また、メタン濃度の観測体制をこれまでも増して強化するために、データの空白地帯であった北インドの水田地帯に新たな大気観測拠点を形成する。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 北インド水田地帯における大気サンプリングサイトの新設

北インド水田地帯での大気中メタン濃度を観測するため、2013年8月にインドを訪問し、国際稲作研究所(IRRI)の協力のもと、ハリアナ州カルナル市において大気サンプリングを開始した。IRRI

研究協力農家の2階室内にサンプリング装置を設置し、屋上に立てた5.5mのポールの先(地上13m)に大気採取口を設置した(図(4)-1)。大気を採取口からポンプで引き、流量を毎分2~3Lに調整し、-30℃の冷凍トラップで除湿した後、1.5Lのガラスフラスコに0.1MPaで加圧充填した。大気試料は、IRRI協力技術者により週1回(金曜日または土曜日)採取され、4本採取したのち梱包して日本に返送されるように手配した。大気試料のメタン濃度分析は、国立環境研究所のGC-FIDを用いて行い、NIES 94 CH<sub>4</sub>スケールでモル比を決定した<sup>1)</sup>。



図(4)-1 インド・カルナルに設置した大気サンプリングサイト (2013年8月)

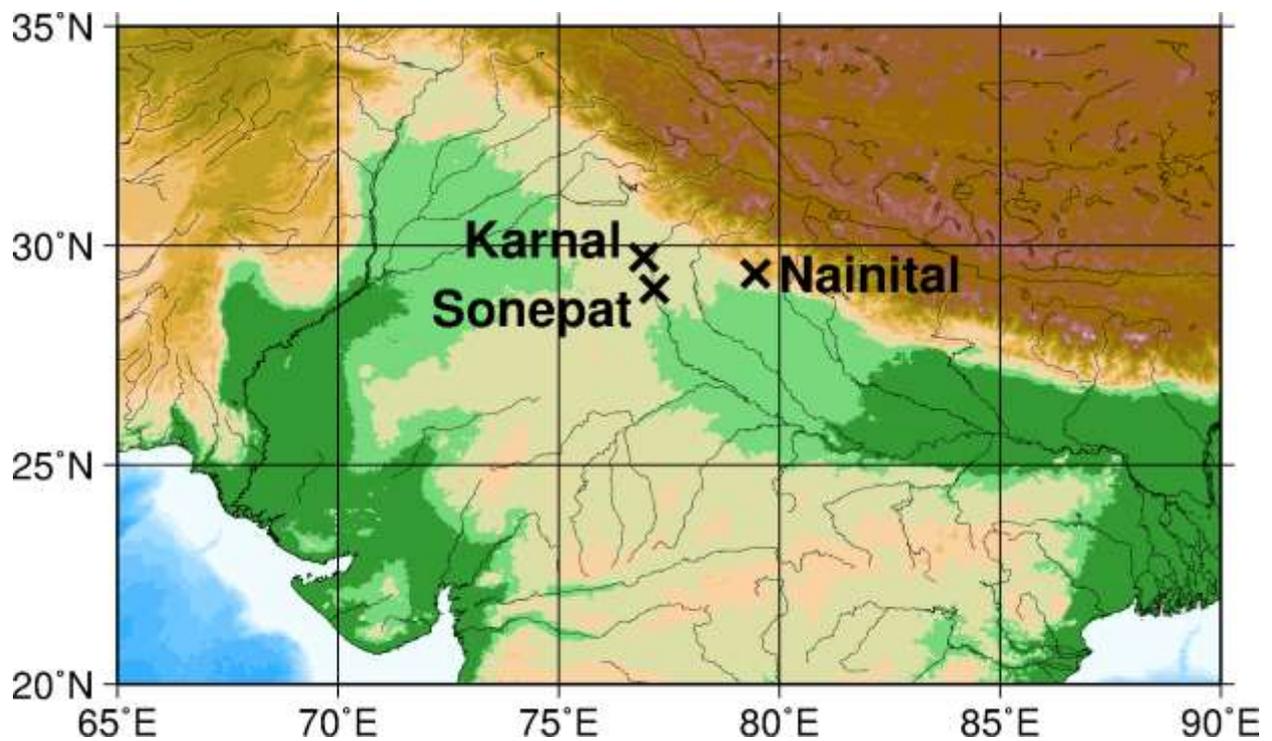
IRRI研究協力農家では、商用電源が通電するのが夕方以降のため、サンプリング時刻が現地時間午後4時過ぎくらいになることが多かった。また、なるべく商用電源を用いて大気サンプリング装置を稼働するように要請しているが、しばしば農業用トラクタを用いた自家発電装置でサンプリングが行なわれており、トラクタ排気による大気試料の汚染が起こりうることに留意する必要があった。

カルナルでの大気サンプリングは、これらの問題に加え、協力先の体制が不安定になったため、継続が困難になった。また、現地技術者が週1回のサンプリングを実施していないと疑念を抱かざるを得ないデータが取得され、データの信頼性が大きく損なわれたため、カルナルでの大気サンプリングの継続を断念した。そこで、2014年9月にインドを再訪し、デリー大学ならびに東京大学大気海洋研究所の協力を得て、カルナルからハリアナ州ソーニーパットにサンプリング装置を移設し、大気サンプリングを再開した。デリー大学研究協力農家のポンプ小屋にサンプリング装置を設置し、屋上に立てた5.5mのポールの先に大気採取口を設置した(地上約8m)(図(4)-2)。サイトがある地域では商用電源が停止することが多いため、現地でUPSを手配し、現地時刻で午後2時くらいにサンプリングを行えるようにした。カルナルで問題となった農業用トラクタを用いた自家発電は使用していないため、カルナルと比べて大気試料の汚染は少ないと期待された。

本サブテーマで新設した大気サンプリング地点（カルナル、ソーニーパット）、ならびに、国立環境研究所が行っている北インド山岳地帯の観測地点ナイニタールの位置を図(4)-3に示した。



図(4)-2 インド・ソーニーパットに設置した大気サンプリングサイト（2014年9月）



図(4)-3 北インドにおける大気サンプリング地点（カルナル、ソーニーパット、ナイニタール）。  
カラーは標高を、黒線は主要河川を表す。

## (2) シベリアにおける航空機観測、タワーネットワーク観測、チャンバー観測、および太平洋における定期船舶観測

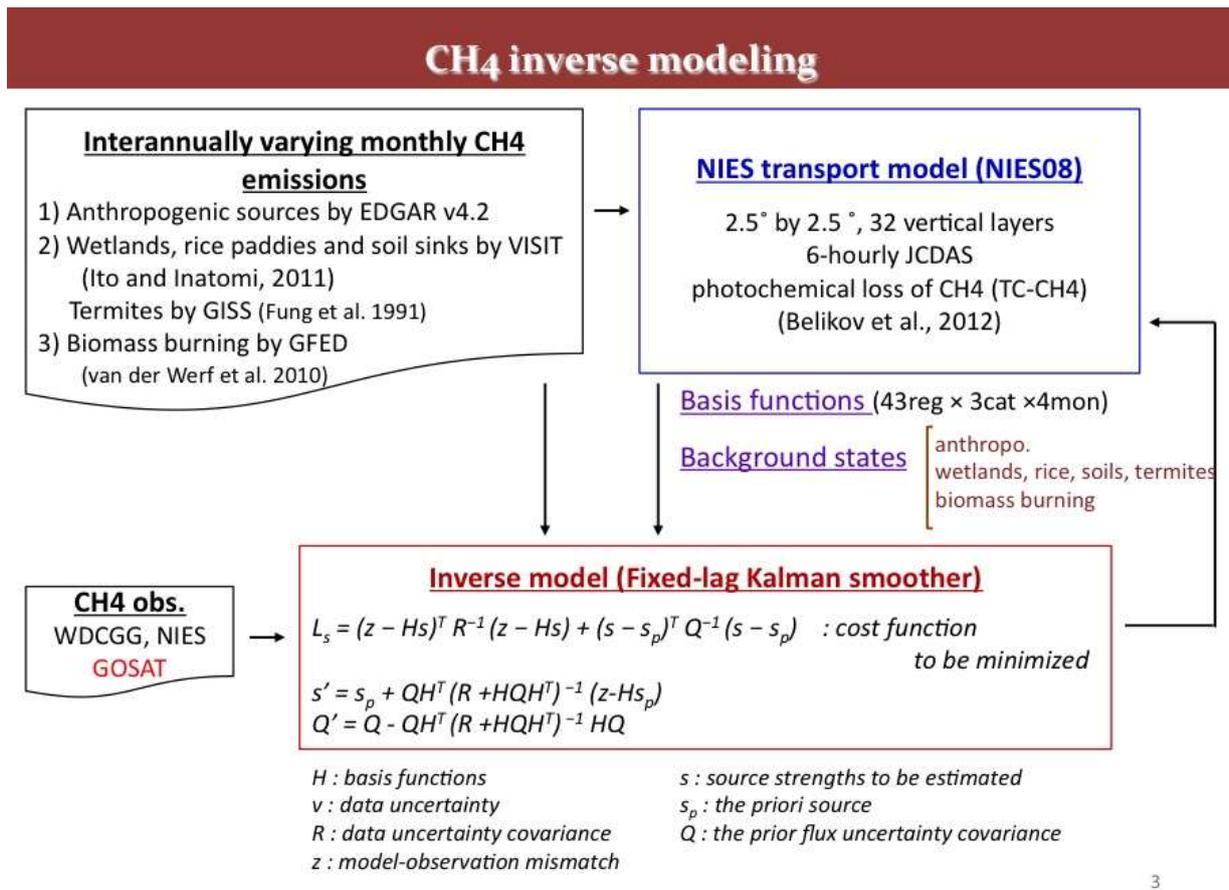
国立環境研究所・地球環境研究センターでは、シベリアの3地点（スルグート、ノボシビルスク、ヤクーツク）において、航空機を利用して対流圏上部から下部にかけての大気を採取し、温室効果ガス濃度の鉛直プロファイルを観測している。大気試料採取の頻度は1ヶ月に1度であるが、航空機のチャーター料の高騰によって、近年は少し頻度を下げて実施している。また、シベリアにおいて、タワー観測ネットワーク（JR-STATION: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network）を構築しており、Berezorechka, Demyanskoe, Karasevoe, Igrim, Noyabrsk, Savvushka, Vaganovo, ヤクーツクで、タワー上の複数高度でメタンや二酸化炭素濃度の現地連続観測を行っている。

さらに、太平洋を日本—オーストラリア—ニュージーランド間で往復する定期船舶、ならびに日米間を往復する定期船舶を利用して、広域大気試料採取を行っており、太平洋上のバックグラウンド大気における温室効果ガス濃度の緯度分布や時間変動などを観測している。本サブテーマでは、これらの国立環境研究所地球環境研究センターで得られた大気モニタリングデータを活用し、メタン濃度の変動特性について解析を行うとともに、インバースモデルを用いたメタン収支推定にも入力データとして利用した。

また、シベリアにおけるメタンフラックスについて、現地調査を行った。土壌から放出されるメタンフラックスを自動測定するチャンバーシステムを用いて、2012年に西シベリア南部トムスク近郊Plotnikovo付近の中栄養の北方湿地でフラックス測定を行った。6個の自動開閉チャンバーシステムは太陽光で駆動するように設計された。メタン濃度の解析には半導体センサを、また二酸化炭素の解析には非分散型赤外線吸収法（NDIR）を用いた。気温、土壌温度、地下水面も観測した。また、2013年には、森林ステップ（ノボシビルスク州17地点）、タイガ南部（トムスク州Plotnikovo付近12地点）、ツンドラ南部（ヤマロ・ネネツ自治管区Tazovsky付近22地点）における様々な生態系において、メタンフラックス観測を行った。

## (3) GOSATデータとインバースモデルを用いた全球メタン収支推定

GOSAT TANSO-FTS SWIR レベル2 (L2) メタンメタンカラム平均濃度データ ( $XCH_4$ ) (V02.21版)、WMOによる温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) 地上地点観測データ、および国立環境研究所が実施しているシベリアにおける大気モニタリングプロジェクトによる航空機観測およびタワー観測データを入力にして、月別の地上メタンフラックス推定値を算出した。多数の観測データを処理する必要があるため、固定時間遅れ—カルマン平滑法<sup>2)</sup>を用いた。固定時間遅れの幅は4ヶ月とした。逆数値解法は、GOSATの二酸化炭素データを用いて二酸化炭素のフラックス推定を行った研究<sup>3),4)</sup>に倣っているが、メタンに対するインバース解析のために以下の設定を行った。メタンのインバースモデルの概要を図(4)-4に示す。

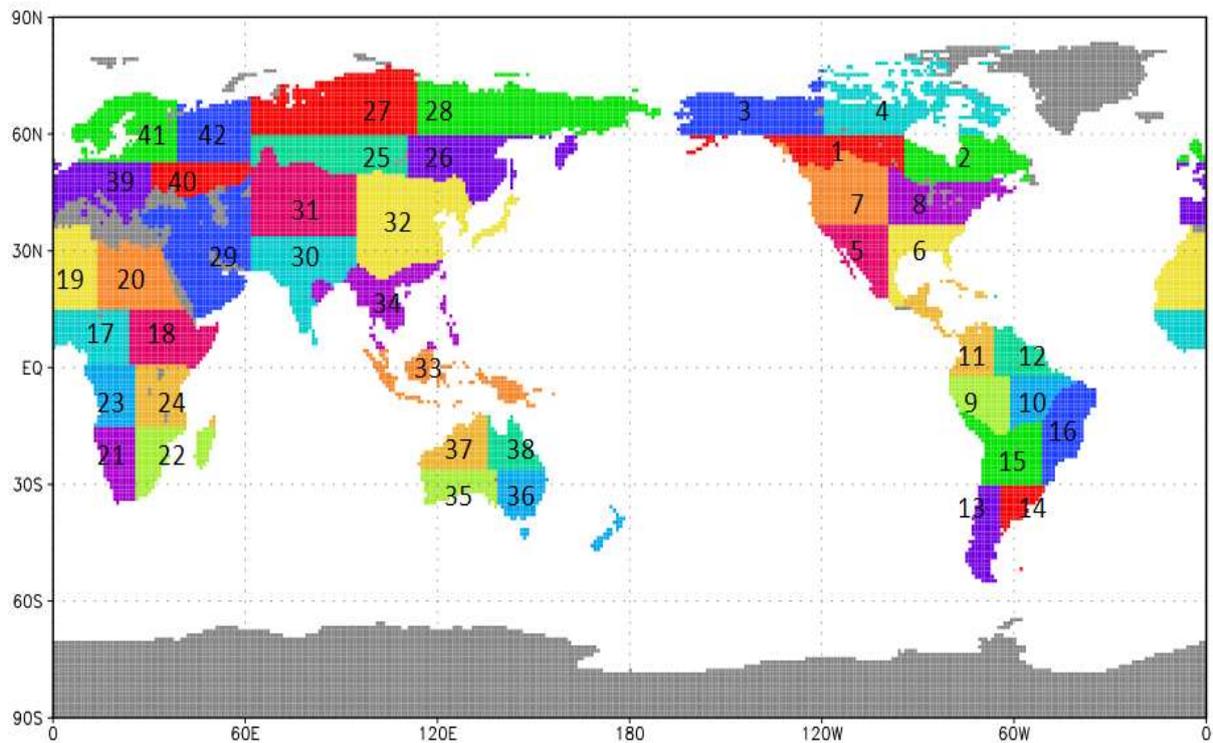


図(4)-4 メタンのインバースモデルの概要

月別メタンフラックスは、陸域42領域と海洋全域1領域の全43領域（図(4)-5）ごとに、バイオマス燃焼、自然起源（湿地、米作水田、シロアリによる放出、土壌による吸収）、および人為放出源（燃料の燃焼および漏えい、産業生産工程および産物消費、米作を除く農業、廃棄物処理、化石燃料燃焼）の3種類のフラックスのそれぞれについて同時に推定した(表(4)-1)。

フラックス推定においては、年々変動する月別メタン放出量を先験値として用いた。人為放出源データはEmission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) v4.2 FT2010 を使用した。バイオマス燃焼による放出量データは、Global Fire Emissions Database (GFED) v3.1<sup>5)</sup>を用いた。湿地、米作水田からの放出量、および土壌による吸収量は、陸域生態系プロセスモデルである Vegetation Integrative Simulator for Trace gases (VISIT)<sup>6)</sup>による結果を用いた。シロアリによる放出量はGoddard Institute for Space Studies (GISS) 大気輸送モデル<sup>7)</sup>によるデータセットを用いた。EDGAR v4.2 FT2010による人為放出源データとしては2000年から2010年の期間のデータが存在する。その内の2010年における人為放出量を2011から2012年の放出量として再度用いた。GFED v3.1バイオマス燃焼放出量データは、データ期間が1995年から2011年までのため、GFED v4.0燃焼面積データ（データ期間1995年中期から2013年）を用いて解析対象期間の月別燃焼放出量を推定した。GFED v4.0燃焼面積データ<sup>8)</sup>およびGFED v3.1バイオマス燃焼放出量データを用い、1995年中期から2011年の期

間について、格子ごとの線形回帰解析を行い、それにより得られた回帰係数を用いて、格子ごとに燃焼面積データから燃焼放出量を推定した。陸域42領域の先験値の不確実性は、人為放出源に対しては20%、バイオマス燃焼と自然放出源に対しては50%とした。また、海洋域については20%とした。



図(4)-5 メタンフラックス推定のための43領域（陸域42領域および海洋1領域）

表(4)-1 設定したメタン放出分類

	CH4 emissions	Emission Inventory	Global total (Tg/yr)	Time resolution
Cat_1	Anthropogenic sources	EDGAR v4.2FT2010	316.21	Annual, IAV
Cat_2	Wetlands	VISIT	157.14	Monthly, IAV
	Rice paddies		33.78	Monthly, IAV
	Soil sink		-35.90	Monthly, IAV
	Termites	GISS	20.62	Annual, no IAV
Cat_3	Biomass burning	GFED v3.1/v4.0t	15.82	Monthly, IAV

2009年6月から2012年8月の期間の、GOSAT TANSO-FTS SWIR L2 XCH<sub>4</sub> V02.21<sup>9)</sup>のデータを、フラックス推定に用いた。GOSAT L2 XCH<sub>4</sub>と、高精度地上観測データを用いて最適化されたフラックスを用いて再推定されたXCH<sub>4</sub>との間には、緯度や月に依存する差が見られた。GOSAT L2 XCH<sub>4</sub>に含まれる偏差（バイアス）を修正するために、緯度および月の関数の二次式<sup>10),11)</sup>によりバイアスを見積もった。GOSAT L2 XCH<sub>4</sub>の値と二次式による値との差を用いて、GOSAT L2 XCH<sub>4</sub>の値を補正した。GOSAT L2 XCH<sub>4</sub>データとマッチするTotal Carbon Column Observing Network (TCCON) XCH<sub>4</sub>観測値との差の標準偏差(1σ)から、GOSAT L2 XCH<sub>4</sub>データのバラツキは12ppbであると検証されているため<sup>9)</sup>、ここで用いるGOSAT L2 XCH<sub>4</sub>データに最小値12 ppbの不確実性を与えた。逆数値解法において、モデル値との差が36 ppb (3σ)以上ある補正済みGOSAT L2 XCH<sub>4</sub>値に対しては、不確実性の値を膨大な値である10<sup>5</sup> ppbとすることにより、逆数値解法計算時の重みがほぼゼロになるようにして、それらの観測値のフラックス推定への影響を排除した。

フラックス推定におけるメタン地上観測データとして、WDCGGデータ、および国立環境研究所のシベリア航空機観測データとJR-STATION観測データを使用した。数値解析期間(2008-2012)において70%以上の観測値がある観測地点を選んで使用した。大気輸送モデルによる数値計算が困難な地点（たとえば海-陸境界地点など）は除いている。データの不確実性は、2009年のGLOBALVIEW-CH<sub>4</sub>の平均残差標準偏差により与え、フラスコサンプリングデータに対しては最小値6 ppb、連続観測データに対しては最小値20 ppbを与えた。データの不確実性の季節変化はここでは考慮していないが、大気境界層に関するモデル精度が強く影響するいくつかの内陸地点については、冬季の観測値に大きな不確実性を与えた。逆数値解法において、モデル値との差が60 ppb以上ある地上観測値に対しては、不確実性の値を大きな10<sup>5</sup> ppbとすることにより、逆数値解法計算時の重みがほぼゼロになるようにして、それらの観測値のフラックス推定への影響を排除した。

NIES全球大気輸送モデル (NIES TM)<sup>12)</sup>を用いて、順方向（フォワード）数値計算と逆推定（インバース）数値計算において、先験値として必要となる年々変動のメタン放出量と大気中メタン応答関数を求めた。本モデルはTransCom-CH<sub>4</sub>モデル相互比較計画<sup>13)</sup>に基づくメタン化学反応を含んでいる。順方向数値計算法の初期値には、TransCom-CH<sub>4</sub>モデル相互比較のために用意された大気大循環モデル（AGCM）を基にした化学輸送モデルによる3次元空間分布値を用いた。

また、GOSATによる検出データのフラックス推定値への効果を確認するため、高精度地上観測データのみを用いて、比較用にGOSATデータを付加してフラックスを推定する時と同じ設定にした逆数値解法を行った。

#### （４）地上観測データとインバースモデルを用いた南アジアのメタン収支推定

細かい時空間スケールのメタン濃度変動を解析することが可能な、オイラー型とラグランジュ型の大気輸送モデルを結合したモデル GELCA (Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model) を用いて、地上観測から得られたメタン濃度データから領域メタンフラックス推定を行った。本サブテーマでは、国立環境研究所が行っているインド内陸の観測地点ナイニタールでの濃度観測データが南アジア（インド）地域のメタンフラックス推定に与える影響について考察した。

GELCAメタンインバージョンシステムは、前述のNIES-TMとGOSATを用いたインバースモデルと同様に、全球を陸域42領域、海洋を1領域と扱い、計43領域のメタンフラックス推定を行う。その中で、インドは、領域30に対応する。インバージョンシステムの拘束条件として用いるメタン

濃度観測データとして、全球規模の観測データセットであるWDCGGで公開されているデータに加え、国立環境研究所の観測により取得された太平洋定期船舶観測データ、シベリアタワー観測および航空機観測データ、さらにインド・ナイニタールの観測データを使用した。南アジア域の地上定点観測としては、他に、Cape Rama (オーストラリア連邦科学産業研究機構による観測)で実施されるフラスコ観測も利用した。

#### 4. 結果及び考察

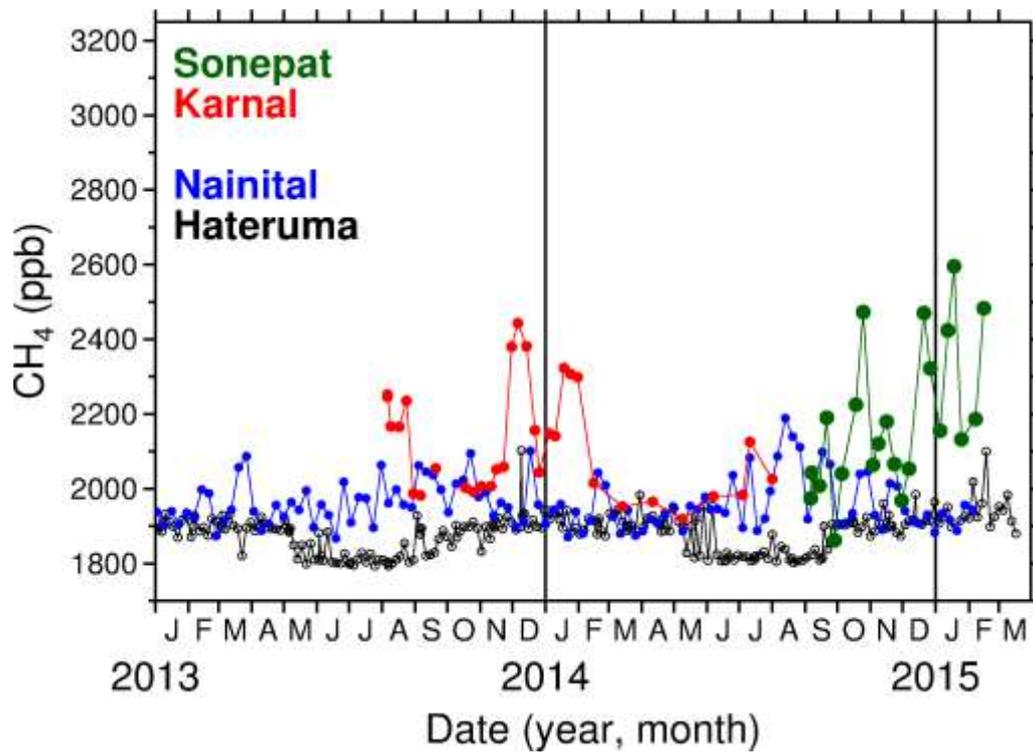
##### (1) 北インド水田地帯における大気メタン濃度観測

図(4)-6に、これまでに北インド水田地帯のカルナルとソーニーパットで採取された大気試料のメタン濃度の時系列を示す。比較対象として、北インドの山岳地帯ナイニタール（標高約2000m）と、沖縄県波照間島で採取された大気試料のメタン濃度も示した。波照間のデータは、北半球低緯度のバックランド大気の変動を捉えていると考えられ、夏にメタン濃度が低くなる季節変化を示した。ナイニタールで得られたデータは、北インドの清浄大気を捉えているものと考えられ、夏にガンジス川流域から空気塊が流入しメタン濃度が増加するが、冬は波照間と同じくらいメタン濃度が観測された。カルナルのメタン濃度は、11月から12月にかけて2400ppb前後、1月から2月にかけて2300ppb前後の高濃度が観測された。ソーニーパットも同様に冬に2500～2600ppbの高メタン濃度が観測された。

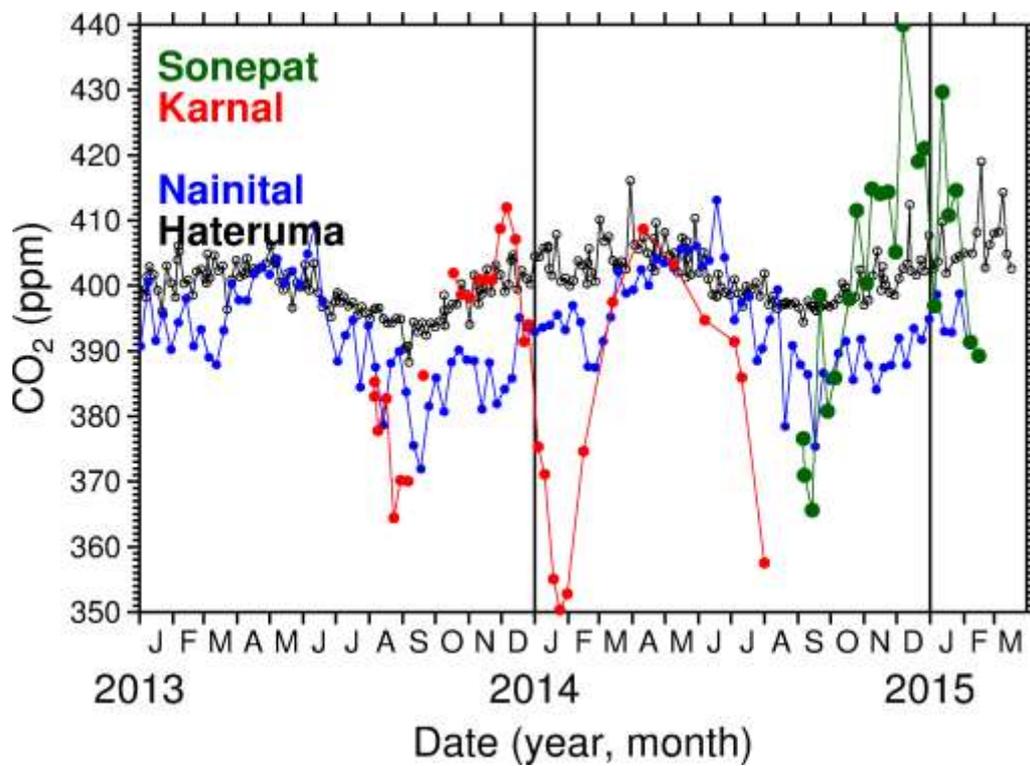
図(4)-7に、カルナル、ソーニーパット、ナイニタール、波照間で採取された大気試料の二酸化炭素濃度の時系列を示す。カルナルとソーニーパットでは、1年間で夏と冬の2回、二酸化炭素の急減が観測された。

カルナルとソーニーパットでは、夏に米、冬に小麦の2毛作が行われている。カルナルとソーニーパットで高メタン濃度が観測された11月から2月にかけては、すでに米の収穫が終わり、乾燥した畑で小麦栽培を行っている時期に相当する。よって、この期間における高メタン濃度データは、水田からのメタン放出を捉えているものではない。一方、二酸化炭素の夏と冬の大きな減少は、夏は稲、冬は小麦の葉による吸収を捉えている可能性があり、稲と小麦がその成長に伴い非常に多くの二酸化炭素を吸収していることを示唆していると考えられた。

本サブテーマで得られたデータは、ボトムアップインベントリで示唆されている夏の大きなメタン放出とは異なる季節変動を示している。しかし、まだ観測期間が短く季節変化を議論するのは難しい上、6～8月の夏期のデータをまだ十分に取得していない。北インドの大気メタン濃度変動を解明するために、本サブテーマで道筋をつけることのできた水田地帯における大気サンプリングを継続し、データを継続して取得することが必要であると考えられた。その他、国立環境研究所における大気試料のガス分析では、一酸化二窒素（ $N_2O$ ）や一酸化炭素（CO）なども分析している。カルナルとソーニーパットでは、非常に高い $N_2O$ 濃度やCO濃度が観測された。観測データを蓄積して、メタン以外のこれら成分も含めて解析し、高メタン濃度の起源を考察する必要がある。



図(4)-6 カルナル、ソーニーパット、ナイニताल、波照間で観測されたメタン濃度

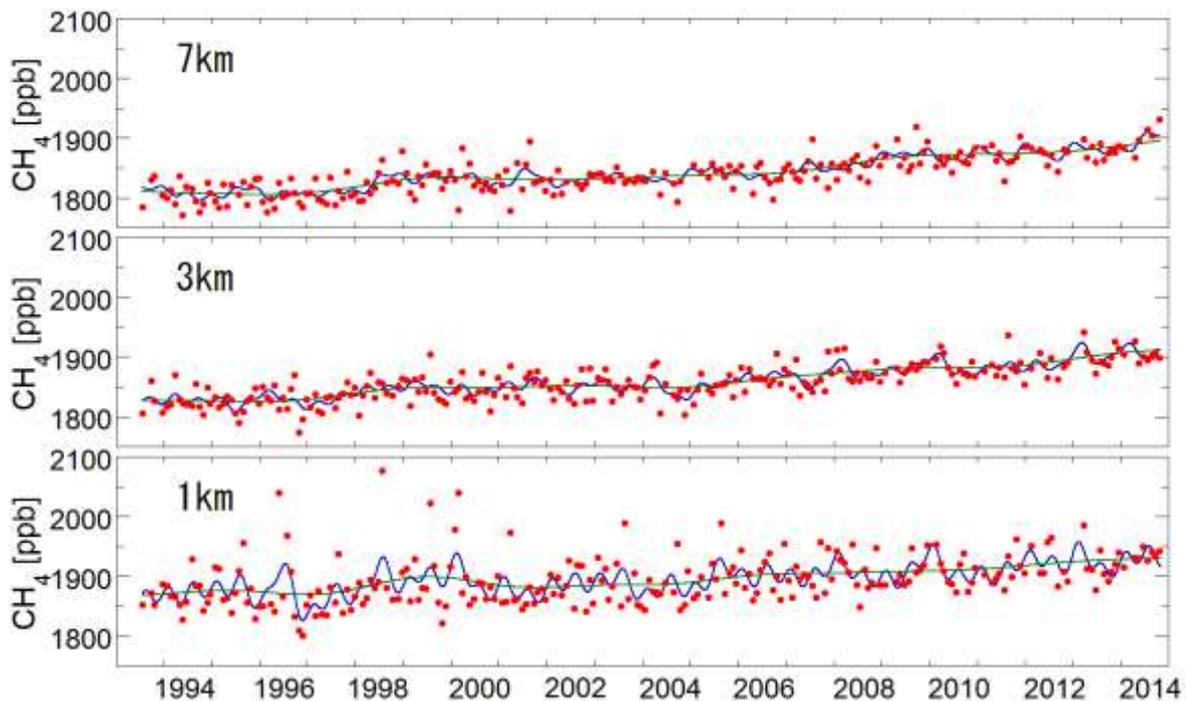


図(4)-7 カルナル、ソーニーパット、ナイニताल、波照間で観測された二酸化炭素濃度

(2) シベリアにおける航空機観測、タワーネットワーク観測、チャンパー観測、および太平洋における定期船舶観測

1) シベリアの航空機観測

航空機観測は定期的な観測を実施し、シベリア上空でのメタン濃度の変動特性について解析を行ったスルグート上空の高度7 km、3 kmおよび1 kmにおけるメタン濃度の変動を比較したものを図(4)-8に示す。スルグート上空のメタン濃度は特に低高度において、夏季に湿地からのメタン放出を反映して高い値が観測されたが、2000年以降は1990年代に見られたような夏季の大きなピークは現れていなかった。メタン濃度の長期的な傾向はいずれの高度においても2006年以降の濃度増加が確認された。



図(4)-8 スルグート上空の高度7 km、3 kmおよび1 kmにおけるCH<sub>4</sub>濃度の変動。

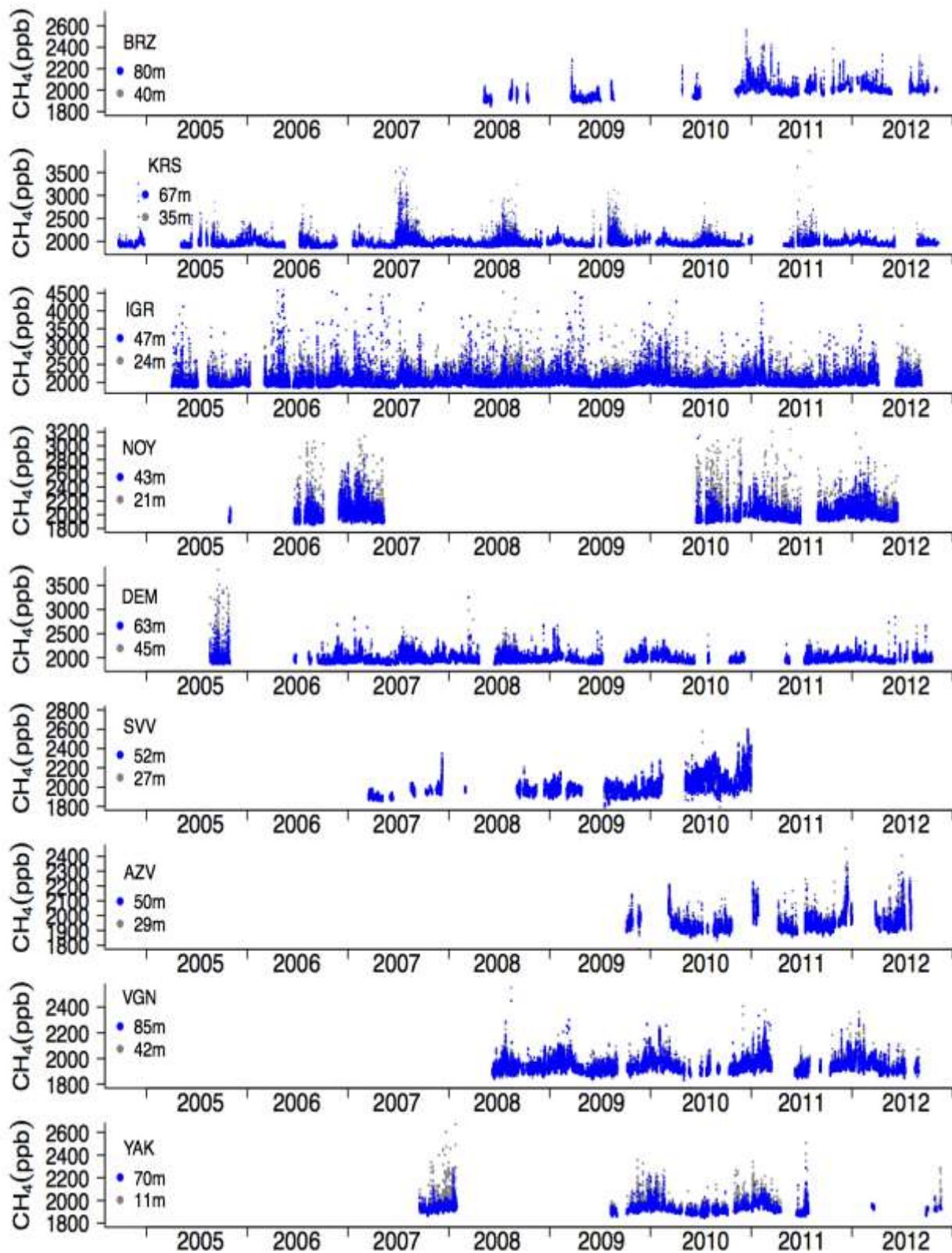
シベリアの航空機観測事例のうち、GOSATの観測と整合するデータを抽出した。たとえばノボシビルスクの周囲（緯度51-59度、経度79-87度）で航空機観測の前後1日のGOSAT観測イベントを検出したところ、2009年7月から2011年9月までに計44個のデータを抽出できた。同様にスルグートでは16のデータが抽出できた。ただし、ヤクーツクでは航空機の飛行高度が低いので気柱平均量を観測している衛星データとの比較は困難であったので除いた。航空機観測データをSaitoh et al. (2012)<sup>14</sup>と同様の方法で気柱量に換算し、単純比較を行ったところ、ノボシビルスクでは差(ppb)は $36.52(\text{ppb}) \pm 23.81(\text{ppb})$ 、スルグートでは $24.82(\text{ppb}) \pm 18.83(\text{ppb})$ と評価できた。

## 2) シベリアのタワーネットワーク観測

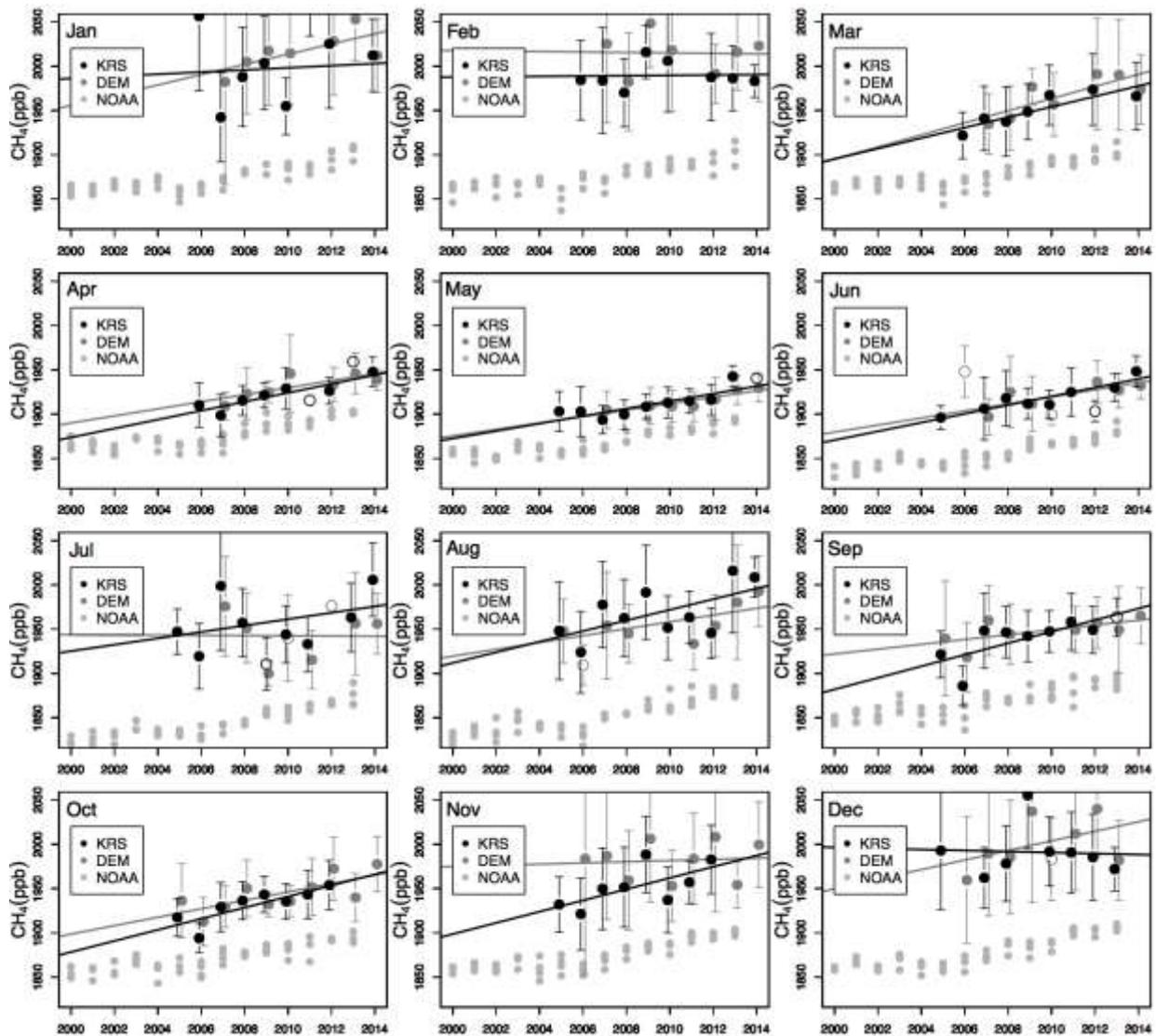
シベリアにおける既存のタワーネットワーク（JR-STATION）を用いてメタン濃度の測定を継続して行った（図(4)-9）。長期観測の行われているKarasevoe（KRS）とDemyanskoe（DEM）の日中値の月毎の経年変動に注目すると、冬季と夏季の濃度変動は大きく、サイトや月毎に長期トレンドの傾向も変わる（図(4)-10）。これは高々度インレットの日中値でも、日々の気象条件やシベリア域からのメタン放出量の影響を強く受けることを示唆している。これまでの研究で、KRSにおける2007年7月、2009年8月、2013年8月、およびDEMにおける2007年7月のメタン日中値の増加は、春季の降水量の増大による地下水面位の上昇が湿地からのメタン放出量を増大させたためと示唆されていた。2014年はKRSにおいては7月、DEMにおいては8月、月平均として過去最高を示し、今後降水量などの気象条件と比較した解析を予定している。

一方で春季と秋季の日中のデータに注目すると2007年以降全球で観測されているような経年増加が観測された。特に4～5月はばらつきも小さくバックグラウンドサイトと似たような増加傾向が見られる。しかしバックグラウンドサイト間でのばらつきや本観測のばらつきを考慮すると、シベリア域のみの特徴的な長期トレンドを論ずることは難しい。

これら、シベリアにおける航空機観測データとタワー観測データは、次に述べるシベリア域でのメタンフラックス推定に利用された。さらに、後述するGOSATデータを用いた全球メタンフラックス推定にも入力データとして利用された。



図(4)-9 JR-STATIONで観測されたメタン濃度の時間変化



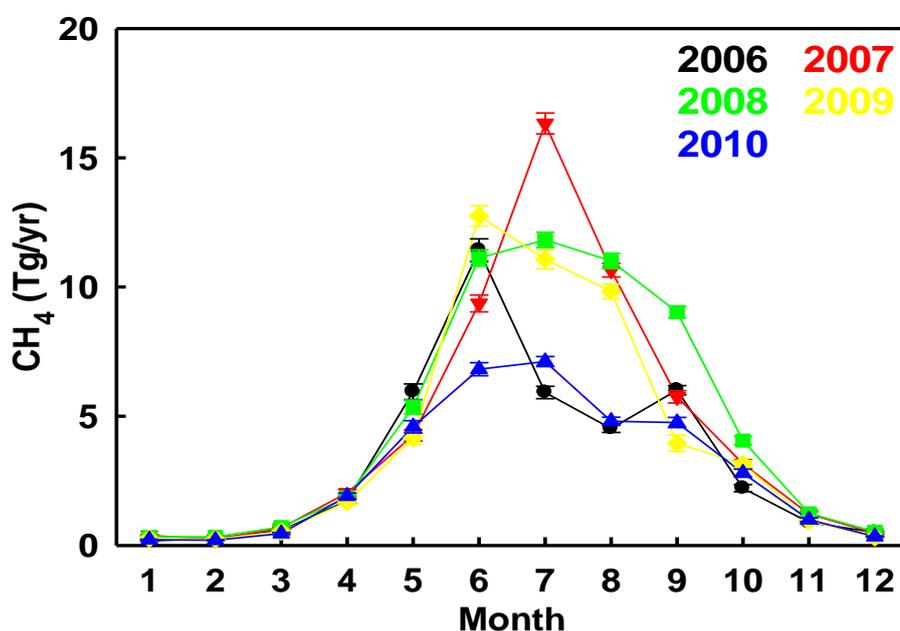
図(4)-10 KRSとDEMにおいて観測されたメタン濃度の日中値（13:00-17:00 LST）の月平均値の経年変化。エラーバーは標準偏差。直線は直線近似のトレンドライン。日中値は低高度と高々度インレットの濃度差が50 ppbより小さい場合のみ使用した。月平均に使用した日中値がN=28より少ない場合は白抜きで表しトレンドラインの計算には使用していない。エラーバー無し of 灰丸は同緯度帯の沿岸域のバックグラウンドサイト（NOAAのサイト；CBA, ICE, MHD, SHM）の月平均値を示した。

### 3) インバース解析によるシベリアのメタンフラックス推定

大気輸送モデルとシベリアの大気メタン濃度観測を用いてインバース解析を行い、2006年から2010年のシベリアのメタンフラックスを推定し、近年のフラックス変動について調査した。

シベリアの2006～2010年の年平均メタン放出量は $21.63 \pm 5.25$  Tg/yrであると推定された。これは全球放出量（505.40 Tg/yr）の4.3%である。図(4)-11に、インバースモデルで推定された西シベリアの2006年から2010年の月別メタンフラックスを示す。2006年と比べると、2007年以降のメタンフ

ラックスは正偏差であった。2007年は、広大な湿地帯である北西シベリアで湿地からのフラックスが増大したと推察され、湿地に近いDemyanskoe, Karasevoe, Igrimで観測された夏の高メタン濃度は、高温多湿の夏期における湿地からのフラックス増大によるものと考えられた。この結果は、2007年の北半球高緯度の大气中メタン濃度増加の主原因が西シベリア湿地からの放出の増大であるとする他研究と一致する。バイオマス燃焼からのフラックス推定値は、この5年間では2008年に最も高くなり、2008年のメタン放出の中心は南東シベリアで、2006～2010年の年平均の2倍以上だった。2008年の大きなメタン放出はGFED v3.1でも見られるが、我々の推定値より低い。2009年と2010年のフラックスの正偏差は、主に南西シベリアの人為起源フラックスの増加によるものであった。



図(4)-11 インバースモデルで推定された西シベリアのメタンフラックス

#### 4) シベリアのメタンフラックス観測

西シベリアにおけるメタンフラックスの季節変動について、現地調査を行った。土壌から放出されるメタンフラックスを自動測定するシステムを用いて、2012年と2013年に西シベリア南部トムスク近郊Plotnikovo付近の中栄養の北方湿地でフラックス測定を行った。表(4)-2に、夏期に観測されたメタンフラックスの週平均値を示す。1週間平均したメタン放出の季節変動は、土壌温度とよく相関していた。放出量が多い夏期の値はチャンバー間でばらつきがあった(3.9～22 mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/h)。

高分解能航空写真と地上調査から作成された植生マップを用いて、フラックス分布の解析を行った。メタンと二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)のフラックスは明らかに植生と土壌状態に対応していた。高い放出率はスゲやワタスゲで覆われた浸水域で観測されたのに対し、最も低い放出率は乾燥丘に対応

していた。最大のメタン放出は、7月中旬から8月中旬に観測された。メタンフラックスの大きさを決める主な原因は地表面下(少なくとも20-25mm以深)の土壌気温である。これらの結果から、この湿地の植生群毎のメタン放出量が推定できた。2012年の温暖な約180日間の1m<sup>2</sup>あたりの全メタン放出量は、チャンバー1（以下ch1などと記述）54.4 g, ch2 – 48.2 g, ch3 – 20.6 g, ch4 – 49.0 g, ch5 – 28.7 g, ch6 – 6.0 gであった。また、2013年5月から9月に同様の観測を行った結果を表(4)-3に示した。

表(4)-2 2012年にPlotnikovoで観測された週平均メタンフラックス (mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/h)

Date	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6
6 May 2012	3.8±0.5	2.18±0.3	4.3±1.5	6.5±0.4	1.67±0.2	0.49-0.2
10 Jun 2012	14.9±0.5	10.8±0.8	5.0±0.35	15.1±1.6	6.1±0.81	0.92±0.1
12 Jul 2012	21.8±1.16	15.5±1.35	8.8±2.1	14.2±1.4	9.3±1.6	3.9±1.0
13 Aug 2012	15.0±2.0	16.7±6.9	6.4±0.3	14.0±3.5	11.8±2.5	2.5±0.67
12 Sep 2012	19.7±2.1	19.6±2.9	5.9±0.85	17.6±1.67	12.7±2.5	1.6±0.61

表(4)-3 2013年にPlotnikovoで観測されたメタンフラックス (mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/h)

Date and time 2013	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6
9 May 12:00-24:00	9.1±2.0	3.2±0.6	1.6±1.0	8.4±3.4	3.2±3.3	1.0±0.9
30 Aug 12:00-18:00	21.0±3.9	12.3±3.4	11.1±2.0	15.7±3.4	11.1±1.9	3.95±2.8
1 Sep 10:00-18:00	24.4±8.5	8.9±1.8	7.0±2.3	15.2±2.1	9.3±1.6	3.4±4.2
3-4 Sep	26.8±5.0	9.95±1.8	10.8±0.8	18.4±2.1	10.5±2.0	4.0±1.3
4 Sep 00:00-08:00	20.6±1.3	8.9±5.2	9.5±2.2	16.8±9.1	10.4±3.0	4.2±2.4
4 Sep 08:00-20:00	25.3±7.7	9.9±2.5	10.9±1.3	17.4±1.9	10.1±3.3	4.2±2.1
8 Sep 10:00-16:00	21.9±11.2	6.8±2.1	6.1±0.5	16.0±0.8	9.0±0.8	2.3±2.5
12 Sep 10:00-16:00	23.4±5.1	6.4±2.7	7.6±2.8	15.8±0.7	8.8±0.5	1.4±0.4
13 Sep 10:00-16:00	20.4±5.8	6.2±4.3	7.7±4.2	15.8±0.8	8.8±0.8	1.4±0.5
25 Sep 10:00-14:00	19.1±5.0	3.5±4.0	5.4±4.0	13.7±0.7	6.5±0.8	2.2±0.5

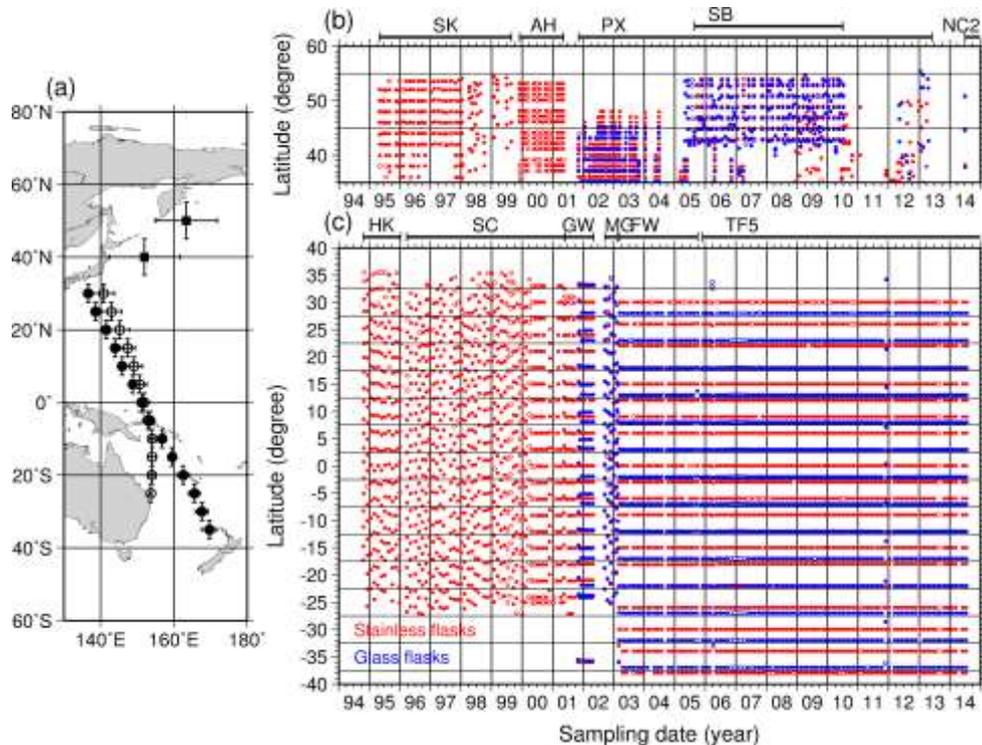
さらに、2013年6月から8月にかけて、森林ステップ（ノボシビルスク州17地点）、タイガ南部（トムスク州Plotnikovo付近12地点）、ツンドラ南部（ヤマロ・ネネツ自治管区Tazovsky付近22地点）における様々な生態系において、ポータブルチャンバーシステムを用いてメタンフラックス観測を行なった。タイガ南部の湿地湖でのメタンフラックスの中間値は25.9 mgCH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/hであった。

森林サイトでの中間値は $-0.05 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ だった。森林ステップとタイガ南部のフラックスは生態系タイプによって大きく異なった。また、メタンフラックス変動は主に気温と土壌水分量にも依存していた。例えば、タイガ南部の5地点におけるメタンフラックスの中間値は、1.94, 0.95, 8.36, 1.86, 1.60  $\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ で、森林ステップの5地点におけるメタンフラックスの中間値は、4.31, 11.45, 0.01, 0.18, 0.19  $\text{mgCH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ であった。ツンドラ南部においては、メタンフラックスの最大値はPalsa地帯の低地で観測され(中間値は $1.28 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ )、最小値は乾燥ツンドラの無機土壌で観測された(中間値は $-0.02 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{h}$ )。

本サブテーマで実施したシベリアのメタンフラックス観測を利用した研究成果は、計5本の国際学術雑誌に掲載された<sup>15),16),17),18),19)</sup>。

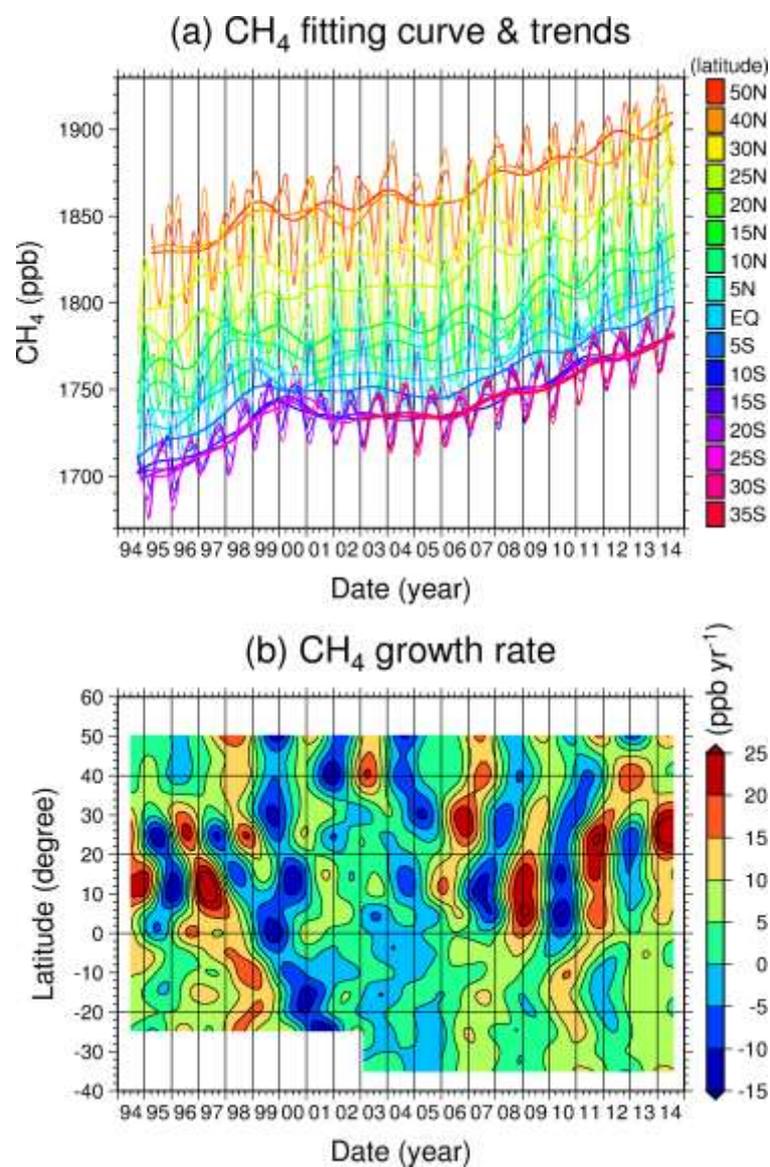
## 5) 太平洋の定期船舶観測

太平洋を日本—オーストラリア—ニュージーランド間で往復する船舶ならびに、北太平洋で日米間を往復する船舶を利用した大気試料採取を継続して行い、得られた観測データを用いて、バックグラウンド大気における温室効果ガス濃度の緯度分布やその変化率を求めた。図(4)-12に、これまでに太平洋航路で採取した大気試料（ステンレスフラスコとガラスフラスコ）の時間・緯度分布を示す。2010年以降の北緯30度以北はデータ数が少ないため、注意が必要である。それを補うために、2014年6月から北米航路の新たな定期貨物船に大気サンプリング装置を設置し、大気サンプリングを再開した。



図(4)-12 太平洋航路で採取した大気試料の時間・緯度分布(北米航路は東経180度まで)

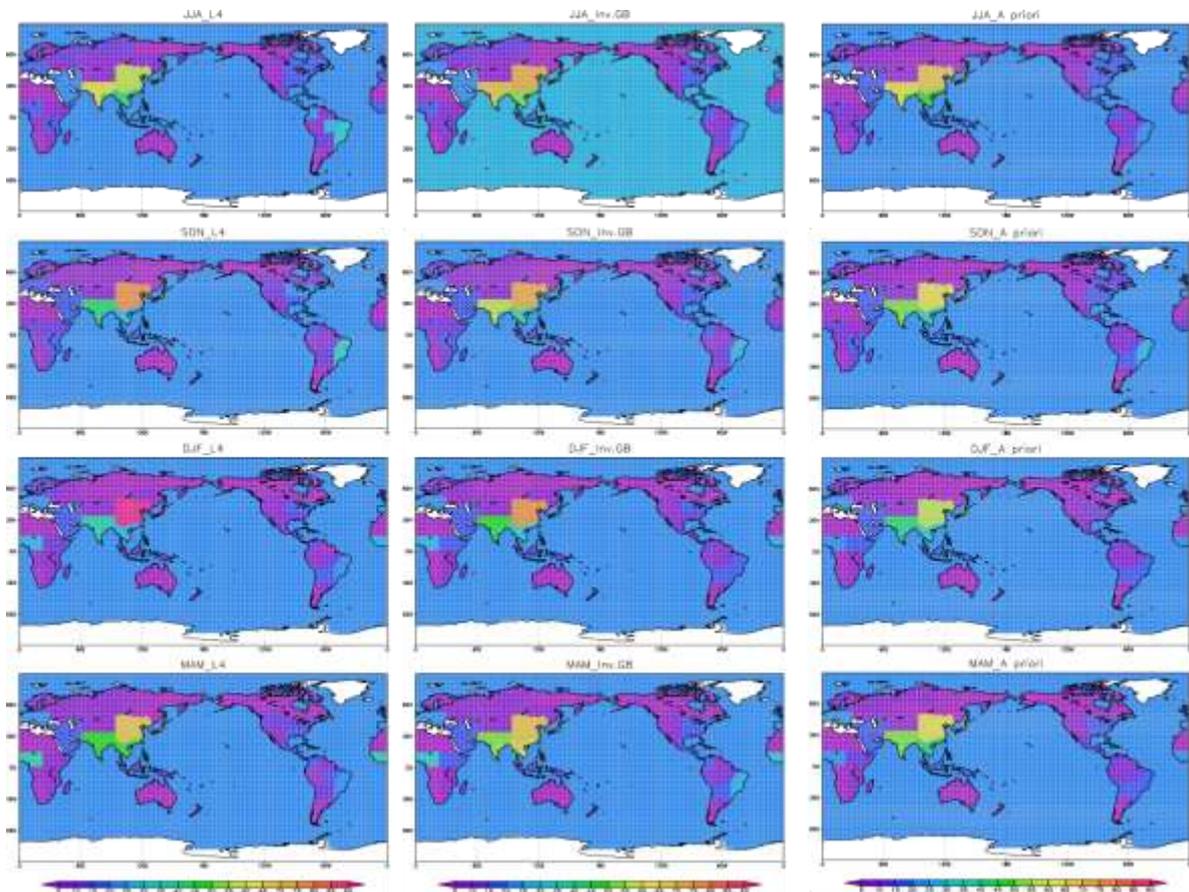
図(4)-13に、定期船舶で採取された大気試料を分析して得られた緯度別のメタン濃度データの時系列（フィッティングカーブならびに2年のローパスフィルタを施した長期変動トレンド成分）と、その濃度変化率を示す。2004年以降、メタンの濃度変化率は北半球で高く、約2年周期の大きな年々変動が観測された。一方、南半球を見ると、メタン濃度の年々変動は非常に小さかった。これは、メタンの放出源・吸収源が北半球に広く分布していることと対応していると考えられた。メタン濃度の年々変動は、北半球熱帯（北緯0度から20度）で大きく、2008～2009年と2011年に大きな増加、2007年、2010年、2013年に減少が観測された。このように、メタン濃度の年々変動は複雑な分布と進行をしているが、2007年以降の全球的な増加傾向は続いていることが確認された。これらの定期船舶から得られた太平洋上の観測データは、後述するインバースモデルを用いたメタンフラックス推定にも入力データとして利用された。



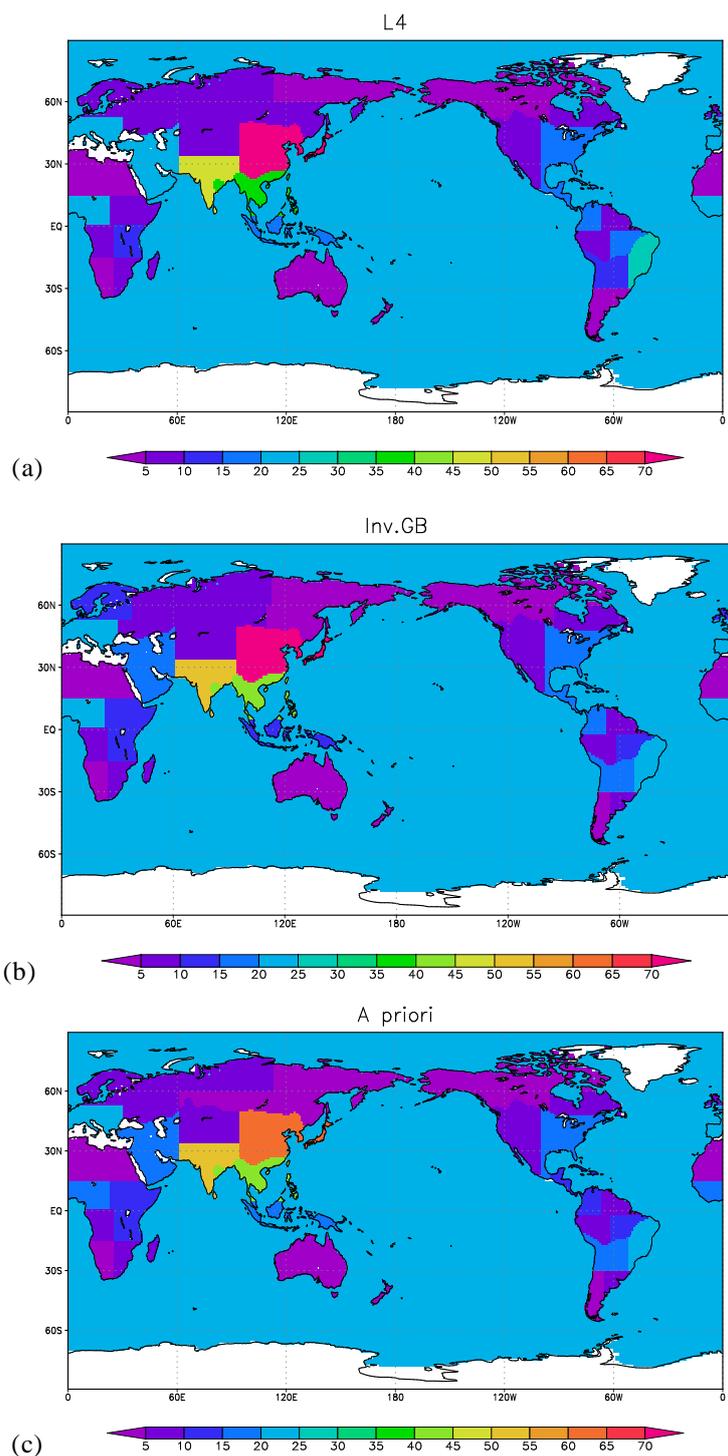
図(4)-13 (a)定期船舶で観測された緯度別メタン濃度データの時系列（フィッティングカーブならびに2年のローパスフィルタを施した長期変動トレンド成分）と (b) 濃度変化率 (ppb/年)

### (3) GOSATデータとインバースモデルを用いた全球メタン収支推定

図(4)-14に、バイアス補正したGOSAT L2データと地上観測データから推定した、2009年6月から2012年5月の季節平均した全球43地域における年間メタンフラックス（GOSAT L4）、地上観測データのみから推定したメタンフラックス、およびインバースモデルに入力した先見値フラックスデータを示す。また、図(4)-15に、2009年6月から2012年5月の期間平均した全球43地域における年間メタンフラックスを示す。地球全体で見るとメタン放出量の多い地域が複数分布しており、それらの地域は人口密度の高い地域とおよそ一致していること、東南アジア・南アジア域や、南米及びアフリカの南亜熱帯地域のメタンの放出が特に多いことがわかった。地上観測データのみを用いたフラックス推定値の2009年6月から2012年5月の期間平均値の地域分布は、CarbonTracker-CH<sub>4</sub>などの他研究<sup>20), 21)</sup>と一致していた。

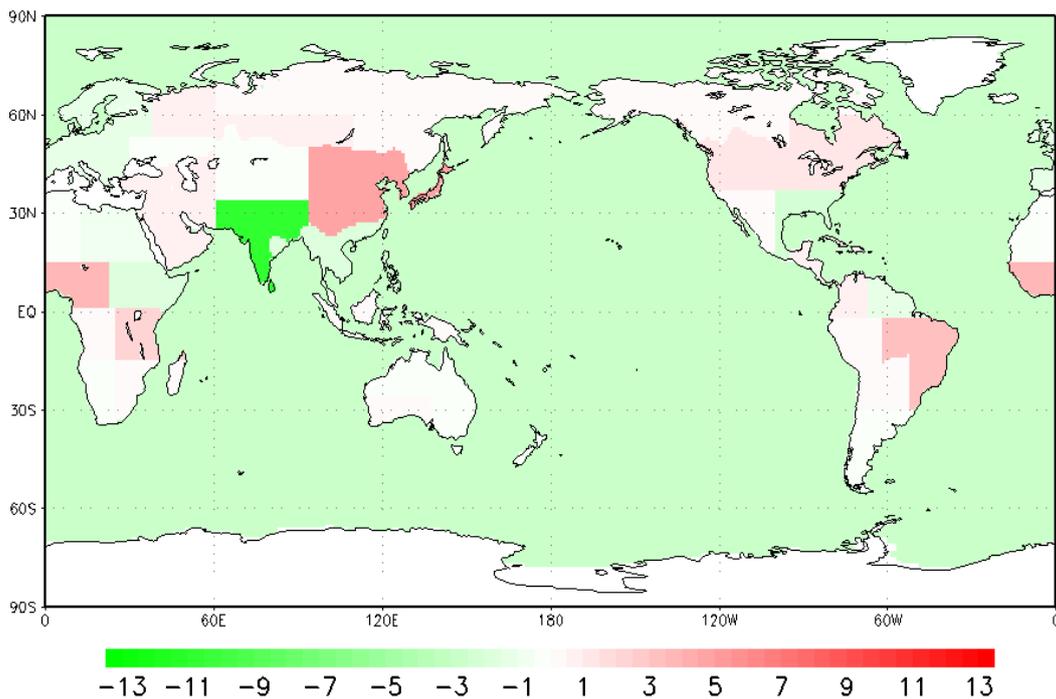


図(4)-14 2009年6月から2012年5月の季節平均（上から6～8月、9～11月、12～2月、3～5月）した全球43地域における(左)バイアス補正したGOSAT L2データと地上観測データから推定した年間メタンフラックス（GOSAT L4）、(中) 地上観測データのみから推定したメタンフラックス、および(右)インバースモデルに入力した先見値フラックスデータ。単位はTgCH<sub>4</sub> region<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>。



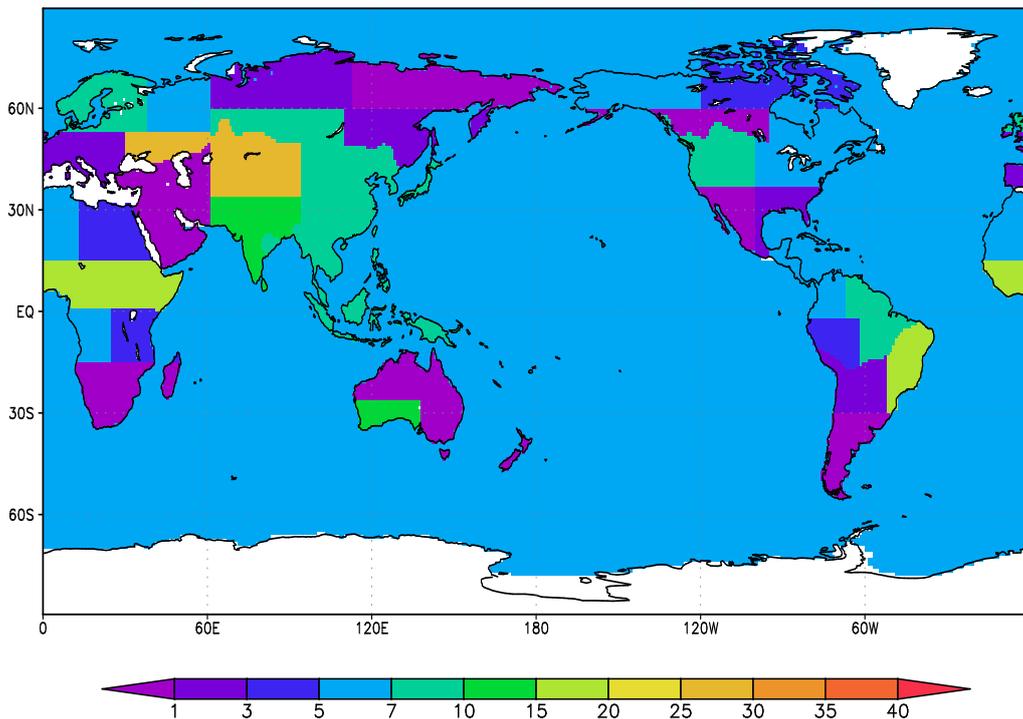
図(4)-15 2009年6月から2012年5月の期間平均した全球43地域における(a)バイアス補正したGOSAT L2データと地上観測データから推定した年間メタンフラックス (GOSAT L4)、(b) 地上観測データのみから推定したメタンフラックス、および(c)インバースモデルに入力した先見値フラックスデータ。単位は $\text{TgCH}_4 \text{ region}^{-1} \text{ year}^{-1}$ 。

GOSATデータを付加することによる地上メタンフラックス逆数値解法推定値への効果を図(4)-16と図(4)-17に示す。北半球高緯度域および南半球中・高緯度域においては、GOSATデータを付加して推定されたフラックス推定値と地上観測データのみを用いたフラックス推定値との差は小さかった。しかし、地上観測データが少ない領域でGOSAT検出データが相対的に豊富な領域の熱帯域および北半球中緯度域においては、メタン総放出量推定値の違いが大きかった。特に、南アメリカ中部（領域番号09,10,15および16）で $58.3 \pm 9.0$ から $65.5 \pm 7.6$  Tg CH<sub>4</sub> region<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>に増加、熱帯アフリカ（領域番号17,18および23,24）で $52.4 \pm 7.4$ から $57.0 \pm 6.4$  Tg CH<sub>4</sub> region<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>に増加、インド（領域番号30）で $54.8 \pm 12.8$ から $44.1 \pm 11.34$  Tg CH<sub>4</sub> region<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>に減少、東アジア（領域番号32）で $71.4 \pm 11.1$ から $76.1 \pm 10.4$  Tg CH<sub>4</sub> region<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>に増加であった。GOSATデータを付加することによって、先験値や地上観測データのみを用いたフラックス推定値より、熱帯域(南アメリカ、アフリカ、東南アジア)の不確実性が大幅に低減したとともに、フラックス推定値が増加した。この結果は他研究<sup>11), 20), 21)</sup>でも見られた。また、これらの領域で推定されたメタンフラックスの季節変動をみると（図(4)-18）、先見値や地上観測データのみ用いた推定と比べ、GOSATデータを加えたことで、全季節で放出量が増えるわけではなく、季節変動のピーク時の放出量が大きくなっていく傾向があった。

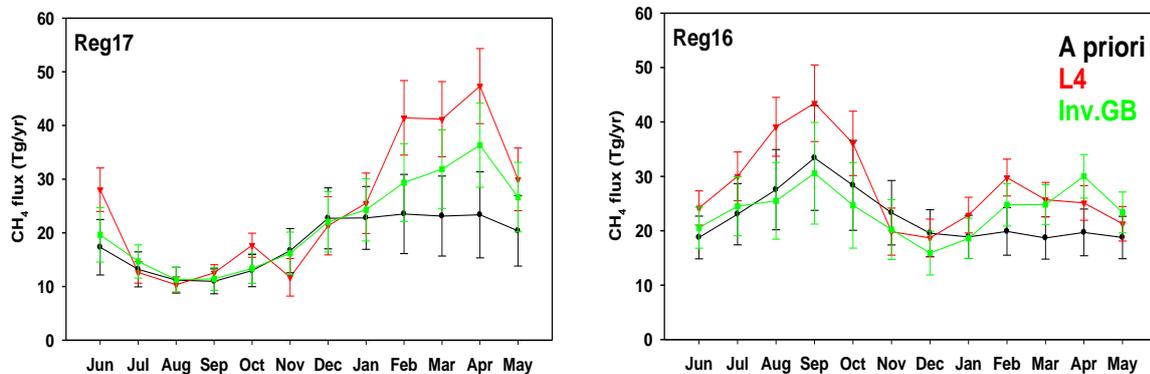


図(4)-16 地上観測データのみ用いて推定したフラックス推定値と地上観測データにGOSATデータを付加して推定されたフラックス推定値との年平均値の差 (Tg CH<sub>4</sub> region<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>)。

UR\_L4 to Inv.GB

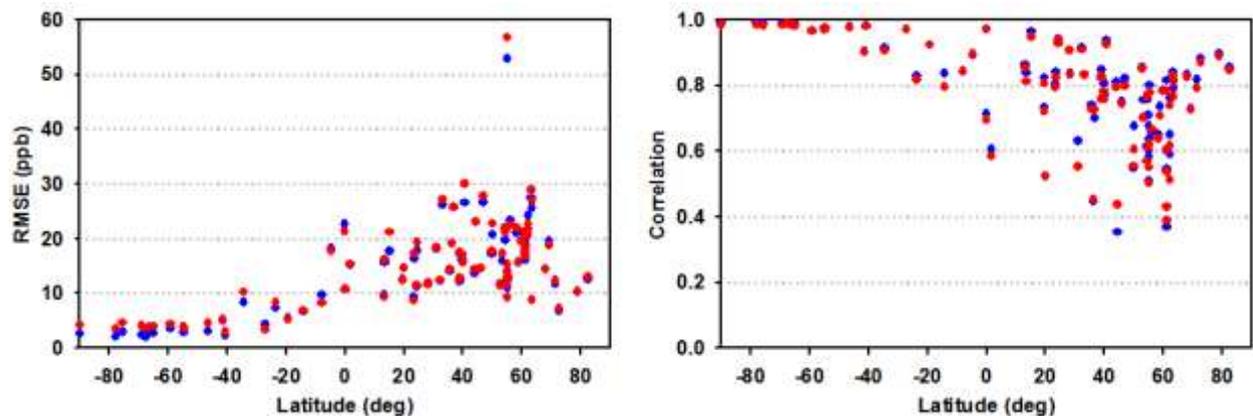


図(4)-17 地上観測データにGOSATデータを付加したことによるフラックス推定値の誤差低減率(%)。



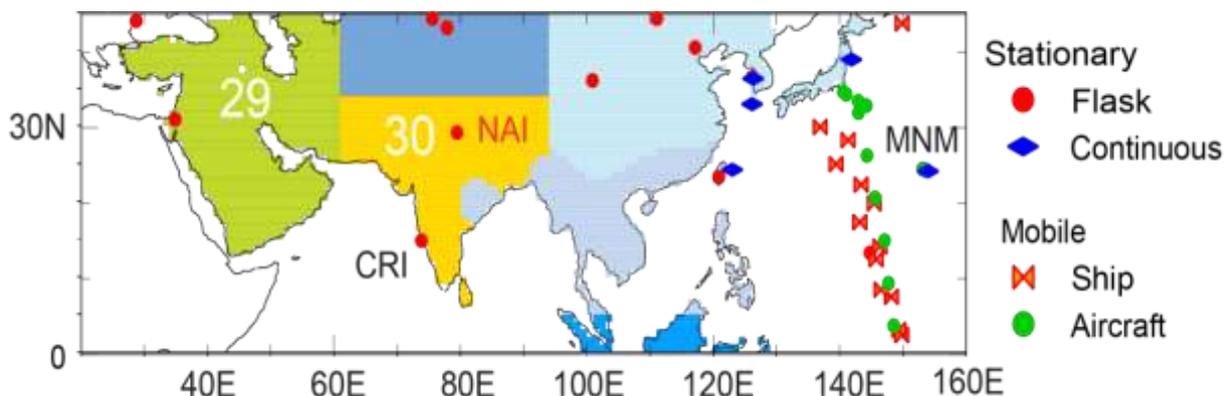
図(4)-18 熱帯アフリカ(領域番号17)と南アメリカ(領域番号16)で推定されたメタンフラックスの季節変動(Tg/年)。黒が先見値、緑が地上観測データのみ用いた推定、赤がGOSATと地上観測データを用いて推定した結果を表す。

2009年6月から2012年5月の期間の、GOSATデータを利用して推定されたメタンフラックスを用いて計算した大気中メタン濃度と地上観測地点での観測濃度値との平均偏差を図(4)-19に示す。南半球における平均誤差は5 ppb以下であり、北半球においてはいくつかの例外を除いて7~30 ppbの範囲に収まっていた。内陸での観測値が豊富な北半球中緯度においては、メタン濃度の観測値と推定値の差が比較的大きい。地上観測濃度値との対応については、逆数値解法にGOSAT観測データを追加使用することにより、改善される地点と悪くなる地点がいくつかあった。熱帯域南部においては、逆数値解法において地上観測値のみを用いて推定した場合に観測値との偏差が相対的に大きい地点で、偏差が減少していた。



図(4)-19 2009年6月から2012年5月における大気中メタン濃度 (ppb) の観測地点データと推定値の2乗平均平方根誤差 (左) および相関 (右)。赤点はGOSATデータを付加して推定されたフラックスにより求めた濃度、青点は地上観測値のみで推定したフラックスにより求めた濃度。

#### (4) 地上観測データとインバースモデルを用いた南アジアのメタン収支推定

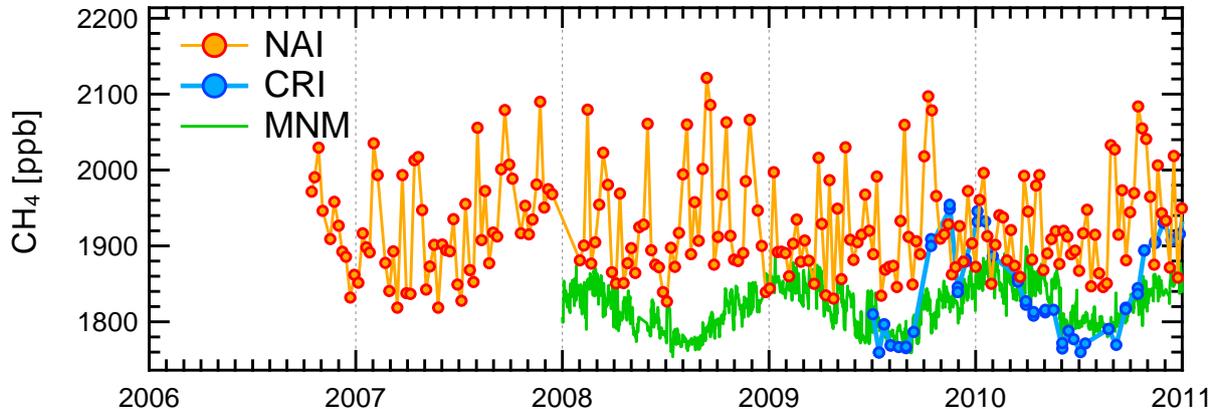


図(4)-20 GELCAインバージョン領域とデータを利用したメタン観測サイト。南アジア (インド) に対応する領域は、領域30 (黄色)、中東は領域29 (黄緑)。NAI, CRI, MNMは、地上観測地点 (ナイニタール、Cape Rama、南鳥島)、Shipは国立環境研究所の太平洋定期船舶観測の位置を示す。

大気結合モデルGELCA(Global Eulerian-Lagrangian Coupled Atmospheric model) メタンインバージョンシステムを用いて、地上観測メタン濃度データから領域メタンフラックス推定を行った。本サブテーマでは、インド内陸の観測地点ナイニタール(図(4)-20)での濃度観測データが南アジア(インド)地域のメタンフラックス推定に与える影響について考察した。

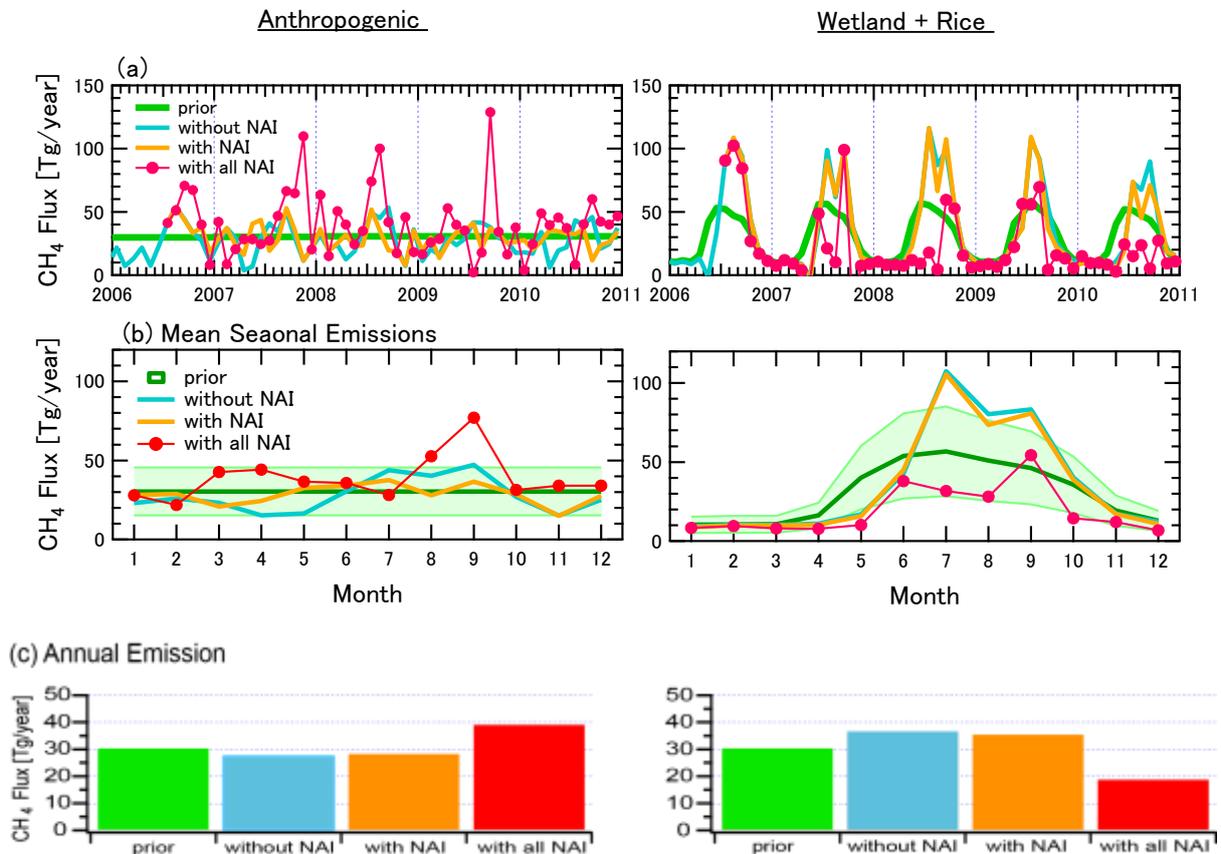
南アジアは、アジアモンスーンにより、その気象場に、明瞭な季節変化が見られる。夏(6月—10月)のモンスーン期(雨季)は、海洋から内陸へ向かいに風(南西季節風)が吹き、非モンスーン期(乾季)には、主な風向きが内陸から海洋へ(北東季節風)と反転する。雨季は高温多湿となるため、ガンジス川周辺流域を中心に、稲作栽培、湿地からのメタン発生が盛んとなる。

図(4)-21に、ナイニタール、南鳥島、Cape Ramaで観測されたメタン濃度の時系列を示す。沿岸域のCape Ramaでは、メタン発生源の季節変化とは対照的に、モンスーン期は、海洋からの影響を強く受け低濃度となる。一方、大陸内部の影響を強く受ける非モンスーン期にメタン濃度が上昇する。このような、メタン濃度の季節変化は、東南・東アジアのバックグラウンドモニタリング地点での観測(南鳥島)と類似する。ナイニタールは、モンスーン期に、ガンジス流域の耕作地・湿地で発生するメタンフラックスによりメタンが高濃度となった空気の影響を受けると考えられるため、夏から秋にかけて季節変化のピークを迎える。このような季節変化に加え、短周期の大きなピークが通年見られ、その振幅は、季節変化よりも大きい。このことは、ナイニタールが、強度の強いメタン発生源の比較的近傍に位置すること、一方、メタン高濃度となった空気のナイニタールへの輸送が、気象場の総観規模変動により短周期で変化するためと推測される。



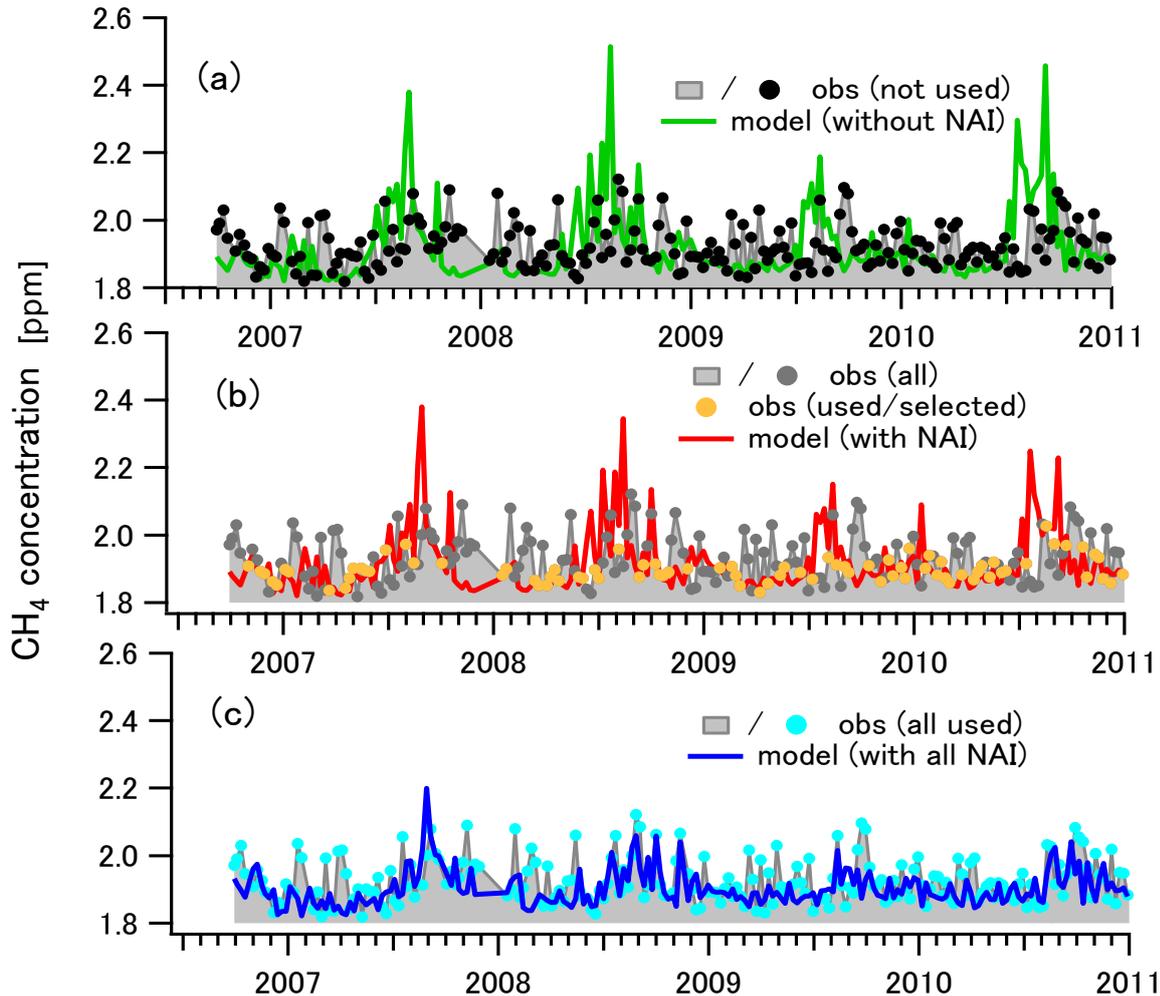
図(4)-21 ナイニタール、南鳥島、Cape Ramaで観測されたメタン濃度の時系列

GELCA メタンインバージョンシステムによるフラックス推定計算を、1999年から2010年の12年間行った。その中で、国立環境研究所のナイニタールでの観測が開始された2006年から2010年までの5年間に着目し、その計算結果を考察した。南アジア域のフラックス推定量は、ナイニタールデータにどの程度の拘束を持たせるかに依存する結果となった。図(4)-22に、3通りの計算設定(ナイニタール観測データ不使用のケース、ナイニタールデータを弱い拘束で使用したケース、全ナイニタールデータを使用したケース)によって推定された南アジア域のフラックスを示す。



図(4)-22 GELCAモデルで推定した、人為起源（エネルギー関連、農業、廃棄物等、左図）と自然起源（湿原、稲作等、右図）の南アジア（領域30）におけるメタンフラックス。計算設定（ナイニタール観測データ不使用のケース（without NAI）、ナイニタールデータを弱い拘束で使用したケース（with NAI）、全ナイニタールデータを使用したケース（with all NAI））の結果と、Prior（先験値）を示す。(a) 月毎のメタンフラックス推定値の時系列。(b) 5年（2006–2010）平均の季節変化、(c) 5年平均の年放出量。

ナイニタールデータを使用した場合でも、観測データの拘束が弱い場合は、使用しない場合に比べて、人為起源メタンフラックス（但し稲作を除く）の季節変動性が弱くなる傾向が見られたが、その他の点では、違いが僅かである（~3%）。一方、ナイニタールデータへの拘束を強めたケースでは、推定フラックスの年放出量および、季節変化に関して、他のケースと大きな変化が見られた。人為起源の平均年放出量が42%増大、一方、稲作・湿地からのフラックスは48%の減少し、その季節変化のピークが7月から9月へとモンスーン後期へとシフトした。さらに、インド（領域30）の東に位置する中東（領域29）の人為起源メタンフラックスが~10%増加し、広域なフラックス推定への影響が示された。



図(4)-23 3通りの逆計算設定により推定されたメタンフラックスを用いて計算されたナイニタールのメタン濃度。比較のため、観測濃度値も示す。(a) ナイニタールの観測値を使用しないケース、(b) ナイニタールの観測値を使用するが、逆計算システム内でモデルと観測値の間の差によりデータセレクションを行ったケース、(c) NAIの全ての観測値を使用したケース。

推定フラックス値の検証の一つとして、推定フラックスを用いて、ナイニタールのメタン濃度シミュレーションを行った(図(4)-23)。ナイニタールの観測値を使用したフラックスで計算されたモデル濃度(a)は、観測値からのずれが、ナイニタールの観測値を使用しなかったケース(b)に比べ、平均で8ppb縮小したが、両方のケースでナイニタールのモデル濃度は、観測濃度よりも、1-2ヶ月程度早い時期に高濃度のピークを迎えた。

一方で、ナイニタールの全観測データを用いたフラックスで計算されたモデル濃度(c)では、季節変動のピーク時期が遅くなり、また振幅も小さくなり、観測季節変化との位相および、振幅の一致が良く、全体として、モデル濃度と観測濃度間の差が縮小した。また、他のケースとは異

なり、平均として観測値よりも低い結果（負の偏差）となった。負の偏差は、観測の短周期変動の高濃度を、モデルが良く再現していないためである。このような短周期変動の再現には、モデルの時空間的高分解能が必要と考えられるが、一方、このような短周期な濃度変動は、地域的な気象場のSynoptic変動に起因するものと、急勾配の高地に位置する観測地点の地形的な要因から生じる局地的な変動（日変化等）も含まれていると考えられる。大陸内部の濃度データは、フラックス推定において、その影響が大きいことが示されたが、一方、データの地域代表性の観点から濃度観測データ選択には注意が必要である。

#### （５）GOSAT TIRからのメタン高度分布導出の精度向上のための成層圏気温分布の整備

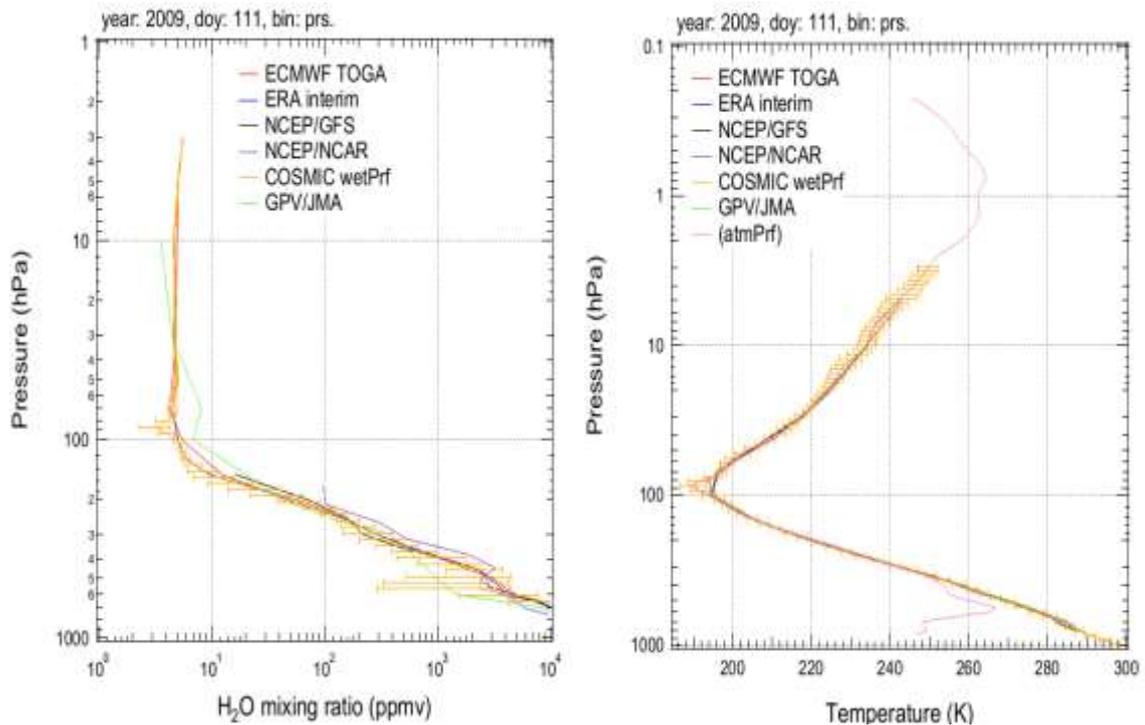
GOSAT熱赤外センサー(TIR)からのメタン高度分布導出における気温・水蒸気データの影響を定量的に把握するために、成層圏の気温・水蒸気分布データの整備を行った。現在のGOSAT TIR L2一般公開データ版(V00.01)では、メタン濃度導出に必要な気温分布と水蒸気分布については気象庁(JMA)の客観解析データGPV(Grid Point Value)を用いているが、異なる気温・水蒸気データを用いた場合、導出結果にどのような影響を与え得るのか調べることは重要である。ここでは、TIRとグアム島周辺の航空機観測によるメタン鉛直プロファイルの比較を行った2009年と2010年の数日間における、GPSによるradio掩蔽観測ならびに様々な客観解析データから得られた気温・水蒸気データを示す。サブテーマ2のGOSAT TIRフォワードモデル計算において、気温・水蒸気分布をJMA/GPVからGPSデータに差し替えて熱赤外域の輝度スペクトルベースでの強度を観測結果と比較した。

用いたGPS radio掩蔽観測データセットは、2006年からの観測が継続しているFORMOSAT-3/COSMIC<sup>22)</sup>のデータ版2010.2640で、米UCARのCDAACから取得した。GPS radio掩蔽法では電波の曲がり（屈折角）から大気屈折率の鉛直構造を解析することで、気温・水蒸気の鉛直分布を導出する。ここでは対流圏気温の導出において水蒸気による影響が考慮されているwet temperature（識別子wetPrf）を利用した。これはERA-Interimを利用した一次元変分法によるデータ同化によって、気温・水蒸気分布を0.1 kmの幾何高度グリッドで同時算出している（高度40 km以下）。水蒸気を考慮に入れていない、より生の情報も提供されている（高度60 kmまでのデータが存在。後述する図のatmPrf）。特に成層圏では水蒸気濃度が低いために十分精度の高い気温分布を得ることが出来る。これらをマージした情報をTIRフォワードモデル計算に供した。GPS掩蔽観測による気温・水蒸気データの比較用に用意されている各種の客観解析気象データも参考までに取得・解析した。用いたデータはECMWFのTOGA 2.5度 global surface and upper air analysis（識別子ecmPrf）、同じくECMWFのERA-Interim（eraPrf）、NCEPのNCAR global reanalysis（ncpPrf）、そして同じくNCEPのGFS operational analysis（gfsPrf）の4つである。これらのデータは各GPS掩蔽観測に時空間的に内挿されている。

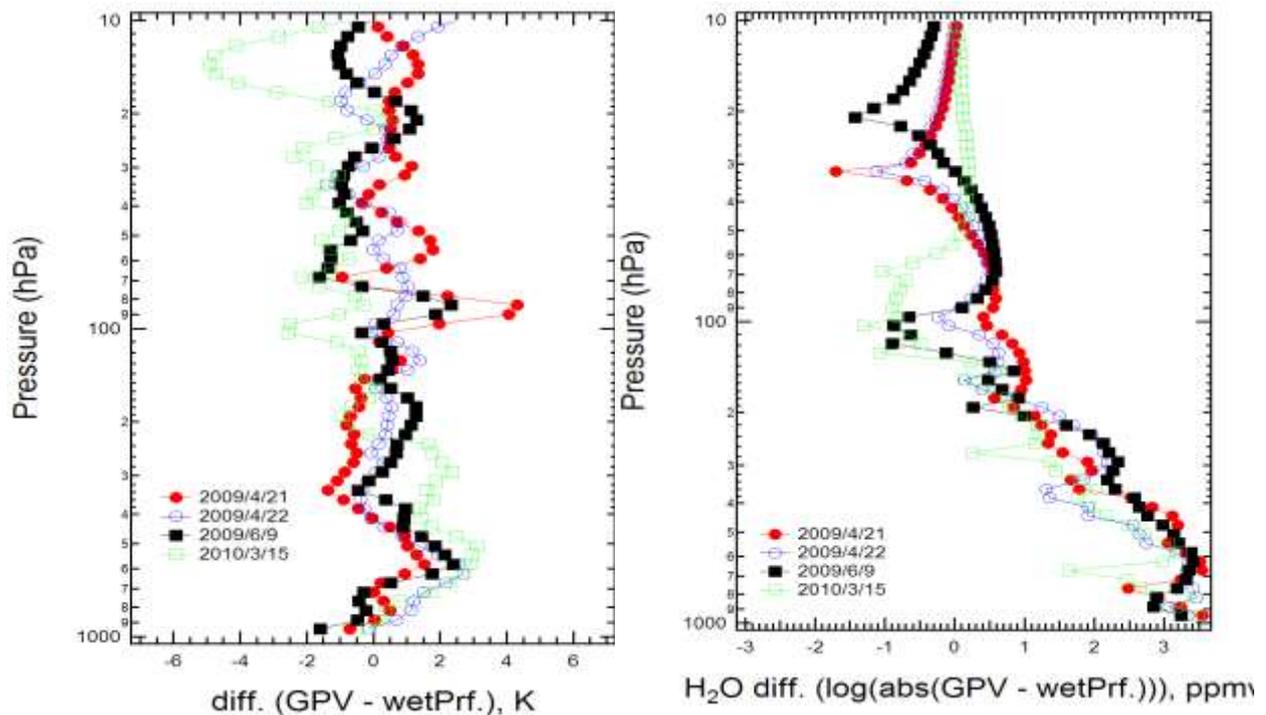
対象としたGOSATと航空機によるメタン観測日は2009年4月21日、22日、6月9日、そして2010年3月15日の4日間である<sup>14)</sup>。各々、これらの航空機観測に同期したGOSATの観測数は、2, 5, 3, そして5である。GOSATの観測時刻はグアム島周辺では3時（UTC）前後である。一方、GPSの観測プロファイルは一日当たり2000を越えるが、低緯度域では観測数がより少なくなるため、各観測日に同期したGPS観測として各々6, 10, 8, そして2プロファイルを用いた。それらGPS観測とGOSAT観測との時間差はUTCベースで同一日としたので最大時間差はプラス21時間、距離差は各々平均で600から1000 kmとなり、一致性は必ずしも良くない。一例として4月21日の6つの気

温・水蒸気プロファイルを数百メートルに相当する気圧ビン内で平均した結果を各々、図(4)-24に示す。

これらのGPS観測の日平均プロファイルを実際のGOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドのメタン濃度導出システムにおけるフォワードモデル計算の気圧グリッドに線形内挿し、定常処理に用いているJMA/GPVとの比較を行った。4日分の結果をまとめて図(4)-25に示す。左図は気温の絶対値差（JMA/GPV マイナス GPS）、右図は水蒸気の体積混合比（ppmv）ベースの絶対値差の常用対数（つまり、0.1 ppmvの差はマイナス1となり、10 ppmvの差はプラス1となる）を示す。気温については時空間的な一様性を考慮に入れても概ね $\pm 2$  K程度の範囲内に収まっており、広い空間スケールで対流圏から高度30 km以下の成層圏まで静穏な状態であることを示している。しかし、4月21日の100 hPa付近（対流圏界面）や3月15日の15 hPa付近では4 Kを超える差異が存在している。このように鉛直方向に細かな構造については客観解析データでは解像出来ていないと考えられる。水蒸気については対流圏内での湿度の時空間的な非一様性の結果として大きな違いが出ていると考えられるが、GPVデータは30-40 hPaの高度レベル以下の成層圏で他の客観解析データに比べて1から3 ppmv高くなっており（図(4)-24）、注意が必要である。



図(4)-24: GPS radio掩蔽観測による2009年4月21日の19-24度N, 140-150度E付近の水蒸気分布（左）と気温分布（右）



図(4)-25: GOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドのフォワードモデル計算における気圧グリッド上に内挿したGPSによる気温(左)と気圧(右)のJMA/GPVとの差

今後の課題として、アドバイザリーボード会合にて、1. 速報値のGPVではないJMAの再解析データを用いた場合はどうなるか、2. 対流圏界面付近での気温の絶対値差は、そこでの気温勾配が小さいので大きな問題にはならないのではないかと、3. むしろ地表の最高・最低気温が6時間毎データセットからでは切り出せない、その点を考慮すべき、とのコメントを得た。対流圏内の水蒸気分布についてはGOSAT観測との時空間的一致がかなり高いことが要求されるために、気象データ以外の何らかの観測結果に頼ることは難しいと考えられる。成層圏についてはJMA/GPVの水蒸気他データより高いことが示唆されたため、他の緯度・季節についての確認や、水蒸気測定のある衛星観測（ACE-FTSなど）との比較検討が必要と思われる。

その後、GOSAT TIRの導出アルゴリズムの改良に伴い、気温・水蒸気等は外部パラメータとしての入力からターゲット（メタンと同時推定）に変更された。そのため、これまでの外部パラメータの精緻化の方針から、実際に導出されたメタン、水蒸気などの化学種の定量的なデータ質評価を他の観測との比較から実施することにした。これは対流圏メタンカラム量の推定に係る基礎的な研究としても重要である。TIRは最新のV01.00を用いて2010年と2011年の2年間について解析した。比較対象となる観測は西シベリアの2地点での航空機とカナダの衛星搭載リモセンサACE-FTSである。

航空機観測との比較では高度4kmから7kmのTIRの感度が高い高度領域をまずは選んだ。TIRの時間変化は50-100ppbv程度の変動幅を持ちながら夏期に低く冬期に高い季節変化が見られた。検証データである航空機もその範囲内に概ね収まることが分かり、これら高度でのTIRの確度は妥当であると言える。しかし冬期の高度7kmに見られる2ppmv程度の高い値についてはより詳細な評価が今

後は必要である。

一方、成層圏でのACE-FTSとの比較では2011年1月から5月上旬まで極渦の影響を受けているメタン高度分布はTIRとACE-FTSで大きく異なる（2010年でも3月まで極渦の影響あり）。メタン全量に寄与するこれら高度のメタン濃度は小さいが、TIRは成層圏でのメタン濃度を過大評価していることが分かった。また上述の高度7kmの航空機との比較と関連するが、TIRからは1月の上部対流圏（200-300hPaレベルまで）で2ppmvを超える高い濃度が見られた。ACE-FTSからは明確にはそのような高濃度のメタンは見られておらず、今後このような高いメタンの是非に関して同時推定している水蒸気や亜酸化窒素の結果や、気象状況なども考慮に入れた解析が必要である。

謝辞 インバース解析に用いたWDCGGのメタン地上観測データは、以下の観測グループによる。F. Apadula, F. Artuso, G. Brailsford, E. J. Dlugokencky, A. J. Gomez-Pelaez, J. Hatakka, D. Heltai, T. Kwasasato, S.-Y. Kim, P. Krummel, R. Langenfelds, A. Lanza, T. Machida, H. Mukai, S. Nichol, S. Piacentino, M. Ramonet, A. di Sarra, M. Sasakawa, P. Steele, K. Uhse, R. Wang, D. WorthyおよびJ.-A. Y。また、NIES-TMならびにGELCAモデルを用いた数値計算にはGOSAT Research Computation Facility (RCF) を用いた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマでは、国立環境研究所地球環境研究センターが実施している大気モニタリングから得られた高精度メタン濃度データに加え、GOSAT衛星から得られた全球メタン濃度データを最大限に活用し、全球の領域毎のメタンフラックスの推定する手法を開発した。その結果、地球全体で見るとメタン放出量の多い地域が複数分布しており、それらの地域は人口密度の高い地域とおよそ一致していること、東南アジア・南アジア域や、南米及びアフリカの南亜熱帯地域のメタンの放出が特に多いことがわかった。地上観測ネットワークデータのみを用いたフラックス推定値と比べ、GOSAT観測データを加えることで、熱帯域(南アメリカ、アフリカ、東南アジア)で不確実性が大幅に低減したとともに、フラックス推定値が増加した。GOSATは我が国が打ち上げた世界で唯一の温室効果ガス観測に特化した衛星であり、GOSATのメタンデータを最大限利用して成果を出したことで、世界の気候変動研究への我が国の貢献を示すことができた。

これまでの大気メタンの観測網は海洋などバックグラウンド地域に限定されており、内陸部における現地測定データの取得はきわめて貴重なものである。国立環境研究所が継続して実施してきたシベリアでの観測に加え、水田からのメタン放出量が極めて大きい北インド内陸部における観測データの取得に道筋がつけられたことは、今後の大気メタン研究の発展に大きな貢献が期待できる。細かい時空間スケールのメタン濃度変動を解析することが可能な大気結合モデルを用いてインバース解析を行った結果、北インド・ナイニタールのメタン濃度観測データが南アジア地域のメタンフラックス推定に大きな影響を与えることが明らかになった。この結果から、メタンフラックス推定の精緻化には、北インドにおける大気の大気直接観測が非常に有効であることが示された。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

本サブテーマで得られたGOSATの観測データを用いた全球の月別メタン収支の推定結果は、環境省が国立環境研究所とJAXAと共同で行った報道発表に使用された(2014年3月27日)。これにより、環境省が力を入れて推進してきたGOSATプロジェクトの成果を国民に還元することにつながった。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマで開発したGOSATの観測データを用いたメタン収支の推定手法は、改良を続けながら今後もGOSAT L4メタンプロダクトの作成に使用されるため、GOSAT L4メタンデータを利用する全ての環境政策には必須のツールとなる。

## 6. 国際共同研究等の状況

### 1) シベリア上空における温室効果ガスの航空機モニタリング

カウンターパート: Institute of Atmospheric Optics, Permafrost Institute, Institute of Microbiology (ロシア)

参加・連携状況: 航空機を用いたシベリア3地点(スルグート、ヤクーツク、ノボシビルスク)の上空での大気サンプリングの実施、共同論文の発表など

### 2) Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network

カウンターパート: Institute of Atmospheric Optics, Permafrost Institute, Institute of Microbiology (ロシア)

参加・連携状況: シベリア9地点におけるタワーを用いた二酸化炭素とメタンの連続観測の実施、共同論文の発表など

### 3) アジア太平洋域における大気サンプリング

カウンターパート: Malaysian Meteorological Department (マレーシア), Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (中国), Institute of Atmospheric Composition, China Meteorological Administration (中国), Aryabhata Research Institute of Observational Sciences (インド), Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmosphere Administration (米国)

参加・連携状況: ダナンバレー(マレーシア)、貴陽(中国)、ナイニタール(インド)、マウナロア(ハワイ)における大気サンプリングの実施、観測結果の相互比較(マウナロア)、共同論文の発表など

### 4) シベリアにおけるメタンフラックス現地調査

カウンターパート: Institute of Atmospheric Optics, Moscow State University, Yugorsky State University, Central Aerological Observatory (ロシア)

参加・連携状況: シベリアにおけるメタンフラックスの共同観測、研究打ち合わせ、共同論文の発表など

### 5) The Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project (TransCom) 大気輸送モデル国際比較プロジェクト

カウンターパート: 世界各国、多数

参加・連携状況: シミュレーション結果を提出し比較、年会に参加・発表、共同論文の発表など

6) インドにおける大気サンプリング

カウンターパート: International Rice Research Institute (フィリピン), Central Soil Salinity Research Institute, University of Delhi (インド)

参加・連携状況: 北インドで新規に大気サンプリングを実施

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) N. Saitoh, M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa: SOLA, 8, 145-149 (2012) “Comparisons between XCH<sub>4</sub> from GOSAT Shortwave and Thermal Infrared Spectra and Aircraft CH<sub>4</sub> Measurements over Guam”
- 2) O.A. Krasnov, S. Maksyutov, M.V. Glagolev, M.Yu. Kataev, G. Inoue, A.I. Nadeev, V.D. Shelevoi : Optics of the atmosphere and ocean, Vol. 26, No. 12, 1090–1097. (in Russian) (2013) “Automated system «Flux-NIES» for monitoring methane and carbon dioxide fluxes”
- 3) S. E. Belova, I. Yu. Oshkin, M. V. Glagolev, E. D. Lapshina, Sh. Sh. Maksyutov, S. N. Dedysh: Microbiology, Vol. 82, No. 6, 731–738, DOI: 10.1134/S0026261713060040 (2013) “Methanotrophic Bacteria in Cold Seeps of the Floodplains of Northern Rivers”
- 4) A. F. Sabrekov, M. V. Glagolev, I. E. Kleptsova, T. Machida, S. S. Maksyutov : Eurasian Soil Science, Vol. 46, No. 12, 1182–1193, DOI: 10.1134/S1064229314010098 (2013) “Methane Emission from Bog Complexes of the West Siberian Taiga”
- 5) R. Saito, P. K. Patra, C. Sweeney, T. Machida, M. Krol, S. Houweling, P. Bousquet, A. Agusti-Panareda, D. Belikov, D. Bergmann, H. S. Bian, P. Cameron-Smith, M. P. Chipperfield, A. Fortems-Cheiney, A. Fraser, L. V. Gatti, E. Gloor, P. Hess, S. R. Kawa, R. M. Law, R. Locatelli, Z. Loh, S. Maksyutov, L. Meng, J. B. Miller, P. I. Palmer, R. G. Prinn, M. Rigby and C. Wilson : J. Geophys. Res., 118, 3891–3904, doi:10.1002/jgrd.50380 (2013) “TransCom model simulations of methane: comparison of vertical profiles with aircraft measurements”
- 6) T. J. Bohn, E. Podest, R. Schroeder, N. Pinto, K. C. McDonald, M. Glagolev, I. Filippov, S. Maksyutov, M. Heimann, X. Chen and D. P. Lettenmaier : Biogeosciences, 10, 6559-6576, doi:10.5194/bg-10-6559-2013 (2013) “Modelling the large-scale effects of surface moisture heterogeneity on wetland carbon fluxes in the West Siberian Lowland”
- 7) A.F. Sabrekov, B. Runkle, M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, T. Machida, S.S. Maksyutov : ERL, 9 (4), 045008 (2014) “Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH<sub>4</sub> flux upscaling”
- 8) T. J. Bohn, J. R. Melton, A. Ito, T. Kleinen, R. Spahni, B. D. Stocker, B. Zhang, X. Zhu, R. Schroeder, M. V. Glagolev, S. Maksyutov, V. Brovkin, G. Chen, S. N. Denisov, A. V. Eliseev, A. Gallego-Sala, K. C. McDonald, M. A. Rawlins, W. J. Riley, Z. M. Subin, H. Tian, Q. Zhuang and J. O. Kaplan : Biogeosciences Discuss., 12, 1907-1973, doi:10.5194/bgd-12-1907-2015 (2015)

“WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia”

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) N. Saitoh, M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa : The 8<sup>th</sup> International Workshop of Greenhouse Gas Measurements from Space, USA, 2012 “Simultaneous observations of column abundances and profiles of CH<sub>4</sub> by GOSAT: Validation of GOSAT CH<sub>4</sub> products using aircraft measurements over Guam”
- 2) X. Xiong, N. Saitoh, C. Barnet, E. Maddy, S. Hayashida, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, and T.S.Pagano : The 4th GOSAT RA PI Meeting, California Institute of Technology (Caltech), USA, 2012“Comparison of CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT TANSO TIR, AIRS and aircraft measurements”
- 3) 林田佐智子、齋藤尚子、犬伏和之、寺尾有希夫、Shamil Maksyutov、町田敏暢、笹川基樹、杉田考史、横田達也、向井人史：日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学(2012)「GOSAT データなどを用いた全球メタン発生領域の特性抽出と定量化 ～環境省推進費プロジェクトの紹介と進捗状況報告(第一報)～」
- 4) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子：日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学（2012）「衛星からの熱赤外域天底測定によるメタン導出のための気温・水蒸気高度分布の整備」
- 5) 齋藤尚子、今須良一、杉田考史、林田佐智子、塩見慶：日本気象学会2012年度秋季大会、北海道大学（2012）「GOSAT/TANSO-FTS TIRからのメタン濃度高精度導出のための同時推定アルゴリズムの検討」
- 6) 齋藤尚子、今須良一、杉田考史、林田佐智子：第18回大気化学討論会（2012）「GOSAT/TANSO-FTS TIRセンサーからのメタン濃度高精度導出アルゴリズムの検討」
- 7) 林田佐智子、齋藤尚子、犬伏和之、寺尾有希夫、Shamil Maksyutov、町田敏暢、笹川基樹、杉田考史、横田達也、向井人史、野原精一：第18回大気化学討論会（2012）「全球メタン発生領域の特性抽出と定量化へのアプローチ～環境省環境研究総合推進費プロジェクトの紹介～」
- 8) N. Saitoh, R. Imasu, T. Sugita, S. Hayashida, K. Shiomi : AGU Fall Meeting, USA, 2012 “Algorithm improvement toward better retrieval of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> profiles from GOSAT/TANSO-FTS thermal infrared spectra”
- 9) S. Hayashida, A. Ono, S. Ishikawa, Y. Terao, W. Takeuchi : AGU Fall Meeting, USA, 2012 “Comparison of atmospheric CH<sub>4</sub> concentration observed by GOSAT and in-situ measurements in Thailand and India”
- 10) Y. Terao, H.-S. Kim, H. Mukai, Y. Nojiri, T. Machida, Y. Tohjima, T. Saeki, And S. Maksyutov: AGU Fall Meeting, USA, 2012 “Trends, interannual variability, and seasonal cycle of atmospheric methane over the western Pacific observed using voluntary observing ships”
- 11) H.-S. Kim, T. Machida, M. Sasakawa, D. Belikov, T. Saeki, A. Ito, and S. Maksyutov : AGU Fall Meeting, USA, 2012 “Recent variation of Siberian CH<sub>4</sub> fluxes estimated from atmospheric

observations of CH<sub>4</sub>”

- 12) S. Maksyutov, H. -S. Kim, T. Saeki, D. A. Belikov, A. Ito, I. Morino, Y. Yoshida, T. Yokota, and the WDCGG Team : Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-3796, 2013 “Regional CH<sub>4</sub> flux estimates based on GOSAT and ground-based observations”
- 13) I. Kleptsova, M. Glagolev, S. Maksyutov: Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-630, 2013 “Wetland classification based on Landsat and its application for methane emission inventory of West Siberian taiga zone”
- 14) S. Maksyutov, O. Krasnov, V. Shelevoi, A. Nadeev, and M. Glagolev : Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-3779, 2013 “Observations of wetland methane fluxes in West Siberia with automated chamber system”
- 15) 山本めぐみ、林田佐智子、町田敏暢 : 日本気象学会2013年度春季大会, 2013 「GOSAT衛星と航空機で観測されるシベリア域大気中メタン濃度の比較解析」
- 16) M. Yamamoto, S. Hayashida, A. Ono, T. Machida, and T. Sugita : 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Yokohama, 2013 “Comparison of GOSAT XCH<sub>4</sub> and airborne measurements over Siberia”
- 17) H. -S. Kim, S. Maksyutov, T. Saeki, D. A. Belikov, A. Ito, Y. Yoshida, T. Yokota, M. Sasakawa, T. Machida, and the WDCGG data contributors : 9th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, Yokohama, 2013 “Regional CH<sub>4</sub> flux estimates based on GOSAT SWIR L2 and ground-based observations”
- 18) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子 : 日本地球惑星科学連合2013年大会 (2013) 「メタン高度分布比較のための衛星および航空機観測と同期したGPS掩蔽測定による気温高度分布の整備」
- 19) 町田敏暢、笹川基樹、M. Arshinov、B. Belan、S. Mitin、S. Maksyutov、松枝秀和、澤庸介、佐伯田鶴 : 第19回大気化学討論会(2013) 「航空機を利用したシベリア上空の温室効果ガスの長期観測」
- 20) 齋藤尚子、木本周平、杉村亮、今須良一、杉田考史、林田佐智子、塩見慶、川上修司、町田敏暢、松枝秀和、澤庸介 : 第19回大気化学討論会(2013) 「GOSAT/TANSO-FTS TIR CO<sub>2</sub> および CH<sub>4</sub> リトリーバルアルゴリズムの改良について」
- 21) 齋藤尚子、今須良一、杉田考史、林田佐智子、塩見慶、川上修司、町田敏暢、松枝秀和、澤庸介 : 日本気象学会2013年度秋季大会(2013) 「改良版アルゴリズムによる GOSAT/TANSO-FTS TIR CO<sub>2</sub> および CH<sub>4</sub> リトリーバル」
- 22) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子 : 日本気象学会2013年度秋季大会(2013) 「シベリア上空の気温・水蒸気高度分布の比較」
- 23) M. Ishizawa, T. Shirai, M. Inoue, I. Morino, Y. Yoshida, H. Takagi, D. Belikov, M. Saito, T. Yokota, S. Maksyutov : AGU Fall Meeting, 2013 “Application of bias corrections to NIES GOSAT XCO<sub>2</sub> for estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes, 2009-2011”
- 24) S. Maksyutov, V. Sedykh, I. Kleptsova, A. Frolov, A. Silaev, E. Kuzmenko, N. Kuzmik, V. A. Sokolov, A. Fedorov, S. Nikolaeva: AGU Fall Meeting, 2013 “Mapping forest succession types in Siberia with Landsat data”

- 25) N. Saitoh, R. Imasu, T. Sugita, S. Hayashida, K. Shiomi, S. Kawakami, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, Y. Terao : AGU Fall Meeting, 2013 “New products of GOSAT/TANSO-FTS TIR CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> profiles: Algorithm and initial validation results.”
- 26) M. Glagolev, A. Sabrekov, I. Kleptsova, S. Maksyutov, P. Barsukov, V. Bashkin : ISAR-3 conference, Tokyo, 2013 “Contribution of palsa to methane emission from West Siberian tundra”
- 27) M. Ishizawa, T. Shirai, M. Inoue, I. Morino, Y. Yoshida, K. Mabuchi, R. Zhuravlev, A. Ganshin, D. Belikov, M. Saito, T. Oda, V. Valsala, O. Uchino, T. Yokota and S. Maksyutov : IWGGMS-10, The Netherlands, 2014 “Impact of Retrieval Biases of GOSAT XCO<sub>2</sub> on the Surface CO<sub>2</sub> Flux Estimates”
- 28) C. Iwasaki, S. Hayashida, A. Butz, T. Machida : Asia Oceania Geoscience Society 2014, Sapporo, 2014 “Validation of GOSAT SWIR xCH<sub>4</sub> using TCCON and Airborne Measurement”
- 29) Y. Terao, S. Nomura, H. Mukai, T. Machida, S. Sharma, S. Hayashida, K. Inubushi, M. Naja, and P. Patra : Asia Oceania Geoscience Society 2014, Sapporo, 2014 “Observations of atmospheric methane concentrations over rice paddies at Karnal, India: Comparison with Nainital, India and Comilla, Bangladesh”
- 30) Y. Terao : Remote Sensing of Earth's Atmosphere, University of Delhi, New Delhi, 2014. “Atmospheric methane concentrations observed by NIES greenhouse gas monitoring network”
- 31) M. Ishizawa, K. Mabuchi, T. Shirai, M. Inoue, I. Morino, Y. Yoshida, R. Zhuravlev, A. Ganshin, D. Belikov, M. Saito, T. Oda, V. Valsala, O. Uchino, T. Yokota and S. Maksyutov : 日本気象学会2014年度秋季大会, (2014) “Inter-annual variability in CO<sub>2</sub> exchange in Northern Eurasia inferred from GOSAT-XCO<sub>2</sub>”
- 32) 齋藤尚子、木本周平、杉村亮、今須良一、川上修司、塩見慶、杉田考史、町田敏暢、松枝秀和、澤庸介 : 日本気象学会2014年度秋季大会, (2014) 「GOSAT/TANSO-FTS TIRバンドの新バージョンCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>プロダクトのデータ質について」
- 33) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子、町田敏暢 : 日本気象学会2014年度秋季大会(2014) 「西シベリア上空の水蒸気・気温・メタン高度分布の比較」
- 34) 笹川基樹, 町田敏暢, 伊藤昭彦, Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Patra P., K. Ishijima : 第20回大気化学討論会, 講演要旨集 p83 (2014) “Long-term variations of atmospheric CH<sub>4</sub> concentration over Siberia derived from aircraft and tower measurements”
- 35) Sasakawa M., Machida T., Ito A., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N., Nesterova M., Galanin A., Patra P., Ishijima K. : 7th International Symposium on Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases (NCGG7), 2014 “Long-term variations of atmospheric CH<sub>4</sub> concentration over Siberia derived from aircraft and tower measurements.”
- 36) Y. Terao, M. Ishizawa, H. Mukai, M. Naja, S. Nomura, T. Machida, R. Zhuravlev, A. Ganshin, S. Maksyutov : AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, (2014) “Investigation of methane flux in South Asia using atmospheric measurements at Nainital, India and global Eulerian-Lagrangian coupled atmospheric model”
- 37) S. Maksyutov, H. Takagi, H-S Kim, M. Saito, K. Mabuchi, T. Matsunaga, A. Ito, D. Belikov, T. Oda, V. Valsala, I. Morino, Y. Yoshida, T. Yokota: EGU General Assembly, 2014 “Interannual

variability of the regional CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes estimated with GOSAT observations”

- 38) Maksyutov, S. H. Takagi, H-S Kim, M. Saito, K. Mabuchi, T. Matsunaga, A. Ito, D. Belikov, T. Oda, V.Valsala, I. Morino, Y. Yoshida, T. Yokota: IWGGMS-10, Noordwik, 2014 Interannual Variability of the Regional CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Fluxes Estimated with GOSAT Observations
- 39) 秀森丈寛, 川崎昌博, 中山智喜, 松見豊, 笹子宏史, 寺尾有希夫, 野村渉平, 町田敏暢, 竹内渉, 安立美奈子, 今須良一, Dhaka S.K. (2014) オープンパスレーザー分光ガス検出器を用いた大気メタン濃度連続計測システムの開発～2014年夏季名古屋及びインドでの試験観測～. 第20回大気化学討論会
- 40) 秀森丈寛, 川崎昌博, 中山智喜, 松見豊, 笹子宏史, 寺尾有希夫, 野村渉平, 町田敏暢, 竹内渉, 安立美奈子, 今須良一, Dhaka S.K., Singh J., 高橋けんし (2014) インド水田地帯におけるレーザーメタン計による大気メタン連続観測～人工衛星データの検証を目指して～. 第23回生研フォーラム「宇宙からの地球環境・災害のモニタリングとリスク評価」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国立環境研究所科学技術週間に伴う一般公開「春の環境講座」(2012年4月21日、2013年4月20日、2014年4月19日、参加人数各500人程度)にて成果紹介
- 2) 国立環境研究所「夏の大公開」(2012年7月21日、2013年7月20日、2014年7月19日、参加人数各4200人程度)にて成果紹介
- 3) 「大気中のメタンの発生をさぐる」奈良女子大学理学部公開講座「地球温暖化研究の最前線を語る」にて講演(2012年11月29日、奈良女子大学記念館、観客50名)

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 報道発表『「いぶき」(GOSAT)の観測データを用いた世界の月別メタン収支の推定結果について』国立環境研究所・環境省・JAXA(2014年3月27日)

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Terao, Y., H. Mukai, Y. Nojiri, T. Machida, Y. Tohjima, T. Saeki, and S. Maksyutov (2011), Interannual variability and trends in atmospheric methane over the western Pacific from 1994 to 2010, *J. Geophys. Res.*, **116**, D14303, doi:10.1029/2010JD015467.
- 2) Bruhwiler, L.M.P., A.M. Michalak, W. Peters, D.F. Baker, and P. Tans (2005), An improved Kalman Smoother from atmospheric inversions, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 2691-2702.
- 3) Maksyutov, M., H. Takagi, V. K. Valsala, M. Saito, T. Oda, T. Saeki, D. A. Belikov, R. Saito, A. Ito, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, R. J. Andres, and T. Yokota (2013), Regional CO<sub>2</sub> flux estimates

- for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO<sub>2</sub> observations, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9351-9373.
- 4) 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 CO<sub>2</sub> measurements, *J. Geophys. Res.*, **118**, 1100-1122, doi:10.1002/jgrd.50127.
  - 5) van der Werf, G.R., J.T. Randerson, L. Giglio, G.J. Collatz, M. Mu, P.S. Kashibhatla, D.C. Morton, R.S. DeFries, Y. Jin, and T.T. van Leeuwen (2010), *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 11707-11735.
  - 6) Ito, A., and M. Inatomi (2012), Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty, *Biogeosciences*, **9**, 759-773.
  - 7) Fung, I., J. John, J. Lerner, E. Matthews, M. Prather, L.P. Steele, and P.J. Fraser (1991), Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle, *J. Geophys. Res.*, **96**, D7, 13033-13065.
  - 8) Giglio, L., J.T. Randerson and G. R. van der Werf (2013), Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4), *Biogeosciences*, **118**, 317-328.
  - 9) Yoshida, Y., N. Kikuchi, I. Morino, O. Uchino, S. Oshchepkov, A. Bril, T. Saeki, N. Schutgens, G.C. Toon, D. Wunchi, C.M. Roehl, P.O. Wennberg, D.W.T. Griffith, N.M. Deutscher, T. Warneke, J. Notholt, J. Robinson, V. Sherlock, B. Connor, M. Rettinger, R. Sussmann, P. Ahonen, P. Hikkinen, E. Kyro, and T. Yokota (2013), Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR X<sub>CO2</sub> and X<sub>CH4</sub> and their validation using TCCON data, *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 1533-1547.
  - 10) Bergamaschi, P., C. Frankenberg, J.F. Meirink, M. Krol, F. Dentener, T. Wagner, U. Platt, J.O. Kaplan, S. Korner, N. Heimann, E.J. Dlugokencky, and A. Goede (2007), Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations, *J. Geophys. Res.*, **112**, D02304, doi:10.11029/2006JD007268.
  - 11) Bergamaschi, P., C. Frankenberg, J.F. Meirink, M. Krol, M.G. Villani, S. Houweling, F. Dentener, E.J. Dlugokencky, J.B. Miller, L.V. Gatti, A. Engel, and I. Levin (2009), Inverse modeling of global and regional CH<sub>4</sub> emissions using SCIAMACHY satellite retrievals, *J. Geophys. Res.*, **114**, D22301, doi:10.11029/2009JD012287.
  - 12) Belikov, D.A., S. Maksyutov, V. Sherlock, S. Aoki, N.M. Deutscher, S. Dohe, D. Griffith, E. Kyro, I. Morino, T. Nakazawa, J. Notholt, M. Rettinger, M. Schneider, R. Sussmann, G.C. Toon, P.O. Wennberg, and D. Wunch (2013), Simulations of column-averaged CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> using the NIES TM with a hybrid sigma-isentropic ( $\sigma$ - $\theta$ ) vertical coordinate, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 1713-1732.
  - 13) Patra, P.K., S. Howeling, M. Krol, P. Bousquet, D. Belikov, D. Bergmann, H. Bian, P. Cameron-Smith, M.P. Chipperfield, K. Corbin, A. Fortems-Cheiney, A. Fraser, E. Gloor, P. Hess, A. Ito, S.R. Kawa, R.M. Law, Z. Loh, S. Maksyutov, L. Meng, P.I. Palmer, R.G. Prinn, M. Rigby, R. Saito, and C. Wilson (2011), TransCom model simulations of CH<sub>4</sub> and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with CH<sub>4</sub> variability in the troposphere and lower stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 12813-12837.

- 14) Saitoh, N., M. Touno, S. Hayashida, R. Imasu, K. Shiomi, T. Yokota, Y. Yoshida, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa (2012), Comparisons between XCH<sub>4</sub> from GOSAT Shortwave and Thermal Infrared Spectra and Aircraft CH<sub>4</sub> Measurements over Guam, *SOLA*, 8, 145-149.
- 15) Krasnov, O.A., S. Maksyutov, M.V. Glagolev, M.Yu. Kataev, G. Inoue, A.I. Nadeev, V.D. Shelevoi (2013), Automated system «Flux-NIES» for monitoring methane and carbon dioxide fluxes, *Optics of the atmosphere and ocean*, Vol. 26, No. 12, 1090–1097. (in Russian)
- 16) Belova, S. E., I. Yu. Oshkin, M. V. Glagolev, E. D. Lapshina, Sh. Sh. Maksyutov, S. N. Dedysh (2013), Methanotrophic Bacteria in Cold Seeps of the Floodplains of Northern Rivers, *Microbiology*, Vol. 82, No. 6, 731–738, DOI: 10.1134/S0026261713060040.
- 17) Sabrekov, A. F., M. V. Glagolev, I. E. Kleptsova, T. Machida, S. S. Maksyutov (2013), Methane Emission from Bog Complexes of the West Siberian Taiga, *Eurasian Soil Science*, Vol. 46, No. 12, 1182–1193, DOI: 10.1134/S1064229314010098.
- 18) Bohn, T. J., E. Podest, R. Schroeder, N. Pinto, K. C. McDonald, M. Glagolev, I. Filippov, S. Maksyutov, M. Heimann, X. Chen and D. P. Lettenmaier (2013), Modelling the large-scale effects of surface moisture heterogeneity on wetland carbon fluxes in the West Siberian Lowland, *Biogeosciences*, 10, 6559-6576, doi:10.5194/bg-10-6559-2013.
- 19) Sabrekov A.F., B. Runkle, M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, T. Machida, S.S. Maksyutov (2014), Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH<sub>4</sub> flux upscaling, *ERL*, 9 (4), 045008.
- 20) Alexe, M., P. P. Bergamaschi, A. Segers, R. Detmers, A. Butz, O. Hasekamp, S. Guerlet, R. Parker, H. Boesch, C. Frankenberg, R. A. Scheepmaker, E. Dlugokencky, C. Sweeney, S. C. Wofsy, and E. A. Kort (2015), Inverse modelling of CH<sub>4</sub> emissions for 2010–2011 using different satellite retrieval products from GOSAT and SCIAMACHY, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 113-133.
- 21) Fraser, A., P. I. Palmer, L. Feng, H. Boesch, A. Cogan, R. Parker, E. J. Dlugokencky, P. J. Fraser, P. B. Krummel, R. L. Langenfelds, S. O’Doherty, R. G. Prinn, L. P. Steele, M. van der Schoot, and R. F. Weiss (2013), Estimating regional methane surface fluxes: the relative importance of surface and GOSAT mole fraction measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 5697-5713.
- 22) Anthes, R. A., D. Ector, D. C. Hunt, Y-H. Kuo, C. Rocken, W. S. Schreiner, S. V. Sokolovskiy, S. Syndergaard, T-K. Wee, Z. Zeng, P. A. Bernhardt, K. F. Dymond, Y. Chen, H. Liu, K. Manning, W. J. Randel, K. E. Trenberth, L. Cucurull, S. B. Healy, S-P. Ho, C. McCormick, T. K. Meehan, D. C. Thompson, and N. L. Yen (2008), The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results., *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 313-333.

## **Characterization and quantification of global methane emissions using GOSAT and in situ measurements**

Principal Investigator: Sachiko HAYASHIDA

Institution: Faculty of Science, Nara Women's University  
Kitauoya Nishimachi, Nara, 630-0586, JAPAN  
Tel: +81-742-20-3440 / Fax: +81-742-20-3440  
E-mail: sachiko@ics.nara-wu.ac.jp

Cooperated by: Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University  
Graduate School of Horticulture, Faculty of Horticulture, Chiba  
University  
National Institute for Environmental Studies (NIES)

[Abstract]

Key Words: GOSAT, Methan, Global warming, Inverse analysis, Budget estimate, Siberia, Asia, Flux, In situ measurements, airborne measurements

The Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) was launched in January 2009 for global observation of greenhouse gases, including carbon dioxide and methane. Since then, atmospheric methane data have been successfully accumulated for more than five years. The Center for Global Environmental Research/National Institute for Environmental Studies (CGER/NIES) has also accumulated in situ measurements of methane at ground-based sites and using airborne and shipborne instruments across Asia, Siberia, and the West Pacific for many years. With these resources available, we began the present project to characterize methane source regions and estimate regional methane emissions fluxes to quantitatively estimate the global methane budget.

As part of this project, we developed an algorithm to retrieve vertical methane profiles from the thermal infrared (TIR) band of GOSAT that were sufficiently precise to support scientific analysis. The TIR methane product retrieved by the current version of the algorithm (TIR/V01.0x) has been released to the public. We conducted validation studies to assure sufficient reliability of both the GOSAT/SWIR column-averaged mixing ratio for methane ( $XCH_4$ ) retrieved by NIES (V02.2x) and the GOSAT/TIR methane product described above for use in the study.

After these validation studies, we used the GOSAT  $XCH_4$  data with additional ground-based measurements to estimate regional  $CH_4$  fluxes by applying an inverse

system taking into account the latitudinal and seasonal dependence of the GOSAT data. By incorporating the GOSAT measurements into the inverse analysis, uncertainties in the methane flux estimates have been significantly reduced for temperate Asia and tropical regions where ground-based measurement sites are sparse.

For comparison with the estimated methane fluxes, we also conducted flux measurements in certain source regions in Asia and Siberia. For example, rice paddy fields are important sources of atmospheric methane that are widely distributed in monsoon Asia. To understand the mechanisms of variations in methane emissions, we investigated paddy fields in northern India and southern Vietnam.

To further improve our understanding of methane source regions and quantitative methane fluxes, pioneering work is needed to conduct in situ measurements in “blank zones” of atmospheric measurement. To this end, we have performed weekly air sampling at Karnal (from August 2013 to September 2014) and Sonapat (September 2014 to present), Haryana, India. Our preliminary analysis suggests increased methane concentrations in the winter rather than in the summer, inconsistent with the summer maximum expected based on existing bottom-up inventories. Continuation of such methane monitoring may bring new insights.