

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

GOSAT等を応用した南アジア域におけるメタンの放出量推定の精緻化と削減 手法の評価 (2-1502)

平成27年度～平成29年度

Improvement of Methane Emission Estimate from South Asia using GOSAT and Development of an Emission
Mitigation Proposal

※英文タイトルは、環境省の承認を得ている表現とすること。

(英文パンフレット等http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/english/gaiyou/pdf/2017_pamphlet_eng.pdf)

＜研究代表機関＞
奈良女子大学

＜研究分担機関＞
国立研究開発法人 国立環境研究所
国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
千葉大学
東京学芸大学
国立研究開発法人 海洋研究開発機構

平成30年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-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 （国立大学法人 奈良女子大学） 要旨	14
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 南アジアを中心とした大気メタン濃度計測 （国立研究開発法人 国立環境研究所） 要旨	34
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 メタン発生緩和策のオプション検討 （国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構） 要旨	50
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-4 南アジア域におけるメタンフラックスの測定 67

(国立大学法人 千葉大学)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-5 レーザー分光手法によるメタンの連続観測 84

(国立大学法人 東京学芸大学)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-6 インバース解析によるアジアからのメタン発生量の推定と削減策の評

価 100

(国立研究開発法人 海洋研究開発機構)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

III. 英文Abstract

• • • • • 118

I. 成果の概要

課題名 2-1502 GOSAT等を応用した南アジア域におけるメタンの放出量推定の精緻化と削減手法の評価

課題代表者名 林田佐智子 (国立大学法人 奈良女子大学 研究院自然科学系 教授)

研究実施期間 平成27～29年度

累計予算額 120,773千円(うち平成29年度:36,813千円)

予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 地球温暖化、リモートセンシング、物質循環、環境動態解析、メタン、GOSAT、環境計測、インバース解析、放出量(発生量・排出量)推定

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(国立大学法人奈良女子大学)
- (2) 南アジアを中心とした大気メタン濃度計測(国立研究開発法人 国立環境研究所)
- (3) メタン発生緩和策のオプション検討(国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構)
- (4) 南アジア域におけるメタンフラックスの測定(国立大学法人 千葉大学)
- (5) レーザー分光手法によるメタンの連続観測(国立大学法人 東京学芸大学)
- (6) インバース解析によるアジアからのメタン発生量の推定と削減策の評価(国立研究開発法人 海洋研究開発機構)

1. はじめに(研究背景等)

大気メタン(CH_4)は二酸化炭素に次ぐ第二位の温室効果ガスであり、その放出量の正確な推定と削減手法の確立は科学的にも行政的にも急務の課題である。これまで南アジア域がメタンの大放出地であることはすでに把握され、インドでは2007年に水田から70メガトン(等価 CO_2 換算)が、さらに農業セクター全体で334メガトン(同)の温室効果ガスが放出されていると報告されている。しかし、メタン放出源のほとんどがメタン菌によるなどの生物由来であることから、放出量推定には未だ非常に不確定性が大きい。

近年では大気の濃度分布を測定し、大気輸送モデルから放出量を逆推定(インバース解析)するトップダウンアプローチの手法が発達しつつある。国際的には温室効果気体の削減が重要な環境政策とされる中、我が国では世界に先駆けて環境省が中心になり、温室効果ガス観測技術衛星(Greenhouse gases Observing SATellite: GOSAT: 和名いぶき)を打ち上げ、現在まで9年間にわたってメタン観測データを蓄積してきた。しかし、現在公表されているGOSATの短波長赤外チャンネルから得られたデータは気柱平均量である上、観測点もまばらであることから、使用する大気輸送モデルやデータによって大きく結果が異なっているのが現状である。

一方で、メタン放出量削減のための技術開発が活発に行われ、途上国への技術移転も計画されている。現在では、有機物と水の管理あるいは田畑転換などの管理技術によって放出緩和のメカニズムが解明されつつある。将来的には、日本の技術を発展途上国に移転することによって、日本の排出権の確保にも繋がると期待される。しかし、南アジアで実際にメタン放出量の実験的研究は行われておらず、実現可能性は実証されていない。さらに上に述べた様に、南アジアからの放出量推定そのものに大きな不確定性があり、削減策の実効性は期待されるものの、全く評価の段階に至っていないのが実情であった。

このような背景のもと、本プロジェクトでは、メタン放出量が多いにも関わらず観測の空白域であった南アジア(インド・バングラデシュ)を研究の対象地域として、メタン放出量推定の精緻化のために必要な方策を検討すると共に、メタン削減手法の様々なオプションに対して総合的に評価することを目的として研究を遂行した。サブテーマ1・2・5は衛星観測および現地観測での大気メタン濃度データの収集を行い、サブテーマ3・4は水田耕作

からのメタン削減の実地検証のための実験とフラックス観測を行った。サブテーマ6は最先端の大気化学輸送モデルに基づくインバースシステムを開発し、他サブテーマから提供されるデータや最新情報に基づいて、南アジア域からのメタンの放出量推定の改良を目指した。本プロジェクトでは、メンバー全員が緊密に連携して研究を遂行してきた。インドやバングラデシュにおけるフィールド観測では全員が交代で作業に当たり、分担してデータを分析して共著論文として成果を発表するなど、協働体制で研究を実施してきた。そのため、サブテーマ毎の成果は完全に分離されたものではないことにご注意いただきたい。

本プロジェクトの第一の目標は、大気メタンの観測値を使ったインバース解析によってメタン放出量推定の改善を目指すことであった。第二の目標は、南アジアで盛んな稲作からのメタン放出量を低減させるための具体的な緩和策を立案し、実証することであった。最終的には緩和策が実施された際に、大気観測やモデルを使って検知できるかどうかを評価するという高い目標を掲げた。

第一の目標の達成のために、GOSAT(短波長赤外)で観測されるメタンデータの有効活用を検討することは中心課題の一つであった。研究開始時点では、GOSATから得られるメタン観測データを、信頼性の高い大気化学輸送モデルに基づくインバースシステムに投入することによって、南アジア域でのメタン放出量の推定を改善できるものと考えた。しかし、研究を進めるに従い、問題の複雑さが浮き彫りになってきた。GOSATで観測される気柱平均混合比(XCH_4)は観測原理の示す通り、あらゆる高度のメタン分布を積分(平均)した量である。南アジアで観測される XCH_4 の季節変動を調べると、その多くがモンスーン時期に高くなることから、地上からのメタン放出量が雨の多い時期に増加したことを直接反映しているかのように見える。しかし、詳細に調べると、実際には、モンスーン循環による輸送過程によってもたらされる複雑なメタン鉛直分布の変動、特に中部対流圏より上層の大気からの寄与が著しく大きいことがわかった。種々検討の結果、GOSATから提供される XCH_4 データを、現状のモデルシステムに投入してインバース解析を行っても、地上からのメタン放出量の精緻化が困難であることがわかってきた。その時点で使用されていたACTMでは、対流圏上部以上の高度の輸送過程の再現性が十分でないことが問題とされた。特に対流圏の対流強度と成層圏でのブリューワー・ドブソン循環の再現性が不十分であった。これらの問題点を分析し、より適切な力学モデルMIROC4.0に適合した新たなACTMを開発した。MIROC4_ACTMの検証を行った結果、従来のモデルと比べて輸送過程に格段の改善が認められた。さらにGOSAT・ XCH_4 や地上観測値が南アジアからのメタン放出量変動に対する感度があるかどうかの検討を行った。その結果、MIROC4_ACTMを活用すれば、気柱平均量である XCH_4 のデータから、地上メタン発生量の情報を得る可能性が格段に改善できることを示した。

第二の目標とした、稲作からのメタン放出量を低減させるための具体的な緩和策の立案と実証については、サブテーマ2・3・5のメンバーが協力して南インドのタミルナドゥ水稻研究所の圃場において実証実験を行った。水田では、古細菌の一種であるメタン菌が、嫌気条件で土壌中の有機物を分解してメタンを発生させる。稲作期間はイネの茎を通してメタンが大気中に放出されることもよく知られている。稲作によるメタン発生を抑制するためには、常時湛水ではなく、間歇的に水を抜いて好気条件にする水管理が有効とされている。Alternative Wet and Dry (AWD)方式と呼ばれる水管理では湛水と水を抜くことを交互に行う。これによりメタンの発生を抑制すると共に水資源を節約できる。一方で、このような水管理をしながらも、収量は確保することが要求される。このため、実験では、一株あたりの苗数、植栽密度を調整した栽培管理農法System of Rice Intensification (SRI)とその改良型(MSRI)をAWDと組み合わせ導入し、通常の常時湛水管理の農法との比較を行った。その結果、乾季で40%以上、雨季では20%以上のメタン削減に成功した。

この実験結果に基づき、最適農法を南アジアに広く普及させた時の削減ポテンシャルを、インド全域に対する水田分布に基づいてGISを使って計算した。その結果、概ね30%の温室効果気体抑制が可能であることを示すことができた。実験圃場では近接する圃場でメタンフラックスの連続測定や大気メタンの常時監視も行い、実証実験データの解釈を補完した。また、周辺土壌を採集して実験室で培養し、土壌学的見地からメタン発生過程の詳細な基盤的研究成果も得ることができた。

緩和実験の成果と上記の新しいACTMシステムによるインバース解析の検討結果を踏まえれば、ここで示した緩和策を南アジア全域に広く普及させることができた場合、将来の衛星ミッション(GOSAT-2等)で得られるデータを領域毎のメタン放出量の変動検知に活用できる可能性がある。以下の3. 4では研究の方法と結果についてサブテーマ毎に詳しく記す。

2. 研究開発目的

本研究では、メタン放出量が多いにも関わらず観測の空白域である南アジア(インド・バングラデシュ)を研究の対象地域として、メタン放出量推定の精緻化のために必要な方策を検討する共に、メタン削減手法の様々なオプションに対して、観測データと大気輸送モデルを使って総合的に評価することを目的とする。

まず、大気メタン濃度の現地観測を行い、その変動特性を解明すると共に、GOSAT(短波長赤外)で観測されるメタン気柱量情報の有用性を検討する。これらの観測データからインバース解析を行うために必要な、先進的な大気化学輸送モデルとインバースシステムの構築およびその検証を行い、インバースシステムにおけるGOSATメタン気柱量および地上観測データに対する感度を検討する。並行して、南インドの水田耕作地において、稲作からのメタン放出量削減のための具体的方策として、複数の水管理や栽培方策に基づき実証実験を行う。隣接する圃場においてメタンフラックスと大気中メタン濃度の常時監視を行い、水田からのメタン放出量の検討・評価を行う。得られた緩和策実験の結果を、水田分布データと地理情報システムを活用してメタン削減ポテンシャルを求め定量的評価を行う。

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

GOSATの短波長赤外観測から得られた気柱平均混合比(XCH_4)データと、大気化学輸送モデルによるシミュレーションの結果を比較した。インド亜大陸を10の地域に分割し、各地域毎に XCH_4 の変動をサブテーマ6から提供されたACTMから推定されるメタン濃度と関連づけて詳細に調べた。

GOSATデータについては、2011-2014年の期間について国立環境研から公開されている標準プロダクト Version 2.21の-Research Announcement (RAプロダクト)を解析した。南アジアでは南西モンスーンの時期(雨季)には雲が多く、雲判定で観測データが厳しく絞られているため、非常に限られた観測データしか存在しないが本研究では2011-2014年の4年間の観測時期のすべてを網羅することによって、この難点を克服することとした。GOSATデータと比較するモデルシミュレーションは、サブテーマ6でJAMSTECが開発した大気化学輸送モデル(AGCM_ACTM)を用いて行われた。ここではT42 と呼ばれる緯度経度 約 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ の水平分解能、鉛直 σ 座標67層で実行された結果を用いた。モデルシミュレーションでは3次元のメタン濃度が導出されるが、これをGOSATと比較するために気柱量に変換する。その際、全気柱量(XCH_4)と共に大気層をエアマスが同じになるように5層に区切り、部分気柱量を定義した。各層の名称をそれぞれ、下部対流圏(LT)、中部対流圏第一層(MT1)、中部対流圏第二層(MT2)、上部対流圏(UT)と、さらにその上を示す上空(UA)とする。 XCH_4 で観測される季節変動振幅(最大値と最小値の差)に対する各層(部分気柱量)からの寄与の割合を求め、 XCH_4 の変動がどの高度からの寄与で決定されているかを求めた。

さらにGOSATのデータ解析を補強するため、サブテーマ2で取得されたカルナルおよびソーニーパットのメタン測定結果を、気象データ分析や流跡線解析を行って検討した。

(2) 南アジアを中心とした大気メタン濃度計測

南アジアにおける観測の空白域を埋めるために、国立環境研究所地球環境研究センターですでに実施しているヒマラヤ山麓(ナイニタール)およびバングラデシュの水田地帯(コミラ)における大気サンプリングに加え、北インドの水田地帯(ソーニーパット)において、大気サンプリングを行った。この3ヶ所では、各サイトとも屋上に設置したポールの先端に大気採取口を取り付け、そこから大気をポンプで引き、流量を毎分2から3リットルに調整し、 -30°C の冷凍トラップで除湿した後、1.5リットルのガラスフラスコに0.1MPaで加圧充填した。大気試料は、現地協力者により週一回採取され、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。ナイニタールとコミラでは週一回のサンプリング頻度を維持してきたが、ソーニーパットでは現地の事情により、数ヶ月の欠測が数回生じた。また、バッテリーで駆動するモバイルサンプリング装置を開発し、南インドのアウトウライでも大気サンプリングを行った。こうして採取した大気試料のメタン濃度分析は、国立環境研究所のガスクロマトグラフ-水素炎イオン化型検出器(GC-FID)を用いて行い、 ± 2 ppbの精度で、NIES 94 メタンスケールでモル比を決定した。採取された大気試料について、メタンのみでなく、一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO_2)、水素(H_2)、一酸化二窒素

(N_2O)、六フッ化硫黄(SF_6)といった微量成分の分析も行った。

観測された大気メタン濃度データを、本プロジェクトの他サブテーマに対し、逆推定モデルの評価、レーザー分光法を使用した大気中メタン濃度観測の校正、ならびに複合的データ解析のために提供した。

(3)メタン放出緩和策のオプション検討

インド・タミルナドゥ州アドウトウライにあるタミルナドゥ水稲研究所(Tamil Nadu Rice Research Institute、以下略称のTRRIと記載)の実験圃場において、南アジアの現地で普及している水稲品種を用い、常時湛水および、異なる数パターンの節水型の水管理を実施した際の温室効果気体排出量の違いを、現地圃場で計2作の期間について検証した。試験地は、TRRIの実験圃場とした。2カ年の試験の1年目(2016)は、Alternative Wet and Dry (AWD)方式の水管理を実施と、一株あたりの苗数、植栽密度を調整した栽培管理農法System of Rice Intensification (SRI)とその改良型(MSRI)および常時湛水管理の3種の農法比較を行った。2年目(2017)は、異なるAWD管理としてAWD1回区、AWD2回区、全期間AWD区、常時湛水区の4種類の水管理試験区を設定して温室効果気体の発生量を比較した。水田から発生するメタンおよび N_2O を計測するためのガス試料は、クローズドチャンバー法によって行った。チャンバー内の空気を定期的に採取し、メタン および N_2O 濃度をガスクロマトグラフにおいて計測した。

以上の実験について、主な検討のポイントは、(1)AWD水管理の違いによる収量およびGHG排出量への影響、(2)上記水管理下における品種間差のあたえる影響評価(収量とGHG排出量)(3)水管理に苗管理をプラスしたSRI手法の検討の3点である。

実験結果に基づき、このようなAWDないしSRI手法を活用した場合の南アジアにおける温暖化緩和策オプションの検討を行った。既往の成果に基づき、水田の肥培管理に基づく緩和策の実施適地を気候的、地形的情報に基づいて南アジア全域に対して土地利用図(水田)の作成を行った。広域推定に関しては、衛星写真、気象、地形、土地利用等の各地図データならびに統計情報、さらには現地調査による農法を含めた活動量データの収集を行い、空間解像度等を揃えたGISデータとして一元化(基盤整備)することで、IPCCガイドラインにおけるTier1を利用した広域的なメタン排出量が推定できるプラットフォームを整備した。現地での水田からのメタン放出量については、前述のSRI農法等による水管理試験を通じて削減ポテンシャルの実測値を得た。この単位面積あたりのメタン発生量と削減量に基づいて、土地被覆図との関連付けを行い、対象領域(インド全域)の水田からの総発生量を推定した。さらに、年間に当地で実施可能な水田耕作回数(単作、二期作、三期作)等を考慮した、SRIないしAWD手法による広域(インド全域)を対象としたメタン削減ポテンシャルを推定した。

(4)南アジア域におけるメタンフラックスの測定

インド南部の稲の三期作水田とバングラデシュの二期作水田で気象・環境要素を含めたメタンフラックスの総合観測を実施した。メタンフラックスの測定手法には、観測タワーの風上側の平均的なフラックスを30分の時間単位で連続測定できる渦相関法を採用し、測器としてオープンパス型メタン分析計と超音波風速温度計・ $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析計を選択した。インドでは、サブテーマ3が実験を行ったTRRIの隣接圃場を観測場所とし、圃場の一面(長辺 約200 m× 約60 m)をメタンフラックス・気象観測タワーの設置圃場とした。バングラデシュでは既存のフラックス観測サイトであるバングラデシュ農業大学校(Bangladesh Agricultural University、以下略称のBAUと記載)の研究圃場を観測場所とした。メタンフラックスの観測タワーには、気温や日射量、水位、酸化還元電位などの気象・環境要素を測定するセンサも設置した。

メタンフラックスの発生機構を詳細に検討するために、上述のインド・アドウトウライ (TRRI)とタンジャーヴール (Soil and Water Management Research Institute; SWMRI) およびバングラデシュ・BAUの試験水田圃場から採取した土壌サンプルを持ち帰って比較分析した。土壌サンプルの粒径組成、pH、三相分布、電気伝導度(EC)、硝酸態窒素(ヒドラジン還元法)、アンモニア態窒素(ニトロプロシッド法)、全炭素・全窒素(TC・TN;CNコーダー法)、微生物バイオマス態炭素・窒素(MBC・MBN;クロロホルム燻蒸抽出法)、遊離鉄、二価鉄(フェナントロリン法)を定量した。また、現地ガスサンプルから CO_2 、メタン、 N_2O 濃度を測定し、ガスフラックスを算出した。さらにアドウトウライ、タンジャーヴール土壌の湿潤土と風乾土、比較として千葉県水田湿潤土を30℃、暗所で8週間嫌気湛水培養した。その間、1週間毎に培養ビン内部のメタン濃度をGC-ECD法で分析し、また培養4週間後と8週

間後の土壌二価鉄含有量を比色定量した。

(5) レーザー分光手法によるメタンの連続観測

サブテーマ2のような大気サンプリングでは、分析する労力やフラスコの輸送経費を考えると、週一回程度の測定が限度である。しかし、メタンの日変化や季節的な日変化のパターンは不明であり、取得されたデータの時間代表性は保証されていない。簡易な装置で連続測定することによって、サンプリングや衛星観測などの間歇的な観測手法で得られたデータの代表性を保証することが可能である。そこで、LaserMethane®（東京ガスエンジニアリング株式会社・アンリツ株式会社、以後、レーザーメタン計）を用いて、大気メタン濃度を連続測定した。レーザーメタン計は、近赤外レーザー（ $\lambda=1.65\mu\text{m}$ ）を利用したオープンパスのレーザー分光機器であり、主に高濃度のメタン濃度測定のために開発された機器である。そのため、レーザーメタン計による大気メタン濃度の連続測定を行うためには、大気レベルのメタン濃度における補正が必要である。そこでレーザーメタン計の校正用チャンバーと標準ガス（0-10ppmvの範囲で数段階のメタン濃度に調整）、メタン濃度分析の比較対象測器（高精度のメタン分析測器）としてThermo Scientific社のメタンアナライザー（以後、IRI5500）を用いた室内実験を実施した。次に、環境要因（温度、湿度など）がレーザーメタン計に与える影響を明らかにするため、実大気の測定実験を実施した。レーザーメタン計をミラー間距離30m（光路長60m）で屋外に設置し、レーザーメタン計とIRI5500を用いて実大気のメタン濃度を測定した。標準ガスを用いた室内実験と屋外実験の結果から、分子数密度、温度、水蒸気圧の影響を考慮した補正式を求め、補正を実施した。日本国内において野外観測試験を実施した上で、サブテーマ3が実験を行ったTRRIにおける近隣圃場に測定器を設置し、2016年6月から連続測定を開始した。南インドでのメタン連続観測はこれまでに前例のないものである。

(6) インバース解析によるアジアからのメタン放出量の推定と削減策の評価

大気メタンの観測値は地球上のあらゆる箇所からの発生情報を含んでいるが、同時にメタンは移流や対流によって輸送され、大気中での化学反応によって消滅する。そのため、大気メタン濃度からメタン排出量の推定（トップダウンアプローチ）を行うためには、十分な信頼性を持つ大気モデルシステムが不可欠である。サブテーマ6では、まず、気候システム研究センター/国立環境研究所/地球変動研究フロンティア研究センター（CCSR / NIES / FRCGC）の大気大循環モデル（AGCM、バージョン5.7b）に基づいて大気化学輸送モデル（ACTM）を開発した。ここで空間分解能はT42スペクトルトランケーション（約 $2.8\times 2.8^\circ$ ）の水平解像度、および67シグマ-圧力鉛直レベルとした。このAGCM/ACTMを用いてインバースシステムを開発した。インバースモデルの計算では、NOAAの共同世界大気採取ネットワークの37サイトと、2つのJMAサイトからの乾燥大気混合比の大気メタン測定値を使用した。全球を53区画に分割してフラックスの修正量を求めた。構築されたインバースシステムで得られた事後推定値、および対応する大気メタン濃度を地上観測結果およびGOSAT・XCH₄と比較した。またこのモデルで計算された大気メタン混合比データはサブテーマ1に提供され、GOSATのデータと詳細に比較された。

種々検討の結果、従来のモデルには輸送過程（対流圏での対流過程および成層圏のブリュワー・ドブソン循環）に十分な再現性が認められなかったため、その改善を図るべく、大気力学モデルMIROC4.0に適合した新たなACTMを開発した。XCH₄は大気全気柱量に相当することから、上層に存在するメタンの影響を正確に評価する必要があるため、特に成層圏におけるメタンの定量的再現性を観測データとの比較を行って検証した。最後に、MIROC4_ACTMを活用して、地上からのメタン放出フラックスの変化に対する、XCH₄の感度を評価した。

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

GOSATで得られる気柱平均混合比（XCH₄）の変動はメタンの地上からの放出だけで決定されず、アジアモンスーンによって引き起こされる複雑な輸送過程の影響を大きく受けることが示された。南西モンスーンの時期（7月から9月）にインドガンジス平原（IGP）で観測されるXCH₄の最大値と最小値の差（季節変動振幅）はその原因の60%が600hPa以上の上空にあり、600hPa以下の低高度の寄与は40%程度であった。さらに半乾燥地でメタンの放出が極めて低いと推定される半乾燥領域上空では、88%が上部対流圏からの寄与であることが明らかになった。この理由は、強いメタン放出領域であるIGPから、南西モンスーン期間中に、メタンを豊富に含む空気塊が強

い対流活動によって上空に持ち上げられ、さらに200hPa近くの上部対流圏の高気圧性の循環によって閉じ込められることで高濃度が維持される過程によるものと考えられる。インド最南端の領域では、南半球起源の清浄な空気が侵入し、メタンを多く含む空気は北インドに押し流されることや、他の領域に比べて化学消滅速度が速いことから、 XCH_4 の季節変動はその場のメタン放出の季節変動とは全く異なることも明らかになった(Chandra et al., 2017:6.(1)主な誌上発表の3)参照)。

GOSATの短波長赤外観測では、このような複雑なメタンの鉛直構造を観測することができず、単に全気柱量に対応する XCH_4 の情報しか得られない。そのため、現在の大気化学輸送モデルを使ったインバースシステムに単純にGOSATで XCH_4 を投入することでは領域スケールでのメタン放出推定の精緻化は実現困難であることが示された。これを改善するためには、まずメタンの鉛直分布をより正確に観測する必要がある。また輸送過程や化学消滅反応の及ぼす影響を十分検討することのできる先鋭的なモデル開発が望まれる(本報告書サブテーマ6参照)。

一方、観測の側からもメタンの鉛直分布を捉える努力が必要である。そこで、GOSAT・ XCH_4 と比較しながら、サブテーマ2で取得されたカルナルおよびソーニーパットのメタン濃度についても詳細に解析を行った。カルナルおよびソーニーパットでは、メタン濃度は周囲からのメタン放出量が多くなると想定される雨期に低く、逆に放出量が少ないと推定される冬季に高くなることが示された。これらの空気塊について流跡線解析を行った結果、モンスーン時期には南西方向から海洋性の清浄な空気塊が流入すること、冬季には風が弱く、沈降性気流が卓越していることが明らかになった。この結果は上記 XCH_4 とACTMの比較から得られた結果と整合的である。現在、大気化学輸送モデルとも比較しながら成果を論文にまとめている。

なお、現在、GOSATからメタン鉛直分布を導出するために、TIRチャンネルデータの検証が進められており、GOSATあるいは次期ミッションのGOSAT-2によってSWIRとTIRの結合によるメタン濃度鉛直分布の導出が可能になれば、メタン放出量推定の信頼性は大きく改善されるであろう。

(2) 南アジアを中心とした大気メタン濃度計測

北インドの水田地帯で4年間の観測データを蓄積したことで、北インド特有のメタン濃度変動が明らかになった。地上の大気中メタン濃度は、水田からのメタン放出量が最大となる夏から秋ではなく、冬に高濃度となることが観測された。また、メタン濃度とCO濃度の比に着目すると、夏と冬でCO:メタン比が異なっていたことが明らかになった。ソーニーパットおよびコミラでは、冬期にCO:メタン比が1:1に近かった。これは、水稻からメタンが発生していると考えられる夏～秋のCO:メタン比とくらべ、COが有意に高い。冬期はメタン濃度の増加と同時にCO濃度も著しく増加していることから、冬期のメタンは燃焼過程で放出されたものを含むと推察された。本研究の観測結果から、北インドではモンスーンに伴う大気輸送が地上メタン濃度変動に大きな影響を与えていることが示唆され、このメタン濃度変動はGOSATによる気柱量観測では検出されないことなどが明らかとなった。これは、南アジアにおけるメタン収支を逆推定するためにはGOSATによる気柱量観測データのみでは不十分であることを示唆しており、本研究で得られた南アジアの大気メタン濃度の高精度地上観測データは、GOSATデータを補完し、GOSATメタンデータの利活用を図る上で重要な参照データとなる。

南インドのアドウトウライでは、本プロジェクトメンバーがメンテナンス等で訪問した際に大気サンプリングを行い、2016年11月4試料、2016年12月4試料、2017年1月8試料、2017年6月4試料、2018年2月4試料を採取し、メタン濃度等の分析を行った。その結果、レーザーメタン計の光路の高さと大気採取タワーの高さにおけるメタン濃度に差が無く、国立環境研究所によるフラスコサンプリングによるメタン濃度分析データを用いてレーザーメタン計の絶対値をNIES 94 メタンスケールで校正することが可能であることを確認した。また、多成分を分析することで、メタン濃度の日変動などの原因を推察することができることが示された。

(3) メタン発生緩和策のオプション検討

2ヵ年の試験の1年目(2016)は、AWDと称する節水型水管理を使用したSRI農法とその改良型および常時湛水管理の3種の農法比較により、AWDとSRIを組み合わせた農法がメタンを含むGHGの大幅削減に効果があり、収量に影響もないことを実証した。乾季、雨季それぞれの灌漑回数はSRI区、MSRI区、常時湛水(CT)区それぞれで乾季は10回、10回、21回であり、雨季は2回、2回、11回だった。維持すべき田面水位が異なるために要求され

る水量が大幅に異なることが実証された。乾季(Kruvai)、雨季(Thaladi)における常時湛水(CT)を100%とする水利用量比率はSRI区47.5%、MSRI区49.3%であり、雨季ではSRI区79.4%、MSRI区79.8%であった。

栽培期間におけるメタンの積算排出量を処理区ごとに比較すると、CT区が高く、SRI区とMSRI区はほぼ同等だった。乾季(Kruvai)では、メタン排出削減量は、SRIとMSRIについて常時湛水CTと比較すると、40%および55%(品種ADT43)、42%および43%(品種CO51)だった。また、雨季(Thaladi)では、22%および31%(品種ADT46)、25%および20%(品種TKM13)だった。AWD水管理によって水田土壌の還元状態は緩和され、嫌気性微生物由来のメタン生成が起きにくい条件となったことが示唆される。一方で発生量は少ないもののSRIとMSRI区においては N_2O 排出の増加が認められた。CTと比較して乾季では28%および31%であり、雨季では43%および38%の増加となった(Oo et al., 2018: 6(1) 主な誌上発表の1)参照)。

2年目(2017)に行った異なるAWD水管理の比較試験においては、常時湛水と比較した場合、1回AWDと2回AWDによる節水効果はそれぞれ18.5%、19.5%だった。一方で全期間AWDでは71.7%もの節水効果が認められた。また、雨季作については、降雨回数が多いため、AWDによる節水効果は明瞭ではなかった。雨季作期間中は概ね全ての処理区において、湛水状態となった。このような少ない回数でのAWDでも効果が示されたことは、緩和策の普及が比較的容易であることを示している。

2016年のSRI水管理実証試験結果により乾季41%、雨季24%のメタン削減、MSRIにより乾季48%、雨季26%のメタン削減が示されたので、これを踏まえて、インド全域の水田由来メタン排出量を推定すると、常時湛水、SRI、MSRIの3つの水管理に基づいて、9.69、6.91、6.59 Tg/yearと推定された。

(4) 南アジア域におけるメタンフラックスの測定

インド南部の稲の三期作水田とバングラデシュの二期作水田で気象・環境要素を含めたメタンフラックスの総合観測を実施した。インドの三期作水田では測定システムのトラブルによるメタンフラックスの欠測が生じたが、以下の重要な点が明らかになった。(1)メタンフラックスの作期内の日・季節変化は日本の水田と同様であり、温度が制御要因であることが推測された。(2)メタンフラックスの最大レベルはフィリピン共和国やアメリカ合衆国の水田より大きく、日本の水田に近い値であった。(3)夏期の非耕作期間にインド南部の気候的特徴(高温・多雨)を反映し、大きなメタンフラックスが観測された。

インド南部の三期作水田では、メタンの基質となる二酸化炭素(CO_2)の動態についても渦相関法と生態学的調査によるデータ解析を実施した。三期作を合計した稲の光合成による CO_2 吸収量は大きく、同水田でメタンフラックスが大きい理由の一つは、この光合成で固定された炭素($C-CO_2$)がメタン生成の基質となったためと考えられる。ガス態の CO_2 は、稲の大きな光合成量のために生態系呼吸量を考慮しても CO_2 の吸収であったが、植物体炭素、すなわち、収穫物と稲ワラが持ち出されていたために圃場生態系としては CO_2 の持ち出し(放出源)となることが明らかになった。

バングラデシュの二期作水田におけるメタンフラックスの連続測定から、以下のことが明らかになった。(1)各作期・非栽培期間に他の水田では見られない特徴的なメタンフラックスの季節変化が観測された。(2)インドと同様に夏期の非栽培期間に大きなメタンフラックスが観測された(インドと同じ原因に加え、前作収穫後の稲ワラが圃場に放置されたことも影響していると考えられる)。

インド南部とバングラデシュ水田土壌中での潜在的なメタン生成能は、土壌中の有機物量や微生物量等が大きいほど、増加するが、実際の水田からのメタン放出量は土壌状態や遊離鉄含有量等の要因によって空間的にも時間的にも制限されていることが示された。

(5) レーザー分光手法によるメタンの連続観測

大気メタン濃度には観測期間を通して短期的および長期的な時間変化が見られることが明らかになった。まず、夜間から早朝にかけて大気メタン濃度が上昇する日変化パターンを示した。このような大気メタン濃度の日変化パターンは、主に夜間から明け方にかけて風速が低下したことによって形成された地表付近の安定層の存在を示唆するものと考えられた。また、日中(10時-14時)の大気メタン濃度は、2016年10月をピークに2017年4月にかけて緩やかに低下し、その後再び増加する季節変化を示した。このような全体的な傾向に加えて、日中の大気メタン濃度は水稻栽培期間中に突発的に上昇する期間があることが明らかになった。この大気メタン濃度の

季節変化には、水稻栽培管理(代掻きや落水など)に伴う水田からのメタン発生パターンの変化、大気中のOHラジカルとの反応の変化、モンスーンなどによる風向変化などが関与していることが示唆された。

(6) インバース解析によるアジアからのメタン発生量の推定と削減策の評価

AGCM5.7b-ACTM に基づいて、メタンに関するモデル輸送と化学プロセスを評価するために多数のモデル実験を行った。メタンのシミュレーション結果は、遠隔海域で観測された測定と、コミラ、ナイニタール、ソーニーパットで行われた測定をよく再現していた。2つの異なるモデル水平解像度(T42 and T106)を用いたシミュレーションは、大陸上の観測をシミュレートするためにはより高い解像度(T106)でのシミュレーションが必要であることを示していた。

多数のシミュレーションとその結果の詳細な分析を通して、我々は、AGCM57b-ACTMシミュレーションでは下部成層圏とその上層でのメタンを過大評価することを見出した。様々な衛星観測で得られた XCH_4 と比較したところ、高緯度ほどモデルで得られた XCH_4 には系統的に高いバイアスが見られた。これらの知見に基づき、より力学的信頼性が高い、MIROC4の力学モデルに基づいてモデリングシステムを開発した。MIROC4は、AGCM57bの純粋なシグマ鉛直座標系とは異なり、ハイブリッドシグマ鉛直座標系を採用している。この鉛直座標系の改良によって、熱帯域上の成層圏で上向き輸送とその後の高緯度への輸送を制御するブリューワー・ドブソン循環の速度がはるかに良く表現されるようになった。大気年齢についても観測データを使って診断がなされ、良好な結果を得た。MIROC4-ACTMでシミュレートされた XCH_4 はNIESバージョンの GOSAT XCH_4 観測値と良好な一致を示した。

最後に、稲作による表面排出量を変化させた場合の感度シミュレーションを行った。その結果は、現在の精度で得られたGOSAT・ XCH_4 観測値情報から、稲作からの50%以上の排出量の変化を検出できることを示した。

このように、MIROC4-ACTMの開発により、気柱積分された観測値である XCH_4 を地上からのメタン放出量推定に活用できる可能性が高くなった。将来GOSAT-2等の新たなミッションに向け、インバース解析の実現的応用に道を拓くことができた。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

南アジアにおけるメタンの鉛直分布特性の解明

GOSATで観測された XCH_4 と大気化学輸送モデルによるシミュレーションの比較から、アジアモンスーン循環の作りだす輸送過程に依存して、南アジアのかなり広範囲において中・上部対流圏におけるメタン濃度が XCH_4 に寄与することが明らかになった。この結果はソーニーパットでの観測における冬季の濃度極大とも整合的であった。 XCH_4 と地上からのメタン放出フラックス変動が単純に対応していないことはGOSATの XCH_4 データをインバース解析に投入してメタン放出量推定を行うことの難しさを示している。また、GOSAT・TIR(熱赤外チャンネル)からのメタン鉛直分布の導出の有効性も示している。

WD-SRI農法によるメタン放出緩和策の実証

南インドにおいて、現地で主に栽培される品種と栽培体系に基づいてAWD水管理が有効に機能し、メタンを主とする温室効果ガスの排出削減に有効であることが実証された。SRI農法との組み合わせにより収量を落とすことなくメタンの削減に成功した。この緩和策をインド全域に広く普及させた場合の削減ポテンシャルは約30%にもなることを定量的に示した。

南アジアにおける観測空白域における観測データの取得

本研究で立ち上げたソーニーパットや、継続して観測を実施したナイニタールとコミラの大気観測データは、これまでほとんど観測データが得られていなかった観測の空白域における極めて貴重な観測データセットとなっており、将来多目的に活用されることが期待される。

新たな大気化学輸送モデルの開発

XCH₄の活用の為には、メタン鉛直分布情報の再現性を高める新たなモデルシステムの構築が必要であると考えられる。そこで、新たにMIROC4の力学モデルに基づいてモデリングシステムを開発した。この改良によって、熱帯域上の成層圏で上向き輸送とブリューワー・ドブソン循環がはるかに良く表現されるようになった。さらにこのシステムでXCH₄の感度実験を行い、50%程度のメタン放出量の変動は現在のレベルの精度の観測データ(GOSAT・XCH₄)であっても捉えることのできる可能性を示した。

(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＞

GOSATデータの有効利用の検討

GOSATは環境省他が、世界各国の温室効果気体排出量推定を行うことを目指して打ちあげた衛星である。GOSATミッションの目的は、温室効果ガスの全球分布を監視し、京都議定書で要求される温室効果ガスの削減を検証することによって環境行政に貢献し、将来のミッションのために地球観測技術を進歩させることである。メタンは大気寿命が短いこと、成層圏で減少する特有の鉛直分布を持つことなど、二酸化炭素と異なる特性を有し、発生源の特定や放出量の定量化は容易でない。本研究は、南アジア域においてGOSATで観測されたメタンの気柱平均混合比(XCH₄)をメタンの発生源推定に適用するためには、鉛直分布情報が必要不可欠であることを示した。この成果は今後GOSAT-3以降のミッション策定に対して貴重な情報となる。またGOSAT-2のミッションにおいて、SWIRとTIRの組み合わせによるメタン鉛直分布導出の重要性も示している。

新しいインバースシステムの開発

MIROC4.0に基づいて開発された新しいACTMIは、地上観測ネットワークやGOSAT(およびGOSAT-2)などの衛星リモートセンシングデータ等、さまざまな種類の測定値を取り込むことができる。本報告書で示した通り、XCH₄には鉛直層すべての情報が取り込まれるため、モデル内における成層圏でのメタン鉛直勾配情報は、メタンの排出源と吸収源についての将来の研究の発展への重要な鍵になると考えられる。さらに平成30年度開始の推進費課題「GOSAT-2と地上観測による全球のメタン放出量推定と評価手法の包括的研究」への貢献に繋がると期待できる。また、UNFCCCへの排出量報告の精度が向上すると期待できる。新しいインバースシステムにおける感度実験と、緩和策実験の結果を総合すると、将来のGOSAT-2ミッションが実用化された場合、緩和策が広く普及すれば、観測で検知できる可能性があることが示されており、今後のミッション計画策定に貢献する知見である。

SDGs「持続可能な開発目標」への貢献

本プロジェクトの内容は、2015年9月の国連総会で採択されたSDGs「17の持続可能な開発目標」の中において、持続可能な生産消費(目標12)、気候変動(目標13)に該当している。SRIは節水栽培により水資源を節約すること、植栽密度を下げてかつ慣行と同等の収量を得られること、水位の調整により土壌の酸化状態を維持しメタンを大幅削減することを両立することができる極めて現実的な栽培体系であり、インドのみならずアジアの広域の水田水管理に適用可能である。フラックス観測を行ってきたバングラデシュの二期作水田についての調査からは、夏期の非耕作期間に多雨による湛水や高温・雑草の繁茂のために多量のメタンが放出されることが明らかになった。この時期に降雨による貯留水を排水するなどの比較的簡単な圃場管理を行うことによりメタン放出量を削減できる可能性がある。

グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)の統合イニシアチブ(synthesis initiative)・IPCCへの貢献

インバージョンモデルの結果は、グローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)の統合イニシアチブ(synthesis initiative)にメタン排出源と吸収源推定のために提出された。その結果は公開された文献として入手可能である(Saunio et al., 2016, 2017:サブテーマ6参照)。GCP メタンの活動は継続されており、定期的更新の提供を目指している。また、モデル間相互比較プロトコルがメタンインバースモデリングのために開発されており、テーマリー

ダーはサブテーマ6代表者である。このGCP メタン統合イニシアチブから得られた結果は、IPCC AR6の第5章で使用されている。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) A. Z. OO, S. SUDO, H. AKIYAMA, K. T. WIN, A. SHIBATA, A. YAMAMOTO, T. SANO, Y. HIRONO: PLOS ONE, 13(2) (2018), Effect of dolomite and biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from acidic tea field soil.
- 2) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA, P. ELAYAKUMAR, K. VANITHA, C. UMAMAGESWARI, P. JOTHIMANI, V. RAVI: Agri., Ecosyst. Environ., Vol.252,148– 158 (2018), Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.
- 3) N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, T. SAEKI and P. K. PATRA: Atmos. Chem. Phys., 17, 12633–12643 (2017), What controls the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?
- 4) P. K. PATRA, M. TAKIGAWA, SHINGO WATANABE, N. CHANDRA, K. ISHIJIMA: SOLA, under revision (2018), Improved Chemical Tracer Simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry–Transport Model (MIROC4–ACTM).

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 林田佐智子: International Workshop on Land Use/Cover Changes and Air Pollution in Asia, Bogor, Indonesia (2015)
Toward Improvement of Methane Emission Inventory of South Asia from GOSAT
- 2) 出原雅也、秀森丈寛、中山智喜、松見豊、笹子宏史、川崎昌博、高橋けんし、林田佐智子、山本昭範、今須良一: 第21回大気化学討論会 (2015)
実大気におけるリアルタイムその場観測を目的としたオープンパスレーザー分光メタンガス検出器の校正
- 3) 寺尾有希夫、向井人史、野村渉平、西橋政秀: 日本気象学会2015年度秋季大会 (2015)
アジア域への温室効果ガス観測の展開
- 4) 林田佐智子、久慈誠、寺尾有希夫、須藤重人、犬伏和之、間野正美、山本昭範、Prabir Patra: 日本気象学会2015年度秋季大会 (2015)
衛星と現地観測による大気メタンデータの活用～南アジアにおける新展開～
- 5) 岩崎千沙、林田佐智子、今須良一、小野朗子、横田達也、森野勇、吉田幸生、O. Sergey, B. Andrey, TCCON Partners: 日本気象学会2015年度秋季大会 (2015)
PPDF-S法によるGOSATのCO₂、メタン気柱平均混合比データの検証
- 6) H. ARAI, R. YOSHIOKA, S. HANAZAWA, VO QUANG MINH, VO QUOC TUAN, TRAN KIM TINH, TRUONG QUOC PHU, C.S. JHA, S.R. REDDA, M. MANO, V.K. DADHWAL AND K. INUBUSHI: Joint conference of the AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), Pune, India. (2015)
Function of methanogenic community in mangrove soils as influenced by the chemical properties of the hydrosphere.
- 7) M. MANO, A. MIYATA, MD.A. BATEN, K. ONO, W. KIM, MD.A. MIAH, N. MOBIN, M. SATO, and N. MATSUOKA: Joint conference of the AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), Pune, India. (2015)
Continuous CH₄ Flux Measurement of a Double-Crop Paddy Field in Bangladesh.

- 8) K. INUBUSHI, and S. HANAZAWA: Second International Conference of Ecology of Soil Microorganisms, Prague, Czech Republic. (2015)
Microbial activities and GHGs production in upland rice field in Uganda comparing to lowland rice fields in India and Japan.
- 9) C.IWASAKI, S.HAYASHIDA, R.IMASU, A.ONO, T.YOKOTA, I.MORINO, Y.YOSHIDA, O.SERGEY, B.ANDREY and TCCON Partners.:2015 AGU Fall Meeting, San Francisco (2015)
Validation of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ retrieved by PPDF-S method.
- 10)M. IZUHARA, T. HIDEMORI, M. KAWASAKI, T. NAKAYAMA, Y. MATSUMI, H. SASAGO, Y. TERA0, S. NOMURA, T. MACHIDA, W. TAKEUCHI, M. ADACHI, R. IMASU, S. K. DHAKA, J. SINGH, K. TAKAHASHI: JpGU, Makuhari, Japan (2016)
Development of a low-cost in-situ methane observation system and results of field observation at a paddy field in India
- 11)S. HAYASHIDA, P.K. PATRA, Y. TERA0 (Contributors : AMASA project team) : 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS-12), Kyoto, Japan (2016)
Comparison of GOSAT CH₄ measurements with in-situ measurements and model simulations –
Applications of GOSAT CH₄ data to Agricultural CH₄ emission in Asia –
- 12)C.IWASAKI, R.IMASU, S.HAYASHIDA, T.YOKOTA, I.MORINO, Y.YOSHIDA, S.OSHCHEPKOV, A.BRIL, and TCCON Partners: 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS-12) , Kyoto, Japan (2016)
Validation of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ retrieved by PPDF-S method
- 13)S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERA0 and AMASA project team: The 8th GOSAT RA PI Meeting, Kyoto, Japan (2016)
Comparison of GOSAT CH₄ measurements with in-situ measurements and model simulations
- 14)T. SUGITA, N. SAITOH, H. HAYASHIDA, T. MACHIDA: The 8th GOSAT RA PI Meeting, Kyoto, Japan (2016)
Comparison of methane profiles between GOSAT/TANSO-FTS TIR and aircraft measurements in West Siberia
- 15)山本昭範、小野圭介、須藤重人、秀森丈寛、出原雅也、松見豊、犬伏和之、間野正美、竹内大樹、林田佐智子:2016年度日本土壌肥料学会京都大会(2016)
南部インド水田地帯における大気メタン連続観測
- 16)須藤重人、山本昭範:日本土壌肥料学会2016佐賀大会(2016)
温室効果ガス3成分同時分析計測法技術の進展について
- 17)杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子、町田敏暢、笹川基樹:日本気象学会2016年度秋季大会(2016)
西シベリア上空のGOSAT(熱赤外バンド)と航空機観測によるメタンの比較
- 18)林田佐智子:Physical Research Laboratory 招待セミナー (2016)
Project of Atmospheric Methane from Agriculture in South Asia (AMASA)
- 19)林田佐智子:Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences (ARIES) 招待セミナー (2016)
Introduction of our recent activities to improve methane emission estimate in South Asia: Project of Atmospheric Methane from Agriculture in South Asia (AMASA)
- 20)K. INUBUSHI, P. PRABIR, S. HAYASHIDA and AMASA members: 7th ISAJ Symposium, India-Japan Symposium on Science and Technology for Sustainability, Main Auditorium Embassy of India Tokyo, Japan, Program & Abstract, p.21., (2016)
Sustainable Paddy Rice Farming Harmonized With Greenhouse Gas Emission/From AMASA Project In India
- 21)間野正美、宮田明、MD.A. BATEN、小野圭介、金元植、松岡延浩:日本農業気象学会2016年全国大会(2016)
バングラデシュの水稲二期作田におけるメタンフラックスの季節・年変動の特徴

- 22)林田佐智子、小野朗子:第24回生研フォーラム(2016)
アフリカにおける GOSATで観測されたメタンと二酸化炭素の比率
- 23)犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、山本昭範、林田佐智子:日本熱帯農業学会第119回講演会(2016)
南インド水田における温室効果ガスの動態と土壌理化学性
- 24)K. INUBUSHI and H. ARAI: Can Tho University Journal of Science (2017)
Sustainable water use for agriculture and environment.
- 25)K. INUBUSHI, Y. SHIRATORI, K. ITO, H. ARAI, N. YOSHIOKA, A. ISWANDI, A. CITRARESMINI, H.T. NGUYEN, T.L.H. TRAN and Q.H. PHAM: Abstract for 7th International Conference on Silicon in Agriculture, Bangalore, India (2017)
Effects of soil amendment on environment and yield in Southeast Asia.
- 26)S. HAYASHIDA, N. CHANDRA, T. SAEKI, P.K. PATRA: the 2017 Joint IAPSO-IAMAS-IAGA Assembly, Cape Town, South Africa (2017)
Origin of the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over South Asia.
- 27)S. HAYASHIDA: Asia Oceania Geosciences Society, 14th Annual Meeting, Singapore (2017)
Origin of the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over South Asia.
- 28)N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, T. SAEKI, P.K. PATRA: 3rd ACAM Workshop, Guangzhou, China (2017)
What control seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?
- 29)P.K. PATRA, S. NOMURA, Y. TERAOKA, N. CHANDRA, S. HAYASHIDA: 3rd ACAM Workshop, Guangzhou, China (2017)
Variabilities in greenhouse gases in South Asia due to monsoon.
- 30)S. HAYASHIDA, N. CHANDRA, P.K. PATRA, Y. TERAOKA, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO and AMASA project team: JpGU-AGU joint meeting 2017, Makuhari, Japan (2017)
Methane emission estimate from South Asia: AMASA project.
- 31)N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, T. SAEKI and P.K. PATRA: JpGU-AGU joint meeting 2017, Makuhari, Japan (2017)
What controls the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?
- 32)S. HAYASHIDA: Indian Association of Physics Teachers (IAPT), Gurukula Kangri ANGRI Univ., Haridwar (2017)
Climate Change and Introduction to project of Atmospheric Methane from Agriculture in South Asia (AMASA). (invited)
- 33)A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA: 2017年度日本土壌肥料学会仙台大会, Sendai (2017)
Effect of modified rice cultivation systems on methane and nitrous oxide emissions from paddy rice field.
- 34)K. INUBUSHI: Fourth International Conference on Engineering Research Innovation & Education, Sylhet, Bangladesh, Program & Abstract Book, p.32. (2017)
Sustainable paddy rice farming harmonized with greenhouse gas emission/from AMASA project in Bangladesh and India (Plenary Lecture)
- 35)犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、A.Z.OO、小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. RAVI: 日本熱帯農業学会第121回講演会(2017)
南インド水田における温室効果ガスの動態とその影響因子
- 36)間野正美、犬伏和之、須藤重人、A.Z.OO、小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. RAVI: 日本農業気象学会 2017年全国大会(2017)
インドの水田における温室効果ガスフラックスの測定
- 37)山本昭範、小野圭介、須藤重人、Aung Zaw Oo、秀森丈寛、出原雅也、松見豊、犬伏和之、間野正美、林田

佐智子、寺尾有希夫、V. RAVI: 2017年度日本土壤肥料学会仙台大会 (2017)

南部インド水田地帯における大気メタン濃度の経時変化

38) 須藤重人: 2017年度日本土壤肥料学会仙台大会、仙台 (2017)

土壌由来温室効果ガス計測法の進展について(続報).

39) K. INUBUSHI, Z. WANG, M. MANO, S. SUDO, A.Z. OO, A. YAMAMOTO, K. ONO, S. HAYASHIDA, V. RAVI, M.A.

BATEN: Abstract for Annual Meeting of Tropical Agriculture, Tamagawa University, Tokyo (2018)

Influence of physico-chemical properties of soils on greenhouse gases production in paddy soils from Bangladesh, India and Japan.

40) P. K. PATRA: 12th International Conference for Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (AMOS-ICSHMO), Sydney (2018)

Budgets of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in the southern land and ocean.

41) P. K. PATRA (invited): JSPS-US Alumni 2018 Seminar on "Growing Atmospheric Pollution and Its Impact on Climate", Chapman University, Orange (USA), (2018)

Understanding the sources of air pollutants key to effective mitigation policy – a case of methane.

7. 研究者略歴

研究代表者

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課程満期退学、理学博士、現在、奈良女子大学大学院自然科学系教授

研究分担者

寺尾 有希夫

筑波大学大学院博士課程地球科学研究科修了、博士(理学)、現在、国立環境研究所地球環境研究センター主任研究員

須藤 重人

東京大学大学院理学系研究科博士課程終了、博士(理学)、現在、農業環境変動研究センター上級研究員
犬伏 和之

東京大学大学院農学系研究科博士課程満了、農学博士、現在、千葉大学大学院園芸学研究科教授

山本 昭範

筑波大学大学院博士後期課程生命環境科学研究科持続環境学専攻修了、環境学博士、農業環境技術研究所特別研究員、現在、東京学芸大学講師

Prabir K. PATRA (パトラ プラビール)

グジャラート大学大学院理学研究科(インド・アーメダバード)修了、Ph.D、現在、海洋研究開発機構 主任研究員

II. 成果の詳細

II-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

国立大学法人奈良女子大学

研究院自然科学系（理学部）

林田佐智子

久慈 誠

<研究協力者>

Naveen Chandra（平成28-29年度）

荒木晶

平成27～29年度累計予算額：36,566千円（うち平成29年度：12,728千円）

[要旨]

本サブテーマではメタンの一大発生地である南アジアにおいて、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)によって観測された気柱平均混合比 (XCH₄)データと大気化学輸送モデルによるシミュレーションの結果を比較しながら、XCH₄の情報の持つ意味を吟味した。GOSAT・XCH₄の観測結果は、インド周辺域上空では南西モンスーン期（7-9月）に最大となり、秋(10-12月)に最小となるという明瞭な季節変動があった。当初、この季節変動はメタン放出量の季節変動と類似していると推定されたが、輸送過程、推定放出量、化学反応のXCH₄への寄与をモデルの出力に基づいて詳細に検討した結果、XCH₄の季節変動は地上からの放出量の地理的分布とその時間変動性だけによって決まっているのではなく、上部対流圏におけるメタン濃度の変動に大きく支配されていることがわかった。XCH₄が顕著に高いインド北部のインドガンジス河平原地域においては、XCH₄の季節変動振幅（最大値と最小値の差）の40%が下部対流圏(600hPa以下)のメタン濃度変動によるものであるが、残りの60%はそれより上空での変動に起因するものであることが明らかになった。また、西インドの半乾燥地帯ではメタン放出量は極めて少なく、この地域におけるXCH₄の季節変動は70%以上が上部対流圏における変動に起因していた。このようなXCH₄の変動要因はアジアモンスーン循環の作りだす輸送過程の季節変動性にある。メタン放出領域でメタンを豊富に含んだ空気塊はガンジス河平原から7月～9月には南西モンスーン循環によって輸送され、強い積雲対流によって上空に運ばれる。さらに200hPa付近の上部対流圏で発達する高気圧によって閉じ込められる。このような高気圧による閉じ込め過程によって、南アジアのかなり広範囲においてXCH₄はこの時期最大になる。このように、XCH₄と地上からのメタン放出量とは直接関係しているわけではないことが理解できた。さらに北インドの西インドガンジス河平原地域（ソーニーパット）で得られた大気サンプリングで得られたメタン濃度の結果を検討したところ、冬季には周囲からの発生量は少ないにも関わらず、地上付近での濃度が最大になることがわかった。気象データ解析と流跡線解析の結果、冬季には強い沈降が起こっていることが明らかになった。これらの知見は今後GOSATの気柱量観測データをインバース解析に投入してメタン放出量推定を行う際に重要となるであろう。

[キーワード]

GOSAT メタン 衛星観測 メタン放出量推定 衛星データ解析 南アジア

1. はじめに

メタンは放射強制力では二酸化炭素に次ぐ第二の温室効果気体であると共に、短寿命気候汚染物質として早急に削減対策が求められている気体種である。またメタンは大気汚染物質を含む対流圏化学に大きく影響するとともに成層圏の水蒸気のソースともなっており、地球規模での気候や大気質に関する科学的見地からも重要とされる化学種である。メタンの放出量については地球全体の8%程度が南アジアからと考えられてきたが、最近熱帯地方の農業活動による温室効果気体の放出をこれまで以上に重要視する研究も報告されている(Tian et al., 2016)¹⁾。また、近年になって衛星観測の技術が発達し、全球観測

が可能になったため、従来地上観測ではとらえられていなかった発生域におけるメタン濃度の変動性が次第に明らかになってきた。メタンはメタン菌が嫌気条件下で有機物を分解することで発生するため、メタン菌の活動する水田や湿地、反芻家畜の胃腸から多く発生する。南アジアでは水田耕作が非常に盛んであることと自然湿地も多いことから、降水量の多いモンスーン時期(6～9月前後)にメタンの発生量が大きくなる傾向にある。

我が国では、2009年に世界に先駆けて温室効果ガス観測に特化した温室効果ガス観測技術衛星 (Greenhouse gases Observing SATellite :GOSAT : 和名いぶき) が環境省・国立環境研究所・JAXAによって打ち上げられ、現在まで9年間にわたって二酸化炭素とメタンの観測データが蓄積されてきた。GOSATデータの有効利用を目的として、平成24年から26年に環境研究総合推進費「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 (代表: 林田佐智子)」が実施され、GOSATで観測されたメタンデータを用いて全球規模でのメタン発生量推定が行われた。その結果によれば、GOSAT観測情報を含めた場合の年間収支推定量の修正量(当初推定量との差)は南アジアで特に大きいことが示された。これはこれまで南アジアで観測点がほとんどなかったことが原因の一つであると考えられる。ただし現状では、使用する大気輸送モデルやリトリバルされたデータバージョンによって大きく結果が異なっており(Monteil, et al., 2013²⁾; Alexe, et al., 2015³⁾; Pandey et al., 2016⁴⁾)、さらなる詳細な研究が必要と考えられてきた。

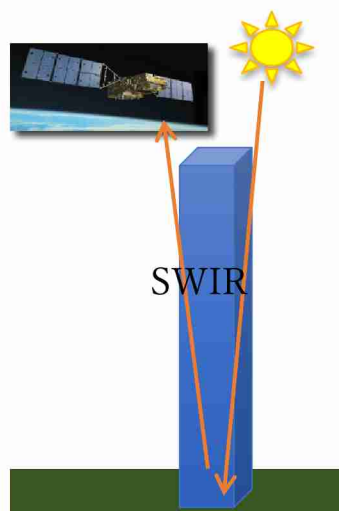
大気メタン濃度は発生量の増減に連動して増減するので、大気濃度の変動を観測してモデルシミュレーションと比較することによって、メタン発生量を推定することができる(この手法をインバース解析と呼ぶ: 詳細はサブテーマ6の節を参照)。しかし、GOSATのSWIR(短波長赤外)における分光観測では、太陽光の光路に沿って太陽放射の吸収スペクトルが観測され、これに基づいてメタンの鉛直積分量、すなわちメタン気柱平均混合比(XCH_4)が得られるだけである(図(1)-1の模式図参照)。この観測原理によって、 XCH_4 にはあらゆる高度におけるメタン濃度の寄与が含まれる。一般に大気組成の分布は三次元的構造を持っており、特にメタンの場合はOHラジカルとの消滅反応によって対流圏内での寿命が短く、地理的分布が不均一である。さらに圏界面高度より上(成層圏)では高高度になるに従って消滅反応が早くなるため濃度が減少するという特徴的な高度分布を持つ。また圏界面高度付近のメタン濃度の変動によっても XCH_4 は大きく変化する。このため、地上からのメタン発生量の地理分布や時間変動性を気柱平均混合比と関連づけるのは極めて困難で、大気中寿命の非常に長い二酸化炭素とは事情が大きく異なる。例えば、我々が航空機観測との比較検討を行った結果では、上部対流圏(Upper Troposphere)・下部成層圏(Lower Stratosphere)(以下UT/LSと表記)にかけての現実的な変動量は XCH_4 換算で ± 20 ppb程度となり、発生源周辺におけるメタン濃度の変動量に匹敵する(詳細はOno et al., 2015⁵⁾ および平成27年度年次報告書に記載)。従ってこの程度の XCH_4 の変動から地上からの放出量を推定するのは困難であることが予想できる。

南アジアにおいては、ヒマラヤ山脈の南側に位置するインド北部のインドガンジス平原(以下IGP)は広大な水田地帯であると共に人口密集地域でもあり、 XCH_4 の値が特に高くなることが知られている(Frankenberg et al., 2011⁶⁾, Hayashida et al., 2013⁷⁾)。一方、モンスーン時期にはこの領域では強い上昇気流があることがわかっており、しばしば高濃度のメタンが上空で観測されている(Xiong et al., 2009⁸⁾, Baker et al., 2012⁹⁾)。このため、観測で得られた高い XCH_4 値が必ずしも地上付近のメタンの高濃度を示しているわけではなく、 XCH_4 を直接その場における発生量と比較することは時として誤った見解を招くことがある。

ただし、インバース解析に使われる大気輸送モデルで大気輸送過程の計算が十分な信頼性を持っており、メタンの高度プロファイルも含めて現実的に再現できるのであれば、メタン放出量の推定は可能になるだろう(モデルの改良についてはサブテーマ6に記述されている)。しかし、いずれにしても気柱平均量である XCH_4 を用いてモデルからインバース解析を行ってメタンフラックスの推定を行う際には、メタンの鉛直プロファイルの変動性について事前に十分な理解をしておくことが不可欠である。そこで本研究では、GOSATで得られた XCH_4 データをメタン放出量推定に有効に活用させるための方策を検討するため、南アジアにターゲットを絞って、GOSATデータと気象データやサブテーマ6で開発された大

気化学輸送モデル(ACTM)によるシミュレーションの結果との比較解析を詳細に行った。

なお、GOSAT衛星搭載のTANSO-FTS(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer)センサーから得られるメタンの情報には、短波長赤外波長(SWIR)から得られるXCH₄の他に、熱赤外波長(TIR)から得られるメタン混合比の鉛直プロファイルがある。しかし、本研究期間中においてTIRチャンネルデータはまだ検証中で、SWIRチャンネルから得られたXCH₄のみが公開されている段階であったため、本研究ではXCH₄のデータ活用に特化して研究を行った。



図(1)-1 GOSAT/SWIR（短波長赤外）における観測量を示す模式図。観測されるのは気柱平均混合比（XCH₄）である。

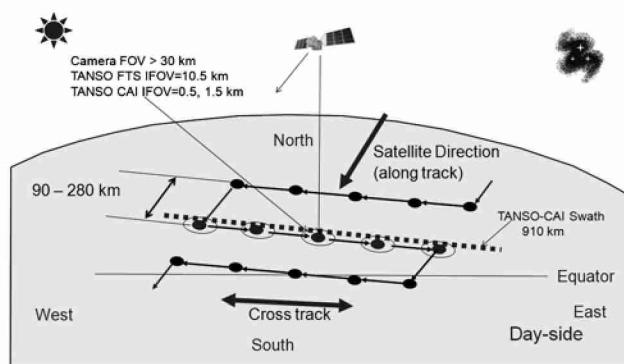
2. 研究開発目的

上記のような背景のもと、本サブテーマでは、南アジア上空で観測されたGOSAT/XCH₄を発生量推定に有効に活用させるための検討を行う。特にモンスーン循環によるメタン輸送過程に着目し、気柱量に及ぼすメタン高度分布の影響をサブテーマ6で得られた大気化学輸送モデル(ACTM)シミュレーションの結果を活用しながら解析し、南アジアにおいてGOSATで観測されたXCH₄の変動（特に季節変動）の変動要因を解明することを目的とする。またサブテーマ2で得られた大気サンプリングの結果を併せて活用し、メタンの高度分布の変動状況をさらに詳細に解析する。

3. 研究開発方法

3. 1 GOSAT メタン観測データ

GOSATは短波長赤外(SWIR)と熱赤外(TIR)の二つの波長域におけるフーリエ分光器(TANSO-FTS)と雲エアロゾルイメージャー(Cloud and Aerosol Imager:TANSO-CAI)から構成されている(Kuze et al., 2009¹⁰⁾)。GOSATの瞬時視野は直径10kmであるが、観測場所はおおよそ250km間隔で離散的であり、また3日完全回帰軌道であるため、観測される空間範囲は限定的である(図(1)-2)。雲によるデータ劣化を避けるためCAIの雲検知アルゴリズムによってデータがスクリーニングされている。



図(1)-2 GOSAT の観測点の概略図。図は 5 点モードを示しているが、観測実施期間中は 3 点モードのため、観測点間隔は約 250km であった(Kuze et al., 2009 からの転載)。

本研究では、2011-2014年の期間について国立環境研から公開されているGOSAT標準プロダクト Version 2.21の-Research Announcement (RAプロダクト)を解析した。GOSATはフーリエ変換分光器による地上ネットワーク(Total Carbon Column Observing Network :TCCON) (Wunch et al., 2011¹¹⁾)との比較解析によって検証されており、系統誤差は約15-20 ppb、精度は1%程度と報告されている(Morino et al., 2011¹²⁾; Yoshida et al., 2013¹³⁾)。衛星観測データとしては極めて信頼性の高いデータといえよう。南アジアでは南西モンスーンの時期(雨期)には雲が多く、雲判定で観測データが厳しく絞られているため、非常に限られた観測データしか存在しない。本研究では2011-2014年の4年間の観測時期のすべてを網羅することによって、この難点を克服することとした。

3. 2 モデルシミュレーション

GOSATデータと比較するモデルシミュレーションは、サブテーマ6でJAMSTECが開発した大気化学輸送モデル(ACTM) (Patra et al., 2009¹⁴⁾, 2016¹⁵⁾)を用いて行われた。このモデルの内容の詳細についてはサブテーマ6の報告を参照されたい。ここではT42と呼ばれる緯度経度約 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ の水平分解能、鉛直 σ 座標67層で実行された結果を用いた。気象場は気象庁JRA-25 (Onogi et al., 2007¹⁶⁾)でナッジングされ、また化学反応において、季節変動を考慮したOH場(Spivakovsky et al., 2000¹⁷⁾)に基づいて最適化されたOH分布を用いている(Patra et al., 2016¹⁵⁾)。

放出に関するモデルの感度を調べるために放出シナリオとしてAGSとCTLの2つのシナリオを用意した。AGSシナリオではEDGAR42FTの人為起源放出に基づいており、農業土壌からの放出以外は2000年の値に固定されている。CTLシナリオではEDGAR32FTの人為起源放出に基づいているが、湿地とバイオマス燃焼はFung et al. (1991)¹⁸⁾、水田からの放出はYan et al. (2009)¹⁹⁾を用いている。湿地、水田バイオマス燃焼では放出には季節変動が考慮されているがデータソースが異なるためAGSとCTLでやや異なっている。その他の人為起源物質には季節変動は与えられていない(Patra et al., 2016¹⁵⁾)。

3. 3 気柱全量および部分気柱量の評価方法

GOSATで観測されるメタン気柱量 XCH_4 と比較するため、ACTMで得られたメタンプロファイルから以下の式の通り気柱量を計算する。

$$XCH_4 = \sum_{n=1}^{60} CH_4(n) \times \Delta \sigma_p(n) \quad \dots \quad \text{式(1)-1}$$

ここで、 $CH_4(n)$ はモデル第 n 層メタンの乾燥混合比で n はACTM内の σ 座標系における層番号である。 $N=1-60$ で σ_p は1.0から0.005に対応し、 $\Delta \sigma_p$ は σ 座標系の層厚である。なお、GOSAT/SWIRのアベレーシングカーネルは対流圏でほぼ一定である(Yoshida et al., 2011)²⁰⁾ので、モデルとGOSATの比較において、リトリバルのアベレーシングカーネルによるたたみ込み積分をかけていない。しかし、たたみ込み積分をかけなくても XCH_4 にはほとんど影響はないことは確認している。

上空のメタン濃度分布が XCH_4 への影響を評価するため、部分気柱量の比較を行った。これに際しては、

まず σ 座標0-1.0に対応する大気的全気柱量を、エアマスが同じになるように、 σ 座標で0.2毎に5層に区切った。各層の名称をそれぞれ、下部対流圏 (LT: $\sigma=1.0-0.8$)、中部対流圏第一層 (MT1: $\sigma=0.8-0.6$)、中部対流圏第二層 (MT2: $\sigma=0.6-0.4$)、上部対流圏 (UT: $\sigma=0.4-0.2$) とその上を示す上空 (UA: $\sigma<0.2$) と示す¹。各層のメタン部分気柱量 (数密度もしくは分圧) を計算し、全気柱量に対する各層の部分気柱量の比率を部分気柱混合比 X_pCH_4 として定義する。5層の X_pCH_4 の総計が全層に対する XCH_4 となる。すなわち

$$\sum_{i=1}^5 X_pCH_4^i = XCH_4 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \text{式(1)-2}$$

ここに i は層番号を示している。

なお、GOSATとACTMシミュレーションの結果を比較する際には、GOSATの観測地点に最も近いモデル格子点を対応させ、時間はGOSATの観測時刻 (地方時刻13:00) に対応するシミュレーション結果を採用した。また、シミュレーション結果の XCH_4 は、2011年1月1日時点においてGOSATで観測された XCH_4 に合わせるため、約20ppbのオフセット補正を行った。ここでは XCH_4 の季節変動量を調べることに主眼をおいたので、このオフセット補正は全体の結論には大きな影響を与えない。

3. 4 流跡線解析

サブテーマ2において大気サンプリングによって得られたメタン濃度について、空気塊の起源を探るため、本研究室で開発した流跡線解析ツールスパイラルを用いて3日間の後方流跡線解析を行った。気象データは NCEP/NCAR Reanalysis 1 を用いた。流跡線の計算には時間積分に4次のルンゲクッタ法を用い、計算の時間間隔は30分とした。鉛直方向の移動には鉛直風速度を直接用いて計算した。

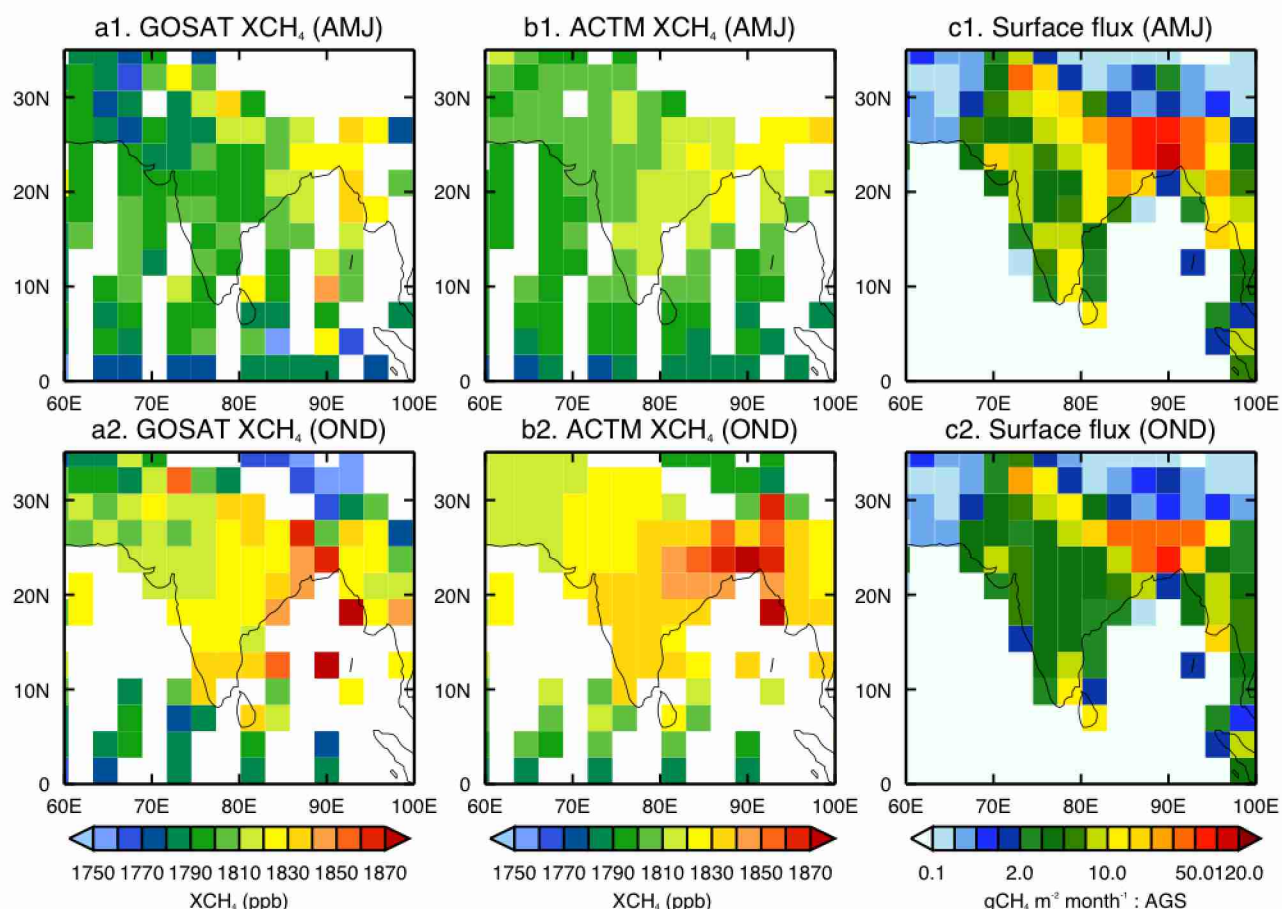
4. 結果及び考察

4. 1 インド上空の XCH_4 GOSAT とACTM シミュレーションによる概観

まず図(1)-3の左に、南アジア上空でGOSATによって観測された XCH_4 の2011年1月から2014年12月までの季節的な平均値の分布を示す。本報告では、この地方の季節性に鑑み1-3月を"冬"、4-6月を"春"、7-9月を"夏 (南西モンスーン期)"、10-12月を"秋"と記載している。図(1)-3上段は春、下段は秋の分布を示している。南アジア全体として XCH_4 は春には比較的低く、秋に高い傾向にある。また北インドでは XCH_4 は~1880 ppb程度とやや高いが、南インドではもっと低く、南北方向の勾配が顕著である。ACTMによるシミュレーション (図(1)-3中央) ではこれらの季節変動や南北勾配がよく再現されている。これらの結果をメタン放出量分布 (図(1)-3右) と比較してみると、ガンジス河下流では秋にメタン放出量が高く、同時に XCH_4 も高いため、 XCH_4 の変動にその場の放出量が直接影響しているかのように見える。しかしこの対応はすべての領域においては当てはまらない。例えば、放出フラックスは春の間の方が秋よりも高いにもかかわらず、 XCH_4 は秋の方が高くなっている領域がかなりある。この不一致は放出だけでなく、輸送や化学反応といった他の要素が XCH_4 を決定している可能性を示している。

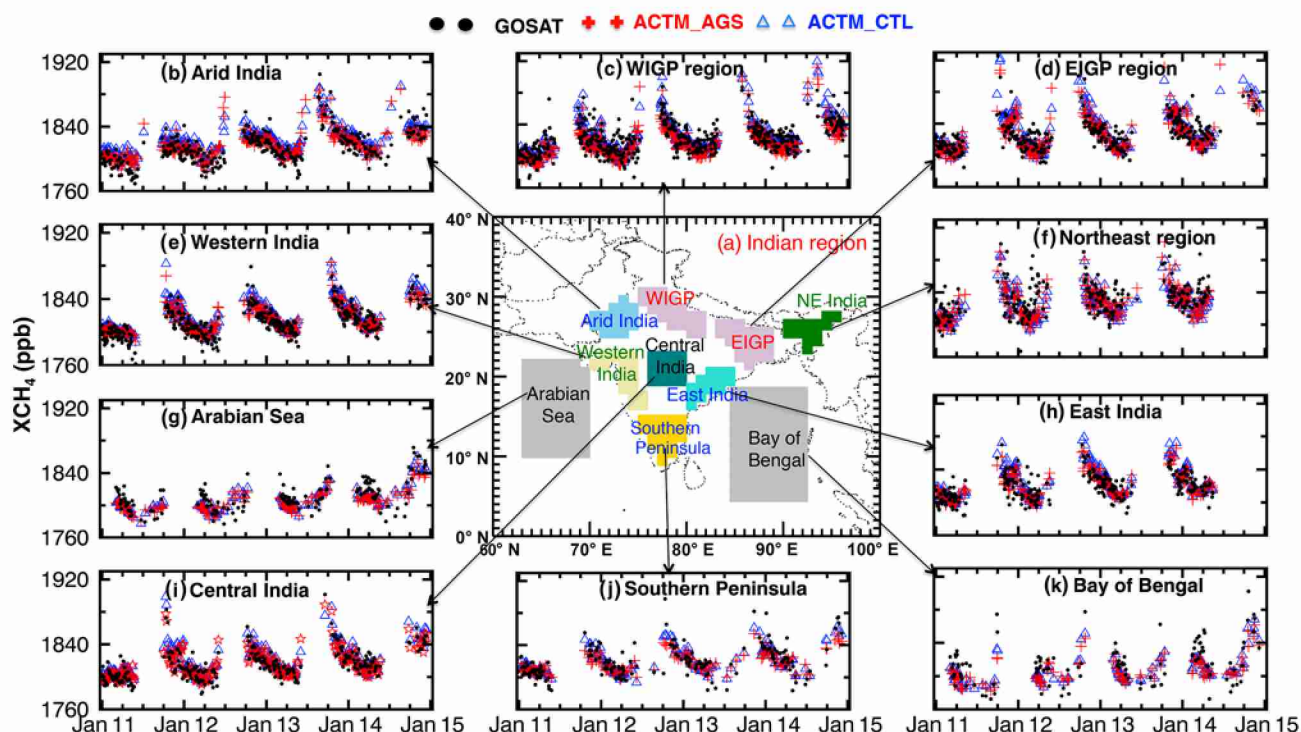
メタン放出量と XCH_4 の関係をより詳細に調べるため、インド亜大陸を8領域に分割した。表(1)-1に挙げる通り、Arid India (AI: 半乾燥地帯)、Western Indo-Gangetic Plain (WIGP: 西インドガンジス河平原)、Eastern Indo-Gangetic Plain (EIGP: 東インドガンジス河平原)、Northeast India (NEI: 北東インド)、Western India (WI: 西インド)、Central India (CI: 中央インド)、East India (EI: 東インド)、Southern Peninsular (SP: 南インド半島)である。さらに海洋をArabian Sea (AS: アラビア海) と Bay of Bengal (BOB: ベンガル海) の2領域に分割し、全部で10領域とした。

¹ σ の値に地上気圧 (およそ1000hPa) を掛けたものが気圧に相当する



図(1)-3：（左）GOSATで観測されたXCH₄の分布。2011年1月から2014年12月までの季節的な平均値を示す（中央）GOSATの時期に合わせてACTMでシミュレーションされたXCH₄の分布。（右）メタンの放出フラックス。ここではシミュレーションに用いたAGSシナリオの例を挙げている。上段（AMJ）は4-6月、下段(OND)は10-12月の平均値。

これらの10領域に対して、2011年1月から2014年12月の期間に対して、GOSAT で観測されたXCH₄ とACTMシミュレーションで得られたXCH₄の時系列を図(1)-4に示す。ここではGOSAT観測日と同じ日の13:00の観測地点に対応するグリッドのACTMシミュレーションデータを抽出している。GOSATでは、夏（南西モンスーン時期）におけるデータは雲スクリーニングによってその多くが取り除かれているためデータ数が非常に限られ、時系列には一部欠落がある。しかし、全期間・全領域を通して見ると、モデルのシミュレーション結果はGOSATで得られた季節変動の顕著な特徴をよくとらえている。モデルシミュレーションとGOSAT観測との相関係数は、表(1)-1に示す通り、すべての領域で十分高く、ACTMの再現性には信頼がおけると結論づけることができた。そこで、以下ではメタンの高度プロファイルをACTMシミュレーションの結果に基づいて解析した。



図(1)-4: インド大陸と海洋上の10区分上のGOSAT・XCH₄と2つの放出シナリオ(AGS とCTL)に対応するACTMでシミュレーションされたXCH₄の時系列。データの欠落はGOSATの欠測に対応する。ACTMのシミュレーション結果は、GOSATの観測地点の最近隣格子点でのGOSAT観測時刻(～1300 hrs LT)と同時刻における値を選択した。

表(1)-1: (右二列) 解析対象とした領域の区分名称と記号。図(1)-4の中央の地図と対応する。(左二列) 図(1)-4で示したGOSAT観測データとACTMの間の相関係数。二種類のメタン放出シナリオ(AGSとCTL)のそれぞれについて示している。

名称	記号	相関係数 (AGS)	相関係数(CTL)
Arid India	AI	0.77	0.88
WIGP region	WIGP	0.86	0.90
EIGP region	EIGP	0.69	0.88
Northeast India	NEI	0.55	0.55
Western India	WI	0.87	0.95
Central India	CI	0.89	0.97
East India	EI	0.78	0.86
Southern Peninsula	SP	0.92	0.91
Arabian Sea	AS	0.86	0.87
Bay of Bengal	BOB	0.84	0.86

4. 2 XCH₄ の季節変動とそれを制御する要因の分析

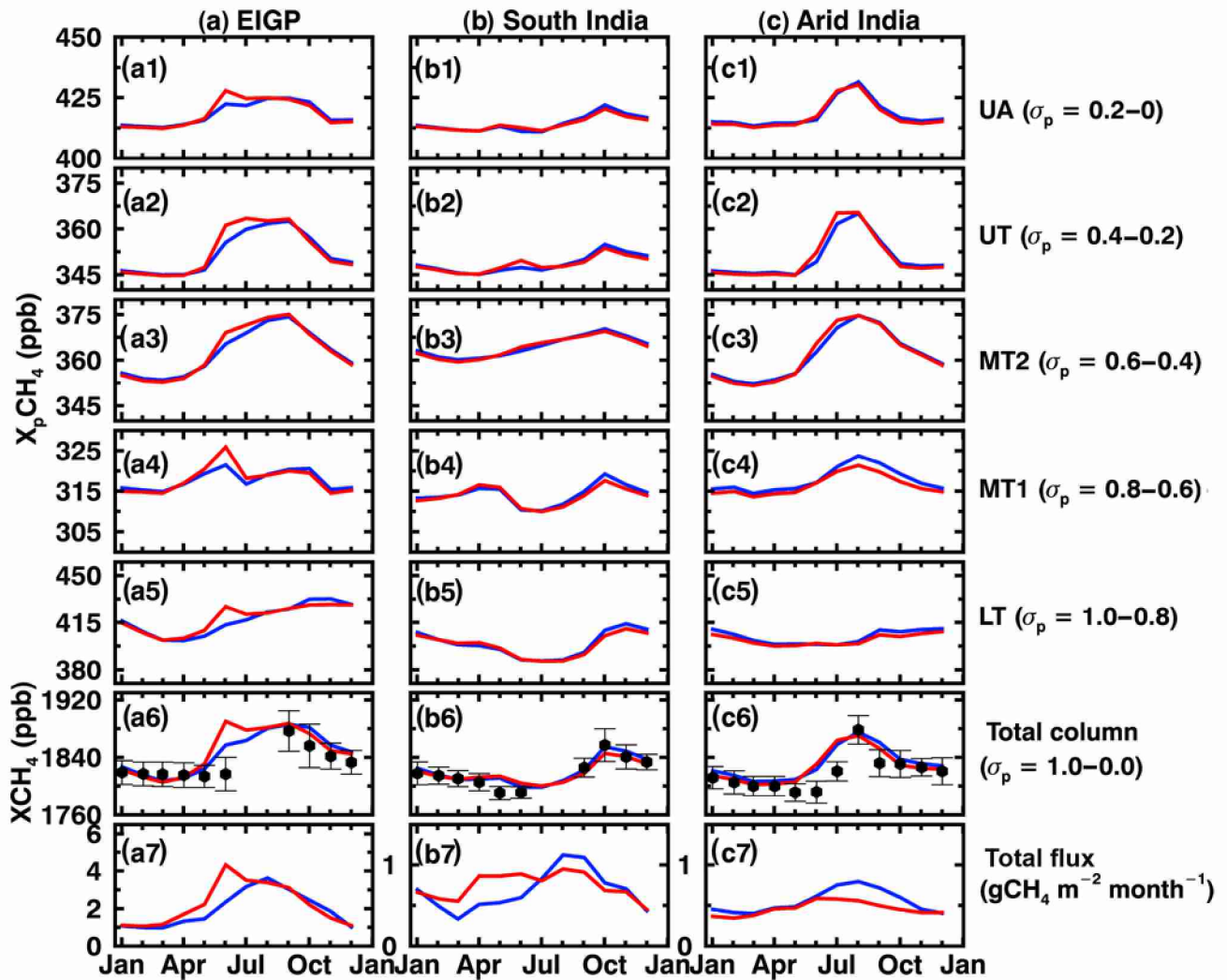
図(1)-5では、すべての領域のうち、代表的な季節変動の特徴が得られた3領域 (EIGP, SP, AI) だけを取り出して示す。記号は表(1)-1の通りで、(a)EIGP (左)、(b) SP (中央)、(c) AI (右) である。各カラムの1-5段目には式(1)-2で定義された部分気柱平均混合比が示されている。6段目には全気柱に対する平均混合比XCH₄が、7段目には対応する領域におけるメタン放出量が描かれている。

まず、(a)のEIGP領域について見てみると、AGSシナリオが示す(赤線)メタン放出量は6月に最大値(4.43 gCH₄ m⁻² month⁻¹)となる。対応する全気柱に対するXCH₄は、放出量の最大値と同じ6月に最大となる。しかしながら、放出量はその後減少傾向であるにもかかわらず、シミュレーション結果のXCH₄は6月以降9月まで同じ程度の値を示す。このことは放出の季節性からは予期できない挙動である。一方、CTLの放出シナリオの例では8月に放出量は最大値を取る(3.63 gCH₄ m⁻² month⁻¹)が、XCH₄の最大値は9月に

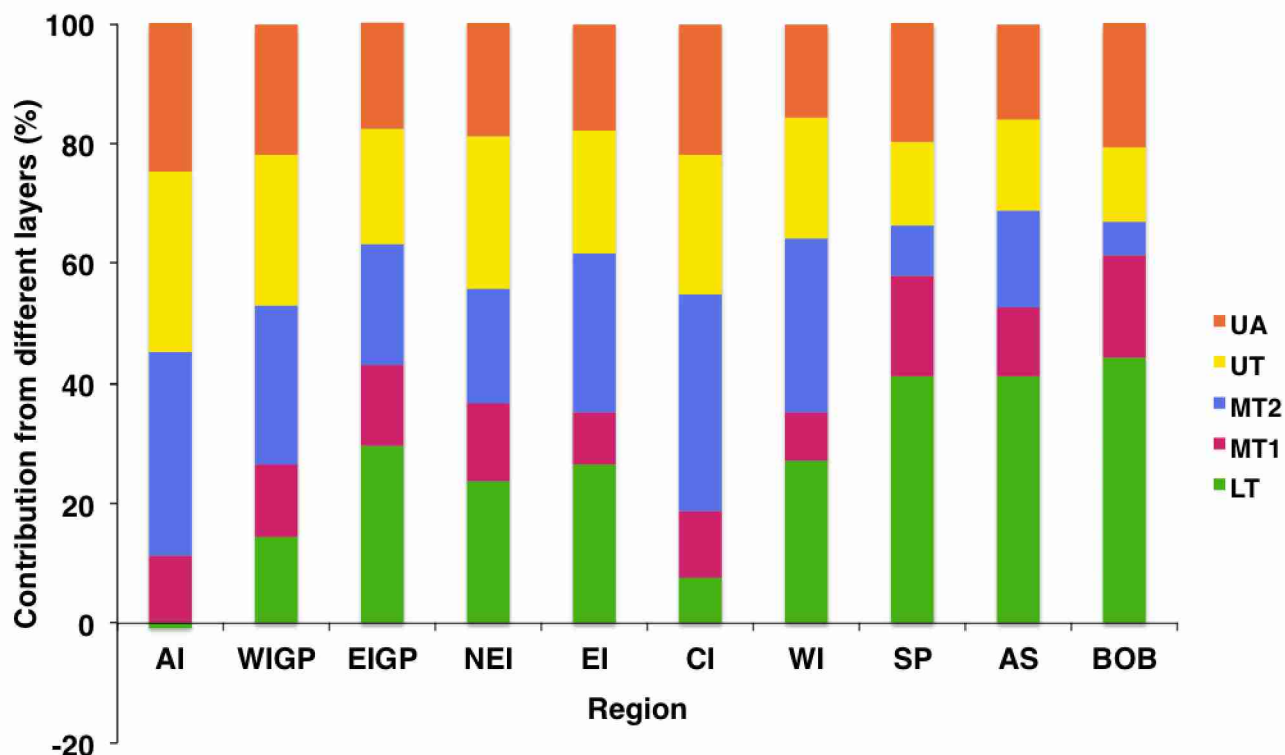
みられ、1ヶ月の遅れがある。また、その後放出量が減少してもXCH₄はあまり減少しないことはAGSの例と同じである。これら二つの例は、XCH₄の変動が単純に放出の季節変動と同じ結果でないことを示している。これはXCH₄を決定づけている要因が、その地域における放出量だけではなく他にもあることを示唆する。ここで5層にわけた大気層のうち、最下層のLTでは一般に放出の影響を直接受けている可能性が高いと期待されるが、図(1)-5(a5)と(a7)を比較するとLTのメタン濃度は放出の季節変動と大きく異なり、秋から冬季にかけて高くなっている。全気柱量のXCH₄(a6)は6月から9月にかけて増加しているが、この変化はLTよりもむしろ上層であるMT2とUTの変動に類似している。このように上層に存在するメタン量が、観測されるXCH₄の挙動に大きく寄与することが示されている。季節変動の程度をさらに定量的に分析するため、XCH₄が最大値になる月と最小値になる月の差(これを季節変動振幅と定義)に対し、各高度層の寄与の割合を図(1)-6に示した。この図のEIGP(左から3本目)が示す通り、季節変動振幅の約40%が600hPa以下($\sigma > 0.6$)の下層のメタンの変動に起因するが、残りの60%は600hPa以上の上空のCH₄の変動に起因するものである。このような高高度のメタン変動がXCH₄変動の大きな要因であることはこれまで認識されてこなかったことである。

一方、SP領域(図(1)-5の中央)ではEIGPと異なる顕著な特徴がある。図(1)-5(b7)に示す通り、5月から9月にかけて放出量は相対的に高いが、XCH₄は逆にこの時期に相対的に低く、両者の季節進行には逆の傾向がある。一方、全気柱平均混合比XCH₄と5層の部分気柱平均混合比X_pCH₄を調べると、LTでは(極大時期が1ヶ月ずれてはいるが)XCH₄と同じような季節変動が見られ、また上層のX_pCH₄の季節変動も同様に10月付近に最大値になる傾向がある。図(1)-6のSP(右から3本目)に示す通り、XCH₄の季節変動に対する600 hPa 高度以下の変動の寄与は約60% だけで、それ以上の高度の寄与が40%に上る。この原因を調べるために、地上風の解析とモデルの中の化学消滅速度を調べた。その結果、この時期には(1)南半球起源の清浄な空気が侵入しメタンを多く含む空気は北インドに押し流されること(2)他の領域に比べ、化学消滅速度が高いこと(1月には6ppb day⁻¹であるが、4月には~12ppb day⁻¹である)がわかった。

図(1)-5右端に示すAI領域(半乾燥地域)ではメタンの放出量は非常に少ない。この領域のXCH₄の変動は、上述の2領域と全く異なっている。XCH₄は5月から上昇し始め、8月に最大値(~1896 ppb)をとり、その後は4月にかけて減少する(図(1)-5(c6))。この季節変動パターンは放出量の季節変動(図(1)-5(c7))と傾向がよく似ており、あたかもXCH₄が放出の季節変動を反映しているかの様である。しかしながらLT(図(1)-5(c5))は放出量の季節変動と全く似ても似つかない。その一方でMT2、UTの季節変動パターンはXCH₄のそれと酷似している。季節変動の振幅に対する寄与を見ると、図(1)-6の左端に示す通り、LTとMT1を合わせた大気下層($\sigma > 0.6$)のメタンのXCH₄の季節振幅への寄与はわずか12%にすぎない。一方、それ以上の高度の寄与は88%に上る。この例は地上付近からの放出がXCH₄の季節変動を形成するわけではないという典型的な事例である。



図(1)-5: 選別された3領域におけるXCH₄と放出量の時系列。各カラムは右からEastern IGP(EIGP)、Southern Peninsula (SP)と Arid India(AI) に対応する。月平均値は2011年から2014年までのすべての期間のデータを平均して得られた。上部の5つのパネルは各高度層の月平均部分混合比(X_pCH₄)である。 σ の値は1.0-0.8(1段目)、0.8-0.6(2段目)、0.6-0.4(3段目)、0.4-0.2(4段目)、0.2-0.0(5段目)に対応する。6段目はGOSATで観測されたXCH₄(黒丸)とACTMシミュレーションで得られたXCH₄を示す。7段目はメタン放出量の月平均値(詳細はPatra et al., 2016参照)¹⁵⁾、GOSATのXCH₄月平均値のエラーバーは標準偏差の範囲を示す。煩雑さを避けるためACTMの値には標準偏差を示していない。各パネル中の赤線・青線は放出シナリオAGS(赤)・CTL(青)に対応している。放出についてのy軸のスケールは左端カラム(EIGP)と右の二つのカラム(SPとAI)で異なることに注意。

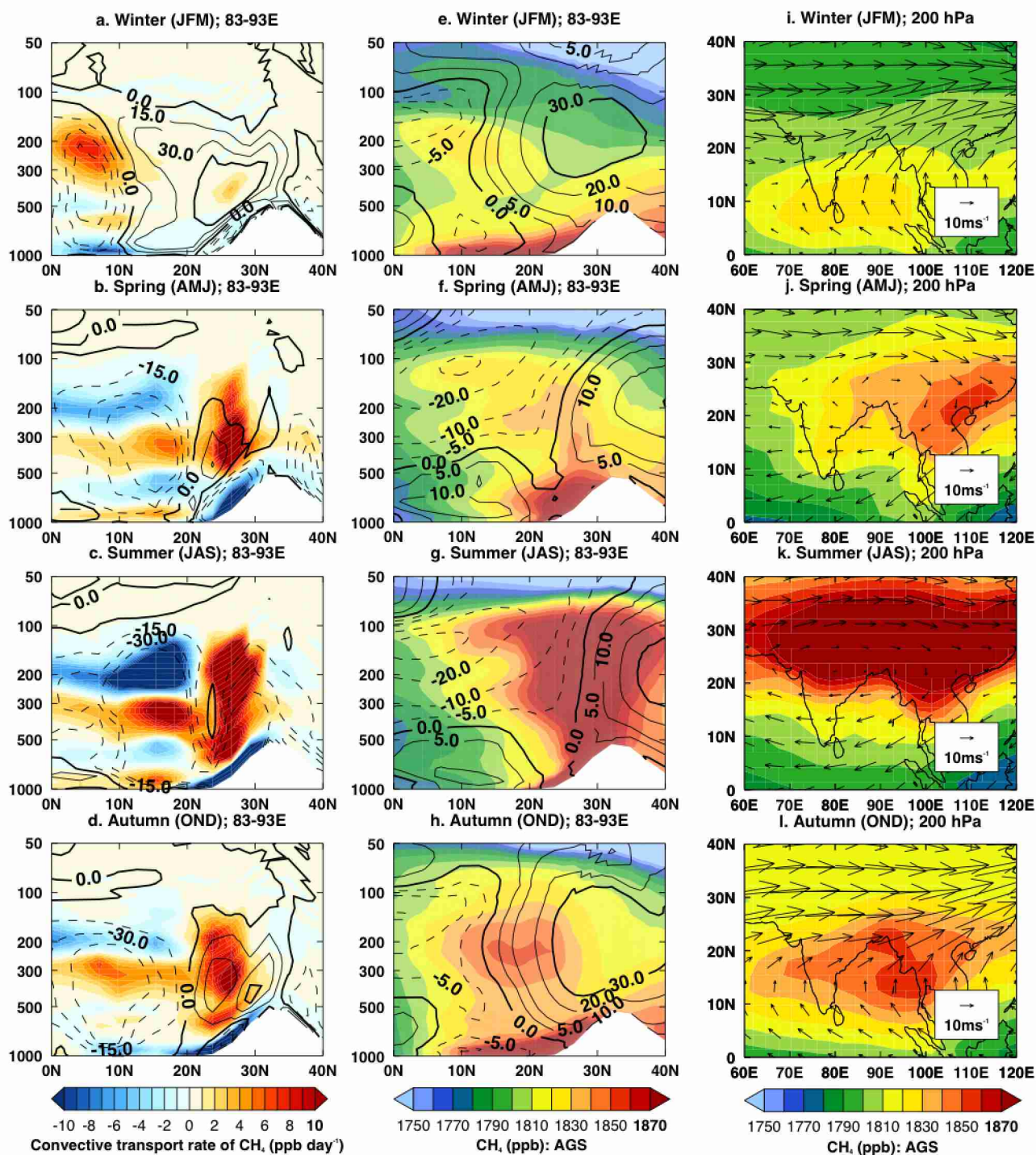


図(1)-6：メタンの部分気柱量が全気柱平均混合比 (XCH_4) の季節変動振幅に及ぼす寄与の割合。ここで季節変動振幅は XCH_4 が最大値を取るときと最小値を取るときとの差である。横軸は対象10領域（表(1)-1参照）の略記号を示す。寄与の値はすべて放出シナリオAGSに対する結果である（詳細は本文参照）。

4. 3 上部対流圏における高濃度メタンの起源

前節で、上層のメタン増加が XCH_4 の増加に大きく寄与することを示した。その原因は主としてメタンの輸送効果にあると考えられる。そこで図(1)-7にモデルで得られた輸送に関する各種の物理量について、放出シナリオAGSの2011年に対するシミュレーション結果を示す。左端と中央に示されているのは、メタンの対流輸送速度 ($ppb\ day^{-1}$) と気圧鉛直速度 ($hPa\ s^{-1}$) の東経83度-93度の範囲で平均した緯度高度断面図である。この経度の範囲はおおよそEIGPの範囲に対応している。輸送速度($ppb\ day^{-1}$)の正（負）の値は、輸送による CH_4 質量の増加（減少）に対応し、また鉛直速度では正と負の値がそれぞれ下降流と上昇流に対応する。図(1)-7(a-d)で示す通り夏の南西モンスーンの時期には、地上付近のメタンの放出量も多く、また上昇流も強いため、上部対流圏にメタンが高濃度で蓄積されることがわかる。中央の図(1)-7(e-h)はメタン濃度と東西風を示している。東西風ゼロの箇所はITCZに対応する。またメタンを豊富に含む空気塊の200hPaにおける水平断面図と風の場合を描くと図(1)-7(i-l)のようになる。上部対流圏でメタンを豊富に含む空気塊は南西モンスーン時期には高気圧性の風に拘束され、南アジア全域から東アジアまで広範囲にわたってメタン増加を引き起こす。モンスーン期の後には上部対流圏の高気圧は消滅し、メタン高濃度領域は南へと移動して行く。このような輸送過程によって複雑なメタンの鉛直分布構造が作られ、GOSAT/SWIRの観測ではその鉛直構造に依存して気柱平均混合比 XCH_4 が得られていることが理解できた。

以上の結果はChandra et al. (2017)として欧州地球物理連合発行のAtmospheric Chemistry and Physics(ACP)に掲載された。なお表(1)-1に示した10個に分割した領域のうち、紙面の制約から本報告書で掲載できなかった地域の図表はSupplementary materialとして以下のリンクからダウンロード可能である。<https://www.atmos-chem-phys.net/17/12633/2017/>



図(1)-7: AGS放出シナリオで計算された各種物理量の2011年の季節平均値。(a-h) は経度83-93°E で平均した緯度高度断面図(白い空白は地形によるデータ欠損を示す)。(i-l)は高度200hPaにおける水平マップを示す。

(a-d): メタンの対流輸送速度 (ppb day⁻¹)。正負の値はメタン質量の蓄積と発散に対応する。等値線は鉛直風速度 (omega velocity) で単位はhPa s⁻¹。正(実線) 負(破線) の値は下降流と上昇流に対応する。
 (e-h): メタン混合比。等値線は東西風速度 (u)。正 (実線) 負 (破線) の値は西風と東風に対応する。
 (i-l) 高度200hPaにおけるメタンの水平マップと水平風ベクトル (単位は m s⁻¹)。

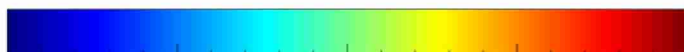
4. 4 冬季に観測される高濃度メタンについて

図(1)-7cを見ると、東インドガンジス河平原(EIGP)に相当するヒマラヤ山麓（緯度20-25度付近）では、冬季に地上付近でメタン濃度が高くなることが示されているが、この傾向は（ここには示していないが）西インドガンジス河平原(WIGP)においても同様である。本プロジェクトのサブテーマ2では、メタン鉛直分布とXCH₄の関係を解明するため、現地での空気採集を行ってきたが、WIGPに対応するカルナルやソーニーパットで冬季にメタン濃度が最大となることを実証した（サブテーマ2の報告参照）。本章では、サブテーマ2で得られたメタン濃度に基づき、高濃度メタンの起源を流跡線解析によって検討した結果を以下に示す。

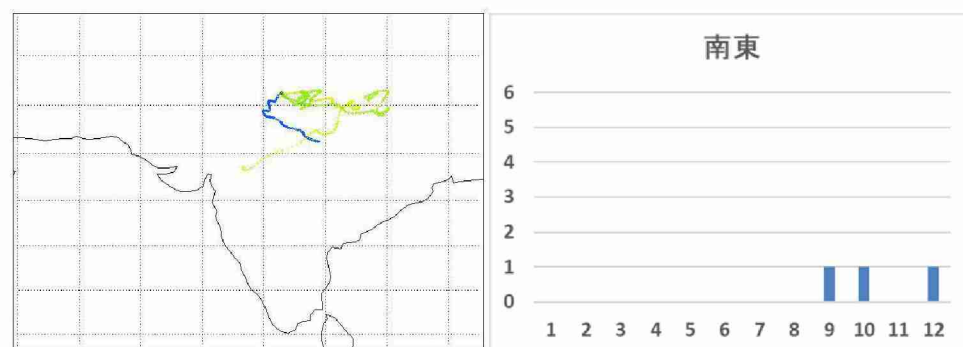
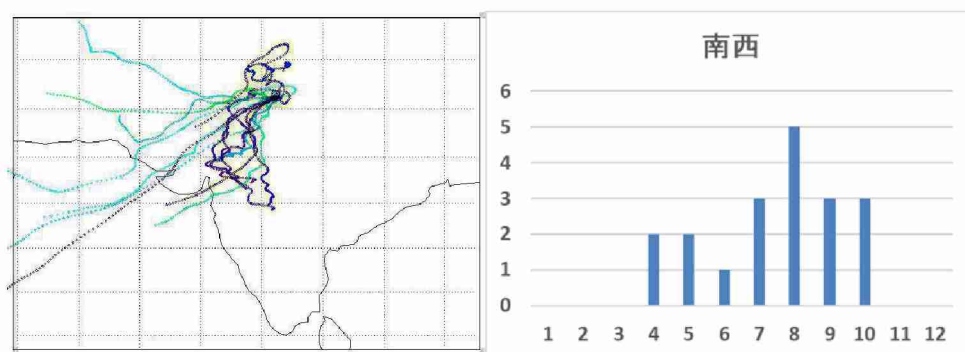
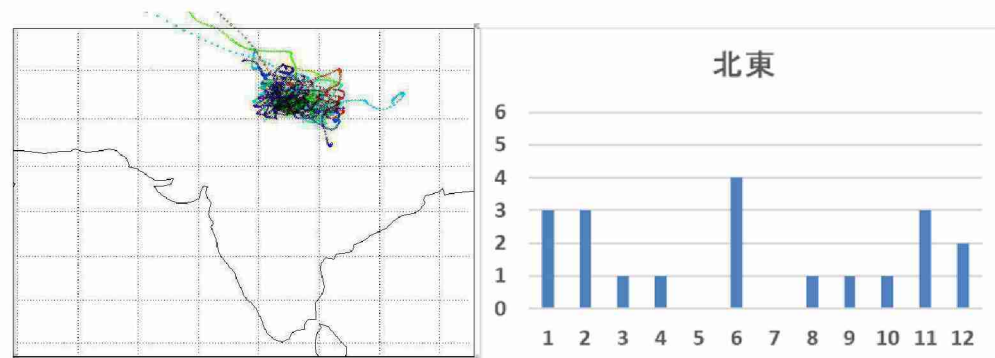
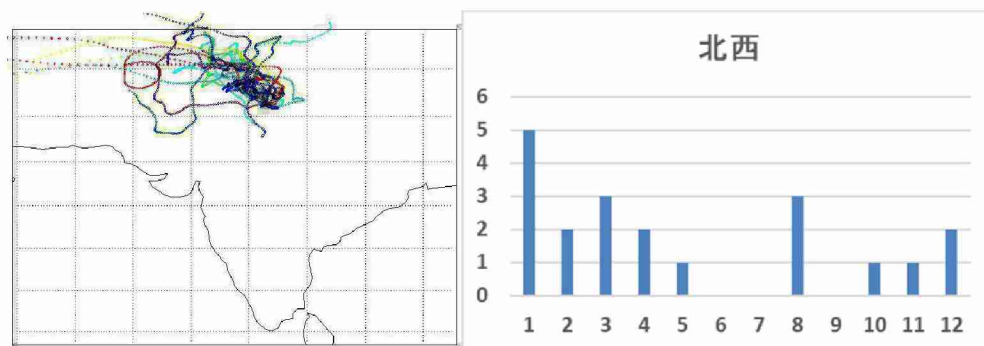
本研究ではサンプリングされた空気塊のメタン濃度データのうちカルナルの28例とソーニーパット102例の計130の事例すべてについて、3日間の後方流跡線解析を行った。そのうち、2015/1～2016/12の1年間にソーニーパットで得られた63例のデータについて空気塊の起源を北西・北東・南東・南西の4方向について分類した結果を図(1)-8に示す。図中、流跡線につけられた色はカラーバーが示すメタン濃度を示している。すべての期間の平均濃度は2133ppbであった。南西モンスーンの時期には南西方向からの空気の流入が明瞭に示されている。この時期には、海洋や半乾燥地域を通してソーニーパットに到達している空気塊が多く、メタン濃度は2200ppbを下回り、低めの値となっている。この時期、ソーニーパット周辺は稲作期間中で最もメタンの放出量が多いと推定される時期である。一方、南東からの空気の流入例は極めて少ない。南西モンスーン時期以外時期（1-6月と10-12月）の空気の流入は北西もしくは北東からであるが、北東からの流入の場合は流跡線の長さが短いことが示す通り、風速が弱いことを示している。高濃度が得られる事例（流跡線の色が赤いもの）は多くが北東から、一部は北西からの流入である。

次に、特に冬季に高濃度メタンが観測された事例を二例、流跡線の高度断面図を気象場のデータと共に示す。図(1)-9は2014年12月21日、図(1)-10は2015年1月18日に観測された事例で、メタン濃度は2470 ppbと2595 ppbで共に非常に高濃度であった。図の右下のパネルに示す流跡線の鉛直断面図から空気塊の動きを見ると両事例とも上空から下降してきていることが明瞭で、対応する気象場でも沈降性気流が示されている。このように、冬季に観測される高濃度の事例では風が弱く下降気流が卓越することが示された。また同時にサンプリングから得られたCOは、2014年12月21日に717ppb、2015年1月18日は651ppbで共に高濃度であり、COとCH₄の間の正相関も確認されている（サブテーマ2の報告参照）。これらの結果は現在、サブテーマ1、2、6と協力して解析を進めており、プロジェクト終了後にまとめて論文化する予定である。

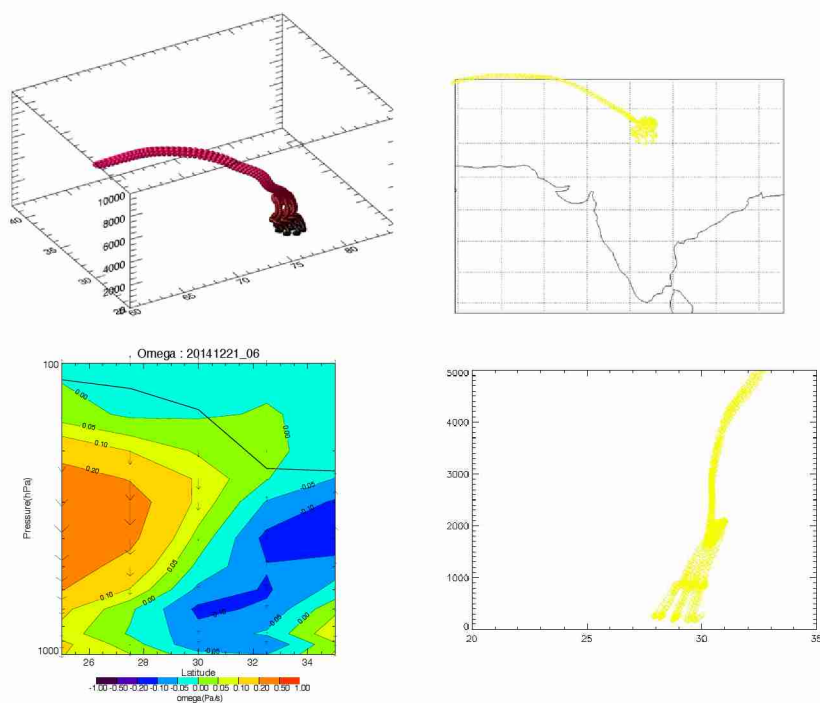
1800 2000 2200 2400 2600 ppb



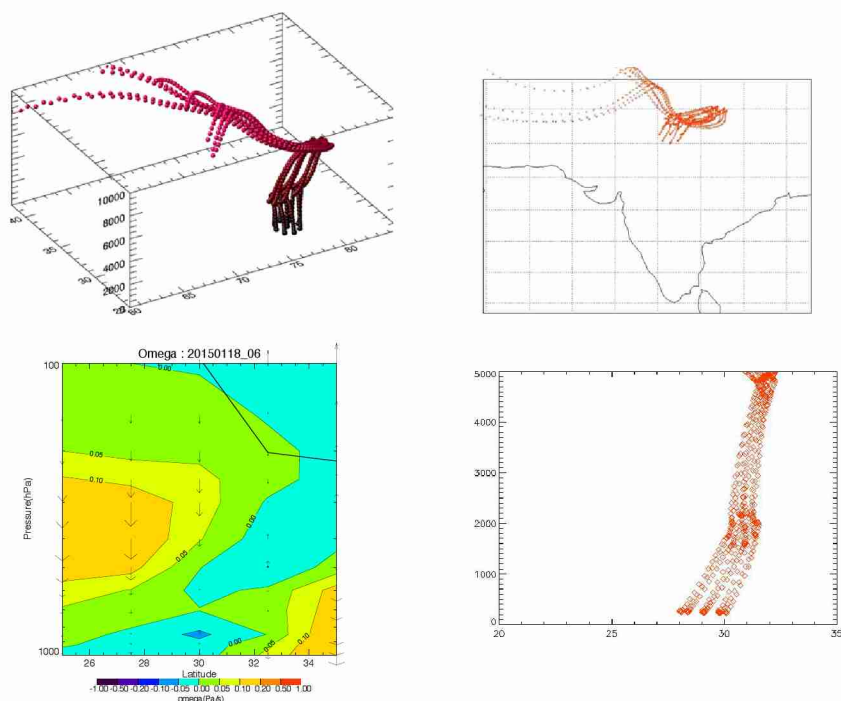
北西



図(1)-8：（左）ソーニーパットを起点として2015/1～2016/12の1年間の63例の観測事例の日時から3日間の後方流跡線解析を行った結果。色は観測されたメタン濃度（カラーバーで示す）である。（右）観測された月別の数。上から北西・北東・南西・南東の4方向に分けて分類した結果である。



図(1)-9：2014年12月21日に観測された事例。メタン濃度は2470ppbであった。（左上）流跡線を立体的に示したもの（右上）流跡線の東西移動を示す（色は図(1)-8のカラーバーと同じ）。（右下）流跡線の鉛直移動を示す（色は図(1)-8のカラーバーと同じ）。（左下）鉛直風の鉛直断面図。矢羽根は風向を示す。



図(1)-10：2015年1月18日に観測された事例。メタン濃度は2595ppbであった。4つのパネルは図(1)-9と同様。

4. 5 まとめ

南アジアのインド上空とその周辺地域において、GOSATによって観測されたメタン気柱平均混合比(XCH_4)を解析し、JAMSTECのACTMシミュレーション結果と比較した。解析対象地域であるインド亜大陸を表(1)-1で示す10の地域に分割し、各地域毎に XCH_4 の変動をACTMから推定される部分気柱量と関連づけて詳細に調べた。その結果、GOSATで得られる気柱平均混合比(XCH_4)の変動はメタンの地上からの

放出だけで決定されず、アジアモンスーンによって引き起こされる複雑な輸送過程の影響を大きく受けることが示された。

南西モンスーンの時期（7月から9月）にインドガンジス平原(IGP)で観測される XCH_4 の最大値と最小値の差（季節変動振幅）はその原因の60%が600hPa以上の上空にあり、600hPa以下の低高度の寄与は40%程度であった。さらに半乾燥地でメタンの放出が極めて低いと推定される半乾燥領域上空では、88%が上部対流圏からの寄与であることが明らかになった。この理由は、強いメタン放出領域であるIGPから、南西モンスーン期間中にメタンを豊富に含む空気塊が強い対流活動によって上空に持ち上げられ、さらに200hPa近くの上部対流圏の高気圧性の循環によって閉じ込められることで高濃度が維持される過程によるものと考えられる。インド最南端の領域では、南半球起源の清浄な空気が侵入しメタンを多く含む空気は北インドに押し流されることや、他の領域に比べて化学消滅速度が速いことから、 XCH_4 の季節変動はその場のメタン放出の季節変動とは全く異なることも明らかになった。

GOSATの短波長赤外観測では、このような複雑なメタンの鉛直構造を観測することができず、単に全気柱量に対応する XCH_4 の情報しか得られない。そのため、現在の大気化学輸送モデルを使ったインバースシステムに単純にGOSATで XCH_4 を投入することでは領域スケールでのメタン放出推定の精緻化は実現困難であることが示された。これを改善するためには、まずメタンの鉛直分布をより正確に観測する必要がある。また輸送過程や化学消滅反応の及ぼす影響を十分検討することのできる先鋭的なモデル開発が望まれる。サブテーマ6では、現在、輸送過程の精度を向上させるモデルの開発が進んでいる（本報告書サブテーマ6参照）。またGOSATのTIRチャンネルデータの検証が進められており(Zou et al., 2016²¹⁾; Holl et al., 2016²²⁾)、GOSATあるいは次期ミッションのGOSAT-2によってSWIRとTIRの結合によるメタン濃度鉛直分布の導出が可能になれば、メタン放出量推定の信頼性は大きく改善されるであろう。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

これまで南アジアからのメタン放出量は相当に大きいことはある程度把握されてきたが、推定値には大きな不確実性が伴ってきた。我が国では世界に先駆けて環境省が中心になり、温室効果ガス観測技術衛星（Greenhouse gases Observing SATellite :GOSAT : 和名いぶき）を打ち上げ、現在まで9年間にわたってメタン観測データを蓄積した。本研究は、南アジア上空においてGOSATで観測された気柱平均混合比(XCH_4)の季節変動が一見してモンスーン時期における地上からのメタン放出量の増加を直接反映しているかのように見えても、実際はモンスーン循環による輸送過程によってもたらされる複雑なメタン鉛直分布の変動、特に中部対流圏より上層の寄与が著しく大きいことを初めて明瞭に示した。今後、GOSAT・ XCH_4 を活用して南アジアからのメタン発生量推定を改善して行くためには、メタンの鉛直分布に関する情報を取得することが重要であることが示された。GOSAT-2における熱赤外（TIR）波長帯の観測結果の有用性を示す結果である。また、インバース解析を行う大気化学輸送モデルにおいて鉛直輸送の再現性を高めることが重要であることが示されたが、この結果はプロジェクト内でサブテーマ6に反映された。さらに、サブテーマ2によって北インド・ソーニーパットにおいて行われた大気サンプリングの結果は、周囲のメタン放出量が少ないと考えられる冬季にメタンが高濃度になるという予期せぬ新しい発見に繋がった。気象解析や流跡線解析の結果、冬季の高濃度メタンは強い沈降気流と関連していることが示唆された。

本報告書の内容の大半はすでに著名な国際学術雑誌に掲載され、国際会議においても数多く発表しており、十分な評価を得ている。

（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>

GOSATは環境省他が、世界各国の温室効果気体排出量推定を行うことを目指して打ちあげた衛星である。GOSATミッションの目的は、温室効果ガスの全球分布を監視し、京都議定書で要求される温室効果ガスの削減を検証することによって環境行政に貢献し、将来のミッションのために地球観測技術を進歩させることである。これまで二酸化炭素の観測データの有効利用がミッションの中心であったが、将来はメタンについても発生源と吸収源を亜大陸規模で推定することが期待されている。しかし、本章の冒頭に述べた通り、メタンは大気寿命が短いこと、成層圏で減少する特有の鉛直分布を持つことなど、二酸化炭素と異なる特性を有し、発生源の特定や放出量の定量化は容易でない。

本研究は、南アジア域においてGOSATで観測されたメタンの気柱平均混合比(XCH_4)をメタンの発生源推定に適用するためには、鉛直分布情報が必要不可欠であることを示した。本研究の成果は今後GOSAT観測データを、温室効果気体削減のための環境行政に活用する上で貴重な情報となる。またGOSAT-2のミッションにおいて、SWIRとTIRの組み合わせによるメタン鉛直分布導出の重要性を示した。

6. 国際共同研究等の状況

1) 協力案件名：インド・ソーニーパットにおける大気サンプリングデータの利用

カウンターパート：P.K.Dhaka教授・デリー大学ラジャハニカレッジ・インド ならびに東京大学大気海洋研究所

位置づけ：北インド水田地帯における唯一の温室効果ガスの高精度定常観測データであり、メタン鉛直分布情報を得る貴重なデータである。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. ONO, S. HAYASHIDA, T. SUGITA, T. MACHIDA: SOLA, Vol.11, 160–164, (2015), Comparison of GOSAT SWIR and Aircraft Measurements of XCH_4 over West Siberia
- 2) N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, T. SAEKI and P. K. PATRA: Atmos. Chem. Phys., 17, 12633-12643 (2017), What controls the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?
- 3) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA, P. ELAYAKUMAR, K. VANITHA, C. UMAMAGESWARI, P. JOTHIMANI, V. RAVI: Agri Ecosyst Environ, Vol.252, 148- 158 (2018), Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.

<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) C.IWASAKI, S.HAYASHIDA, R.IMASU, A.ONO, T.YOKOTA, I.MORINO, Y.YOSHIDA, O.SERGEY,

- B.ANDREY AND TCCON PARTERS.:2015 AGU Fall Meeting, San Francisco (2015)
 “Validation of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ retrieved by PPDF-S method.”
- 2) 岩崎千沙、林田佐智子、今須良一、小野朗子、横田達也、森野勇、吉田幸生、O. Sergey、B. Andrey、TCCON Partners：日本気象学会2015年度秋季大会（2015）
 “PPDF-S法によるGOSATのCO₂、CH₄気柱平均混合比データの検証”
- 3) 林田佐智子、久慈誠、寺尾有希夫、須藤重人、犬伏和之、間野正美、山本昭範、Prabir Patra：日本気象学会2015年度秋季大会（2015）
 「衛星と現地観測による大気メタンデータの活用～南アジアにおける新展開～」
- 4) 出原雅也、秀森丈寛、中山智喜、松見豊、笹子宏史、川崎昌博、高橋けんし、林田佐智子、山本昭範、今須良一：第21回大気化学討論会（2015）
 「実大気におけるリアルタイムその場観測を目的としたオープンパスレーザー分光メタンガス検出器の校正」
- 5) 林田佐智子：International Workshop on Land Use/Cover Changes and Air Pollution in Asia, Bogor, Indonesia (2015)
 “Toward Improvement of Methane Emission Inventory of South Asia from GOSAT”
- 6) 犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、山本昭範、林田佐智子：日本熱帯農業学会第119回講演会(2016)
 「南インド水田における温室効果ガスの動態と土壌理化学性」
- 7) 林田佐智子、小野朗子：第24回生研フォーラム（2016）
 「アフリカにおける GOSATで観測されたメタンと二酸化炭素の比率」
- 8) K. INUBUSHI, P. PRABIR, S. HAYASHIDA and AMASA members: 7th ISAJ Symposium, India-Japan Symposium on Science and Technology for Sustainability, Main Auditorium Embassy of India Tokyo, Japan, Program & Abstract, p.21., (2016)
 “Sustainable Paddy Rice Farming Harmonized With Greenhouse Gas Emission/From AMASA Project In India “
- 9) 林田佐智子：Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences (ARIES) 招待セミナー（2016）
 “Introduction of our recent activities to improve methane emission estimate in South Asia: Project of Atmospheric Methane from Agriculture in South Asia (AMASA)”
- 10) 林田佐智子：Physical Research Laboratory 招待セミナー（2016）
 Project of Atmospheric Methane from Agriculture in South Asia (AMASA)
- 11) 杉田考史、齋藤尚子、林田佐智子、町田敏暢、笹川基樹：日本気象学会2016年度秋季大会（2016）
 「西シベリア上空のGOSAT（熱赤外バンド）と航空機観測によるメタンの比較」
- 12) 出原雅也、秀森丈寛、中山智喜、松見豊、笹子宏史、川崎昌博、高橋けんし、林田佐智子、山本昭範、今須良一：日本気象学会2016年度秋季大会（2016）
 「実大気における連続観測を目的としたオープンパスレーザー分光メタン検出器の校正」
- 13) 山本昭範、小野圭介、須藤重人、秀森丈寛、出原雅也、松見豊、犬伏和之、間野正美、竹内大樹、林田佐智子：2016年度日本土壌肥料学会京都大会（2016）
 「南部インド水田地帯における大気メタン連続観測」
- 14) T. SUGITA, N. SAITOH, H. HAYASHIDA, T. MACHIDA: The 8th GOSAT RA PI Meeting, Kyoto, Japan (2016)
 “Comparison of methane profiles between GOSAT/TANSO-FTS TIR and aircraft measurements in West Siberia”
- 15) S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA and AMASA project team: The 8th GOSAT RA PI Meeting, Kyoto, Japan (2016)
 “Comparison of GOSAT CH₄ measurements with in-situ measurements and model simulations”
- 16) C. IWASAKI, R. IMASU, S. HAYASHIDA, T. YOKOTA, I. MORINO, Y. YOSHIDA, S. OSHCHEPKOV, A. BRIL, and TCCON Partners: 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS-12), Kyoto, Japan (2016)

“Validation of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ retrieved by PPDF-S method”

17)S. HAYASHIDA, P.K. PATRA, Y. TERA0 (Contributors : AMASA project team) : 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space(IWGGMS-12), Kyoto, Japan (2016)

“Comparison of GOSAT CH₄ measurements with in-situ measurements and model simulations - Applications of GOSAT CH₄ data to Agricultural CH₄ emission in Asia –“

18)S. HAYASHIDA, A. ONO: JpGU, Makuhari, Japan (2016)

“Proportion of atmospheric methane to carbon dioxide observed by GOSAT over biomass burning regions in Africa”

19)間野正美、犬伏和之、須藤重人、A.Z.OO、小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. RAVI : 日本農業気象学会2017年全国大会 (2017)

「インドの水田における温室効果ガスフラックスの測定」

20)犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、A.Z.OO、小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. RAVI : 日本熱帯農業学会第121回講演会 (2017)

「南インド水田における温室効果ガスの動態とその影響因子」

21)A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERA0:2017年度日本土壌肥料学会仙台大会, Sendai (2017)

“Effect of modified rice cultivation systems on methane and nitrous oxide emissions from paddy rice field. An attempt to separate anthropogenic CO₂ emission from natural component using CH₄ emission inversion”

22)S. HAYASHIDA: Indian Association of Physics Teachers (IAPT), Gurukula Kangri ANGRI Univ., Haridwar (2017)

“Climate Change and Introduction to project of Atmospheric Methane from Agriculture in South Asia (AMASA).” (invited)

23)N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, T. SAEKI and P.K. PATRA: JpGU-AGU joint meeting 2017, Makuhari, Japan (2017)

“What controls the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?”

24)S. HAYASHIDA, N. CHANDRA, P.K. PATRA, Y. TERA0, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO and AMASA project team: JpGU-AGU joint meeting 2017, Makuhari, Japan (2017)

“Methane emission estimate from South Asia: AMASA project.”

25)P.K. PATRA, S. NOMURA, Y. TERA0, N. CHANDRA, S. HAYASHIDA: 3rd ACAM Workshop, Guangzhou, China (2017)

“Variabilities in greenhouse gases in South Asia due to monsoon.”

26)N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, T. SAEKI, P.K. PATRA: 3rd ACAM Workshop, Guangzhou, China (2017)

“What control seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?”

27)S. HAYASHIDA: Asia Oceania Geosciences Society, 14th Annual Meeting, Singapore (2017)

“Origin of the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over South Asia.”

28)S. HAYASHIDA, N. CHANDRA, T. SAEKI, P.K. PATRA: the 2017 Joint IAPSO-IAMAS-IAGA Assembly, Cape Town, South Africa (2017)

“Origin of the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over South Asia.”

29)K. INUBUSHI, Z. WANG, M. MANO, S. SUDO, A.Z. OO, A. YAMAMOTO, K. ONO, S. HAYASHIDA, V. RAVI, M.A. BATEN: Abstract for Annual Meeting of Tropical Agriculture, Tamagawa University, Tokyo (2018)

“Influence of physico-chemical properties of soils on greenhouse gases production in paddy soils from Bangladesh, India and Japan.”

(3) 知的財産権

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) 「人工衛星から観た温室効果気体の分布：メタンはどこから出てくるか～AMASAプロジェクトの紹介～」(2016年10月20日、橿原市商工経済会館 5 階第一会議室)
- 2) 奈良女子大学理学部平成29年度公開講座『地球温暖化抑制を目指して「AMASA プロジェクトの挑戦」』（主催：奈良女子大学理学部、2017年11月11日、エポカルつくば、参加者約50名）
- 3) 環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS—12 第4回公開シンポジウム（2018年1月23日、京都）にて講演。『特別講演「南アジアから放出されるメタンの挙動研究～2-1502 AMASAプロジェクトの成果から～」』

(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. Tian, H., et al.: Nature, **531**, 7593: p. 225-228.(2016),The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere.
2. Monteil, G., et al.: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **118**, 20: p.11,807-11,823. (2013), Comparison of CH₄ inversions based on 15 months of GOSAT and SCIAMACHY observations.
3. Alexe, M., et al.: Atmospheric Chemistry & Physics, **15**, 1: p. 113-133.(2015),Inverse modelling of CH₄ emissions for 2010–2011 using different satellite retrieval products from GOSAT and SCIAMACHY.
4. Pandey, S., et al.: Atmospheric Chemistry & Physics, **16**, 8: p. 5043-5062.(2016),Inverse modeling of GOSAT-retrieved ratios of total column CH₄ and CO₂ for 2009 and 2010.
5. Ono, A., et al.: SOLA, **11**: p. 160-164.(2015),Comparison of GOSAT SWIR and Aircraft Measurements of XCH₄ over West Siberia.
6. Frankenberg, C., et al.: Journal of Geophysical Research, **116**, D4.(2011),Global column-averaged methane mixing ratios from 2003 to 2009 as derived from SCIAMACHY: Trends and variability.
7. Hayashida, S., et al.: Remote Sensing of Environment, **139**: p. 246-256.(2013),Methane concentrations over Monsoon Asia as observed by SCIAMACHY: Signals of methane emission from rice cultivation.
8. Xiong, X., et al.: Atmos. Chem. Phys., **9**: p. 783–794.(2009),Methane plume over south Asia during the monsoon season: satellite observation and model simulation.
9. Baker, A.K., et al.: Geophysical Research Letters, **39**, 10: p. n/a-n/a.(2012),Estimating the contribution of monsoon-related biogenic production to methane emissions from South Asia using CARIBIC observations.
10. Kuze, A., et al.: Applied Optics, **48**, 35: p. 6716.(2009),Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring.
11. Wunch, D., et al.: Geophysical Research Letters, **36**, 15. (2009),Emissions of greenhouse gases from a North American megacity.
12. Morino, I., et al.: Atmospheric Measurement Techniques, **4**, 6: p. 1061-1076.(2011),Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra.
13. Yoshida, Y., et al.: Atmospheric Measurement Techniques, **6**, 6: p. 1533-1547.(2013),Improvement of the

retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data.

14. Patra, K.P., et al.: Journal of the Meteorological Society of Japan, **87**, 4: p. 635-663.(2009),Growth Rate, Seasonal, Synoptic, Diurnal Variations and Budget of Methane in the Lower Atmosphere.
15. Patra, P.K., et al.: Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, **94**, 1: p. 91-113.(2016),Regional Methane Emission Estimation Based on Observed Atmospheric Concentrations (2002-2012).
16. Onogi, K., et al.: Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, **85**, 3: p. 369-432.(2007),The JRA-25 Reanalysis.
17. Spivakovsky, C.M., et al.: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **105**, D7: p. 8931-8980.(2000),Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH: Update and evaluation.
18. Fung, I., et al.: Journal of Geophysical Research, **96**: p. 13,033-13,065.(1991),Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle.
19. Yan, X., et al.: Global Biogeochemical Cycles, **23**, 2.(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.
20. Yoshida, Y., et al.: Atmospheric Measurement Techniques, **4**, 4: p. 717-734.(2011),Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite.
21. Zou, M., et al.:Atmospheric Measurement Techniques, **9**, 8: p. 3567-3576.(2016),Satellite observation of atmospheric methane: intercomparison between AIRS and GOSAT TANSO-FTS retrievals.
22. Holl, G., et al.:Atmos. Meas. Tech., **9**, 5: p. 1961-1980.(2016),Methane cross-validation between three Fourier transform spectrometers: SCISAT ACE-FTS, GOSAT TANSO-FTS, and ground-based FTS measurements in the Canadian high Arctic.

Ⅱ－２ 南アジアを中心とした大気メタン濃度計測

国立研究開発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

平成27(開始年度)～29年度累計予算額：15,082千円（うち平成29年度：4,230千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

南アジアは、メタンの主要な発生源であることが明瞭であるにも関わらず、これまでほとんど観測データが得られていなかった観測の空白域であった。本研究では、北インドの水田地帯（ソーニーパット）、バングラデシュの水田地帯（コミラ）、ヒマラヤ山麓（ナイニタール）において定常的な大気サンプリング（週一回）を行い、実験室で大気試料のメタン濃度の高精度分析を行った。また、バッテリーで駆動するモバイルサンプリング装置を開発し、南インドのアドゥトゥライでも大気サンプリングを行った。これらのデータは、観測の空白域における極めて貴重な観測データセットとなった。また、観測された大気メタン濃度データを各サブテーマに提供し、逆推定モデルの評価、レーザー分光法を使用した大気中メタン濃度観測の校正、ならびに複合的データ解析に活用された。

北インドの水田地帯で4年間の観測データを蓄積したことで、北インド特有のメタン濃度変動が明らかになった。地上の大気中メタン濃度は、水田からのメタン放出量が最大となる夏から秋ではなく、冬に高濃度となることが観測された。本研究の観測結果から、北インドではモンスーンに伴う大気輸送が地上メタン濃度変動に大きな影響を与えていることが示唆され、このメタン濃度変動はGOSATによる気柱量観測では検出されないことなどが明らかとなった。これは、南アジアにおけるメタン収支を逆推定するためにはGOSATによる気柱量観測データのみでは不十分であることを示唆しており、本研究で得られた南アジアの大気メタン濃度の高精度地上観測データは、GOSATデータを補完し、GOSATメタンデータの利活用を図る上で重要な参照データとなる。

〔キーワード〕

大気モニタリング、大気メタン濃度、地上観測、高精度計測、南アジア

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¹⁾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る。南アジアはメタンの大発源地であるが、これまで大気中メタン濃度の高精度地上観測データは非常に限られていた。大気輸送モデルを用いて発生量を逆推定しようとするトップダウンアプローチを南アジアで実施するには、GOSAT等の衛星観測データのみならず、大気中メタン濃度の高精度地上観測データが必須である。

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、地上観測ステーションでの観測、太平洋を航行する定期貨物船を利用した洋上大気の観測、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などを行ってきた。さらなるメタン濃度変動の原因解明には、

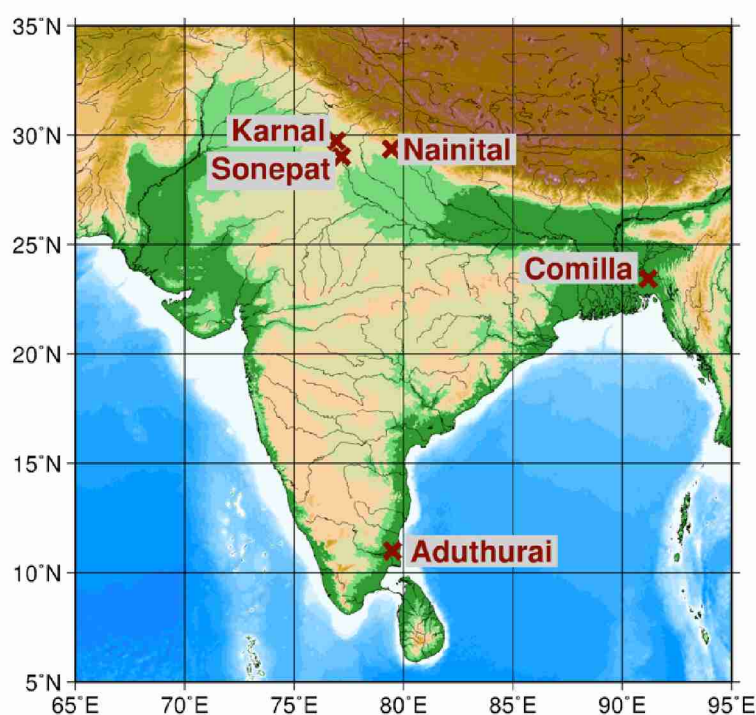
大きなメタン放出源の一つである南アジアの水田地帯におけるメタン濃度観測が重要である。我々は、平成24年度から26年度まで実施した総合地球環境推進費課題2A-1202「GOSATデータ等を用いた全球メタン発生領域の特性抽出と定量化」において、2013年8月から北インド・カルナル(Karnal)の大規模水田でフラスコサンプリングを開始し、1年間の大気中メタン濃度の高精度観測を行った。残念ながら、現地スタッフの観測体制の脆弱性により継続観測を断念したが、2014年9月に、新たにデリー大学と東京大学大気海洋研究所の協力により、デリー近郊のソーニーパット(Sonepat)の農家にフラスコサンプリングのためのサイトを設置した。また、これらに先立ち、国立環境研究所では大気フラスコサンプリングネットワークをアジア地域で展開し、2006年からヒマラヤ山麓のナイニताल(Nainital)、2012年からバングラデシュ水田のコミラ(Comilla)で継続してフラスコサンプリングを実施している。

2. 研究開発目的

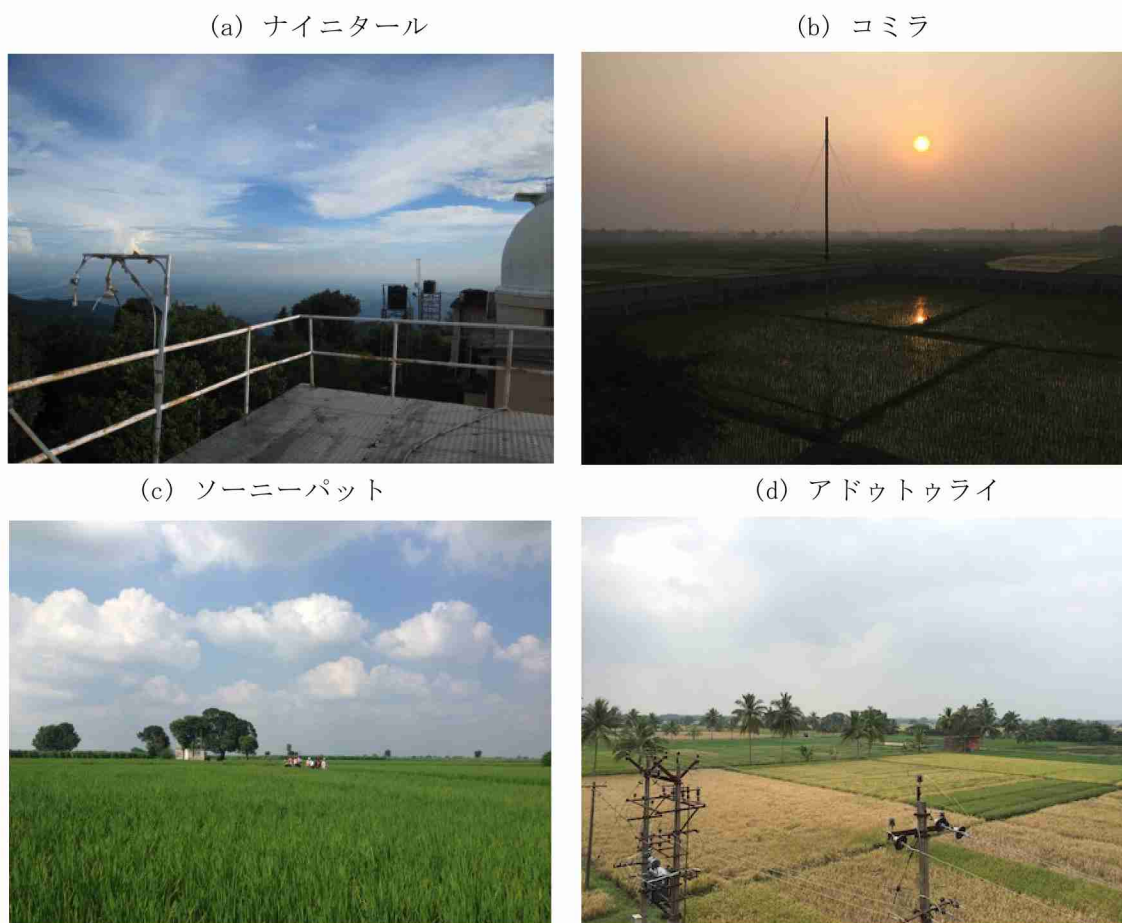
本研究では、南アジアでの大気メタン濃度変動の特性を解明するために、ソーニーパット、コミラ、ナイニतालの3地点において、国立環境研究所が開発した大気サンプリングシステムを用いて大気をフラスコに定常的に採取し、実験室で大気試料のメタン濃度の高精度分析を行うことを目的とする。また、観測された大気メタン濃度データを、逆推定モデルの評価（サブテーマ6）、レーザー分光法を使用した大気中メタン濃度観測の校正（サブテーマ5）ならびに複合的データ解析（サブテーマ1）のために、各サブテーマに提供する。

3. 研究開発方法

国立環境研究所地球環境研究センターですでに実施しているヒマラヤ山麓・ナイニतालおよびバングラデシュ水田地帯・コミラにおける大気サンプリングに加え、北インド水田地帯・ソーニーパットでの大気サンプリングを行い、実験室で高精度に大気中メタン濃度を分析した。また、バッテリーで駆動するモバイルサンプリングシステムを開発し、サブテーマ3、4で実験を行っている南インド・アドゥトゥライ(Aduthurai)のタミルナドゥ水稻研究所（TRRI）において大気サンプリングを行い、大気中メタン濃度の分析を行った。図(2)-1に、本研究で大気サンプリングを行った位置を、図(2)-2に各サイトの様子を示す。



図(2)-1 本研究で大気サンプリングを行った地点。



図(2)-2 各観測サイトの風景

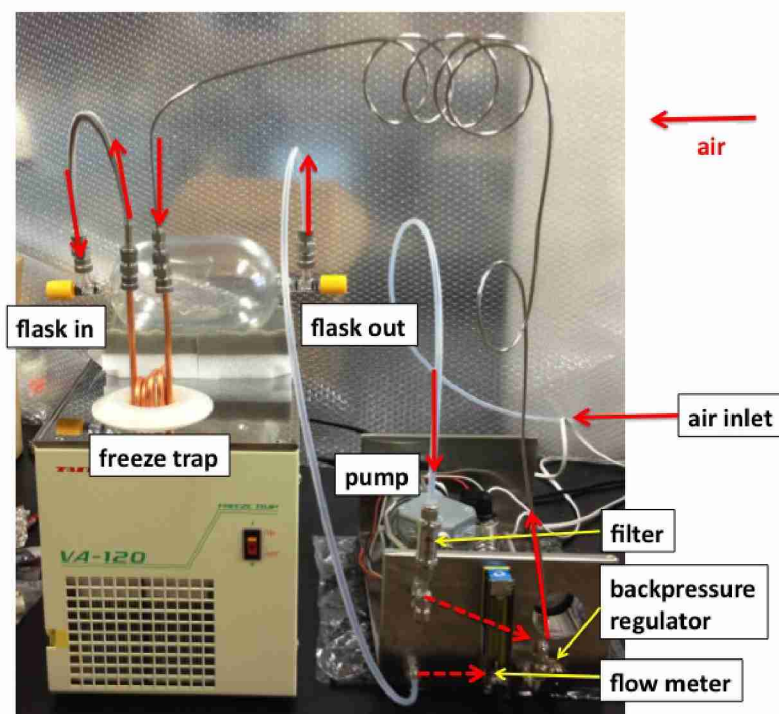
フラスコを用いた大気サンプリングは、その場の連続観測に比べると、実験室でしか実現できないような多成分を高精度で分析することが可能で、電源や空調などのインフラが整っていない場所でもサンプリングでき、比較的成本が安い、といった利点がある。一方で、観測の頻度が低く、データがまばらになる、という欠点がある。サンプリングの頻度を増やせばデータ数が増えるが、フラスコの数、輸送費や実験室での分析処理能力には限界がある。また、フラスコの中で成分が変化しないように、フラスコの素材と前処理、ならびにサンプリングのやり方に、細心の注意をはらう必要がある。このような条件を考慮して、以下のように大気サンプリングを行った。

ナイニタール、コミラ、ソーニーパットの3ヶ所では、各サイトとも屋上に設置したポールの先端に大気採取口を取り付け、そこから大気をポンプで引き、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。図(2)-3に大気サンプリング装置の概要を、図(2)-4にソーニーパットで実際に現地協力者がサンプリングしている様子を示す。大気試料は、現地協力者により週一回採取され、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。こうして、ほぼひと月に1回、各3ヶ所に対して、ガラスフラスコ4本の発送と、採取した大気試料の受取を行った。

ナイニタールでは、アリヤバータ観測科学研究所の Manish Naja博士によって、毎週水曜の現地時間14時に大気サンプリングを行った。コミラでは、ダッカ大学の Kawser Ahmad教授によって、時刻は多少前後するものの、毎週金曜の現地時刻14時から16時に大気サンプリングを行った。ナイニタールとコミラでは、週一回のサンプリング頻度を維持してきた。

ソーニーパットと、以前に観測を行っていたカルナルでは、現地協力者の都合に応じて、曜日はあまり固定せずに（週末が多い）、1週間おき程度の間隔で大気サンプリングを行った。カルナルでは、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たが、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。ソーニーパットにおいては、デリー大学の P.K.Dhaka 教授のご協力のもと、現地で無停電電源装置を手配し、現地時刻で 14 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。しかし、カルナルとソーニーパットでは、電力事情や、現地の政治情勢（大規模なデモがありデリーからサイトまで行く事ができない、など）により、数ヶ月の欠測が数回生じた。



図(2)-3 ソーニーパットで使用した大気サンプリング装置。
ナイニタールとコミラでも、同様の装置を使用している。



図(2)-4 大気サンプリング装置を用いて大気採取を行っているソーニーパットの現地協力者。

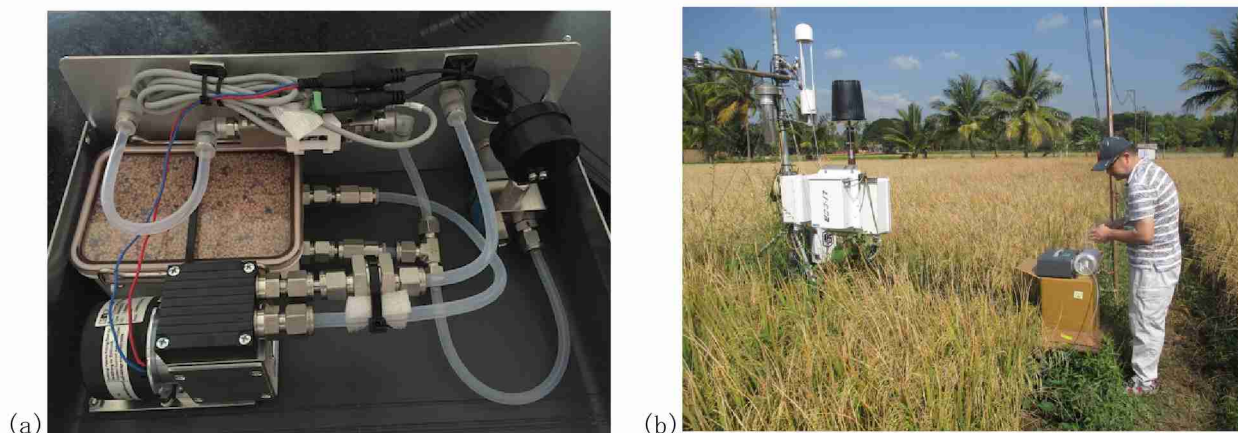
観測サイトを維持するために、2015年6月にソーニーパットの観測サイトを訪問し、大気サンプリング装置のメンテナンスを行い、冷凍機の不調や配管の修繕などを行った。その際、ネズミにより電気ケーブルが損傷した他、小動物により冷凍機ファンが停止していたことなどが明らかになった。このように、インドの農家の納屋で長期観測を行うためには、通常の観測サイト以上に細心の注意をはらい、定期的なメンテナンスを行う必要があった。また、この訪問時に大気サンプリングの集中観測も実施した。

2016年1月にはコミラのサイトを訪問し、大気サンプリング装置のメンテナンスを行い、大気採取管やポンプの交換・整備を実施した（図(2)-5）。



図(2)-5 コミラ観測サイトでの大気採取口とチューブ交換作業（左）
ならびに現地スタッフと行ったポンプ整備（右）の様子（2016年1月）。

これら3サイトにおける定常サンプリングに加え、バッテリーで駆動するモバイルサンプリング装置を開発し、南インド・アドゥトゥライのタミルナドゥ水稻研究所（TRRI）において大気サンプリングを行い、大気中メタン濃度の分析を行った。開発したサンプリング装置は、バッテリーで駆動するポンプとマスフローコントローラー、ならびにパーマピュアを用いた除湿管をコンパクトなアルミボックスに組み込んだもので、持ち運びが容易であるため、電源のない屋外での大気サンプリングが可能である（図(2)-6）。TRRIでは定常的なサンプリングは行わず、本課題の研究者がTRRIを訪問した際にサンプリングを行った。



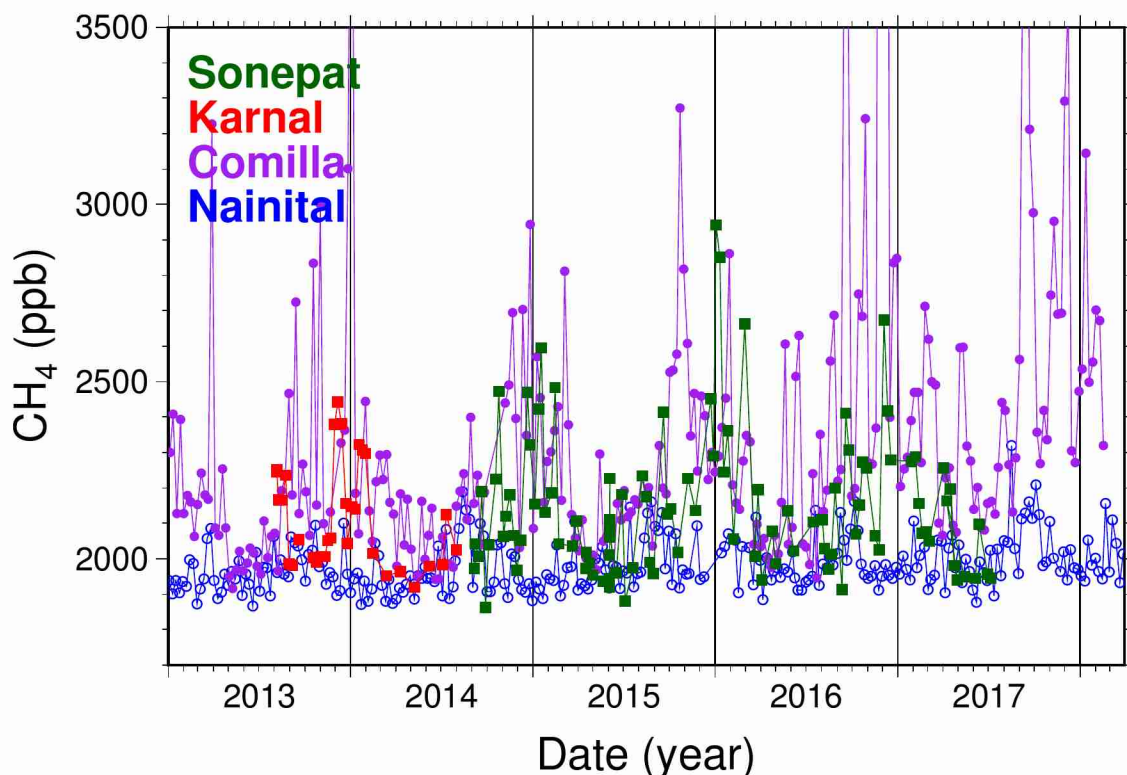
図(2)-6 開発したモバイルサンプリング装置(a)と、TRRI
実験圃場におけるサンプリングの様子(b)（2017年1月）。

こうして採取した大気試料のメタン濃度分析は、国立環境研究所のガスクロマトグラフ-水素炎イオン化型検出器（GC-FID）を用いて行い、 ± 2 ppbの精度で、NIES 94 CH₄スケールでモル比を決定した¹⁾。また、本研究はメタンが対象なので詳細は省略するが、採取された大気試料について、メタンのみでなく、一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO₂）、水素（H₂）、一酸化二窒素（N₂O）、六フッ化硫黄（SF₆）といった微量成分の分析も行った。

4. 結果及び考察

北インドのメタン濃度変動の特性

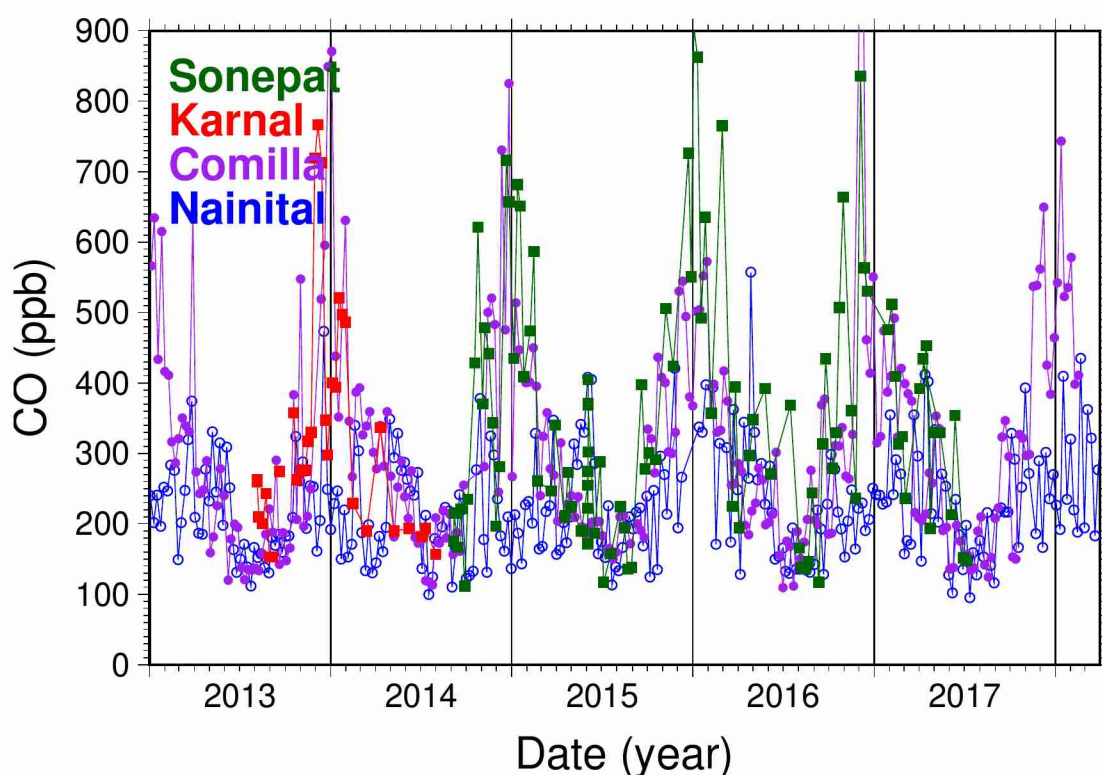
図(2)-7に、ナイニタール、コミラ、カルナル、ソーニーパットの4地点で観測された大気メタン濃度の時系列を示す。北インド水田地帯において、前推進費課題で行ったカルナルのデータ1年分と、ソーニーパットのデータ3年分を合わせて約4年間のデータを得ることができた。これら大気サンプリング観測データから、北インドでは、春から初夏にメタン濃度が極小となり、晩夏から冬にかけて増加し極大となる季節変動パターンが明らかになった。ただし、季節変化を考える上で、カルナルのサイトでは夏に稲作、冬に小麦の二毛作という北インドの代表的な農業形態であったのに対し、ソーニーパットでは、稲と小麦に加え、複数の作付が行われていることに注意する必要がある（2015年6月訪問時は、トマトとキュウリ栽培が行われていた）。これは、ソーニーパットがカルナルよりニューデリーに近く、近郊農業として野菜生産の需要が高いことに起因している。また、カルナルに比べてソーニーパットの方がメタン濃度データにばらつきが大きい（二酸化炭素データも同様）。これは、ソーニーパットデータが多様な農作物の作付けによる影響を受けている、また、ニューデリー大都市圏からのメタン排出の影響を受けている可能性が示唆された。



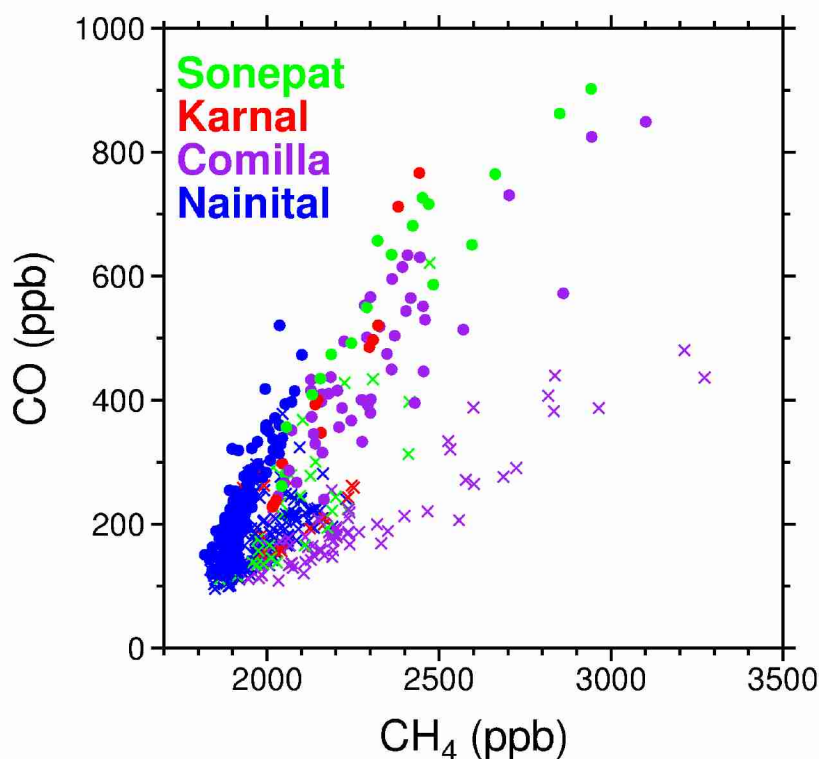
図(2)-7 ナイニタール、コミラ、カルナル、ソーニーパットで観測された大気メタン濃度の時系列

コミラと北インド（ソーニーパットとカルナル）のメタン濃度データを比較すると、季節変動パターンと、極大時の濃度に違いがあることが明らかになった。コミラでは8月くらいからメタン濃度の増加がはじまり、9月～12月に極大になった。一方、北インドでは、稲作が盛んになる夏から秋期ではなく、10月から2月くらいにメタン濃度の極大値が観測された。極大時のメタン濃度は、コミラの方が北インドと比べ、明らかに高かった。コミラでは、2016年9月と2017年9月に、最大4000ppb以上の高濃度メタンが観測された。これらのメタン濃度変動の違いは、バングラデシュと北インドの稲作形態の違いといったメタン排出源によるものと、大気輸送の寄与の両方が考えられる。コミラの9月に観測された高濃度メタンや、夏から秋にかけてメタン濃度が増加するのは、水稻によるメタン放出を捉えていると考えられるが、冬のメタン濃度の極大はこれまでに観測からは報告されていない。本研究で初めて観測された現象である。サブテーマ6で報告されている通り、ヒマラヤ山麓に沿ってガンジス河流域に南東からモンスーンが流入することによって、地上付近ではメタンが冬季に高濃度になることがモデルで得られている。大気サンプリングによる結果はモデルを支持する結果となっている。

一方、大気組成分析では、一酸化炭素（CO）の分析も行っている。CO濃度は、観測された空気中の微量成分が燃焼起源であるかどうかを示すトレーサとして有効である。ソーニーパットとコミラの両方で、冬期にCO濃度の増大が観測された（図(2)-8）。また、ナインタールにおいても、ソーニーパットやコミラより濃度は低いものの、冬期のCO濃度増大が観測された。ここで、メタン濃度とCO濃度の比に着目すると（図(2)-9）、夏と冬でCO:CH₄比が異なっていたことが明らかになった。冬期は、カルナル、ソーニーパットともにCO:CH₄比が1:1に近かった。コミラでは、北インドに比べ、メタン濃度に対してCO濃度が少し低かったが、水稻からメタンが発生していると考えられる夏～秋のCO:CH₄比とくらべ、COが有意に高い。このように、冬期はメタン濃度の増加と同時にCO濃度も著しく増加していることから、冬期のメタンは燃焼過程で放出されたものを含むと推察された。今後の課題として、化石燃料燃焼、バイオマス燃焼、水田からの放出といったメタン発生源の特定を行うために、大気メタン中の安定炭素同位体比を分析することが必要であると考えられた。



図(2)-8 ナインタール、コミラ、カルナル、ソーニーパットで観測されたCO濃度の時系列

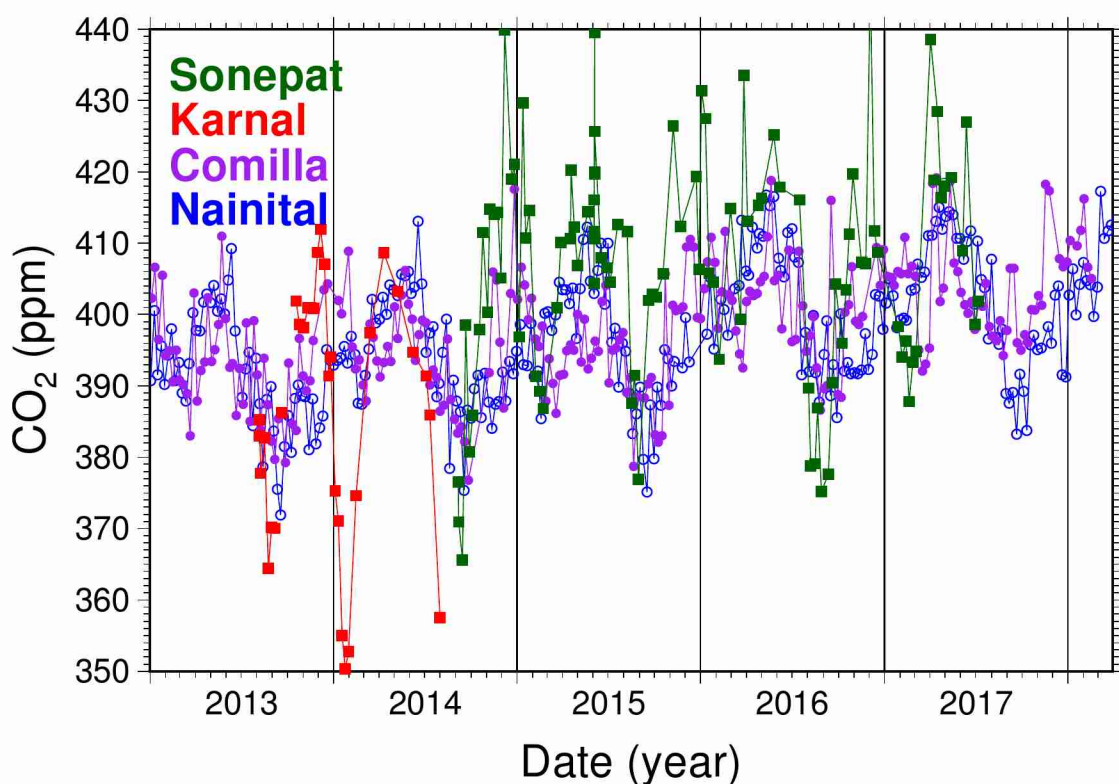


図(2)-9 ナイニताल、コミラ、カルナル、ソーニーパットで観測されたメタン濃度とCO濃度の比。○が冬期（12月から2月）、×が夏期（7月から10月）を示す。

本研究の観測結果から、北インドではモンスーンに伴う大気輸送ならびに冬期の燃焼起源メタンが地上メタン濃度変動に大きな影響を与えていることが示唆された。サブテーマ1の解析結果から、北インドの地上における冬のメタン濃度の極大は、GOSATによる気柱量観測では検出されないことが明らかとなった。これは、南アジアにおけるメタン収支を逆推定するにはGOSATの気柱量観測データのみでは不十分であることを示唆しており、本研究で得られた南アジアの大気メタン濃度の高精度地上観測データは、GOSATデータを補完し、GOSATメタンデータの利活用を図る上で重要な参照データとなると考えられた。

一方で、CO₂濃度観測結果からは、北インドで冬期にCO₂濃度が減少することが観測された(図(2)-10)。特にカルナルの2014年1月から3月には、CO₂濃度が350 ppm程度まで大きく減少した。これは、冬に作付けして成長する小麦によるCO₂吸収を捉えていると考えられた。このデリー周辺における冬期のCO₂低濃度は、航空機を利用した温室効果ガス観測プロジェクト（CONTRAILプロジェクト）でも観測され、この冬季に栽培される作物（主に冬小麦）によるCO₂吸収量はこの時期にデリー周辺から排出される人為起源CO₂の2倍ほどにもなると見積もられた²⁾。

その他、ソーニーパットとコミラのN₂O濃度は、冬期に極大となるパターンが観測された。これは、メタンと同様に、北インド冬期のモンスーンに伴う大気輸送ならびに燃焼起源による濃度増大に加え、施肥による大気N₂O濃度の増大効果を観測しているものと推察された。SF₆データは北半球の平均的な濃度トレンドを示した。H₂データからは、設置したバッテリーの影響が観測された。



図(2)-10 ナイニタール、コミラ、カルナル、ソーニーパットで観測されたCO₂濃度の時系列

タミルナドゥ水稲研究所 (TRRI) における大気サンプリング

図(2)-11に、TRRIで大気サンプリングを行った実験圃場サイトの写真を示す。Site Yはサブテーマ5でレーザーメタン観測を実施しているテラス上、Site Yタワーではレーザーメタン計よりさらに10mほど高い場所にインレットを設置した。また、サブテーマ3で実施している緩和実証実験サイト (Site S) ならびにサブテーマ4でフラックス観測を実施しているサイト (Site M) においても大気採取を行った。

Site Yタワーにおいて、日変動を捉えるために採取された大気試料のメタン濃度を表(2)-1 に示す。2016年11月10～11日の大気試料は奈良女子大学・林田によって採取され、2016年12月14～15日の大気試料は東京学芸大学・山本と農業環境技術研究所・小野によって採取された。11月10日16:28のデータはメタン濃度が3ppmを超えているが、CO₂濃度ならびにCO濃度も同時に高いため、燃焼過程の寄与が示唆された。それ以外のデータは、夕方から朝にかけてメタン濃度が増大する日変化を示しており、12月14～15日は夜間に200～300 ppbのメタン濃度の増大が観測された。



図(2)-11 タミルナドゥ水稲研究所(TRRI)における大気サンプリング地点。

左からSite Y、Site Yタワー、Site S、Site M

表(2)-1 TRRI Site Yタワーで日変動を捉えるために採取された大気試料のメタン濃度

サイト	採取日時	メタン濃度 (ppb)
Site Yタワー	2016/11/10 13:16	2079
Site Yタワー	2016/11/10 16:28	3095
Site Yタワー	2016/11/10 20:16	2152
Site Yタワー	2016/11/11 13:21	2073
Site Yタワー	2016/12/14 15:19	2065
Site Yタワー	2016/12/14 19:05	2272
Site Yタワー	2016/12/15 6:18	2343
Site Yタワー	2016/12/15 14:15	2022

2017年1月に、国立環境研究所・寺尾らがTRRIを訪問し、TRRIの各サイト・圃場間の違いを捉えるために、Site Y, Site Yタワー, Site S, Site Mにおいて大気試料を採取した。そのときに得られたメタン濃度を表(2)-2 に示す。まず、Site YとSite Yタワーで大気採取を行い、レーザーメタン計の光路の高さとタワーの高さにおけるメタン濃度に差が無いことを確認した。よって、表(2)-1 で示したデータを含め、国立環境研究所によるフラスコサンプリングによるメタン濃度分析データを用いて、レーザーメタン計の絶対値をNIES 94 CH₄スケール¹⁾ で校正することが可能であると考えられた。

また、2017年1月18日夕方（16～17時）ならびに1月19日午前（10～11時）に、Site S → Site M → Site Yと移動して連続的に大気サンプリングを行った。その結果、これら3地点では、Site Sが最も大気メタン濃度が高いことがわかった。Site MとSite Yはほぼ同濃度であったが、両日ともにSite YがSite Mより数ppb濃度が高かった。大気採取を行った際、これら3サイトでは稲の種類、生育状況、土壌水分などが異なっていたが、Site Sで大気メタン濃度が高い理由の1つとして、灌漑水路とポンプが近くにあり、地下水の汲み上げ時にメタンが湧出している可能性が考えられた。

表(2)-2 TRRIでサイト間の違いを捉えるために採取された大気試料のメタン濃度

サイト	採取日時	メタン濃度 (ppb)
Site Yタワー	2017/1/18 12:19	1987
Site Y	2017/1/18 12:34	1987
Site S	2017/1/18 16:14	2027
Site M	2017/1/18 16:42	1939
Site Yタワー	2017/1/18 17:09	1942
Site S	2017/1/19 10:02	2011
Site M	2017/1/19 10:33	1963
Site Yタワー	2017/1/19 11:08	1971

また、2017年6月ならびに2018年2月に、東京学芸大学・山本がレーザーメタン計のメンテナンスでTRRIを訪問した際に、大気サンプリングを行った。2017年6月12～13日ならびに2018年2月20～21日に採取された大気試料のメタン濃度とCO濃度を表(2)-3 に示す。両時期ともに、夜間から早朝にかけてメタン濃度の増加（2017年6月12～13日は約100ppb、2018年2月20～21日は約200ppbの増加）が観測された。これは2016年12月に観測された日変動と同程度であった。しかし、2017年6月12～13日の夜間はCO濃度の変動が観測されなかったのに対し、2018年2月21日の早朝（6:03）ではCO濃度（とCO₂濃度）の大きな増加

が観測されたため、燃焼過程の寄与が示唆された。このように、例えばレーザーメタン計などによるメタン濃度の連続観測を実施しているサイトにおいても、大気サンプリングを行い、多成分を分析することで、メタン濃度の日変動などの原因を推察することができることが示された。

表(2)-3 TRRIで2017年6月と2018年2月に採取された大気試料のメタン濃度とCO濃度

サイト	採取日時	メタン濃度 (ppb)	CO濃度 (ppb)
Site Yタワー	2017/6/12 14:30	1897	119
Site Yタワー	2017/6/12 19:00	2009	107
Site Yタワー	2017/6/13 5:21	1990	80
Site Yタワー	2017/6/13 14:06	1898	107
Site Yタワー	2018/2/20 14:12	1970	189
Site Yタワー	2018/2/21 6:03	2167	338
Site Yタワー	2018/2/21 14:13	1976	221
Site Yタワー	2018/2/21 18:57	1964	178

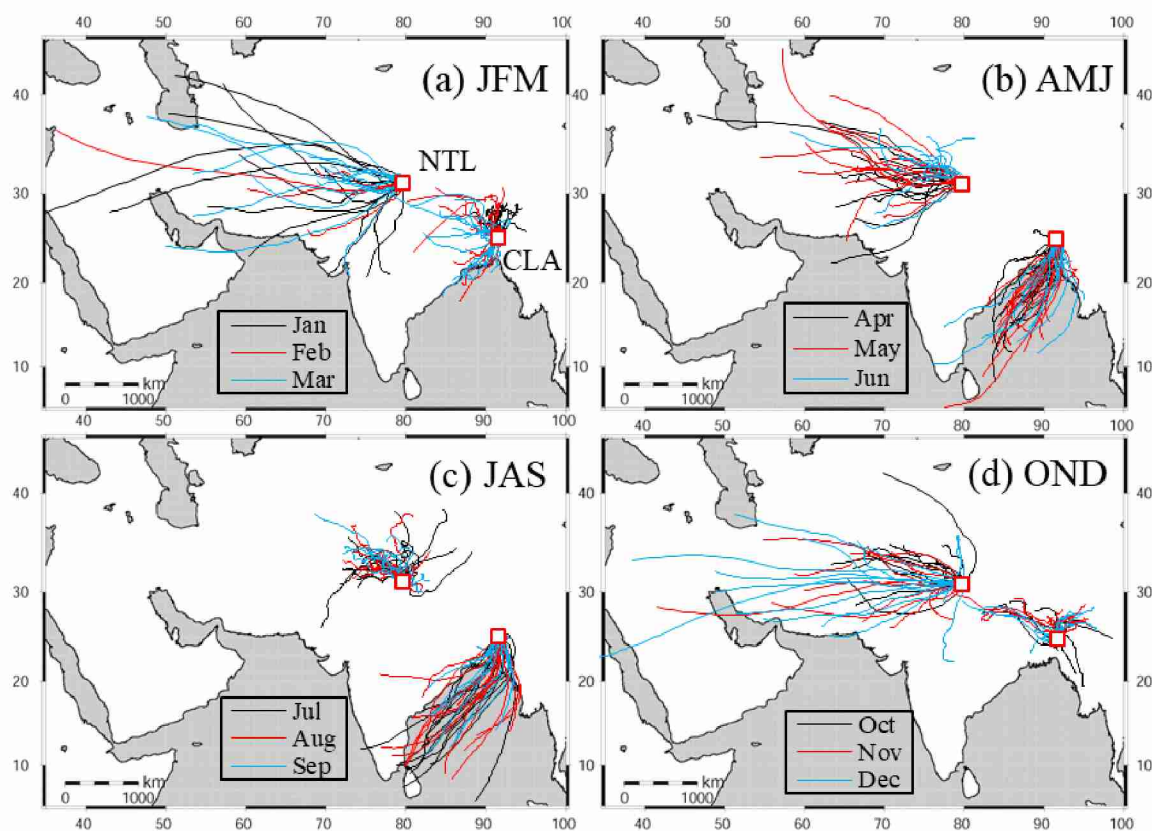
ナイニタールとコミラにおける長期観測データの解析

国立環境研究所では、2006年9月からナイニタールで、2012年6月からコミラで大気サンプリングを実施してきた。これら長期観測データを用いて、ナイニタールとコミラで観測された大気微量成分の解析を行った。本稿ではメタン以外の結果は省略するが、ナイニタールとコミラの長期観測データについては、メタンのみならず、CO₂, CO, H₂, N₂O, SF₆, $\delta^{13}\text{C-CO}_2$, $\delta^{18}\text{O-CO}_2$ を含めた統合的な解析を行い、現在論文投稿へ向けた準備をしている (Nomura et al., Atmospheric greenhouse gases concentration and the isotopic ratios of CO₂ in India and Bangladesh by NIES flask sampling network, in preparation)。

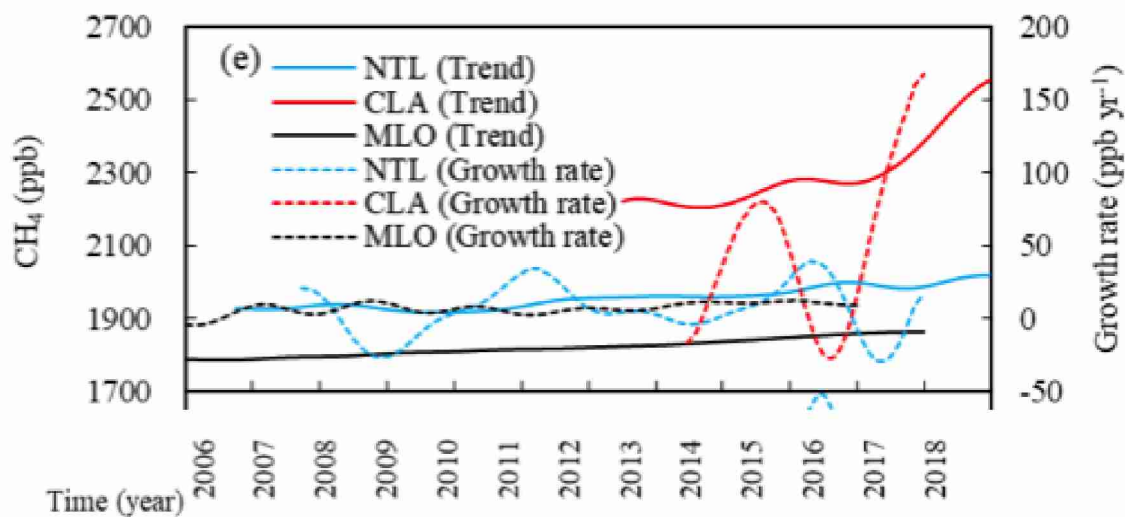
図(2)-12に、ナイニタールとコミラの位置からMETEX³⁾で計算した3日間後方流跡線を示す。ナイニタールでは、夏期は空気が滞留していることが多いが、それ以外の季節は西風の影響を強く受けていた。ナイニタールでは、夏にメタン濃度が増加する季節変動が観測されるが、それは南アジア北部で停滞した空気を観測していることに関係する可能性がある。一方、コミラは、春と夏のモンスーン季節に、ベンガル湾からの南西風の影響を受け、秋と冬は陸地で空気が滞留していることが多いことがわかった。コミラでは春から夏にメタン濃度が極小となるが、これはベンガル湾からの空気塊を観測した結果であると推察された。

図(2)-13に、ナイニタール、コミラ、マウナロアで観測されたメタン濃度の長期トレンド成分と年変化率を示す。季節変動を除去したトレンド成分で比較すると、ナイニタールのメタン濃度はマウナロアより約100 ppb高く、コミラのメタン濃度はマウナロアより約400 ppbから600 ppb高かった。ナイニタールの年変化率は、平均的にはマウナロアの年変化率と一致したが、より大きな年々変動が観測された。コミラは、マウナロアそしてナイニタールとも全く異なる年変化率を示した。

以上から、南アジアの大気メタンを議論する際に、コミラはモンスーンによる大気輸送効果と稲作からのメタン放出の影響を強く受けているが、ナイニタールのデータは「南アジアの」バックグラウンド(マウナロアより平均で100 ppb高いが、平均的な年変化率はマウナロアと一致)として取り扱うことができると推察された。



図(2)-12 ナイニタールとコミラの位置から計算した3日間後方流跡線。2013年から2015年の (a)が1月から3月、(b)が4月から6月、(c)が7月から9月、(d)が10月から12月。

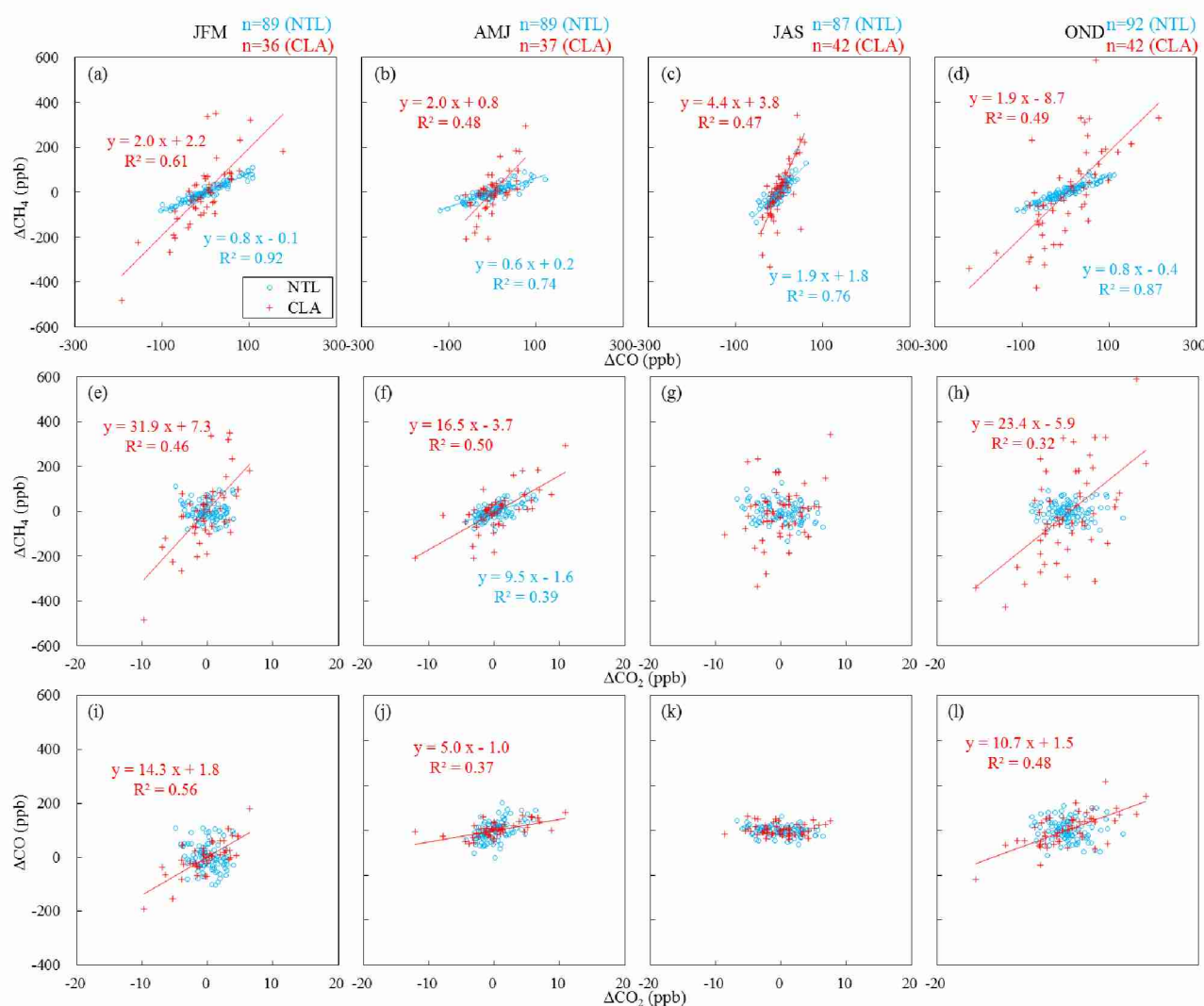


図(2)-13 ナイニタール、コミラ、マウナロアで観測されたメタン濃度の 長期トレンド成分（実線）と年変化率（破線）。

図(2)-14に、ナイニタールとコミラで観測された、季節別の ΔCH_4 と ΔCO 相関、 ΔCH_4 と ΔCO_2 相関、 ΔCO と ΔCO_2 相関を示す。ここで Δ は、各濃度観測値のフィッティングカーブからの偏差を示す。

ΔCH_4 - ΔCO 相関の傾きは、最大となる7～9月にナイニタールで 1.9 ppb ppb^{-1} 、コミラで 4.4 ppb ppb^{-1} であり、他の季節ではナイニタールで 0.6 - 0.8 ppb ppb^{-1} 、コミラで 1.9 - 2.0 ppb ppb^{-1} であった。傾きは年間を通してコミラの方がナイニタールより高かった。これは、水田に位置するコミラがよりメタン放出の影響を受けていることを示唆しており、7～9月に傾きが大きくなることも整合的である。

ΔCH_4 - ΔCO_2 相関を見ると、ナイニタールでは4～6月 (9.5 ppb ppm^{-1}) 以外は相関が見られなかった。ナイニタールの CO_2 濃度変動は、基本的に陸域生態系の吸収と放出に対応していると考えられるが、4～6月はしばしば平野からの空気を観測したため、人為起源の CH_4 (と CO_2 放出) を捉えた可能性があった。一方、コミラの ΔCH_4 - ΔCO_2 相関は、7～9月以外で正相関が観測された (1～3月が 31.9 , 4～6月が 16.5 , 10～12月が $23.4 \text{ ppb ppm}^{-1}$)。



図(2)-14 ナイニタール (青) とコミラ (赤) で観測された、季節別の ΔCH_4 と ΔCO 相関(a-d)、 ΔCH_4 と ΔCO_2 相関(e-h)、 ΔCO と ΔCO_2 相関(i-l)。a,e,iが1～3月、b,f,jが4～6月、c,g,kが7～9月、d,h,lが10～12月。 Δ は、各濃度観測値のフィッティングカーブからの偏差。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

アジアの観測空白域への展開

本研究で立ち上げたソーニーパットや、継続して観測を実施したナイニタールとコミラの大気観測データは、メタンの主要な発生源であることが明瞭であるにも関わらずこれまでほとんど観測データが得られていなかった観測の空白域における極めて貴重な観測データセットとなっている。

北インドのメタン濃度変動の特性

北インドの水田地帯で4年間の観測データを蓄積したことで、北インド特有のメタン濃度変動が明らかになった。地上の大気中メタン濃度は、水田からのメタン放出量が最大となる夏から秋ではなく、冬に高濃度となることが観測された。本研究の観測結果をもとに、北インドではモンスーンに伴う大気輸送が地上メタン濃度変動に大きな影響を与えていることが示唆され、このメタン濃度変動はGOSATによる気柱量観測では検出されないことなどが明らかとなった。

(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>

本課題によって、南アジアにおけるメタン収支を逆推定するにはGOSATデータのみでは不十分であることが明らかになったが、本研究で得られた大気メタン濃度の高精度地上観測データは、GOSATデータを補完し、GOSATメタンデータの利活用を図る上で重要な参照データとなる。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) インド・ソーニーパットにおける大気サンプリングを、デリー大学 P.K.Dhaka教授ならびに東京大学大気海洋研究所と協力して実施。北インド水田地帯における唯一の温室効果ガスの高精度定常観測。
- 2) バングラデシュ・コミラにおける大気サンプリングを、ダッカ大学 Kawser Ahmad教授ならびにJAMSTECと協力して実施。バングラデシュにおける唯一の温室効果ガスの高精度定常観測。
- 3) インド・ナイニタールにおける大気サンプリングを、アリヤバータ観測科学研究所Manish Naja博士と協力して実施。北インド山岳地帯における最も長期間の温室効果ガスの高精度定常観測。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAQ, P. ELAYAKUMAR, K. VANITHA, C. UMAMAGESWARI, P. JOTHIMANI, V. RAVI, Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol.252,148- 158(2018)
Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 野村渉平「バングラデシュの温室効果ガス濃度を長期モニタリングするために」地球環境研究センターニュース, Vol.27, No.1 (2016)

- 2) 寺尾有希夫「アジア域への温室効果ガス観測の展開 ～北インド編～」国立環境研究所ニュース, Vol.36, No.3, pp.13-15 (2017)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 寺尾有希夫、向井人史、野村渉平、西橋政秀：日本気象学会2015年度秋季大会 (2015) 「アジア域への温室効果ガス観測の展開」
- 2) 林田佐智子、久慈誠、寺尾有希夫、須藤重人、犬伏和之、間野正美、山本昭範、Prabir Patra：日本気象学会2015年度秋季大会 (2015) 「衛星と現地観測による大気メタンデータの活用～南アジアにおける新展開～」
- 3) 秀森丈寛、川崎昌博、中山智喜、松見豊、笹子宏史、出原雅也、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、Surendra K. Dhaka, Jagmohan Singh、高橋けんし：大気化学討論会 (2015) 「北部インド水田地帯におけるin-situ大気メタン連続観測」
- 4) 出原雅也、秀森丈寛、中山智喜、松見豊、笹子宏史、川崎昌博、高橋けんし、林田佐智子、山本昭範、今須良一：第21回大気化学討論会 (2015) 「実大気におけるリアルタイムその場観測を目的としたオープンパスレーザー分光メタンガス検出器の校正」
- 5) T.HIDEMORI, Y.MATSUMI, H.SASAGO, T.NAKAYAMA, M.KAWASAKI, K.TAKAHASHI, Y.TERAO, S.NOMURA, T.MACHIDA, W.TAKEUCHI, M.ADACHI, R.IMASHU, S.K.DHAKA, J.SINGH: AGU Fall Meeting, San Francisco (2015) “Continuous in-situ methane measurements at paddy fields in a rural area of India with poor electric infrastructure, using a low-cost instrument based on open-path near-IR laser absorption spectroscopy”
- 6) 秀森丈寛、川崎昌博、中山智喜、松見豊、笹子宏史、出原雅也、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、S.K. Dhaka、 J. Singh、高橋けんし：第24回生研フォーラム (2016) 「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濃度の通年観測と衛星観測との比較」
- 7) M.IZUHARA, T. HIDEMORI, M. KAWASAKI, T. NAKAYAMA, Y. MATSUMI, H. SASAGO, Y. TERAOKA, S. NOMURA, T. MACHIDA, W. TAKEUCHI, M. ADACHI, R. IMASU, S. K. DHAKA, J. SINGH, K. TAKAHASHI, JpGU (2016) “Development of a low-cost in-situ methane observation system and results of field observation at a paddy field in India”
- 8) T.HIDEMORI, M. IZUHARA, M. KAWASAKI, T. NAKAYAMA, Y. MATSUMI, Y. TERAOKA, T. MACHIDA, S. NOMURA, K. TAKAHASHI, S. K. DHAKA, J. SINGH, R. IMASU, IWGGMS (2016) “Continuous in-situ observation of methane at a paddy field in India”
- 9) 林田佐智子, N.CHANDRA, P.K.PATRA, 寺尾有希夫, 須藤重人, 犬伏和之, 間野正美, 山本昭範 (2017) Methane emission estimate from South Asia: AMASA project, 日本地球惑星科学連合2017年大会
- 10) P. K. Patra, S. Nomura, Y. Terao, T. Machida, M. Naja, K. Ahmed, N. Chandra, S. Venkataramani, S. Lal, S. Hayashida (2017) Variabilities in greenhouse gases in South Asia due to monsoon, ACAM meeting, Guangzhou

(3) 知的財産権

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) 国立環境研究所公開シンポジウム2017 (2017年6月16日滋賀びわ湖ホール中ホール 来場者約300名、6月23日東京メルパルクホール 来場者約600名) にて成果紹介 (寺尾有希夫「南アジアの水田でメタンを測る」)
- 2) 奈良女子大学公開講座「南アジアのメタンを探る：AMASAプロジェクトの挑戦」 (2017年11月11日つくば国際会議場、聴講者約50名) にて講演 (寺尾有希夫「大気の温室効果ガス濃度を測る～南アジア編～」)

- 3) 第15回環境研究シンポジウム（主催：環境研究機関連絡会、2017年11月22日一橋大学一橋講堂）
にて成果紹介（寺尾有希夫「南アジアの水田でメタンを測る」）

（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) Terao, Y., H. Mukai, Y. Nojiri, T. Machida, Y. Tohjima, T. Saeki, and S. Maksyutov: J. Geophys. Res., 116, D14303, doi:10.1029/2010JD015467. (2011)
Interannual variability and trends in atmospheric methane over the western Pacific from 1994 to 2010
- 2) Umezawa T., Niwa Y., Sawa Y., Machida T., Matsueda H.: , Geophys. Res. Lett., doi: 10.1002/2016GL070939. (2016)
Winter crop CO₂ uptake inferred from CONTRAIL measurements over Delhi, India
- 3) Zeng, J. and Fujinuma, Y.: EOS, Transactions American Geophysical Union 85(46), 482. (2004)
New web site launched for online air trajectory calculation.

Ⅱ－３ メタン発生緩和策のオプション検討

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター
気候変動対応研究領域 温室効果ガス削減ユニット 須藤 重人

研究協力者

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター
気候変動対応研究領域 作物温暖化応答ユニット 小野 圭介

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター
環境情報基盤研究領域総合評価ユニット 大澤 剛士

ポスドク

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター
気候変動対応研究領域 温室効果ガス削減ユニット Aung Zaw Oo

平成27(開始年度)～29年度累計予算額：25,712千円（うち平成29年度：7,997千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

本サブテーマ3では、インドの水田におけるメタン削減手法の開発を行った。世界人口は増大しつづき、水稲作の必要水量を減らし、温室効果気体排出量も減らし、かつ、コメ収量を増大させるという必要性は急務であるといえる。SDGs「持続可能な開発目標」の中の気候変動（目標13）、持続可能な生産消費（目標12）に相当するテーマである。水管理は水稲作由来の温室効果ガスを削減するための、最も有望な緩和オプションの一つであって、これまで、栽培期間中を通して湛水あるいは落水するという作業を数回行うという管理への試みが研究されてきている。しかしながら、栽培初期において節水管理を行い、メタン、 N_2O の発生量の変動効果を検証するといった研究はこれまで十分にはなされていない。

本研究においては、南アジアの現地で普及している水稲品種を用い、常時湛水と異なる数パターンの節水型の水管理を実施した際の温室効果気体排出量の違いを現地圃場で計2作の期間について検証した。試験地は、インド・タミルナドゥ州アドゥトゥライにあるタミルナドゥ水稲研究所の実験圃場とした。2ヵ年の試験の1年目(2016)は、AWDと称する節水型水管理と、1株あたりの苗数、植栽密度を調整した栽培管理農法(SRI)とその改良型(MSRI)および常時湛水管理の3種の農法比較を行った。2年目(2017)は、異なるAWD管理としてAWD1回区、AWD2回区、全期間AWD区、常時湛水区の4種類の水管理試験区を設定して温室効果気体の発生量を比較した。水田から発生する CH_4 および N_2O を計測するためのガス試料は、クロードチャンバー法によって行った。チャンバー内の空気を定期的に採取し、 CH_4 および N_2O 濃度をガスクロマトグラフにおいて計測した。

SRI検証試験（2016年度）においては、AWD水管理とSRI栽培管理を組み合わせた農法では、 CO_2 換算の温室効果気体排出量削減に22–44%の効果があり、かつ収量に影響を与えず、灌漑水量の低減（乾季で約50%の削減）に資することが明らかとなった。SRIでは乾季41%、雨季24%のメタン削減、MSRIにより乾季48%、雨季26%のメタン削減が示された。これを踏まえて、インド全域の水田由来メタン排出量は、常時湛水、SRI、MSRIの3つの水管理に基づいて、9.69、6.91、6.59 Tg/yearと推定された。異なるAWD水管理の比較試験（2017年度）では、常時湛水と比較した場合、1回AWDと2回AWDによる節水効果はそれぞれ18.5%、19.5%だった。一方で全期間AWDでは71.7%もの節水効果が認められた。

[キーワード]

メタン、緩和技術、SRI農法、AWD水管理、温室効果ガス

1. はじめに

コメは世界の、とりわけアジア地域における主食である。世界のコメ生産の75%以上は水田耕作によっている。したがって、作付け期間は継続的に水田は湛水であり続けるVan der Hoekら(2001)¹⁾。その水稲作の75%以上は、灌漑水田であり、水田によって使用される水の量はアジア域の淡水資源の80%に上る。水田は主食としてのコメの生産拠点である一方で、温室効果ガスメタンの主要な発生源でもある。したがって、コメの生産を増やしつつ、メタンも削減することはアジアの重要な課題である。2015年9月の国連総会で採択されたSDGs「持続可能な開発目標」では、持続可能な生産消費（目標12）、気候変動（目標13）などが17のゴールの一翼を担っており、持続可能なコメ生産は複数のゴールを同時に目指す取り組みである。わが国の食料自給率は40%以下であり、過半数を世界からの食料輸入に依存している。アジアの持続可能な農業への貢献は、同時にわが国の食料安全保障に直結している。

水稲作で使用される水量の削減へのひとつの試みがAWD（alternate wetting and drying）という名称の節水水管理である。AWDに関してはメタン（CH₄）を48-93%削減できるという、様々な研究報告がなされているLinguistら(2015)²⁾、Pandey ら(2014)³⁾、Xuら(2015)⁴⁾。しかしながら、メタンと一酸化二窒素（N₂O）の排出にはトレードオフの関係があって、メタンが減るとN₂Oの増加が指摘されていてXuら(2015)⁴⁾；Ooら(2018)⁵⁾、栽培期間中のメタン削減効果を減耗させている。したがって、水管理のあり方はメタンとN₂Oのトレードオフ関係の制御に極めて重要な役割を果たす。それゆえ、地球温暖化ポテンシャル（GWP）を合計値で削減するような効果的な温暖化緩和策戦略を検討する必要があるPeyronら(2016)⁶⁾。

上述のAWD水管理を含めて、苗の管理等もあわせた統合的な水稲栽培体系の強化を目指す手法にSRI（System of Rice Intensification）というものがある。通常の田植えは3本程度の苗を1株として、発芽から25日程度経過した苗の植え付けを行うが、SRIの手法では、発芽から10日程度の若い苗を1株1本のみ、通常より広い間隔で植える。これによって、苗間の栄養競合、光合成競合等を緩和し、苗に要する種籾費用を低減し、節水水管理を行うことで水利上の利益を得る。本研究では、このようなAWDないしSRI手法を活用した南アジアにおける温暖化緩和策オプションの模索を行った。また、本研究に基づいて提示する緩和策オプションの南アジア広域における適用可能性についても検討した。

2. 研究開発目的

水管理は水稲作由来の温室効果ガスを削減するための、最も有望な緩和オプションの一つであって、これまで、中干しやAWDといった、栽培期間中を通して湛水する、あるいは、落水するという作業を数回行うという管理への試みが研究されてきている。しかしながら、栽培初期において、1回ないし2回のAWD管理を行って、それによる、メタン、N₂Oの発生量の変動効果を検証するといった研究はこれまで十分にはなされていない。また、世界人口は増大しつつあり、水稲作の必要水量を減らし、GHG排出量も減らし、かつ、コメ収量を増大させるという必要性は急務であるといえる。

本研究においては、現地で普及している水稲品種を用い、常時湛水と異なる数パターンのAWD水管理を実施した際のGHG排出量の違いを現地圃場で計2作の期間について検証した。試験地は、インド・タミルナドゥ州アドゥトゥライにあるタミルナドゥ水稲研究所の実験圃場とした。水稲作付けの前の期間には、ブラックグラム（豆）栽培が行われたため、合計のGHG排出量は、ブラックグラムー水稲ー水稲の3作における総合的な値として評価した。

主な検討のポイントは、（1）AWD水管理の違いによる収量およびGHG排出量への影響、（2）上記水管理下における品種間差のあたえる影響評価（収量とGHG排出量）（3）水管理に苗管理をプラスしたSRI手法の検討の3点である。2016年度についてはこのうち、（3）のSRI手法の適用のインドでの導入効果についての検証を実施した。2017年は、2016年度にSRIがメタン削減と収量維持の両立できる手法で

あることを明らかにしたことを踏まえて、より実地的な、詳細な水管理手法の開発を試みるため、上記（１）、（２）の事項を検討する試験を実施した。

広域推定に関しては、気象、地形、土地利用等の各種データ収集を行い、GISデータとして一元化（基盤整備）した。

３．研究開発方法

試験概要

本サブテーマの水稲栽培試験は、インド、タミルナドゥ州アドゥットゥライにあるタミルナドゥ水稲研究所 (TRRI) (11° 0' N, 79° 30' E, 19.4 m MSL) の水田圃場を使用した (図(3)-1)。(１) 2016年5月から2017年1月の期間は、SRI手法のメタン削減への有効性の検証試験を行った。(２) 異なるAWD管理と常時湛水による水管理比較栽培試験については、2017年2月から2018年1月の約1年間実施した。作付けしたのは、ブラックグラム（マメ科）、乾季作イネ、雨季作イネの3作であった。この、ブラックグラムとイネを組み合わせた栽培体系は、当地で一般的に行われるもので、窒素固定能を有するブラックグラムを栽培することで土壌に可給態窒素を供給することで地力増進を図っている。

土壌は沖積粘土質土壌に分類される。全窒素含量 1.1 g kg^{-1} 、全炭素含量 19.6 g kg^{-1} 、土壌pH 7.5 (1:5 H_2O)、EC 11.6 mS m^{-1} 、土性は13.6% 砂、61.2% シルト、25.3% 粘土の割合（埴壤土(Clay Loam)）であった。

圃場概要と処理

(１) 乾季稲作（2016年5月～9月）と雨季稲作（2016年10月～2017年年1月）の2作試験をした。

(２) 乾季前半にブラックグラム（2017年2月から4月）、乾季稲作（2017年5月～9月）、および雨季稲作（10月～2018年1月）の3作を実施した。

ブラックグラム作の期間には、メタンと N_2O の排出について作付け前後の圃場準備期間（堆肥等の投入、残渣すきこみ、耕耘等に要する期間も含めて観測をした。ブラックグラム（品種ADT3）の栽培期間は2月14日は種、4月28日収穫であり、植栽間隔は $30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ であった。ブラックグラム作については、無施肥であった。栽培期間中、播種前に一度および登熟期に3度の灌水を行った。

上記のブラックグラム作の次に、2期の水稲作を続けた。

（試験処理区の設定）

（１）SRI検証試験（2016年度の試験）

処理と反復で区切った圃場を設定した。処理区には複合的な管理要素を包含する3つの処理を設定した。

(i) SRI区：発芽から8日目の苗を1株1本植。田植えから2週間後にAWD水管理を開始し、これを最終落水の2週間前まで継続。植栽間隔は $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 。

(ii) MSRI区：発芽から15日目の苗を1株2本植、田植えから2週間後にAWD水管理を開始し、これを最終落水の2週間前まで継続。植栽間隔は $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 。

(iii) 常時湛水 (CT)区：発芽から25日目の苗を1株3本植、常時湛水。水深は 5 cm 。植栽間隔は $10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 。

また、副検討項目として、品種の違いを検証するため、現在当地で栽培されている品種である乾季作用のADT43とCO51、雨季作用のADT 4 6 とTKM 1 3 を上記の主検討処理区ごとに作付けした。

（２）異なるAWDによる水管理試験（2017年度の試験）

(１) と同様に、処理と反復で区切った圃場を設定した。本試験での主たる検討事項である水管理について、(i) AWD 1 回区、(ii) AWD 2 回区、(iii) 全期間AWD区、(iv) 常時湛水区の4種類に水管理試験区を設定した。

また、副検討項目として、品種の違いを検証するため、現在当地で栽培されている品種である乾季作

用のADT43とCO51、雨季作用のADT46とTKM13を作付けした。



実験圃場の設営と田植え前の圃場準備



田植え後の圃場とガス採取用の栈橋の設置



イネ生育期の水田圃場
(Elayakumar氏)



クローズドチャンバー法によるガス採取

図(3)-1 試験地の概要写真

いずれの試験区においても、圃場面積は5m x 5mであった。処理区間の漏洩等を防ぐため、処理間には3重の境界盛土帯を作成した。異なる水管理処理区間は2.5mの間隔をとった。

以下は、2016年、2017年の両栽培試験に共通した事項である。

(代掻き)

乾季作は、代掻き(5月15日)の2週間前に入水し、雨季作は同様に代掻き(9月23日)の2週間前に入水した。代掻き作業では、乾季は乗用トラクター牽引、雨季は手押し式の代掻き機により実施した。

(田植え)

乾季作では、播種から22日目の苗を2017年6月16日に1株あたり2ないし3本にて植えた。植栽間隔は10cm x 15cmとした。雨季作では乾季と同様の苗を2017年10月6日に田植えた。

(水管理)

田植え後における水管理は、最初の2週間については、田面から2-3cmの高さに水位を保った。常時湛水区(CF)では、田植えから2週間経過した後では、栽培期間中を通して収穫前の最終落水までの間は水深を5cmを保った。AWD水管理区については、穴の開いた長さ25cmの塩ビ管を使用して水位を制御した。この塩ビ管は下側15cmの側面部分に多くの穴が開いている。そのチューブを土壌に15cm深

まで埋め込む。田植え2週間後、1回AWD区、2回AWD区および全期間AWD区の処理を開始した。1回AWDと2回AWDの区では、栽培前期（生育初期）期間において1回ないし2回の非湛水処理サイクルを実施した。その後は、水深を5cmに保つ常時湛水管理を続けて、コメ収穫2週間前まで湛水を継続した。全期間AWD区では、田植え後2週間の常時湛水後は、収穫2週間前までの全ての期間においてAWD水管理を繰り返した。

（AWDについて）

このAWD水管理に記述すると以下ようになる。田面に水をいれ湛水にすると、その後水位は徐々に下降し始める。水位が土壌表面の下15cmまでに減少したタイミングで、AWDにおいては、再び灌水を行い、水位を土壌表面の上5cmまでに戻す。こうしたAWDの水位の上昇下降のサイクルは、乾季においては9-12日で1サイクルとなる。しかしながら、雨季においては、AWDの灌水サイクルは降雨により変動する。なお、本試験における灌水は、地下水のくみ上げによって実施した。

（施肥について）

本試験における水稻作への施肥については、2016年度、2017年度とも、尿素窒素 150 kg N ha^{-1} 、磷酸 $50 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ 、カリ $50 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ 、硫酸亜鉛 $25 \text{ kg ZnSO}_4 \text{ ha}^{-1}$ 、and 石灰 $500 \text{ kg gypsum ha}^{-1}$ の比率で行った。窒素およびカリは分けつ期、出穂期、開花期の3回に均等に施用した。他については基肥とした。収穫は登熟を待って行った。

温室効果ガスの採取、分析、解析

CH_4 および N_2O を計測するためのガス試料は、クローズドチャンバー法によって行った Minamikawa ら(2015)⁷⁾。ブラックグラム作では、播種前に2回のガス採取、栽培期間中は週一回の採取を実施した。水稻栽培期間については、ガス採取頻度は週一回とした。ただし、乾季作に限り、施肥を行うタイミングに合わせて施肥の翌日にガス採取を追加実施した。チャンバー内部には空気攪拌用の電動ファンを設置し、ガス採取によって起きる内圧の変動を補うための圧力補償用のテドラーバッグを設置した。チャンバーからのガス採取は3方活栓を通じて50mLの気密性のあるシリンジによって、チャンバー設置後0分、15分、30分経過後にそれぞれ行った。ガス採取に際しては、シリンジを5回とも洗いして紺民ネーションを防いだ。採取したガスは、ブチルゴム栓つき15mLの真空ガラスバイアルビンに移し変えた。分析までは冷暗保存した。チャンバー内温度は、簡易型温度計PC-9125, AS ONE Co., Tokyo, Japanにて計測した。 CH_4 および N_2O 濃度は、FIDとECDを有する島津GC-2014型ガスクロマトグラフにおいて計測した（図(3)-2）。



図(3)-2 ガス分析装置の概要写真

全てのガス試料を、つくば市にある農研機構農業環境変動研究センター実験室において分析した。 CH_4 および N_2O のフラックスは、それぞれの単位時間あたりの増加量を直線近似することによって算出した。栽培期間は通した上記のガスの排出量は、上記のフラックス値により直接算出した。

その他の環境データの計測について

10cm 深の土壌温度をガス採取時に記録した。酸化還元電位については、白金電極をイネの根のまわりの土壌 5 cm 深に差し込み、Eh メーター（YK-23RP, Taiwan）を使用して計測した。1 m² 範囲のつぼ刈りにより収量、約 14% の水分を含むもみ重として算出した。地上部わら重は 80℃ 条件で、二日間乾燥処理後の重量として計測した。

緩和策オプションの広域適用可能性の推定について

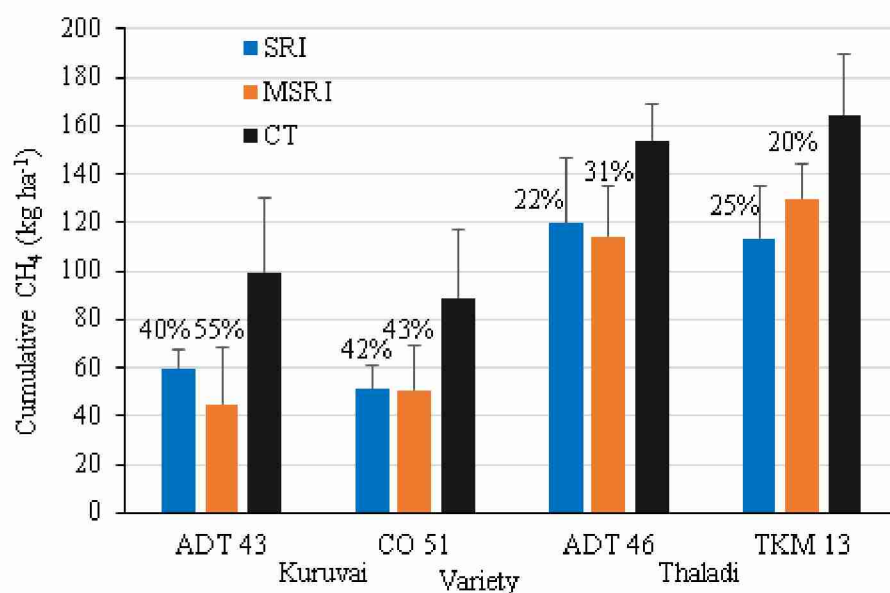
既往の成果に基づき、水田の肥培管理に基づく緩和策の実施適地を気候的、地形的情報に基づいて南アジア全域に対して土地利用図（水田）の作成を行った。現地での水田からのメタン発生量については、前述の SRI 農法等による水管理試験を通じて削減ポテンシャルの実測値を得た。この単位面積あたりのメタン発生量と削減量に基づいて、土地被覆図との関連付けを行い、対象領域（インド全域）の水田からの総発生量を推定した。さらに、年間に当地で実施可能な水田耕作回数（単作、二期作、三期作）等を考慮した、SRI ないし AWD 手法による広域（インド全域）を対象とした削減ポテンシャルを推定した。

4. 結果及び考察

（１）SRI 検証試験（2016 年度）

灌漑水量と節水効果について

乾季、雨季それぞれの灌漑回数は SRI 区、MSRI 区、常時湛水（CT）区それぞれで乾季は 10 回、10 回、21 回であり、雨季は 2 回、2 回、11 回だった。維持すべき田面水位が異なるために要求される水量が大幅に異なることが実証された。乾季(Kruvai)、雨季(Thaladi)における常時湛水（CT）を 100% とする水利用量比率は SRI 区 47.5%、MSRI 区 49.3% であり、雨季では SRI 区 79.4%、MSRI 区 79.8% であった。



図(3)-3 SRI 区、MSRI 区、CT 区の CH₄ 積算排出量比率（CT を 100% とする）。

図(3)-3 には、SRI 区、MSRI 区、CT 区における CH₄ 積算排出量比率（CT を 100% とする）を示した。栽培期間における CH₄ の積算排出量を処理区ごとに比較すると、CT 区が高く、SRI 区と MSRI 区はほぼ同等だった。乾季(Kruvai)では、CH₄ 排出削減量は、SRI と MSRI について常時湛水 CT と比較すると、40% および 55%（品種 ADT43）、42% および 43%（品種 CO51）だった。また、雨季（Thaladi）では、22% および 31%（品種 ADT46）、25% および 20%（品種 TKM13）だった。AWD 水管理によって水田土

壤の還元状態は緩和され、嫌気性微生物由来のメタン生成が起きにくい条件となったことが示唆される。一方で発生量は少ないものの SRI と MSRI 区においては N_2O 排出の増加が認められた。CT と比較して乾季では 28% および 31% であり、雨季では 43% および 38% の増加となった。

水稲作収量と処理との関係

乾季、雨季とも SRI 区および MSRI 区の水稲収量はほぼ CT 区と同等だった。CO₂-eq 換算の GHG 排出量 (CH₄、N₂O の排出合計値) と、収量あたりの CO₂-eq 換算 GHG 排出量は有意に CT と比較して低い値となった。理由は CH₄ 排出量が低かったことと収量に変化がなかったことによる。したがって、SRI および MSRI による CH₄ の削減は、収量に影響を与えず、効果的な CO₂ 換算 GHG 排出総量抑制手段であるといえる。われわれの提示する植栽方法 (栽植密度) の修正案は、CO₂ 換算 GHG 排出量の低減と灌漑水量の低減、さらに収量の維持の両立を実現できるものである。表(3)-1 には、インド・タミルナドゥ州において SRI 手法を導入したと仮定した場合の資源使用量の見積もりを示した。

表(3)-1 インドにおける稲種籾使用量、灌漑水量、積算 CH₄ 排出量および CO₂-eq 温室効果ガス排出量の見積もり (タミルナドゥ州の 100 万 ha に SRI を適用した場合の影響評価)

	Conventional	SRI	Estimate for 1 M ha		Advantage due to SRI
			Conventional	SRI	
Seed used	30 kg ha ⁻¹	7.5 kg ha ⁻¹	30000 t	7500 t	22500 t
Irrigation (cm)					
Kuruvai (Dry)	930 mm	526 mm	3.1 M ft	1.7 M ft	1.4 M ft
Thaladi (Wet)	488 mm	108 mm	1.6 M ft	0.35 M ft	1.25 M ft
Cumulative CH₄ emission					
Kuruvai (Dry)	94 kg ha ⁻¹	56 kg ha ⁻¹	94000 t	56000 t	38000 t
Thaladi (Wet)	159 kg ha ⁻¹	117 kg ha ⁻¹	159000 t	117000 t	42000 t
CO₂-eq emission (CH₄ + N₂O)					
Kuruvai (Dry)	3682 kg ha ⁻¹	2499 kg ha ⁻¹	3682000 t	2499000 t	1183000 t
Thaladi (Wet)	5615 kg ha ⁻¹	4318 kg ha ⁻¹	5615000 t	4318000 t	1297000 t

2016 年度の試験の結論

AWD 水管理と 1 株あたりの苗数、栽植密度を調整した SRI 栽培管理は、CO₂ 換算の GHG 排出量削減に効果 (22 - 44%) があり、かつ、収量に影響を与えず、灌漑水量の低減 (乾季で約 50% の削減) に資することが明らかとなった。

(2) 異なる AWD 水管理の比較試験 (2017 年度)

灌漑水量と節水効果について

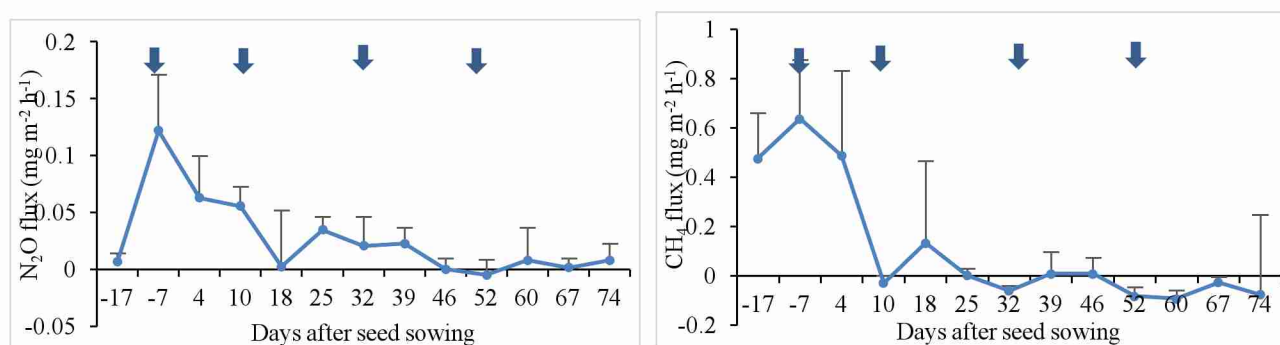
ブラックグラム作においては、播種前 1 回、栽培期間中 3 回、合計 4 回の灌水作業を行った (表(3)-2)。乾季稲作においては、常時湛水で 2 1 回の灌水作業を実施した。1 回 AWD および 2 回 AWD 処理ではともに、灌水回数は 17 回、全期間 AWD では灌水回数は 6 回であった。

なお、雨季については、現在データのとりまとめ中である。

常時湛水と比較した場合、1 回 AWD と 2 回 AWD による節水効果はそれぞれ 18.5%、19.5% だった。一方で全期間 AWD では 71.7% もの節水効果が認められた。また、雨季作については、降雨回数が多いため、AWD による節水効果は明瞭ではなかった。雨季作期間中は概ね全ての処理区において、湛水状態となった。

表(3)-2 2017年の栽培試験期間中の灌漑水量(タミルナドゥ、インド)

Season	処理	灌漑回数	灌漑水量(mm)	節水率(%)
ブラックGRAM		4	-	-
乾季稲作 (June-Sep. 2017)	全期間-AWD	6	307	71.7
	2回-AWD	17	874	19.5
	1回-AWD	17	885	18.5
	常時湛水	21	1086	
雨季稲作 (Oct. 2017-Jan. 2018)	全期間-AWD	6	318	74.8
	2回-AWD	18	1003	20.6
	1回-AWD	19	1009	20.2
	常時湛水	24	1264	

図(3)-4 N₂OとCH₄の発生量の変動(ブラックGRAM作)

。エラーバーは6反復における標準誤差。矢印は灌水の時期をあらわす。

ブラックGRAM作の収量と温室効果ガス排出

播種の後、灌水とともに、速やかにN₂OおよびCH₄のフラックスが上昇した(図(3)-4)。その後の期間においては、地温は上昇傾向にあったが、N₂OおよびCH₄はともにフラックスが漸減した。ブラックGRAM作付け期間中のN₂OおよびCH₄の排出量積算値はそれぞれ、CH₄で2.1 kg ha⁻¹およびN₂Oで0.51 kg ha⁻¹だった。CO₂換算の温室効果ガス排出量は221 kg ha⁻¹だった(表(3)-2)。本栽培においては、CO₂換算値におけるCH₄とN₂Oの寄与度はそれぞれ31%、68.4%であった。ブラックGRAMの種収量は850 kg ha⁻¹、わら収量は2.4 t ha⁻¹であった(表(3)-4)。

乾季稲作の温室効果ガス排出

乾季水稲作期間では、いずれの品種においてもCH₄フラックスは開花期まで上昇傾向で、その後漸減となった(図(3)-5)。

2016年の乾季水稲作と比較すると、2017年の乾季作ではCH₄のフラックスのピークはやや栽培後期に偏っていた。乾季水稲作に入る前のブラックGRAM(畑作)の栽培条件が粗放的な2016年と4度の灌水処理をした2017年とは異なっていたことが、乾季水稲作のCH₄排出パターンの違いに関連している可能性がある。栽培期間中の4種類の水管理の違いは、それぞれのCH₄排出量において1%水準の有意差として認められた。CH₄フラックスは最大が常時湛水(CF)で、以下、1回AWD、2回AWDそして全期間AWDの順であった。

CH₄排出量の積算値に関しては、常時湛水と比較した場合の各AWD水管理におけるCH₄削減率は、全期間AWD、2回AWD、1回AWDについてそれぞれ、55.1、53.9、34.2% (品種ADT43)および50.5、49.1、37.2% (品種CO51)であった。全期間AWD処理は、水稲栽培期間を通じて灌水と落水のサイクル

を繰り返しており、このことが CH_4 の最大の削減をもたらしたといえる。栽培前期における 1 回 AWD および 2 回 AWD についても、乾季水稲作については全期間 AWD に近い CH_4 削減効果を発揮していた。

雨季稲作の温室効果ガス排出

雨季水稲作期間では、いずれの品種においても移植直後に大きな CH_4 フラックスが観測された後、漸減傾向となった（図(3)-5c,d）。表(3)-2 に示すように、水管理の処理間には有意な差が認められた。 CH_4 フラックスは全期間 AWD が最小で、常時湛水が最大であった。品種については今回試験に供した 2 品種の間では CH_4 フラックス量に差が認められなかった。

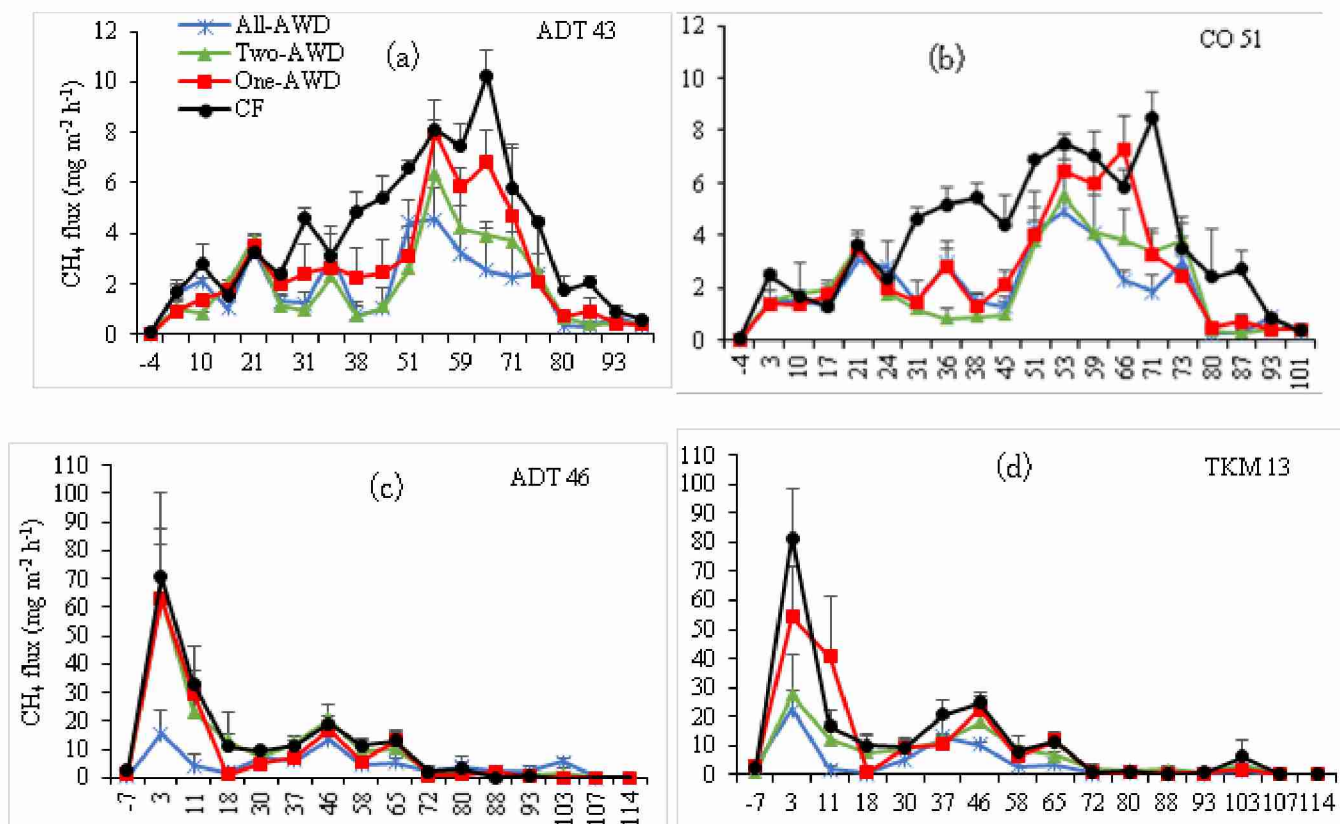
雨季作期間においては、降雨回数が多かったため、水管理が十分に効果的であったとはいえないが、常時湛水（CF）と比較すれば、AWD 水管理は積算値において CH_4 削減に有意に効果が認められた（表(3)-2）。

常時湛水と比較した場合の各 AWD 水管理における CH_4 削減率は、全期間 AWD、2 回 AWD、1 回 AWD についてそれぞれ、59.4、8.5、22.0%（品種 ADT46）および 63.3、31.7、14.9%（品種 TKM13）であった。

AWD 水管理は雨季においては、乾季ほどに効果的な水管理手法とは言えないが、特に全期間 AWD については、常時湛水と比べれば CH_4 の積算排出量削減に効果があるといえる。

常時湛水に関しては、乾季作期間中に常に湛水状態であったために、雨季作期間に入った時点で既に土壌の還元が進んでいて、 CH_4 が産生しやすい条件が整っていたといえる。したがって、乾季作における水管理の条件が、その後の雨季作の CH_4 排出量に大きな影響を与えることを指摘したい。全期間 AWD を乾季作において行った水田では、その処理が微生物の活動に影響を与えており、その後の雨季作期間についても、大幅に CH_4 排出を抑制することができると解釈される。

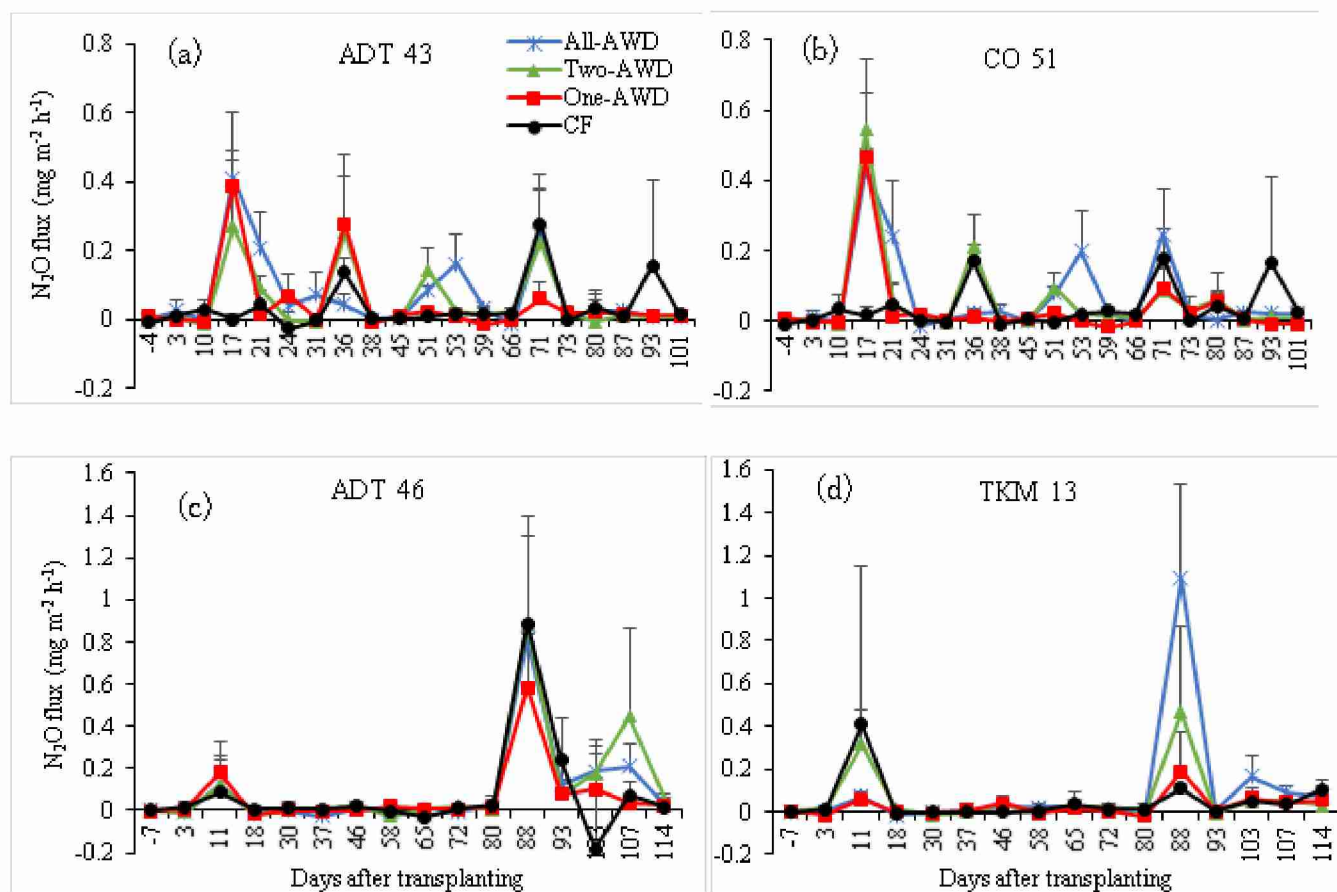
いずれの水管理手法においても、雨季作は乾季作と比較すれば CH_4 排出量の積算値は大きくなった。2 作の水稲作の中では、前作より後作の CH_4 排出量が大きくなることは我々の既往の結果においても指摘しているところである。乾季作の作物残さの土壌へのすきこみは、新鮮有機物の投入となり、雨季作における CH_4 産生の基質として機能している。



図(3)-5 CH₄フラックスの変動 (a)乾季・品種 ADT43、(b)乾季・品種 CO51、(c)雨季・品種 ADT46、(d)雨季・品種 TKM13 図の横軸は移植後の日数を表す。エラーバーは反復(3)の標準誤差。

水稲作における N₂O フラックスについて

乾季水稲作では、施肥直後と1回目のAWDにおける落水期間においてN₂Oのフラックスピークが観測された図(3)-6(a,b)。N₂Oの平均フラックス値と積算値について、5%水準で水管理処理間に有意差は認められなかった。しかしながら、いずれの品種においても、AWD水管理においては常時湛水(CF)と比較すれば比較的高いN₂O排出が観測された。全期間AWD、2回AWD、1回AWDはそれぞれ、常時湛水と比較すると、74.7、41.3、9.3%のN₂O排出量増大がみられた。常時湛水では、栽培期間を通じて湛水状態にあり、酸化還元電位は低い値を維持する。このことが完全脱窒をしやすい条件となり、積算N₂O排出量を少なくする要因といえる。こうした結果は既往の報告を支持するものといえるHouら(2000)⁸⁾。雨季水稲作では、最後の窒素施肥の後に最終落水の時期にN₂Oのピークが観測された。有意差は認められなかったものの、全期間AWDと2回AWDでは常時湛水と比較して高いN₂O排出値が観測され、1回AWDでは、比較的低い値となった。品種間にN₂O排出量の違いはなかった。図(3)-6(c,d)



図(3)-6 N_2O フラックスの変動 乾季作水田 (a:品種 ADT43、b:品種 CO51)、雨季作水田 (c:品種 ADT46、d:品種 TKM13) 図の横軸は移植後の日数を表す。エラーバーは反復(3)の標準誤差

水稲生産性（収量）と CO_2 換算 GHG 排出量について

表(3)-4 に示すように、異なる水管理によって、わら・コメ収量の有意な違いは認められなかった。しかしながら、品種間にはわら・コメ収量に有意な違いが認められた。すなわち、乾季作では CO51 は ADT43 と比べて多収であった。雨季作では、ADT46 が TKM13 と比較して多収であった。乾季作において、 CO_2 換算の排出量は常時湛水において AWD に比較して有意に高い値となった(表(3)-2)。いずれの品種においても、これは主に、常時湛水における CH_4 排出量が高いことが要因である。乾季作において、常時湛水と比較した場合の全期間 AWD、2 回 AWD、1 回 AWD の CO_2 換算排出量の削減効果はそれぞれ、品種 ADT43 では、46.3、49.2、31.8%であり、品種 CO51 では、40.6、49.2、33.1%であった。収量あたりの CO_2 換算 GHG 排出量を算定した場合においても、常時湛水が最も高い値を示した。雨季作において、水管理の違いによって CO_2 換算の GHG 排出量には有意な差が認められた。最も高い値を示したのは、常時湛水であった。常時湛水と比較した場合の全期間 AWD、2 回 AWD、1 回 AWD の CO_2 換算排出量の削減効果はそれぞれ、品種 ADT46 は、55.8、6.3、21.58%であり、品種 TKM13 では 58.8、29.9、15.8%であった。乾季、雨季を通じて、最も GHG 排出の少なかったのは全期間 AWD だった。これはいずれの品種においても、 CH_4 排出量が少なく、かつ、 N_2O 排出に有意差がなかったことに帰する。

表 (3)-3 栽培期間中の平均温室効果ガスフラックスと積算値(サブテーマ 3)

*P < 0.05 (5 % 有意), **P < 0.01 (1 % 有意), ns = not significance at 0.05 level. (5 % 水準有意差なし)

		CH ₄ flux		N ₂ O flux		CO ₂ -eq emission (kg CO ₂ ha ⁻¹)	寄与度 CO ₂ -eq (%)	
		平均フラックス (mg m ⁻² h ⁻¹)	積算値 (kg ha ⁻¹)	平均フラックス (mg m ⁻² h ⁻¹)	積算値 (kg ha ⁻¹)		CH ₄	N ₂ O
乾季畑作								
	ブラックグラム	0.11±0.06	2.1±0.7	0.006±0.004	0.51±0.2	221.4±76.8	31.6	68.4
乾季稲作								
ADT 43	All-AWD	1.92±0.69	42.8±17.5	0.073±0.04	1.53±0.80	1912±446	74.6	25.4
	Two-AWD	1.97±0.57	44.0±13.5	0.055±0.02	1.05±0.42	1807±412	82.0	18.0
	One-AWD	2.75±0.95	62.7±20.7	0.047±0.01	1.00±0.44	2428±761	87.6	12.4
	CF	4.19±0.05	97.7±0.8	0.039±0.01	0.81±0.34	3563±108	93.3	6.7
CO51	All-AWD	2.12±0.07	47.2±1.9	0.070±0.03	1.42±0.44	2028±191	79.4	20.6
	Two-AWD	2.16±1.03	48.5±24.6	0.063±0.02	1.37±0.47	2056±777	78.1	21.9
	One-AWD	2.60±0.26	59.8±6.2	0.036±0.04	0.85±0.95	2287±483	90.3	9.7
	CF	3.99±0.34	92.9±9.5	0.040±0.02	0.86±0.56	3417±248	92.4	7.6
雨季稲作								
ADT 46	All-AWD	4.60±3.6	145.8±110.2	0.098±0.03	2.31±0.74	5644±3890	85.5	14.5
	Two-AWD	10.69±8.2	328.5±241.3	0.119±0.10	2.70±2.30	11974±8666	92.3	7.7
	One-AWD	9.42±1.4	280.2±38.5	0.071±0.01	1.71±0.26	10036±1296	94.8	5.2
	CF	11.79±3.6	359.0±113.8	0.079±0.01	1.93±0.17	12779±3900	95.2	4.8
TKM 13	All-AWD	4.51±1.3	138.8±41.8	0.105±0.05	2.46±1.29	5451±1072	85.4	14.6
	Two-AWD	8.39±4.9	258.4±144.5	0.066±0.06	1.62±1.35	9270±4760	93.5	6.5
	One-AWD	10.63±3.2	322.1±88.6	0.028±0.01	0.66±0.27	11146±2951	98.0	2.0
	CF	12.42±2.2	378.4±64.6	0.051±0.05	1.23±1.36	13232±2027	97.1	2.9
分散分析								
乾季稲作								
	水管理	**	**	ns	ns	**		
	品種	ns	ns	ns	ns	ns		
	交互作用	ns	ns	ns	ns	ns		
雨季稲作								
	水管理	*	*	ns	ns	*		
	品種	ns	ns	ns	ns	ns		
	交互作用	ns	ns	ns	ns	ns		

表(3)-4 作物生産量と収量ベースのCO₂換算GHG排出量

(n = 3). *P < 0.05, **P < 0.01, ns = 有意差なし(0.05水準)

Full-AWD:全期間AWD、Two-AWD:2回AWD、One-AWD: 1回AWD、CF:常時湛水

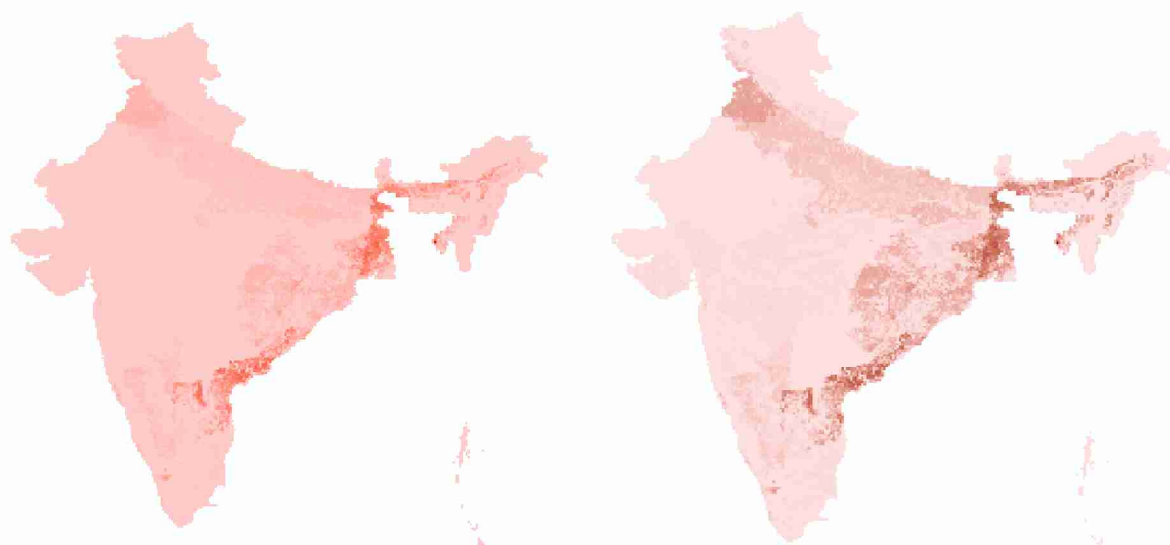
品種等	水管理	子実収量 (t ha ⁻¹)	ワラ収量 (t ha ⁻¹)	収量ベースの CO ₂ -eq排出量 (kg CO ₂ -eq t ⁻¹)
乾季ブラッ クグラム作		0.85	2.4	260.5
乾季稲作				
ADT 43	Full-AWD	5.18±0.21	9.30±0.25	371±95
	Two-AWD	5.23±0.20	8.64±0.55	347±87
	One-AWD	5.42±0.34	9.05±0.40	453±163
	CF	5.41±0.40	9.45±0.19	661±58
CO51	Full-AWD	5.85±0.37	9.47±0.41	349±49
	Two-AWD	5.53±0.20	9.33±0.14	369±125
	One-AWD	5.61±0.36	9.44±0.32	408±89
	CF	5.85±0.22	9.52±0.25	584±27
雨季稲作				
ADT 46	Full-AWD	6.44±0.36	8.59±0.26	859±546
	Two-AWD	6.10±0.84	8.87±0.49	1956±498
	One-AWD	6.58±0.17	8.76±0.29	1524.7±196
	CF	6.26±0.58	8.90±0.18	2063±455
TKM 13	Full-AWD	3.35±0.17	4.70±0.44	1642±401
	Two-AWD	2.64±0.18	4.97±0.59	3501±310
	One-AWD	3.41±0.27	5.23±0.42	3267±859
	CF	2.89±0.32	5.43±1.19	4658±1175
分散分析				
乾季稲作	Treat.	ns	ns	**
	Var.	**	*	ns
	Treat.	ns	ns	ns
	×Var.			
雨季稲作	Treat.	ns	ns	**
	Var.	**	**	**
	Treat.	ns	ns	ns
	×Var.			

2017 年度の試験に基づく結論

AWD 水管理は常時湛水と比較すると乾季、雨季のいずれの場合でも GHG 削減効果 (CH₄ と N₂O 排出量合計を CO₂ 換算した値) が期待できる。回数を絞った (1 回ないし 2 回の落水) AWD 処理であっても、常時湛水と比較すれば、GHG 削減効果は期待でき、労力節減の観点からは現実的な緩和オプションといえる。水管理にともなう GHG 削減効果は品種によらず期待できる。

GIS 手法に基づく広域削減ポテンシャルの推定

2016 年の SRI 水管理実証試験結果により乾季 41%、雨季 24%のメタン削減、MSRI により乾季 48%、雨季 26%のメタン削減が示された。これを踏まえて、インド全域の水田由来メタン排出量を推定すると、常時湛水、SRI、MSRI の 3 つの水管理に基づいて、9.69、6.91、6.59 Tg/year と推定した。図(3)-7 には、本サブテーマで得られた SRI および MSRI に基づく水管理をインド全域の水稲圃場に適用した際に期待される削減ポテンシャルを示した。インドの水稲耕作地帯はガンジス川流域周辺とベンガル湾に沿ったインド東海岸沿いに多く存在している。色の濃い部分は削減量が多くなる場所である。これは、色の濃い地域では、年あたり 2 期作あるいは 3 期作の水稲作によって、年間に見込まれるメタン削減量が単作地帯より大きくなることを示している。なお、SRI 手法によるメタン削減は、本研究で示したように、乾季作で特に効果が大きいため、2 期作であってもメタン削減量が 2 倍には達しないことも考慮している。



図(3)-7 SRI (左) および MSRI (右) によって削減できるメタン削減ポテンシャル (色の濃い部分が高い)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

南インドにおいて、現地で主に栽培される品種と栽培体系に基づいてAWD水管理が有効に機能し、メタンを主とする温室効果ガスの排出削減に有効であることが実証された。AWD水管理は栽培全期間にわたって実施することがGHG削減に効果的ではあるが、栽培前期の1回ないし2回の実施によっても相当に削減効果が見込めることが証明され、省力的な節水水管理の技術の提示がなされた。

(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>

本研究では、水管理という地域に依存しない水稻栽培技術を活用することにより、南アジアの広域で適用可能な緩和策オプションの提示ができた。

2015年9月の国連総会で採択されたSDGs「持続可能な開発目標」の中では、持続可能な生産消費（目標12）、気候変動（目標13）などが17のゴールに該当している。SRIは節水栽培により水資源を節約すること、植栽密度を下げてかつ慣行と同等の収量を得られること、水位の調整により土壌の酸化状態を維持しメタンを大幅削減することを両立することができる極めて現実的な栽培体系であり、インドのみならずアジアの広域の水田水管理に適用可能である。また、南アジアの温室効果ガス排出量算定の精緻化に貢献し、UNFCCCへの排出量報告の精度が向上する。

6. 国際共同研究等の状況

カウンターパート

V. Ravi・タミルナドゥ水稻研究所所長・インド

M.A. Baten・バングラデシュ農業大学校教授・バングラデシュ

南アジア稲作研究の中心地である両機関と共同研究契約を結び、緊密な連携を図りながら測定を進めることができた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) A. Z. OO, S. SUDO, H. AKIYAMA, K. T. WIN, A. SHIBATA, A. YAMAMOTO, T. SANO, Y. HIRONO: PLOS ONE, 13(2) (2018)

Effect of dolomite and biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from acidic tea field soil.

- 2) K W. CHENG, S. M. KIMANI, T. KANNO, S. TANG, A. Z. OO, K. TAWARAYA, S. SUDO, Y. SASAKI and N. YOSHIDA, Soil Science and Plant Nutrition, 64(1), 77-83 (2018)

Forage rice varieties Fukuhibiki and Tachisuzuka emit larger CH₄ than edible rice Haenuki.

- 3) S. M. KIMANI, W. CHENG, T. KANNO, T. NGUYEN-SY, R. ABE, A. Z. OO, K. TAWARAYA and S. SUDO, Soil Science and Plant Nutrition, 64(1), 68-76 (2018)

Azolla cover significantly decreased CH₄ but not N₂O emissions from flooding rice paddy to atmosphere.

- 4) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA, P. ELAYAKUMAR, K. VANITHA, C. UMAMAGESWARI, P. JOTHIMANI, V.

RAVI, Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol.252,148- 158(2018)

Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.

<その他誌上発表（査読なし）>

1) A. Z. OO, S. SUDO, P. K. PATRA and V. RAVI: December 2017-January 2018 Farmers' Forum, India, p.12-19 (2018)

SRI Both Economical and Environment Friendly.

（２）口頭発表（学会等）

1) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA, 2017年度日本土壌肥料学会仙台大会, Sendai (2017)

Effect of modified rice cultivation systems on methane and nitrous oxide emissions from paddy rice field."

2) 山本昭範、小野圭介、須藤重人、Aung Zaw Oo、秀森丈寛、出原雅也、松見豊、犬伏和之、間野正美、林田佐智子、寺尾有希夫、V. Ravi、2017年度日本土壌肥料学会仙台大会、仙台（2017） 南部インド水田地帯における大気メタン濃度の経時変化

3) 須藤重人、2017年度日本土壌肥料学会仙台大会、仙台（2017） 土壌由来温室効果ガス計測法の進展について（続報）。

（３）知的財産権

1) 須藤重人・山本昭範：農業環境変動研究センターおよび東京学芸大学；「３成分同時分析装置および３成分同時分析方法」、特願2016-023363、2016年2月10日

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

1) 林田佐智子・須藤重人・寺尾有希夫、奈良女子大学理学部平成29年度公開講座（2017年11月11日つくば、『地球温暖化抑制を目指して「AMASA プロジェクトの挑戦」』）

（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) W. VAN DER HOEK, R. SATTHIVADIVEL, M. RENSHAW, J. B. SILVER, M. H. BIRLEY and F. KONRADSEN, Research Report 47. International Water Management Institute, Colombo-Sri Lanka, pp. 30 (2001)

2) B. A. LINGUIST, M. M. ANDERS, M. A. A. ADVIENTO-BORBE, R. L. CHANEY, L. L. NALLEY, E. F. F. DA ROSA and C. VAN KESSEL, Glob. Chang. Biol. 21, 407-417 (2015).

Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems,

3) A. PANDEY, V. T. MAI, D. Q. VU, T. P. L. BUI, T. L. A. MAI, L. S. JENSEN and A. DE NEERGAARD, Agric. Ecosyst. Environ. 196, 137-146 (2014)

Organic matter and water management strategies to reduce methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in Vietnam.

4) Y. XU, J. GE, S. TIAN, S. LI, A. L. MGUY-ROBERTSON, M. ZHAN and C. CAO, Sci. Total Environ. 505,

1043–1052 (2015)

Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China.

5) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA, P. ELAYAKUMAR, K. VANITHA, C. UMAMAGESWARI, P. JOTHIMANI and B. RAVI, *Agri. Ecosys. Environ.*, 252, 148-158 (2018)

Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.

6) M. PEYRON, C. BERTORA, S. PELISSETTI, D. SALD-PULLICINO, L. CELI, E. MINIOTTI, M. ROMANI and D. SACCO, *Agric. Ecosys. Environ.* 232, 17–28 (2016)

Greenhouse gas emissions as affected by different water management practices in temperate rice paddies.

Alternate wet/dry irrigation in rice cultivation: a practical way to save water and control malaria and Japanese encephalitis.

7) K. MINAMIKAWA, T. TOKIDA, S. SUDO, A. PADRE and K. YAGI, Guidelines for measuring CH₄ and N₂O emissions from rice paddies by a manually operated closed chamber method. National Institute for Agro-Environmental Science, Tsukuba, Japan (2015).

8) A. X. HOU, G. X. CHEN, Z. P. WANG, O. Van CLEEMOUT, W. H. PATRIC JR., *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 2180–2186 (2000),

Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological process.

Ⅱ-4 南アジア域のメタンフラックスの測定

国立大学法人 千葉大学大学院園芸学研究科 犬伏 和之
間野 正美

研究協力者

千葉大学大学院園芸学研究科 王 瓚楊
千葉大学園芸学部 竹内 大樹

平成27～29年度累計予算額：22,112千円（うち平成29年度：8,496千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

南アジア域は水田における稲作栽培が盛んな地域であり、メタンの放出が多いと考えられている。このことは、大気メタン安定同位体や人工衛星・モデルによる研究から支持されている。一方、同域では実際の水田におけるメタンフラックスの観測、特に季節・年変化を捉える長期・連続測定が行われておらず、陸域側の実証データが欠けている現状である。本サブテーマでは、南アジア域のインド共和国（以下インド）とバングラデシュ人民共和国（以下バングラデシュ）でメタンフラックスの連続測定を実施し、メタン放出のレベルや作期・季節変化および水田土壌中の潜在的なメタン生成能を把握することを目的とした。

インド南部の稲の三期作水田とバングラデシュの二期作水田で気象・環境要素を含めたメタンフラックスの総合観測を実施した。インドの三期作水田では測定システムのトラブルによるメタンフラックスの欠測が生じたが、以下の重要な点が明らかになった。(1)メタンフラックスの作期内の日・季節変化は日本の水田と同様であり、温度が制御要因であることが推測された。(2)メタンフラックスの最大レベルはフィリピン共和国やアメリカ合衆国の水田より大きく、日本の水田に近い値であった。(3)夏期の非耕作期間にインド南部の気候的特徴（高温・多雨）を反映し、大きなメタンフラックスが観測された。

インド南部の三期作水田では、メタンの基質となる二酸化炭素（ CO_2 ）の動態についても渦相関法と生態学的調査によるデータ解析を実施した。三期作を合計した稲の光合成による CO_2 吸収量は大きく、同水田でメタンフラックスが大きい理由の一つは、この光合成で固定された炭素（ C-CO_2 ）がメタン生成の基質となったためと考えられる。ガス態の CO_2 は、稲の大きな光合成量のために生態系呼吸量を考慮しても CO_2 の吸収であったが、植物体炭素、すなわち、収穫物と稲ワラが持ち出されていたために圃場生態系としては CO_2 の持ち出し（放出源）となることが明らかになった。

バングラデシュの二期作水田におけるメタンフラックスの連続測定から、以下のことが明らかになった。(1)各作期・非栽培期間に他の水田では見られない特徴的なメタンフラックスの季節変化が観測された。(2)インドと同様に夏期の非栽培期間に大きなメタンフラックスが観測された（インドと同じ原因に加え、前作収穫後の稲ワラが圃場に放置されたことも影響していると考えられる）。

インド南部とバングラデシュ水田土壌中での潜在的なメタン生成能は、土壌中の有機物量や微生物量等が大きい程、増加するが、実際の水田からのメタン放出量は土壌状態や遊離鉄含有量等の要因によって空間的にも時間的にも制限されていることが示唆された。

〔キーワード〕

水田、メタンフラックス、渦相関法、メタン生成能、季節変化

1. はじめに

メタン（ CH_4 ）は二酸化炭素（ CO_2 ）の約20倍の温室効果を持つ気体であり、地球温暖化に影響を与え

る主要ガスの一つである。このメタンは、自然生態系では湿地や水田などの還元状態の土壌で生成される。アジアのモンスーン地域には世界の水田面積の大半が集中しており、特に南アジア域はその気候的な特徴から稲の二期作や三期作が可能であるため、米の生産量も世界上位の国が多い（インド共和国〔以下インド〕：2位、バングラデシュ人民共和国〔以下バングラデシュ〕：3位）（United States Department of Agriculture, 2015）¹⁾。したがって、水田面積が多く、稲の栽培回数も多い南アジア域はメタンの放出量が多い地域と推測され、大気・陸域の双方からの研究が必要とされている。大気側の研究では、メタン濃度の安定同位体の観測から南アジアのメタン放出の重要性が示唆されている（Schaefer *et al.*, 2016）²⁾とともに、メタン濃度のインバースモデルによる解析からはその放出量の不確実性が大きいことも示されている（国立環境研究所、2014）³⁾。一方、陸域側の研究では、農業統計情報から推定した水田からのメタン放出量がインドやバングラデシュで多い（Yan *et al.*, 2009）⁴⁾ことが示されているが、実際の水田におけるメタン放出量の観測は短期間・散発的なものが多く（例えば、Frei *et al.*, 2007⁵⁾; Ali *et al.*, 2012⁶⁾）、大気側の研究と結びつけるための季節・年を通した観測例はほとんど見られない（インド中部の二期作水田における1年間の報告例がBhattacharyya *et al.* [2014]⁷⁾で報告されている程度である）。このように、南アジア域の水田は全球規模のメタン放出に関して重要な生態系と考えられていながら、実際の水田圃場におけるメタンの潜在生成能やメタン放出量の観測、特に季節～年単位の時間スケールの観測がされてなく、情報・データの空白域となっている。

2. 研究開発目的

メタンの重要な放出地域と考えられていながら、その実測例の希な南アジア域においてメタン放出量（フラックスと同義、以下、適時メタンフラックスとも呼ぶ）を測定する。観測対象は、南アジア域の主要な農作物であり、栽培期間中に土壌が湛水となるためにメタン放出が大きいと予測される水田生態系とする。具体的には、これまでに観測例のないインド南部の三期作水田とバングラデシュの二期作水田を対象とする。インド南部の三期作水田では、メタンとCO₂フラックスを連続測定する観測タワーを設立し、気象・環境要素も測定する総合的な観測サイトとし、南アジア域の温室効果ガスや気象・環境研究のプラットフォームとすることも目的とする。バングラデシュでは既存の二期作水田におけるメタンフラックスの観測を継続し、同国のメタン動態の把握や放出量の評価を行うとともに、新設したインド南部のメタンフラックスの観測の比較対象とすることも目的とする。また水田土壌中のメタンの潜在生成能とその制御因子について検討する。

3. 研究開発方法

3. 1 観測場所と観測機器

2015年に観測候補地の検討のためにインドを訪問し、インド南部タミルナドゥ州の稲研究所（Tamil Nadu Rice Research Institute、以下略称の TRRI と呼ぶ）の圃場を観測場所に決定した。同年の TRRI 所長の Ravi 博士との打ち合わせにより、研究圃場の一面（長辺 約 200 m × 約 60 m）をメタンフラックス・気象観測タワーの設置圃場とした。同観測圃場の位置を後述するバングラデシュの観測圃場の位置とともに図(4)-1 に示す。メタンフラックスの測定手法には、観測タワーの風上側の平均的なフラックスを30分の時間単位で連続測定できる渦相関法を採用し、測器としてオープンパス型メタン分析計（Li-Cor 社、LI-7700）と超音波風速温度計・CO₂/H₂O 分析計（Campbell 社、IRGASON）を選択した。渦相関法は、風上側の圃場の平均的なフラックスを測定することとなるため、事前に観測場所の風向を調べ、観測タワーの設置場所を検討することが必要である。ここでは、TRRI の過去の風向データの解析により、日中の主風向が東北東・西南西であることを明らかにし、主風向方向の風上側に十分な面積を確保できる圃場中央を観測タワーの設置場所とした。メタンフラックスの観測タワーの設置場所は北緯 11° 00' 2.0"、東経 79° 28' 50.2"、標高 19 m であり、2016 年 5 月末に観測タワーを設立し、渦相関法の測器を取り付けた。メタンフラックスの観測タワーには、気温や日射量、水位、酸化還元電位などの気象・環境要素を測定するセンサも設置した。図(4)-2 にメタンフラックス・気象観測タワーの設置状況を示す。渦相関法の測器の出力信号は、0.1 秒ごとの瞬時値をデータロガー（Campbell 社、CR6）に計測し、記録媒

体（micro SD カード）に記録した。気温や日射量などの気象要素の測器の出力信号は、10 秒ごとの瞬時値をデータロガー（Campbell 社、CR1000）で計測し、その 30 分間の統計値（平均値と標準偏差）を記録媒体（Compact Flash カード）に記録した。その他、専用のデータロガーを必要とする気象・環境要素（降水量、水位、酸化還元電位）は、それぞれに適したデータロガーに計測値（あるいはその統計値）を記録した。

バングラデシュでは既存のフラックス観測サイトであるマイメンシン県のバングラデシュ農業大学校（Bangladesh Agricultural University、以下略称の BAU と呼ぶ）の Banten 教授が管理する研究圃場を観測場所とした（図(4)-3 に観測タワーの様子を示す）。メタンフラックスの測定手法には、インド・TRRI の観測圃場と同様の渦相関法を採用し、測器としてメタン分析計は同型機（Li-Cor 社、LI-7700）、超音波風速温度計は Gill 社の R3、CO₂/H₂O 分析計は Li-Cor 社の LI-7500 を用いている。メタンフラックスの観測タワーの設置場所は、北緯 24° 43' 31.0"、東経 90° 25' 27.3"、標高 18 m であり、インド・TRRI の観測圃場と同等の気象・環境要素の測器が設置されている。渦相関法および気象・環境要素の測器からの出力データは、インド・TRRI の観測圃場と同様の形式で記録している。

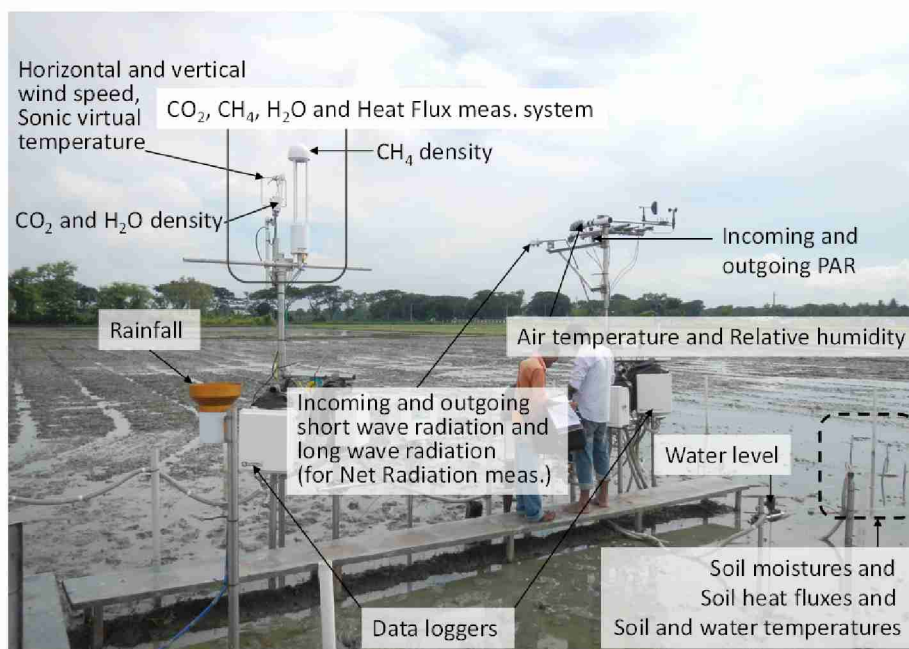
3. 2 観測圃場の栽培体系と解析対象期間

インド・TRRI の観測圃場では、インド南部で一般的な稲の三期作栽培が行われており、この三作期は現地の用語で Kuruvai、Thaladi、Summer と呼ばれている（以後この用語で呼称する）。解析対象期間は観測タワーを設立した 2016 年 5 月から本研究課題の最後の出張を行った 2018 年 2 月までとする。表(4)-1 に、インド・TRRI の観測圃場における解析対象期間の稲の栽培品種と移植・収穫日、栽培日数を示す。

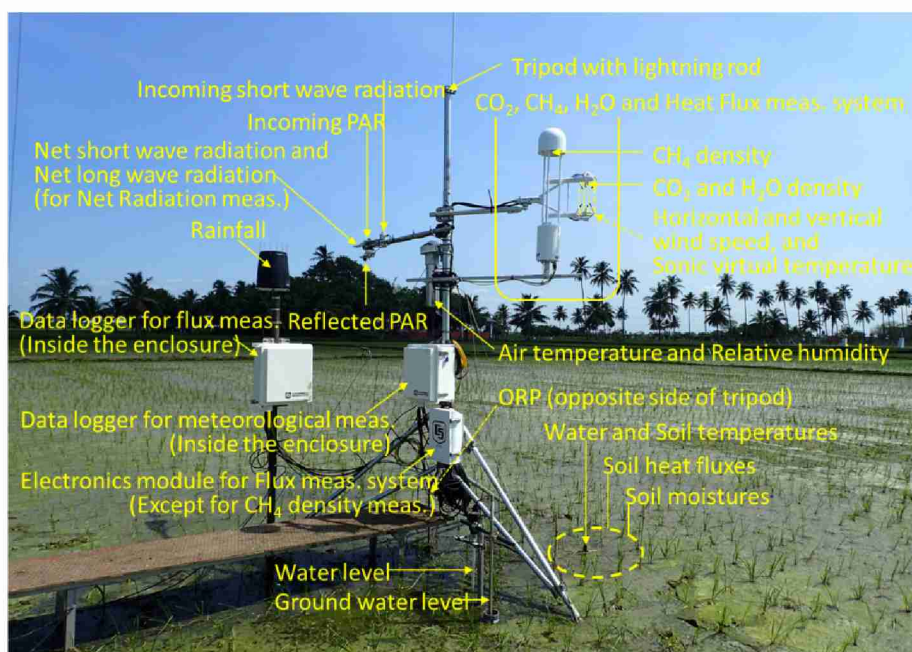
表(4)-1 の解析対象期間のうち、渦相関法のデータについて、データ記録媒体の不調による欠測（2016 年 11 月）とデータロガーの故障による欠測（2017 年 9 月～2018 年 1 月）が生じた他、メタン分析計のトラブルによる断続的な長期欠測が生じた（詳細は 4.2 節）。気象・環境要素については、データロガーの不調による長期の欠測が 2017 年 9 月～10 月および 2017 年 12 月～2018 年 2 月に生じた。



図(4)-1 観測場所の概略地図（Google Map より作成）。インドのタミルナドゥ州稲研究所（TRRI）と土壌水管理研究所（SWMRI、3.5 節参照）、バングラデシュのバングラデシュ農業大学校（BAU）の位置を示す。



図(4)-2 インドのタミルナドゥ州の TRRI 観測圃場に設置したメタンフラックスと気象・環境要素の測定システム（2016年6月撮影）。



図(4)-3 バングラデシュのマイメンシン県の BAU 観測圃場に設置したメタンフラックスと気象・環境要素の測定システム。

表(4)-1 インド・TRRI の観測圃場における解析対象期間の稲の作期、栽培品種、移植・収穫日と栽培日数。

年	作期	品種	移植日	収穫日	栽培日数
2016	Kuruvai	ADT 43	2016年 5月27日	2016年 8月23日	89
2016	Thaladi	ADT 46	2016年 9月26日	2017年 1月23日	120
2017	Summer	ADT 43	2017年 2月28日	2017年 6月12日	105
2017	Kuruvai	ADT 43	2017年 6月27日	2017年10月 4日	100
2017	Thaladi	ADT 46	2017年10月28日	2018年 2月23日	119

バングラデシュ・BAU の観測圃場では、バングラデシュで一般的な稲の二期作栽培が行われており、現地の用語で乾期作の Boro、雨期作の Aman と呼ばれている（以後この用語で呼称する）。解析対象期間は、本研究課題の開始時の作期である 2015 年 Boro 期の終了後の 2015 年 5 月 15 日からとする。表(4)-2 に、バングラデシュ・BAU の観測圃場における解析対象期間（とその前後）の稲の作期、栽培品種、移植・収穫日と栽培日数を示す。

表(4)-2 バングラデシュ・BAU の観測圃場における解析対象期間の稲の作期、栽培品種、移植・収穫日と栽培日数。作期のアスタリスクは、*は本成果報告書の解析の対象外、**は情報不足のために現時点での計算が終了していない期間、NA は現時点では情報が利用できないことを意味する。

年	作期	品種	移植日	収穫日	栽培日数
2015	Boro*	BR 52	2015年 1月18日	2015年 5月14日	117
2015	Aman**	BR 52	2015年 8月13日	2015年12月 7日	117
2016	Boro	BR 29	2016年 1月14日	2016年 5月10日	118
2016	Aman	BR 52	2016年 8月17日	2016年11月30日	106
2017	Boro**	BR 29	2017年 1月31日	2017年 5月26日	116
2017	Aman**	NA	NA	NA	NA

表(4)-2 の解析対象期間のうち、2015 年 Aman 期は（現時点では）計算に必要な情報が不足しており、メタンフラックスの計算が終了していない。また、2017 年 Boro 期・Aman 期は植生高など渦相関法の計算に必要なデータを現地協力者が整理中である。したがって、本成果報告書では 2015 年 5 月～2016 年 12 月まで（2015 年 Aman 期を除く）を解析対象期間とするが、一部の結果については本研究課題の期間中に解析を行った 2013 年 8 月～2015 年 4 月までのデータも用いる。

3. 3 メタンフラックスの計算方法と品質管理・欠測値補間方法

本研究の観測場所の植生は、背の低い群落であり、地表面の状態も均一と見なせる状況（植物の品種が単一であり、生長の程度も同じ）であるため、渦相関法の理想的な観測条件を満たしている。そのため、メタンフラックスの計算には世界的なフラックス観測ネットワーク（FluxNet）で採用されている標準的な渦相関法の手続き（例えば、Foken, 2008⁸⁾）を採用した。計算に必要な外部要素として、生態学的パラメータ（稲の植生高）と気象要素（気温・相対湿度）があるが、稲の植生高は現地協力者による実測値、気象要素は観測タワーで測定している気温・相対湿度を用いた。メタンフラックスの平均化時間は30分とし、一般的に用いられている平均化方法（ブロック平均）と風速の座標変換（ダブルローテーション）を採用した（Foken, 2008⁸⁾; Burba, 2013⁹⁾）。ガスフラックスの計算に標準的に適用される補正方法である乾燥空気の密度補正（Webb *et al.*, 1980¹⁰⁾）とフラックスの高周波・低周波の損失量の補正（それぞれ、Moncrieff *et al.*, 1997¹¹⁾ と Moncrieff *et al.*, 2004¹²⁾）を適用した他、メタンフラックスの補正に特有のスペクトロスコピック効果の補正（Burba, 2013⁹⁾）も適用した。メタンフラックスの符号は、慣例に従い、上向き（地表面から大気への放出）をプラス、下向き（大気から地表面に向かう場合）をマイナスとした。メタンフラックスの単位は、FluxNetの標準的な単位系である $\mu\text{mol}(\text{CH}_4) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ （30分値の場合）あるいは $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ （日積算値の場合）を採用した。

計算されたメタンフラックスが妥当な値かどうかを調べる品質管理として、0.1秒ごとの生データの統計値を調べる検査（Vickers and Mahrt, 1997¹³⁾）の他、データが渦相関法の測定前提である定常性・接地境界層の乱流理論を満たしているかどうかを確認する検査（Foken and Wichura, 1996¹⁴⁾）を実施し、Mauder and Foken (2006)¹⁵⁾の方法に準じて品質を判断した。最終的なメタンフラックスデータの品質は、高品質、通常の品質、解析不可の3段階となり、解析不可と判定されたデータは欠測値の扱いとした。

欠測値の前後の有効なメタンフラックスのデータ数が十分にある場合、平均日変化法（Falge *et al.*, 2001）¹⁶⁾を用いて欠測値を補間し、日積算メタンフラックスの値を得た。

3. 4 CO₂フラックスの計算方法と品質管理・欠測値補間方法および稲の生態学的調査

インド・TRRIの観測圃場におけるCO₂フラックスを渦相関法により測定した（測器は3.1節で述べたIRGASON、Campbell社）。CO₂フラックスの計算方法は、メタン分析計に固有のスペクトロスコピック補正を適用していない他は、メタンフラックスと同様である。CO₂フラックスの符号・単位はメタンフラックスと同様に、地表面への吸収：負、地表面からの放出：正とし、日積算値：g C m⁻² d⁻¹を用いた。

CO₂フラックスの品質管理は、基本的にメタンフラックスの方法と同様であるが、降水量や風向のデータも考慮した間野ら（2007）¹⁷⁾の方法を適用し、解析可と不可のデータに分類した。

CO₂フラックスの欠測値（品質管理により解析不可と判定されたデータを含む）は以下の手順で補間した（Reichstein *et al.*, 2005¹⁸⁾; Max Planck Institute, 2011-2018¹⁹⁾）。渦相関法で測定されるCO₂フラックスは、稲や土壌微生物を含む全ての生態系の呼吸量（Ecosystem Respiration、RE）と稲の光合成によるCO₂吸収量（Gross Primary Production、GPP）の差であり、CO₂フラックス = RE - GPPと表せる。夜間のGPPはゼロであり、測定されたCO₂フラックスはREと等しくなるので、夜間のCO₂フラックス（RE）と気温（呼吸量の主要な制御パラメータ）の関係式を決定する。この関係式が日中にも適用できると仮定すれば、日中のGPPがGPP = （計算された）RE - CO₂フラックスとして算出できる。算出されたGPPについて、GPPと日射量・飽差（光合成の主要な制御パラメータ）との関係式を求める。以上の気温とRE、日射量・飽差とGPPの関係式を用いることにより、気象パラメータからREとGPPが算出でき、その差を計算することでCO₂フラックスの補間値を求めた。以上の手順の過程で得られた関係式を用いて、CO₂フラックスの実測値（解析可データ）が存在する場合にもGPPとREが計算でき、各30分値についてCO₂フラックスとGPP、REを得ることができる。この30分値データを積算することにより、日積算CO₂フラックス、GPP、REデータを得た。

観測圃場のCO₂収支を調べるためには、光合成により稲に固定されたCO₂が最終的にどのようなものかを考慮する必要がある。インド・TRRIの観測圃場では収穫物の他に、各作期とも稲ワラが牛餌として持ち出されている。この収穫物と稲ワラの乾物重は、現地協力者が各作期の収穫時にサンプリング・計測した結果を用い、炭素換算係数（0.35 g C g⁻¹）を利用してCO₂フラックスと同じ単位に変換した。

3. 5 水田土壌中のメタン生成潜在能の測定

上述のインド・TRRI（Aduthurai）とThanjavur（Soil and Water Management Research Institute; SWMRI）およびバングラデシュ・BAUの試験水田圃場から採取した土壌サンプルを持ち帰って比較分析した（図(4)-4）。土壌サンプルの粒径組成、pH、三相分布、電気伝導度(EC)、硝酸態窒素（ヒドラジン還元法）、アンモニア態窒素（ニトロプロシッド法）、全炭素・全窒素（TC・TN；CNコーダー法）、微生物バイオマス態炭素・窒素（MBC・MBN；クロロホルム燻蒸抽出法）、遊離鉄、二価鉄（フェナントロリン法）を定量した。また、現地ガスサンプルからCO₂、CH₄、N₂O濃度を測定し、ガスフラックスを算出した。さらにAduthurai、Thanjavur土壌の湿潤土と風乾土、比較として千葉県水田湿潤土を30℃、暗所で8週間嫌気湛水培養した。その間、1週間毎に培養ビン内部のCH₄濃度をGC-ECD法で分析し、また培養4週間後と8週間後の土壌二価鉄含有量を比色定量した。



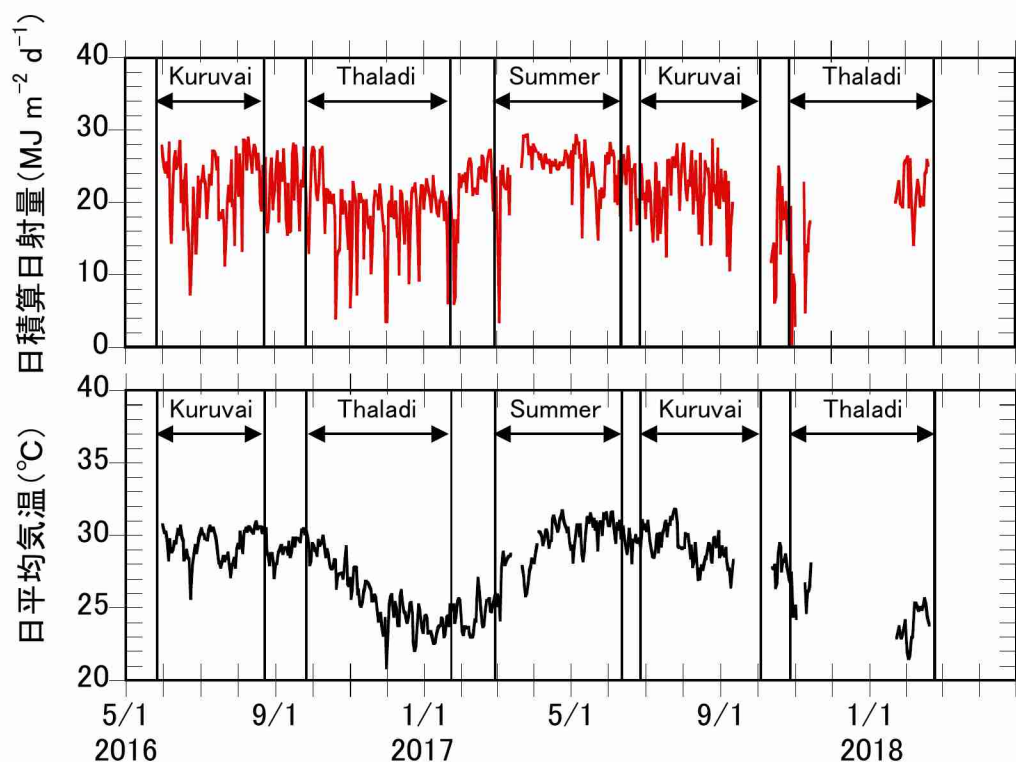
図(4)-4 インドのタミルナドゥ州のTRRI（左）とSWMRI（右）の土壌採取試験水田。

4. 結果及び考察

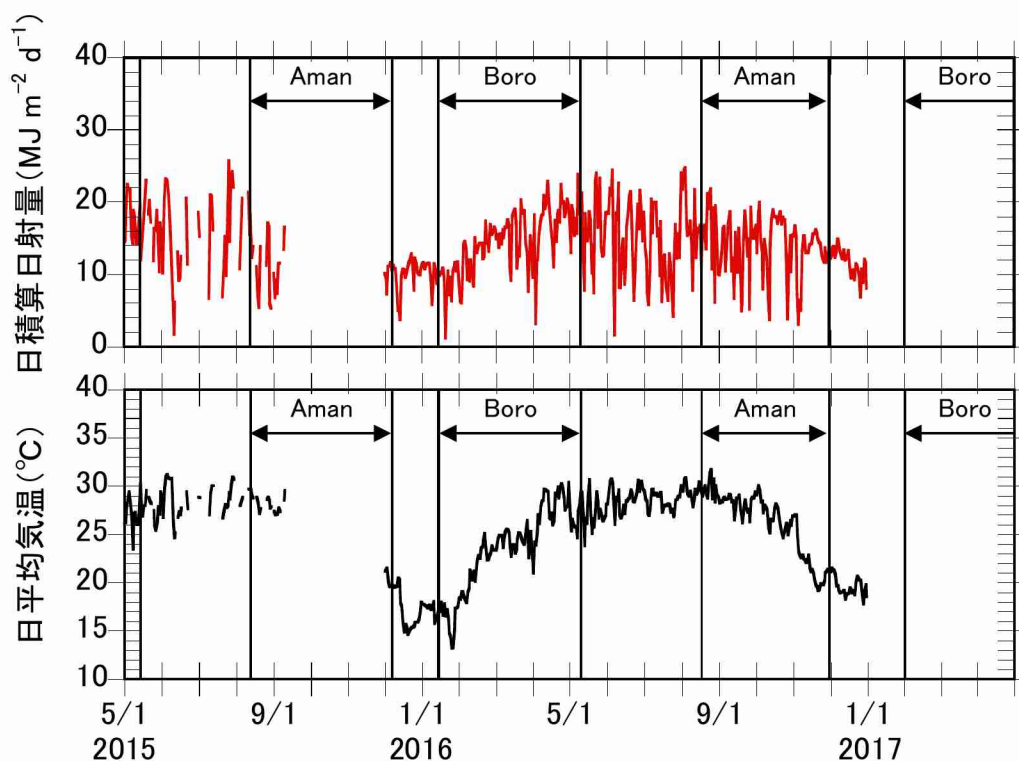
4. 1 気象状況の概要

図(4)-5と図(4)-6にインド・TRRIとバングラデシュ・BAUの観測圃場の日積算日射量と日平均気温の季節変化を示す。両観測圃場とも低緯度ではあるが北半球に位置しているため、日射量は夏期に大きく、冬期に小さい季節変化を示した。インド・TRRI観測圃場の方が赤道に近いため、一年を通して $5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度大きな日射量であった。日射量に比較して、特に夏期の気温は両観測圃場で差がなく、日平均気温の最大は約 30°C であった。冬期の気温は、インド・TRRI観測圃場の方が高い傾向であった。作期の特徴として、インド・TRRI観測圃場のSummer期では天候が良い日が多く、高い日射量が続いたことが分かる。

各作期の積算日射量と平均気温を表(4)-3と表(4)-4に示す。欠測の日数が見られる作期があるために厳密な比較はできないが、両観測圃場とも気象要素の年次間差はそれほど大きくない（インド・TRRI観測圃場のKuruvai期、バングラデシュ・BAU観測圃場のBoro期の数値を参照）。作期の積算日射量は、インド・TRRI観測圃場のKuruvai期とバングラデシュ・BAU観測圃場のBoro期が $1700 \sim 1900 \text{ MJ m}^{-2}$ で小さく、その他の作期は $2100 \sim 2400 \text{ MJ m}^{-2}$ と大きかった。作期平均気温は、冬期の気温の差（図(4)-5と図(4)-6）を反映し、バングラデシュ・BAU観測圃場のBoro期が 23°C 程度と小さく、その他の作期は $26 \sim 30^{\circ}\text{C}$ と大きかった。



図(4)-5 インド・TRRIの観測圃場における日積算日射量（上）と日平均気温（下）の時系列変化。横軸は月/日で示し（以後の図も同様）、2016年5月1日から2018年4月末までの2年間。



図(4)-6 バングラデシュ・BAUの観測圃場における日積算日射量（上）と日平均気温（下）の時系列変化。2015年5月1日から2017年4月末までの2年間。

表(4)-3 インド・TRRI観測圃場の作期ごとの積算日射量と平均気温。アスタリスク（*）は欠測の日数を示し、栽培期間内に*：23日、**：70日、***：7日の欠測日があることを表す。

作期	年	日射量 (MJ m^{-2})	気温 ($^{\circ}\text{C}$)
Kuruvai	2016	1888	29.5
	2017	1675*	29.3*
Thaladi	2016	2238	25.8
	2017	NA**	NA**
Summer	2017	2422***	29.6***
	2018	-	-

表(4)-4 バングラデシュ・BAU観測圃場の作期ごとの積算日射量と平均気温。アスタリスク（*）は欠測の日数を示し、栽培期間内に*：3日、**：88日の欠測日があることを表す。

作期	年	日射量 (MJ m^{-2})	気温 ($^{\circ}\text{C}$)
Boro	2015	1734*	22.7*
	2016	1700	23.5
	2017	-	-
Aman	2015	(333)**	(26.4)**
	2016	2141	26.3
	2017	-	-

4. 2 インド南部の三期作水田におけるメタンフラックス

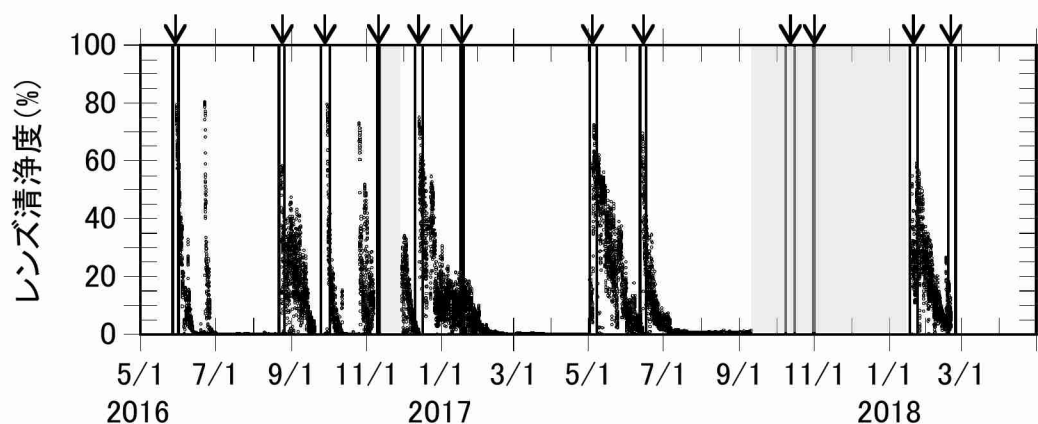
インド・TRRIの観測では、3.2節で示したデータロガーと記録媒体の問題による欠測の他にメタン分

析計のトラブルによる欠測が多く生じた。メタン分析計は、その開光路端のレンズに泥・埃・雨滴等の汚れが付着し、表面が汚れている場合はメタン濃度（正確には密度）の測定が正しく行えない。現地協力者には観測開始時に週に1度のレンズ清掃、2016年末からは週に2度のレンズ清掃を依頼したが、実際の清掃頻度は依頼の回数よりも少なかったと推測される（図(4)-7）。サブテーマ代表者・研究分担者が現地に訪問したときは現地協力者が丁寧にレンズの清掃を実施していたこと、観測データの回収が現地訪問時に限られていることなどの要因が重なり、レンズ清掃の実態把握が遅れ、メタンフラックスの欠測が多く生じることとなった。本サブテーマのような現地の研究者の観測協力が必須で、かつ、協力者に気象観測の経験が少ない場合は、観測態勢の構築に工夫が必要であることが分かった（ただし、後述のバングラデシュ・BAUの観測ではこのような問題は生じておらず、現地協力者の個人的特性に左右される問題でもある）。今後は、レンズ清掃を確実に実施したことの証拠の提出（例えば、写真撮影など）やインターネット経由によるオンタイムでのレンズ状況の把握（汚れている場合は、即時に清掃依頼をする）等の対策によりメタンフラックスの欠測を減らすことができると考える。以上のように、インド・TRRIの観測圃場では、データロガー・記録媒体およびメタン分析計のレンズ汚れのためにメタンフラックスの欠測が多く生じたが、メタンフラックスの放出レベルや日変化・季節変化の特徴は下記のように捉えることができた。

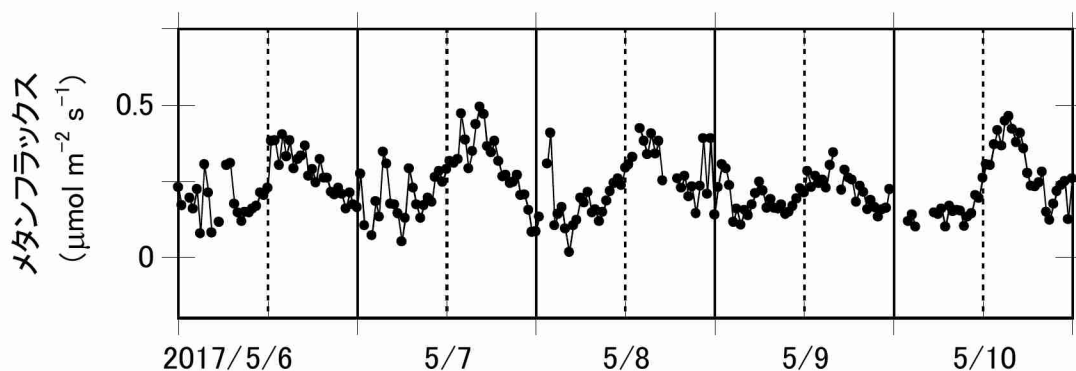
図(4)-8に2017年Summer期のメタンフラックスの日変化を示す。この時期、稲は出穂しており、植生高は約1 mである。メタンフラックスは夜間に $0.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度、日中は $0.4 \sim 0.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度と明瞭な日変化を示した。メタンフラックスの最大値は正午過ぎの14～15時頃に生じており、気温や地温の最大値が生じる時間と一致している。この日変化は、従来の多くの研究で示されているように（例えば、Yagi *et al.*, 1996²⁰⁾）、温度変化に対する土壌中のメタン生成量の増減が原因と考えられる。Weller *et al.* (2015)²¹⁾が指摘しているように、このような日変化はチャンバー法などの非連続測定では捉えられない場合もあり、本研究で用いた渦相関法による測定上のメリットが活かされたものである。

図(4)-9に日積算メタンフラックスの季節変化を示す。前述したように欠測が多いが、図からは以下のことが読み取れる。(1) 夏期の稲の非栽培期間（2016年Kuruvai期終了後）に約 $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の大きなメタン放出がある。(2) メタンフラックスは稲の栽培期間の前半～中頃が大きく、収穫時にかけて減少する。(3) 各作期内のメタンフラックスの最大値は $0.3 \sim 0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度でほぼ同じである。(1)は後述するバングラデシュ・BAU観測圃場と同様に、夏期の高温、降雨による湛水の維持、繁茂した雑草の光合成による易分解性有機物の供給量の維持、耕耘機による圃場土壌の攪乱等が影響していると考えられる。(2)のメタンフラックスの作期内季節変化の特徴は国内水田でも観測されており、主に稲の生長による光合成量の増大（易分解性有機物の供給量の増加）や稲体を通したメタン放出経路の増加が原因と推測される。(3)については、メタンフラックスの最大値観測時の気温が作期ごとに異なる（図(4)-5）ことや稲の栽培品種の違い（表(4)-1）がメタンフラックスの最大値に違いをもたらすと考えられるため、解釈が難しい。本観測圃場では全ての作期終了後に稲ワラを牛餌のために持ち出す（作物残渣の処理方法が同じ）ことがメタンフラックスの最大値の作期間の差を小さくしている要因として考えられるが、今後、観測を継続してこの原因を明らかにしたい。

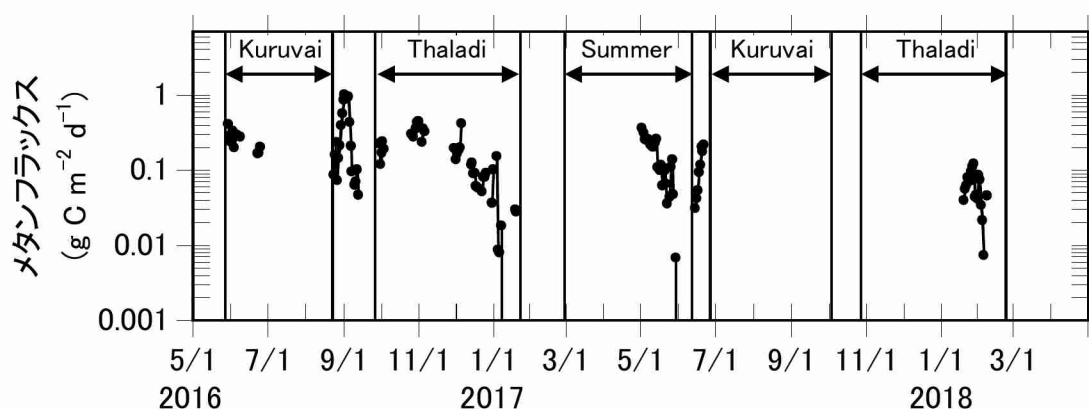
本観測圃場で観測された作期内のメタンフラックスの最大レベル（ $0.3 \sim 0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度）はフィリピン共和国（Alberto *et al.*, 2014）²²⁾やアメリカ合衆国（Hatala *et al.*, 2012）²³⁾の水田で観測された最大レベル（ $0.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度）より大きく、日本の水田（Iwata *et al.*, 2017）²⁴⁾の最大レベル（ $0.2 \sim 0.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ）と同程度である。非耕作期間の $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度の大きなメタフラックスは、バングラデシュの水田での報告例（ $0.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度）（Frei *et al.*, 2007）⁵⁾の他、本研究のバングラデシュ・BAU観測圃場での報告（Mano *et al.*, 2015）²⁵⁾があるのみである（4.3節も参照）。



図(4)-7 メタン分析計のレンズ清浄度の時系列図（データは30分値）。数値が大きい場合はレンズが清浄であり、50～60%以下ではメタン濃度の測定が難しい。網掛け部はデータロガー・記録媒体の問題時。図上の矢印は日本側研究者の出張時（垂線に挟まれた期間が出張期間）。図より、日本側研究者の現地訪問時には現地協力者が丁寧に清掃しているが、その他の期間の清掃頻度が低いことが推測される。



図(4)-8 インド・TRRI観測圃場のメタンフラックスの時系列変化（シンボルは30分値）。2017年5月6日～5月10日（Summer期）で、日界を縦の実線、正午を縦の破線で示す。

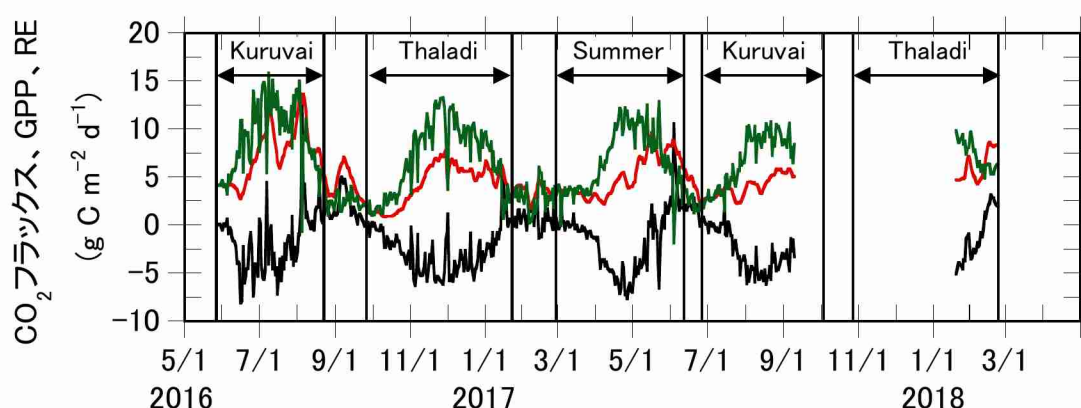


図(4)-9 インド・TRRI観測圃場の日積算メタンフラックスの時系列変化。縦軸が対数スケールであることに注意。横軸は2016年5月1日から2018年4月末までの2年間。メタンフラックスの日積算値は1日のうちに半分以上のデータが利用できる場合のみ計算した。

4. 3 インド南部の三期作水田におけるCO₂フラックス

図(4)-10にインド・TRRI観測圃場における日積算のCO₂フラックス、光合成量（GPP）、生態系呼吸量（RE）の季節変化を示す。2017年9月～2018年1月のデータロガーの故障による欠測期間は気象パラメー

タとRE、GPPの関係が定式化できなかったため欠測となっている。CO₂フラックスは、作期内で明瞭な季節変化を示し、その変化パターンは各作期とも同じであった。すなわち、稲の移植後のゼロ付近の値から稲の光合成量（GPP）の増加に伴ってCO₂吸収量が増加し、生育期間中頃に最大となった。その後、収穫に向かってGPPは減少し、収穫前後は生態系呼吸量（RE）の方が上回り、CO₂の放出となった。GPPの各作期内の季節変化の特徴（移植・収穫時：小、生育期間中頃：大）は、（データが少なく不明瞭ではあるが）メタンフラックスの季節変化の傾向（図(4)-9）と一致しており、稲の光合成由来の炭素（C-CO₂）がメタン生成の基質となっており、かつ、その影響が大きい（季節変化に反映している）ことが示唆される。REは、GPPの増加のタイミングより遅れて増加を始めた。これは、観測圃場が水田であり、水面が土壌呼吸によるCO₂放出の抵抗となっているため、REに占める土壌呼吸量の割合が小さかったからと考えられる。すなわち、稲の生長がある程度に達した後、稲の呼吸量の増加のタイミングでREが増加を開始したと推測される。観測圃場の田面水の消失時（中干し時）、特にKuruvai期で顕著であるが、REの増加が観測された。これは、田面水の消失（CO₂放出経路の抵抗の減少）により、土壌呼吸によるCO₂放出量が多くなり、その増加分がREに加わったためである。



図(4)-10 インド・TRRI観測圃場の日積算のCO₂フラックス（黒）、光合成量（GPP）（緑）、生態系呼吸量（RE）（赤）の時系列変化。横軸は2016年5月1日から2018年4月末までの2年間。2017年9月～2017年1月はデータロガーの故障による欠測。

生態系（ここでは水田）のCO₂動態を調べるためには、渦相関法によって測定されるガス態のCO₂交換だけではなく植物（ここでは稲）に固定されたCO₂がどのように移動するかも評価する必要がある。本研究では、稲の収穫物と稲ワラの持ち出しを考慮した純生物相生産量（Net Biome Production、NBP）を次の式を使って評価した。NBP = NEP - C_{removal}、ここで、NEP（Net Ecosystem Production）は純生態系生産量でCO₂フラックスの積算の負値（NEP = -ΣCO₂フラックス）、C_{removal}は観測圃場から持ち出されたCO₂量（収穫物と稲ワラ）である。観測圃場の三作期の全てをカバーする期間として、2016年のKuruvai期から2017年のSummer期後の非耕作期間（2017年Kuruvai期の移植日前日）のNBPをNEP、GPP、REとともに表(4)-5に示す。各作期・非栽培期間ともNBPは負値（C-CO₂の観測圃場からの損失）であり、結果として1栽培年では1 m²あたり830 gの炭素が観測圃場から失われていることが明らかになった。これは、C_{removal}として観測圃場から収穫物だけでなく稲ワラも含めて持ち出されていることが原因である。正確なNBPの評価のためには施肥による炭素投入量や表(4)-5中の各項目の誤差評価などが必要であるが、定性的な結論（観測圃場はC-CO₂の損失）は変わらないと考えられる。したがって、4.2節のメタンフラックスの結果と併せて考えると、インド・TRRIの三期作水田はガス態のCO₂を（三期作のために）多く吸収しているが、炭素の形態（CH₄、収穫物、稲ワラ）としてC-CO₂を放出・持ち出しているため炭素収支の負の生態系であり、温室効果ガスの放出の場であることが明らかになった。

表(4)-5 インド・TRRI観測圃場のCO₂収支。2016年Kuruvai期、Thaladi期、2017年Summer期と各作期後の非栽培期間の合計値で示す。1栽培年は各作期・非栽培期間の合計値で、稲の栽培期間にもとづいた1年である（2016年5月27日～2017年6月26日）。表の単位はg C m⁻² (期間)⁻¹で、NEPとGPP、NBPは正の値が生態系のCO₂吸収（生産量）、REとC_{removal}は正の値が生態系からのCO₂放出量（持ち出し量）を意味する。

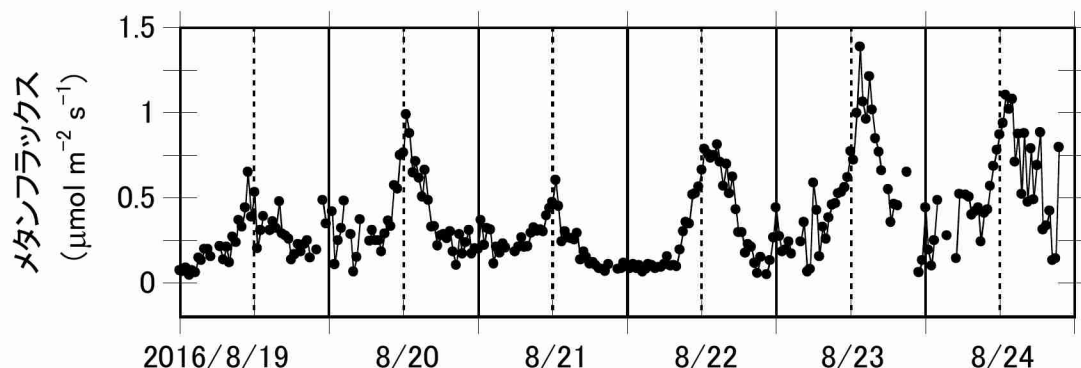
作期	NEP	GPP	RE	C _{removal}	NBP
Kuruvai 2016	149.8	795.8	646.0	439.8	-290.0
Thaladi 2016	314.2	817.4	503.2	431.9	-117.7
Summer 2017	166.4	697.7	531.3	477.6	-311.2
非栽培期間	-109.9	214.5	324.4	0	-109.9
1栽培年（合計）	-520.4	2525.7	2005.0	1349.3	-828.8

4. 4 バングラデシュの二期作水田におけるメタンフラックス

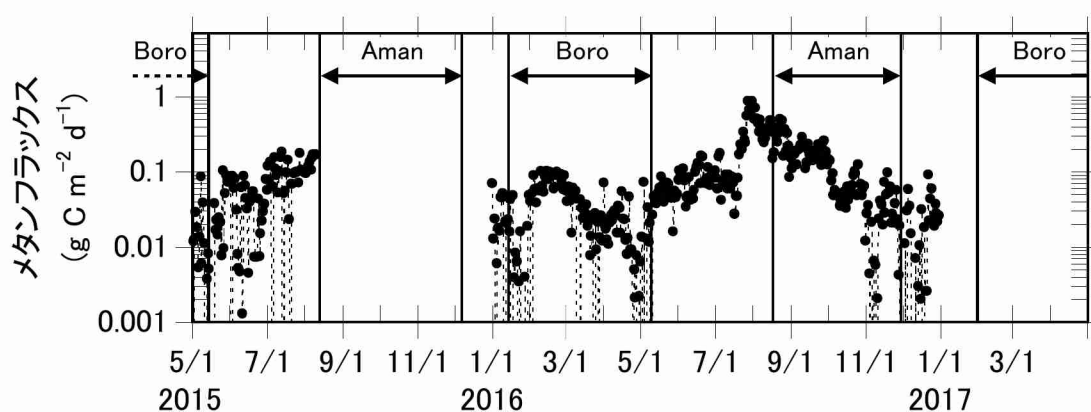
バングラデシュ・BAU観測圃場のメタン分析計は適時のレンズ清掃で正常に動作しており、メタンフラックスの欠測は計算に必要な諸パラメータの未整理と計測上避けられない気象条件（豪雨や非常に弱い風速等）の場合である。図(4)-11に2016年Aman期のメタンフラックスの日変化を示す。稲の移植（2016年8月17日）の直後であるが、メタンフラックスは大きく日変化も明瞭である（夜間：～0.3 μmol m⁻² s⁻¹程度、日中：0.5～1.5 μmol m⁻² s⁻¹程度）。この大きなメタンフラックスは、前作（2016年Boro期）の収穫後、稲ワラが圃場に放置され耕起によりすき込まれたことによる有機物量の増加および夏期の非栽培期間（5月中旬～8月中旬）の気象・生態環境（高温、多雨による湛水、雑草の繁茂等）が影響していると考えられる。このような大きなメタンフラックスにも関わらず気温・地温に準じた日変化を示すのは、放出されるメタンの由来が土壌中のメタン生成によることを示唆している。

日積算メタンフラックスの季節変化（図(4)-12）は、非栽培期間、Aman期、Boro期で異なった特徴を示した。夏期の長い非栽培期間のメタンフラックスは、0.01～0.03 g C m⁻² d⁻¹程度から0.2～1 g C m⁻² d⁻¹程度まで増加した。これは、先述したように前作稲の稲ワラの放置と気象・生態環境の他、この期間に気温が上昇していることに起因すると考えられる。この非栽培期間は、数回の圃場の耕起を除けば管理がされていない。降水による圃場の貯留水を適切に排水するなど土壌の還元状態を弱めることにより、この時期の大きなメタン放出量を抑制できる可能性がある。非栽培期間に続くAman期は、メタンフラックスが作期を通して減少傾向となった。このような作期内の季節変化は日本の水田等では見られず（例えば、Iwata *et al.*, 2017）²⁴⁾、特徴的である。このメタンフラックスの減少は、メタン生成にともなう土壌中の易分解性有機物量の減少および夏期から冬期にかけての気温・地温の低下が影響していると推量できる。Boro期のメタンフラックスは、稲の移植後から生育中頃まで大きくなり、以後収穫時に向けて減少するという一般的な作期内の季節変化を示した。この作期は、気温の上昇に併せて稲も成長するため、一般的なメタンフラックスの季節変化の特徴となったと考えられる。なお、作期ごとの総メタン放出量はAman期（12.8 g C m⁻²）に比べてBoro期（3.8 g C m⁻²）の方が小さい。これは、作期の平均気温の差異（表(4)-4）の他に、Aman期の収穫後の稲ワラが観測圃場外に持ち出されていること、すなわち、稲ワラ由来の有機物の観測圃場への投入量が異なる（Boro期：前作稲ワラ持ち出し、Aman期：前作稲ワラすき込み）ことが影響していると考えられる。図(4)-12で見られるメタンフラックスの季節変化は過去2年にも観測されており（Mano *et al.*, 2015）²⁵⁾、この地域の二期作水田の重要な特徴である。

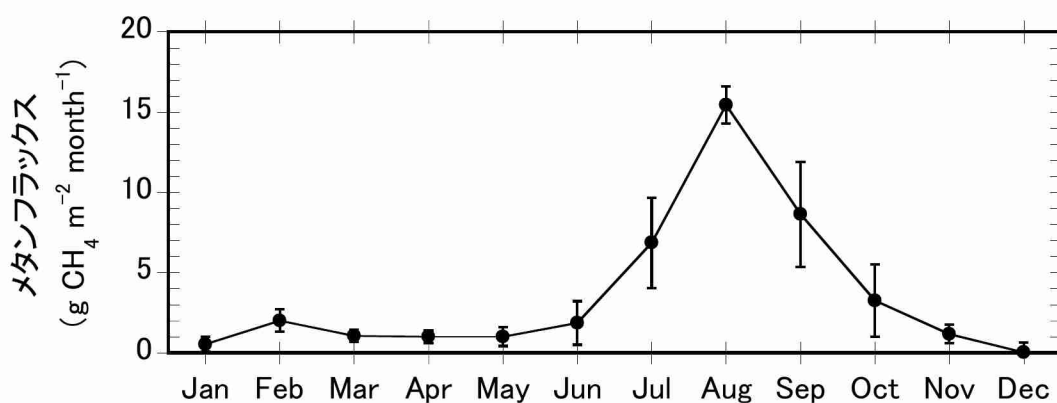
バングラデシュの二期作水田における月別のメタン放出量を調べるために、本研究課題期間に解析を実施した2013年8月からの計測データも含めてその実態を調べた。図(4)-13にバングラデシュ・BAU観測圃場における月別のメタン放出量を示す。メタン放出量は7月～9月の3ヶ月間が7～15 g CH₄ m⁻² month⁻¹と大きく、その他の月は0～3 g CH₄ m⁻² month⁻¹と小さい変化を示した。



図(4)-11 バングラデシュ・BAU観測圃場のメタンフラックスの時系列変化（シンボルは30分値）。2016年8月19日～8月24日（Aman期の移植直後）で、日界を縦の実線、正午を縦の破線で示す。



図(4)-12 バングラデシュ・BAU観測圃場の日積算メタンフラックスの時系列変化。縦軸が対数スケールであることに注意。横軸は2015年5月1日から2017年4月末までの2年間。

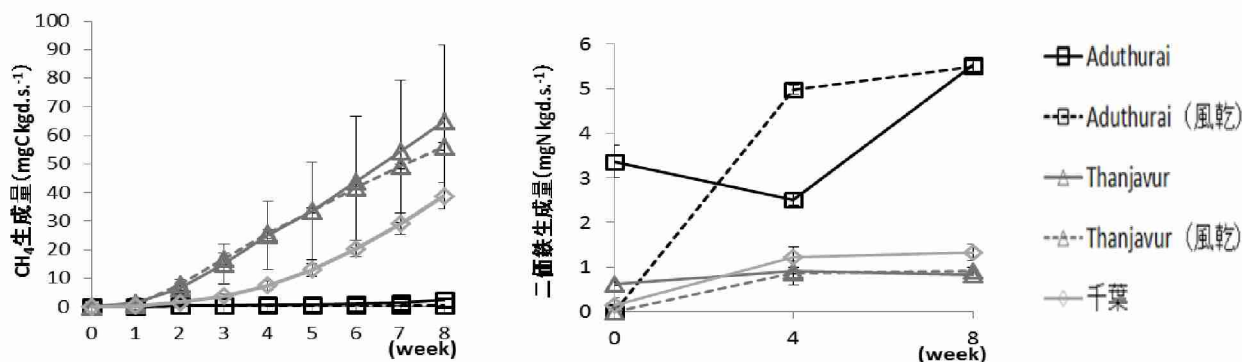


図(4)-13 バングラデシュ・BAU観測圃場の月別メタン放出量。各月の平均値と標準偏差で示す（各月のデータ数は3）。図の縦軸の単位はChandra *et al.* (2017)²⁶⁾の図3の最下段（a7、b7、c7）と同じ $\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ とした。

4. 5 水田土壌中のメタン生成潜在能の測定

土壌理化学性の測定より、Aduthurai土壌はThanjavur土壌に比べ、保水性が良好で、湛水により土壌の還元が進行していたこと、無機態窒素量や微生物バイオマス量でより肥沃であること、また遊離鉄含有量および二価鉄生成量が多いことが分かった。加えて、土壌の培養実験(図(4)-14)ではAduthurai土壌で CH_4 生成量が小さく、一方で二価鉄の生成量が多いという結果が得られ、これらのことから、

Aduthurai圃場はより大きな温室効果ガス生成能を持つが、二価鉄生成に伴う有機物の消費や現地水田の水管理に伴う、酸化的土壌状態の維持によって、CH₄の生成が抑制されたと考えられた。



図(4)-14 11月採取土壌の嫌気培養下におけるCH₄生成量および二価鉄生成量の経時変化
(エラーバーは標準偏差を示す)。

以上の結果から、インド南部地域の水田土壌におけるCH₄の潜在的な生成能は、土壌中の有機物量や微生物量が大きい程、増加するが、実際の水田からのCH₄放出量は土壌状態や遊離鉄含有量等の要因によって空間的にも時間的にも制限されていることが示唆された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

メタン放出量の観測の空白域であった南アジア域の水田においてメタンフラックスの連続観測を行い、その放出レベルや季節変化の特徴を、土壌の潜在的メタン生成能とともに把握することができた。

(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>

バングラデシュの二期作水田は、夏期の非耕作期間に多雨による湛水や高温・雑草の繁茂のために多量のメタンが放出される。この時期に降雨による貯留水を排水するなどの比較的簡単な圃場管理を行うことによりメタン放出量を削減できる可能性がある。

インド・バングラデシュの両観測場所ではメタンの他に二酸化炭素フラックスも連続測定している。南アジア域で得られたこれら温室効果ガスフラックスのデータは地球温暖化の研究に重要であり、将来、FluxNetなどの国際的データベースで公開することにより有効に活用されると見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

カウンターパート

V. Ravi・タミルナドゥ水稲研究所所長・インド

M.A. Baten・バングラデシュ農業大学校教授・バングラデシュ

南アジア稲作研究の中心地である両機関と共同研究契約を結び、緊密な連携を図りながら測定を進めることができた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

<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) H. Arai, R. Yoshioka, S. Hanazawa, Vo Quang Minh, Vo Quoc Tuan, Tran Kim Tinh, Truong Quoc Phu, C. S. Jha, S. R. Redda, M. Mano, V. K. Dadhwal and K. Inubushi: Joint conference of the AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), Pune, India, 2015
"Function of methanogenic community in mangrove soils as influenced by the chemical properties of the hydrosphere. "
- 2) M. Mano, A. Miyata, Md. A. Baten, K. Ono, W. Kim, Md. A. Miah, N. Mobin, M. Sato and N. Matsuoka: Joint conference of the AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), Pune, India, 2015
"Continuous CH₄ Flux Measurement of a Double-Crop Paddy Field in Bangladesh. "
- 3) K. Inubushi and S. Hanazawa: Second International Conference of Ecology of Soil Microorganisms, Prague, Czech Republic, 2015
"Microbial activities and GHGs production in upland rice field in Uganda comparing to lowland rice fields in India and Japan. "
- 4) 間野正美、宮田明、Md.A. Baten、小野圭介、金元植、松岡延浩：日本農業気象学会2016年全国大会(2016)
「バングラデシュの水稻二期作田におけるメタンフラックスの季節・年変動の特徴」
- 5) 犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、山本昭範、林田佐智子：日本熱帯農業学会第119回講演会(2016)
「南インド水田における温室効果ガスの動態と土壌理化学性」
- 6) 犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、A. Oo、小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. Ravi：日本熱帯農業学会第121回講演会(2017)
「南インド水田における温室効果ガスの動態とその影響因子」
- 7) 間野正美、犬伏和之、須藤重人、Aung Zaw Oo、小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. Ravi：日本農業気象学会2017年全国大会(2017)
「インドの水田における温室効果ガスフラックスの測定」
- 8) K. Inubushi, P. Pabir, S. Hayashida and AMASA members: 7th ISAJ Symposium, India-Japan Symposium on Science and Technology for Sustainability, Tokyo, Japan, 2016
"Sustainable Paddy Rice Farming Harmonized With Greenhouse Gas Emission/From AMASA Project In India. "
- 9) K. Inubushi: Fourth International Conference on Engineering Research Innovation & Education, Sylhet, Bangladesh, 2016
"Sustainable paddy rice farming harmonized with greenhouse gas emission/from AMASA project in Bangladesh and India. "
- 10) K. Inubushi and H. Arai: Can Tho University Journal of Science, Can Tho, Vietnam, 2017
"Sustainable water use for agriculture and environment. "
- 11) K. Inubushi, Y. Shiratori, K. Ito, H. Arai, N. Yoshioka, A. Iswandi, A. Citraresmini, H.T. Nguyen, T.L.H.

Tran and Q.H. Pham: 7th International Conference on Silicon in Agriculture, Bangalore, India, 2017

"Effects of soil amendment on environment and yield in Southeast Asia. "

- 12) K. Inubushi, Z. Wang, M. Mano, S. Sudo, A.Z. Oo, A. Yamamoto, K. Ono, S. Hayashida, V. Ravi and M.A. Baten : Annual Meeting of Tropical Agriculture, Tokyo, Japan, 2018

"Influence of physio-chemical properties of soils on greenhouse gases production in paddy soils from Bangladesh, India and Japan. "

(3) 知的財産権

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) 犬伏和之、間野正美：戸定会講演会「宇宙と田んぼから見た温室効果ガス（AMASAプロジェクト成果から）」、2016年11月5日千葉大学戸定祭、100周年記念ホールにて開催。

(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) United States of Department of Agriculture: Available from: https://www.nass.usda.gov/Publications/Ag_Statistics/2015/Ag_Stats_2015_complete%20publication.pdf [Accessed March 30, 2018] (2015), Agricultural Statistics 2015.
- 2) H. Schaefer, F.S.E. Mikaloff, C. Veidt, K.R. Lassey, G.W. Brailsford, T.M. Bromley, E.J. Dlugokencky, S.E. Michel, J.B. Miller, I. Levin, D.C. Lowe, R.J. Martin, B.H. Vaughn and J.W. White: Science, 352(6281):80-4, doi: 10.1126/science.aad2705. Epub 2016 Mar 10. (2016), A 21st-century shift from fossil-fuel to biogenic methane emissions indicated by $^{13}\text{CH}_4$.
- 3) 国立環境研究所 : <http://www.nies.go.jp/whatsnew/2014/20140327/20140327.html> (最終アクセス日 2018年4月25日) (2014), 「いぶき」(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について.
- 4) X. Yan, H. Akiyama, K. Yagi and H. Akimoto: Global Biogeochemical Cycles, 23, GB2002, doi:10.1029/2008GB003299. (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.
- 5) M. Frei, M.A. Razzak, M.M. Hossain, M. Oehme, S. Dewan and K. Becker: Agriculture, Ecosystems and Environment, 120, 391-398 (2007), Methane emissions and related physicochemical soil and water parameters in rice-fish systems in Bangladesh.
- 6) M.A. Ali, M.G. Farouque, M. Haque and A. Kabir: Journal of Environmental Science & Natural Resources, 5(1), 179-185 (2012), Influence of Soil Amendments on mitigating methane emissions and sustaining rice productivity in paddy soil ecosystems of Bangladesh.
- 7) P. Bhattacharyya, S. Neogi, K.S. Roy, P.K. Dash, A.K. Nayak and T. Mohapatra: Agriculture, Ecosystems & Environment, 189, 127-135 (2014), Tropical low land rice ecosystem is a net carbon sink.
- 8) T. Foken: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp.305 (2008), Micrometeorology.
- 9) G. Burba: Li-Cor Biosciences, Lincoln, pp.331 (2013), Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications.

- 10) E.K. Webb, G.I. Pearman and R. Leuning: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 106, 85–100 (1980), Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer.
- 11) J.B. Moncrieff, J.M. Massheder, H. de Bruin, J. Ebers, T. Friborg, B. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Soegaard and A. Verhoef: Journal of Hydrology, 188-189, 589-611 (1997), A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide.
- 12) J.B. Moncrieff, R. Clement, J. Finnigan and T. Meyers: eds. Lee, X., W. J. Massman and B. E. Law. Dordrecht: Kluwer Academic, 7-31 (2004), Averaging, detrending and filtering of eddy covariance time series, in Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurements.
- 13) D. Vickers and L. Mahrt: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 14, 512-526 (1997), Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data.
- 14) T. Foken and B. Wichura: Agricultural and Forest Meteorology, 78, 83-105 (1996), Tools for quality assessment of surface-based flux measurements.
- 15) M. Mauder and T. Foken: Meteorologische Zeitschrift, 15, 597-609 (2006), Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure.
- 16) E. Falge, D. Baldocchi, R. Olson *et al.*: Agricultural and Forest Meteorology, 107, 43–69 (2001), Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange.
- 17) 間野正美、宮田明、安田幸生、永井秀幸、山田智康、小野圭介、齊藤誠、小林義和：農業気象, 63, 125-138 (2007) , オープンパス型渦相関法データの品質管理.
- 18) M. Reichstein, E. Falge, D. Baldocchi *et al.*: Global Change Biology, 11, 1424-1439 (2005), On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm.
- 19) Max Planck Institute: Available from: <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWeb> [Accessed February 10, 2018]. (2011-2018), New REddyProcWeb online tool.
- 20) K. Yagi, H. Tsuruta, K. Kanda and K. Minami: Global Biogeochemical Cycle, 10, 255–267 (1996), Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: automated methane monitoring.
- 21) S. Weller, D. Kraus, K. Butterbach-Bahl, R. Wassmann, A. Tirol-Padre and R. Kiesel: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 178, 755-767 (2015), Diurnal patterns of methane emissions from paddy rice fields in the Philippines.
- 22) M.C.R. Alberto, R. Alberto, R. Wassmann, R.J. Buresh, J.R. Quilty, T.Q. Correa Jr., J.M. Sandro and C.A.R. Centeno: Field Crops Research, 160, 12-21 (2014), Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer.
- 23) J.A. Hatala, M. Detto, O. Sonnentag, S.J. Deverel, J. Verfaillie and D. Baldocchi: Agriculture Ecosystems and Environment, 150, 1-18 (2012), Greenhouse gas (CO₂, CH₄, H₂O) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the Sacramento-San Joaquin Delta.
- 24) H. Iwata, M. Mano, K. Ono, T. Tokida, T. Kawazoe, Y. Kosugi, A. Sakabe, K. Takahashi and A. Miyata: Atmospheric Environment, 179, 156-165 (2017), Exploring sub-daily to seasonal variations in methane exchange in a single crop rice paddy in central Japan.
- 25) M. Mano, A. Miyata, M.A. Baten, K. Ono, W. Kim, M.A. Miah, N. Mobin, M. Sato and N. Matsuoka: Proceedings Joint conference of the AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS TC WG VIII/3 : Weather, Atmosphere and Climate Studies, 40 (2015), Continuous CH₄ Flux Measurement of a Double-Crop Paddy Field in Bangladesh.
- 26) N. Chandra, S. Hayashida, T. Saeki and P.K. Patra: Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 12633–12643 (2017), What controls the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?

Ⅱ－５ レーザー分光手法によるメタンの連続観測

国立大学法人東京学芸大学

自然科学系広域自然科学講座環境科学分野

山本 昭範

平成27(開始年度)～29年度累計予算額：5,670千円（うち平成29年度：1,451千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

南アジアは強力な温室効果ガスであるメタンの主要な発生源であると指摘されているが、地上観測データが非常に少なく、大気メタン濃度推定の不確実性が高い。大気メタン濃度は様々な手法による観測が行われている。このうち、手動の大気サンプリング等では、日変化などの短期的な時間スケールにおける大気メタン濃度の変動などの連続的な時間変化を明らかにすることは困難である。そのため、大気サンプリング等によって得られた大気メタン濃度の代表性の検証および短期的～長期的な時間変化パターンを明らかにするためには、大気メタン濃度の連続観測が不可欠である。そこで、本研究は、特に地上観測データの少ない南インドの水田地帯において、レーザー分光手法により大気メタン濃度の時間変動を明らかにすること、また、高時間解像度観測を利用して、ポイントデータとして得られる大気メタン濃度値の代表性を検討することを目的とした。

大気メタン濃度には観測期間を通して短期的および長期的な時間変化が見られることが明らかになった。まず、夜間から早朝にかけて大気メタン濃度が上昇する日変化パターンを示した。このような大気メタン濃度の日変化パターンは、主に夜間から明け方にかけて風速が低下したことによって形成された地表付近の安定層の存在を示唆するものと考えられた。また、日中（10時～14時）の大気メタン濃度は、2016年10月をピークに2017年4月にかけて緩やかに低下し、その後再び増加する季節変化を示した。このような全体的な傾向に加えて、日中の大気メタン濃度は水稻栽培期間中に突発的に上昇する期間があることが明らかになった。この大気メタン濃度の季節変化には、水稻栽培管理（代掻きや落水など）に伴う水田からのメタン発生パターンの変化、大気中のOHラジカルとの反応の変化、モンスーンなどによる風向変化などが関与していることが示唆された。

〔キーワード〕

レーザー分光、大気メタン濃度、時間変動、連続観測、南アジア

1. はじめに

メタンは二酸化炭素の約25倍の地球温暖化係数をもつ強力な温室効果ガスであり、人為的な原因による温室効果の約20%に寄与している（Stocker et al., 2013）¹⁾。様々なメタンの発生源や吸収源の存在が明らかになっているが、それぞれの発生源および吸収源（水田、湿地、反芻動物、土壌など）が大気メタン濃度に与える詳細な影響は解明されていない。

大気メタン濃度は様々な手法により観測が行われており、空間的、時間的な変動が非常に大きいことが明らかになっている（Cunnold et al., 2002など）²⁾。そのため、大気メタン濃度やその時間変動を正確に評価するためには長期間かつ高頻度の観測が必要である。しかしながら、手動の大気サンプリング等では、日変化などの短期的な時間スケールにおける大気メタン濃度の変動などの連続的な時間変化を明らかにすることは困難である。

また、全球スケールのメタン発生において、南アジアからのメタン発生の重要性が指摘されている。特に、南インドでは地上観測データが少なく大気メタン濃度推定の不確実性が高い (Patra et al., 2016)³⁾。そのため、南インドにおける大気メタン濃度の連続観測は、大気メタン濃度の時間変化や広域推定を行う上で重要なデータとなる。そこで本サブテーマは、特に地上観測データの少ない南インド水田地域の大気メタン濃度をレーザー分光手法により連続観測し、短期的～長期的な時間変化パターンを明らかにする。

2. 研究開発目的

本研究は南アジアにおける大気メタン濃度の連続測定を行うため、LaserMethane® (東京ガスエンジニアリング株式会社・アンリツ株式会社、以後、レーザーメタン計) を用いる。レーザーメタン計は、近赤外レーザー ($\lambda=1.65\mu\text{m}$) を利用したオープンパスのレーザー分光機器であり、主に高濃度のメタン濃度測定のために開発された機器である。そのため、レーザーメタン計による大気メタン濃度の連続測定を行うために、大気レベルのメタン濃度における機器の補正が必要である。そこで本サブテーマでは、まず補正装置や標準ガス等の整備を行い、大気レベルのメタン濃度におけるレーザーメタン計の補正を行う。また、野外の環境条件における安定した大気メタン濃度の連続測定を可能とするため、国内において連続測定実験を実施する。

次に、大気レベルのメタン濃度におけるレーザーメタン計の補正、および国内における安定した連続観測が確認できた上で、特に地上観測データの少ない南インドの水田地帯 (Tamil Nadu州・Aduthurai) に着目し、Tamilnadu Rice Research Institute (TRRI、タミルナドゥ稲研究所) においてレーザー分光手法による連続観測を行い、大気メタン濃度の経時変化を明らかにする。本研究により大気メタン濃度の短期的・長期的な大気メタン濃度の時間変動を明らかにするとともに、高時間解像度観測を利用して、ポイントデータとして得られる大気メタン濃度値の代表性を検討する。

3. 研究開発方法

3-1 メタン濃度測定機器の補正

大気メタン濃度の測定機器には、LaserMethane® (東京ガスエンジニアリング株式会社・アンリツ株式会社、以後、レーザーメタン計) を用いた。レーザーメタン計は、近赤外レーザー ($\lambda=1.65\mu\text{m}$) を利用したオープンパスのレーザー分光機器であり、主に高濃度のメタン濃度測定のために開発された機器である。そのため、レーザーメタン計による大気メタン濃度の連続測定を行うためには、大気レベルのメタン濃度における補正が必要である。

まず、レーザーメタン計の校正用チャンバーと標準ガス (0-10ppmvの範囲で数段階のメタン濃度に調整)、メタン濃度分析の比較対象測器 (高精度のメタン分析測器) としてThermo Scientific社のメタンアナライザー (以後、IRI5500) を用いた室内実験を実施した (図(5)-1)。室内実験は、チャンバー内を調整した濃度の標準ガスで置換した状態でレーザーメタン計による測定を行い、同時に同じ標準ガスをIRI5500で測定し、レーザーメタン計によるメタン濃度の値とIRI5500によるメタン濃度の値を比較した。この一連の測定実験を数段階に調整した標準ガス毎に実施して、標準ガスを用いたレーザーメタン計補正のための関係式を求めた。

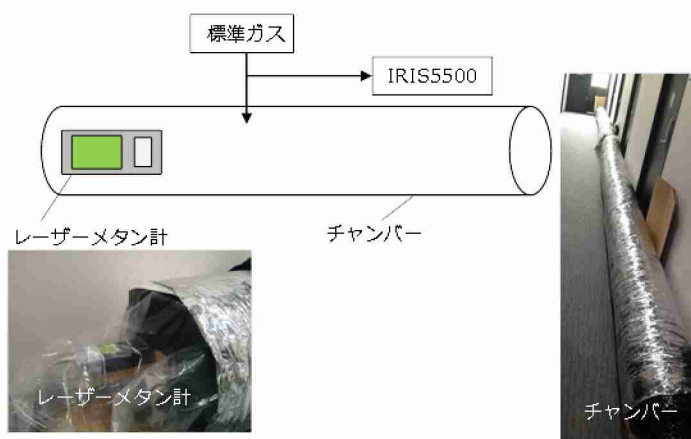
次に、環境要因 (温度、湿度など) がレーザーメタン計に与える影響を明らかにするため、実大気の測定実験を実施した。レーザーメタン計をミラー間距離30m (光路長60m) で屋外に設置し、レーザーメタン計とIRI5500を用いて実大気のメタン濃度を測定した。大気メタン濃度測定と同時に、環境条件 (温度、相対湿度、大気圧) を測定し、レーザーメタン計観測に対する各環境要因の依存性を評価した。標準ガスを用いた室内実験と屋外実験の結果から、分子数密度、温度、水蒸気圧の影響を考慮したレーザーメタン計の下記の補正式を求めた。

$$\text{CorCH}_4 = \frac{1013}{P} \frac{T+273}{300} \times \frac{P}{P-P_{\text{H}_2\text{O}}} \times (4.63 \times 10^{-3} T + 7.49 \times 10^{-2} n + 0.738) \times \text{RawCH}_4 \quad \text{式(5)-1}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 6.11 \times 10^{(7.5T/(T+237.3))} \times \text{RH} / 100 \quad \text{式(5)-2}$$

$$n = (P_{\text{H}_2\text{O}} \times 100) / \{8.3 \times (T + 273)\} \quad \text{式(5)-3}$$

CorCH₄は補正後の大気メタン濃度（ppb）、RawCH₄は補正前の大気メタン濃度（ppb）を示す。また、P、T、P_{H₂O}、n、RHは、それぞれ大気圧（hPa）、気温（℃）、水蒸気圧（hPa）、水蒸気密度（mol m⁻³）、相対湿度（%）を示す。



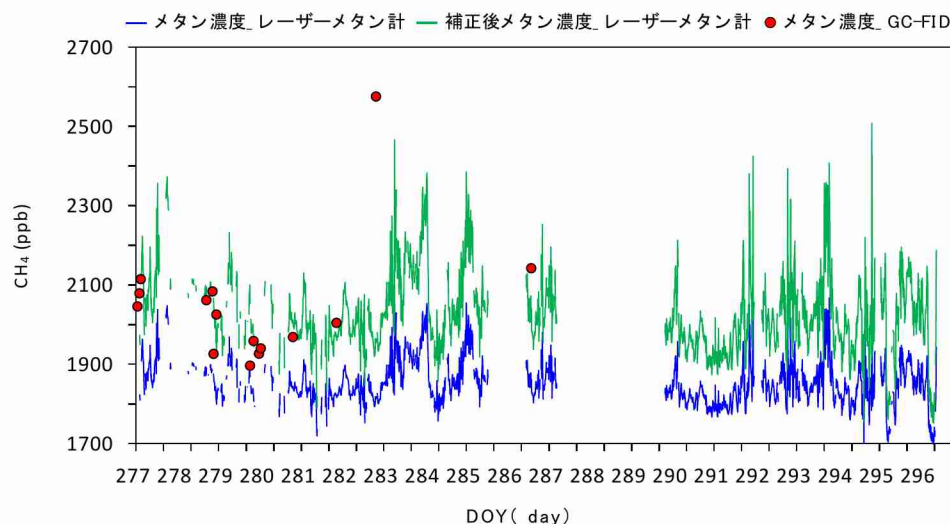
図(5)-1 標準ガスを用いた室内実験装置

3-2 大気メタン濃度の連続測定の実験的安定性の検証

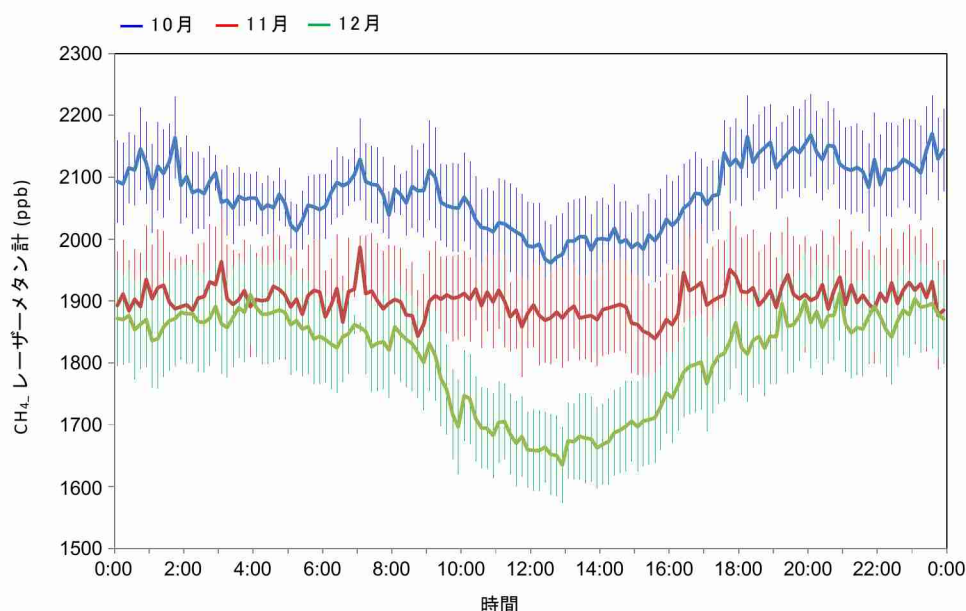
野外環境における安定したレーザーメタン計の連続運転を可能とするため、実際の圃場において連続測定実験を行った。野外測定実験は農研機構・農業環境変動研究センター（茨城県つくば市）の圃場で実施した。圃場脇にレーザーメタン計をミラー間距離24m（光路長48m）で設置し、大気メタン濃度を連続測定した。レーザーメタン計はオープンパス方式の分析測器であるため、長期間の野外測定の実施中に校正用装置（図(5)-1）を用いた定期的な標準ガスによる校正を行うことは困難である。そこで、野外測定実験では、ガスクロマトグラフィーによる大気メタン濃度（以後、GC-FIDメタン濃度）との比較を行い、野外の環境条件下におけるレーザーメタン計の補正を試みた。レーザーメタン計の観測期間中に周辺大気を簡易型ポンプで採取し、水素炎イオン化型検出器を搭載したガスクロマトグラフィー（GC-2014、島津製作所）を用いて分析した。

野外測定実験におけるレーザーメタン計による観測値、GC-FIDメタン濃度、GC-FIDメタン濃度を用いた補正式による補正後のレーザーメタン計による観測値を図(5)-2に示す（2015年10月の例）。式(1)により環境要因に対する依存性を補正したレーザーメタン計による大気メタン濃度（青色の実線）、GC-FIDメタン濃度（赤い丸）の時間変化を比較すると、連続測定実験の期間を通して差が見られた。この差は、農作業が行われる圃場環境では、短期的および長期的な時間スケールで環境条件が変動するため、それに伴いレーザーメタン計のメタン吸収スペクトルが影響を受けたことが要因だと考えられる。そこで、GC-FIDメタン濃度を用いて野外測定用補正式を作成し、圃場の環境条件を反映してレーザーメタン計の補正を行った。その結果、GC-FIDメタン濃度を利用することで、レーザーメタン計によって圃場環境における大気メタン濃度の時間変化の評価が可能になった（図(5)-2、緑色の実線）。

連続測定の実験期間（2015年10月～2015年12月）における各月の大気メタン濃度の日変化（10分毎の平均値）を図(5)-3に示す。全ての期間で日中に低く、早朝や夜間に高い傾向が見られた。また、季節変化に伴って10分毎の平均メタン濃度が低下した（10月>11月>12月）。この結果は、季節変化による気温の低下に伴いメタン生成菌の活性が低下したことで、土壌などの発生源から大気へのメタン放出が減少したことが要因の1つと考えられる。このような典型的な季節変化の傾向が読み取れることから、環境要因の依存性の補正と野外測定時の補正を行うことで、レーザーメタン計は長期間の大気メタン濃度の連続測定が可能であると考えられた。



図(5)-2 野外測定実験におけるレーザーメタン計およびGC-FIDによる大気メタン濃度の時間変化
青の実線は式(5)-1による補正後の大気メタン濃度、緑の実線はGC-FIDによる補正後の大気メタン濃度、赤丸はGC-FIDによる大気メタン濃度を示す。



図(5)-3 野外測定実験における2015年10月から12月の大気メタン濃度の日変化
値は10分間毎の平均値、バーは標準誤差を示す

3-3 大気メタン観測サイト選定の現地調査

他のサブテーマ（1、3、4、6）と協力して南アジアにおける大気メタン濃度観測候補地の現地調査を実施した。2015年7月26日から8月1日にかけて、インド北部のハリアナ州ソーニーパットの水田地域、インド南部のタミルナドゥ州のTamilnadu Rice Research Institute (TRRI、タミルナドゥ稲研究所) およびSoil and Water Management Research Institute (SWMRI) を訪問し、各地域の環境条件、稲作の栽培体系などを調査した。また、2015年11月20日から11月25日にかけて、TRRIおよびSWMRIを再訪し、各場所の電源設備等の状況、雨期の水稲栽培状況、気象観測データなどを調査した。各候補地における現地調査の結果などから大気メタン濃度の連続観測場所をTRRIに定めた。

3-4 レーザーメタン計を中心とする観測ユニットと環境要因計測

野外における安定した大気メタン濃度の連続観測を行うため、レーザーの放射角度を精緻に調整するために専用の三脚ケースを作成し、レーザーメタン計をケース内に組み入れた（図(5)-4a）。また、レーザーメタン計の観測に与える気温変化の影響を最小限にするため、クーレットクーラー（OCPCA-5CU-D24、日東工業株式会社）、温度コントローラー（E5CB、オムロン）、温度センサー（K熱電対）から構成する温調装置によりレーザーメタン計を入れたケース内部の温度を制御した（図(5)-4b）。レーザーメタン計はメタン濃度を2 Hzで測定する。レーザーメタン計の制御や観測データ収集はGasviewソフトウェア（東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社）により行った。

レーザーメタン計による観測値の補正に必要となる気象データ（気温、相対湿度、大気圧など）はサブテーマ(4)の観測データを利用した。また、野外における連続観測時の濃度校正にはサブテーマ(2)のフラスコサンプリングによる大気メタン濃度を用いた。日本からのレーザーメタン計の観測データの回収や稼働状況確認は構築したネットワークを利用した。



図(5)-4 レーザーメタン計専用の三脚ケース (a) およびケース内部の温調装置 (b)

3-5 観測機器類の設置

レーザーメタン計を中心とする観測機器類は、連続観測を行うために2016年5月22日から6月4日にかけてTRRIの研究本館のバルコニーに設置した（図(5)-5）。レーザー光が水田圃場の上を通る場所に観測機器類と反射版の設置位置を調整した。その後、大気メタン濃度観測に必要なレーザー強度が得られるようにレーザーメタン計および反射版の高さと角度を調整した。反射版の高さは地上から約6m、レーザーメタン計と反射版の距離（ミラー間距離）は約60mである。



図(5)-5 TRRIにおける観測機器類および観測圃場の様子

TRRI研究本館のバルコニーにおける観測機器設置の全景（上段左）、レーザー光を放射している圃場（上段右）、研究本館のバルコニーに設置した観測機器（下段左）、観測機器類（下段中央）、反射版（下段右）

4. 結果及び考察

4-1 研究期間における栽培管理

現地の慣行的な栽培管理に従い、本研究期間においては1年間に3回の栽培を行った。それぞれの作期は、Kuruvai、Thaladi、Summer riceと呼ばれている。各年の各作期の品種、田植えおよび収穫の日程は表(5)-1に示した。

表(5)-1 研究期間における各年の作期および栽培品種

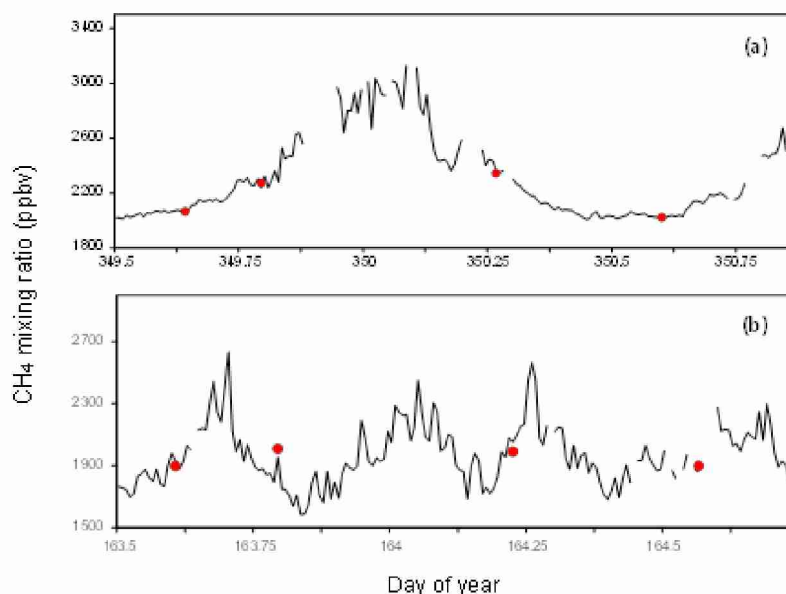
調査年	作期	品種	田植え日	収穫日
2016	Kuruvai	ADT43	2016.5.27	2016.8.23
2016-2017	Thaladi	ADT46	2016.9.26	2017.1.23
2017	Summer rice	ADT43	2017.2.28	2017.6.12
2017	Kuruvai	ADT43	2017.6.27	2017.10.4
2017-2018	Thaladi	ADT46	2017.10.28	2018.2.23

4-2 レーザーメタン計を用いた野外長期観測における機器類の調整頻度

レーザーメタン計は十分なレーザー強度が得られるようにレーザーメタン計および反射版の高さと角度を精緻に調整することで大気メタンを連続観測することができる。しかしながら、長期観測期間においては、Gasviewソフトウェア（レーザーメタン計の制御およびデータ回収）のエラーやレーザーメタン計本体の誤作動・不調、レーザーメタン計の設置位置のずれが起こることが明らかになった。特に、設置位置のずれに伴うレーザー強度の低下は連続観測の精度維持に重要な要因であると考えられた。このような設置位置のずれは、強風などの気象条件や栽培管理による反射版への軽微な影響によると考えられる。本研究結果から、少なくとも数ヶ月に1回程度の調整作業が安定した連続観測を行うために必要であると考えられる。

4-3 大気メタン濃度のポイントデータと連続観測データの比較

図(5)-6は、2016年12月（図(5)-6a）および2017年6月（図(5)-6b）においてポイントデータとして得られたTRRIの大気メタン濃度（サブテーマ(2)の結果）とレーザーメタン計による大気メタン濃度連続観測の比較を示している。両方の期間において、レーザーメタン計による連続観測データはポイントデータとよく一致しており、レーザーメタン計による連続観測はポイントデータの代表性の検証に有効であると考えられる。また、ポイントデータと連続観測データを比較すると、大気メタン濃度はポイントデータで観測される濃度変化よりも大きな日変動をしていることが明らかになった。このように本研究により得られたレーザーメタン計による連続観測データは、フラスコサンプリングにより得られる断片的な大気メタン濃度データの解釈に重要な役割を果たすことが示された。



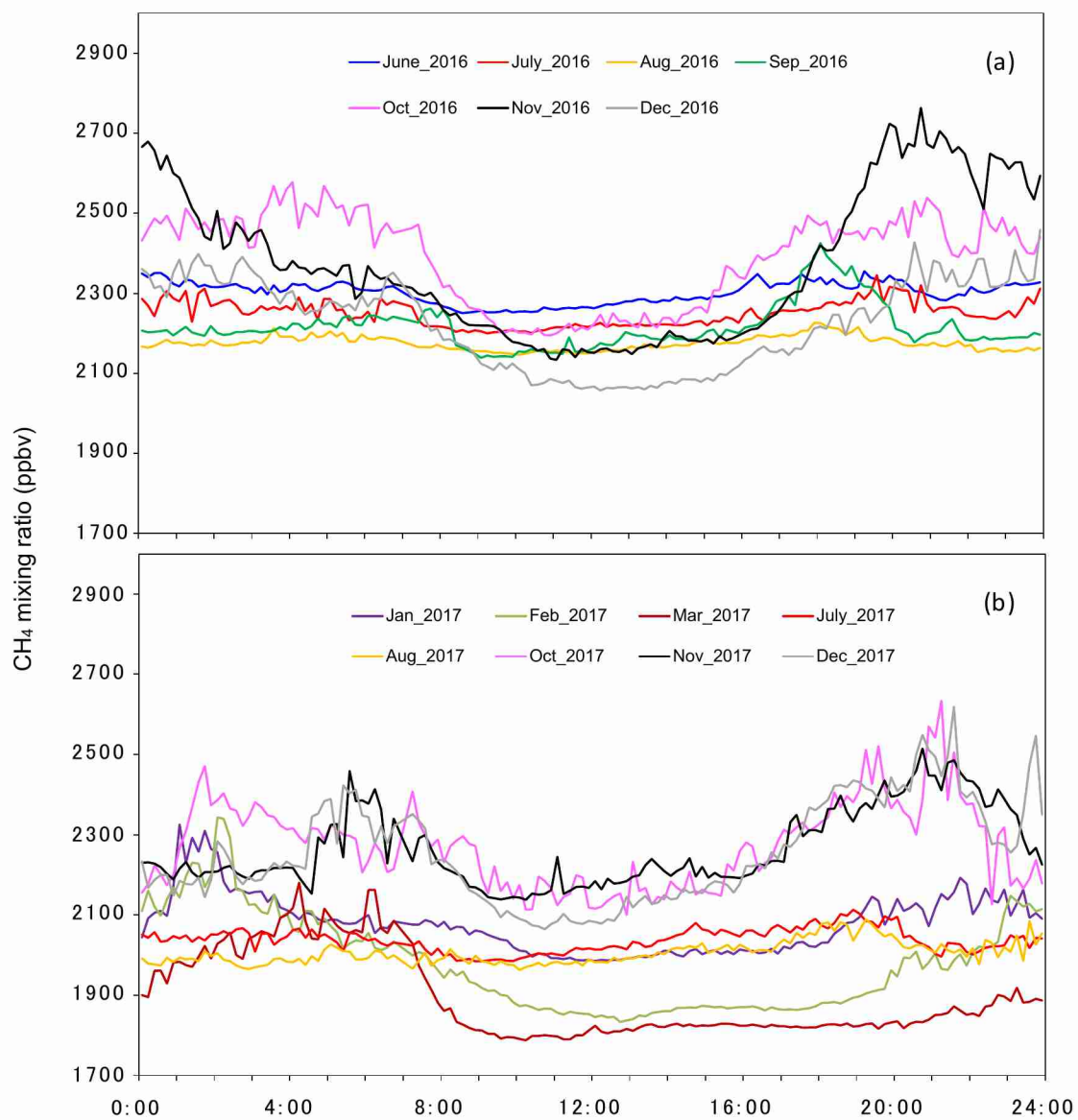
図(5)-6 2016年12月 (a) および2017年6月 (b) におけるフラスコサンプリングによる大気メタン濃度ポイントデータとレーザーメタン計による大気メタン濃度の連続観測データの比較
赤丸がポイントデータの値、黒線が連続観測データの値を示す。

4-4 大気メタン濃度の日変化

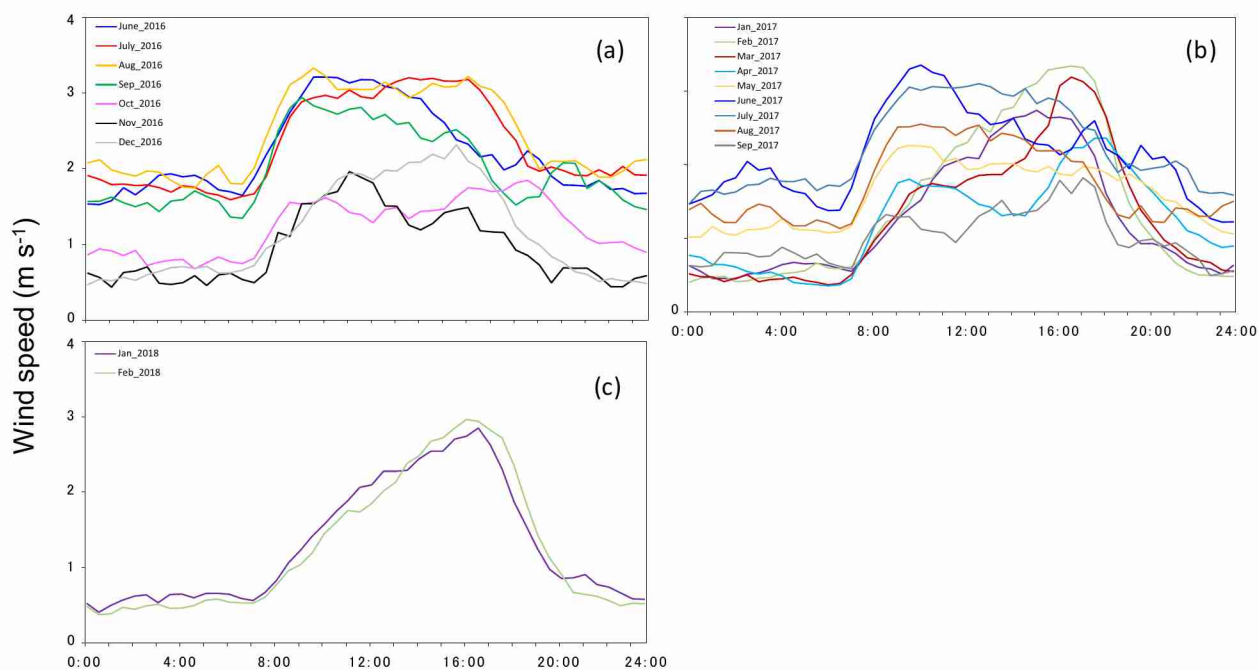
図(5)-7は、2016年6月から2017年12月までの各月におけるTRRIの大気メタン濃度の日変化を示している。2017年4月、5月、6月、9月、2018年1月、2月は、レーザーメタン計やソフトウェアの不具合によってデータ取得率が低いために日変化の解析から除外した。観測期間を通して各月の大気メタン濃度には同様の日変化パターンが見られ、夜間から早朝にかけて大気メタン濃度が上昇し、日中に最も低くなる変化が見られた。この日変化パターンの要因について気象データを用いて解析した。図(5)-8は、各月の風速の日変化パターンを示している。各月で風速の最大値や最小値、風速の変動幅は異なるが、観測期間を通して午前8時から午後6時の間に風速が上昇し、その他の時間帯で低下する変化を示した。

図(5)-9は、各月の大気メタン濃度と風速の関係を示している。風速変化に対する大気メタン濃度の応答の大きさは各月によって異なったが、風速の低下した期間に大気メタン濃度が高くなる傾向があることが明らかになった。このことから、大気メタン濃度の日変化パターンは、主に夜間から明け方にかけて風速が低下したことによって形成された地表付近の安定層の存在を示唆するものと考えられる。

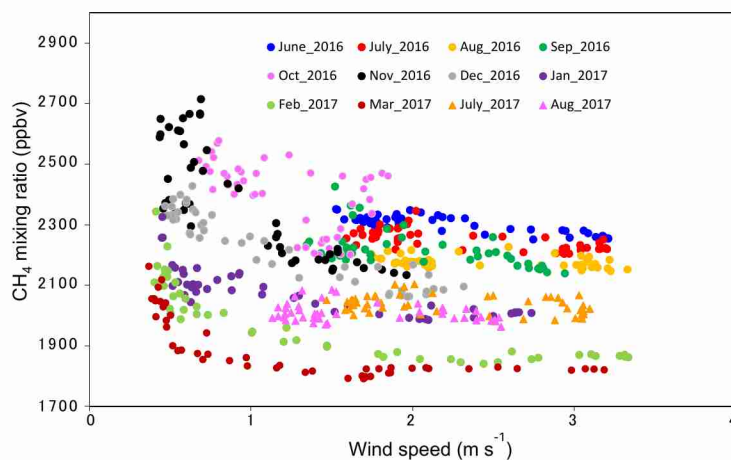
また、大気メタン濃度の日変化の変動幅が各月で異なった（図(5)-7）。各月の大気メタン濃度の最大値と最小値の差は79.9 ppbv–630.0 ppbvの範囲であり、各月の風速の最大値と最小値の差は 1.17 m s^{-1} – 2.93 m s^{-1} の範囲であった。この風速の日内差（最大値と最小値の差）の増加に伴い、大気メタン濃度の日内差も増加する傾向が見られた（図(5)-10）。しかしながら、同程度の風速の日内差でも大気メタン濃度の日内差が異なることが明らかになった。これは水稻の栽培および生育状況、風向・風速の変化などの複数の要因が影響していることを反映していると考えられる。



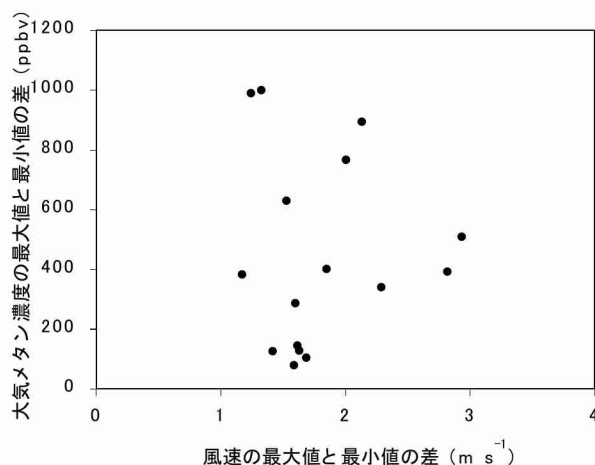
図(5)-7 2016年 (a) および2017年 (b) における各月のレーザーメタン計による大気メタン濃度の日変化
 データは各月各時間の平均値を示す。2017年4月、5月、6月、9月、2018年1月、2月はデータ取得率が低いため除外した。



図(5)-8 2016年 (a) 、2017年 (b) 、2018年 (c) における各月の風速の日変化
2017年10月、11月、12月は計測機器の不具合によりデータが欠損している。



図(5)-9 2016年および2017年における風速と大気メタン濃度（各時間の平均値）の関係



図(5)-10 図(5)-9の期間における各月の風速の最大値と最小値の差と大気メタン濃度の最大値と最小値の差の関係

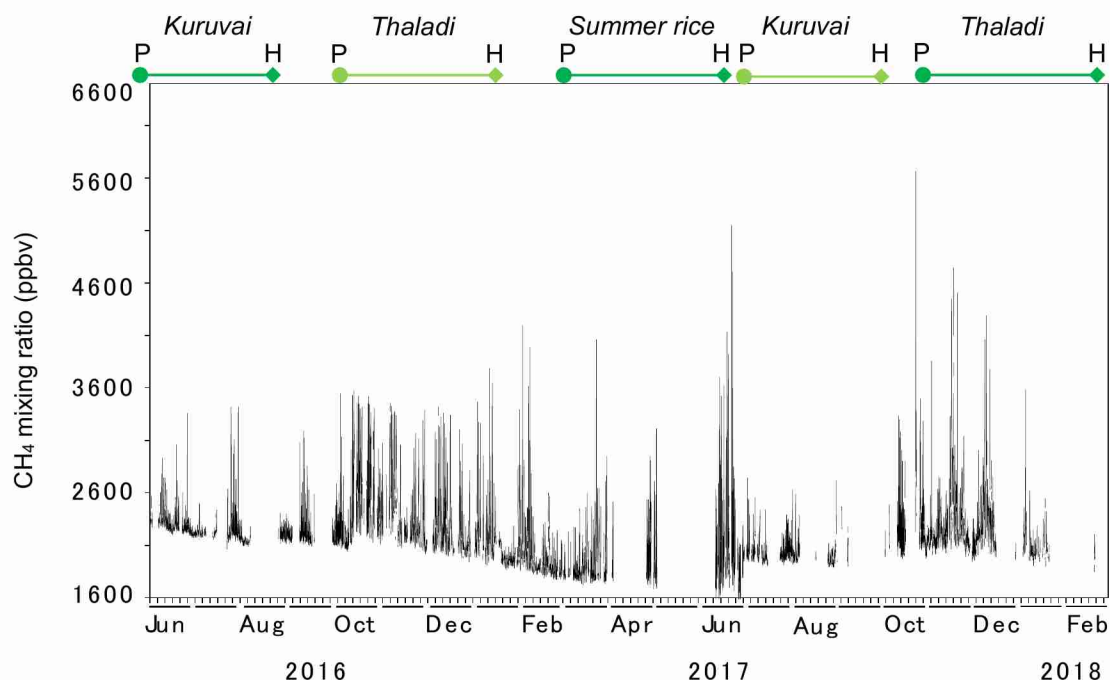
4-5 大気メタン濃度の季節変化

図(5)-11は、2016年6月から2018年2月までのTRRIにおける大気メタン濃度の季節変化を示している。大気メタン濃度は、観測期間を通して短期的変化（日変化）を伴いながら長期的にも時間変化することが明らかになった。また、大気メタン濃度は水稻の作期と作期の間にも大きく変動することが明らかになり、これは耕起や代掻きなどの栽培管理や水田の水管理などの影響によるものと考えられる。

図(5)-7で述べたように、大気メタン濃度は日変化を示し、その変動幅は観測日によって異なる。そこで、このような日変化の影響を最小限にして、大気メタン濃度の季節変化を明瞭にするため、大気がよく攪拌されていると考えられる日中（10時－14時）の大気メタン濃度を算出した（図(5)-12）。図(5)-12の値は測定日毎の10時－14時の大気メタン濃度平均値である。日中の大気メタン濃度は、2016年10月をピークに2017年4月にかけて緩やかに低下し、その後再び増加する季節変化を示した。このような全体的な傾向に加えて、日中の大気メタン濃度は水稻栽培期間中に突発的に上昇する期間があることが明らかになった。

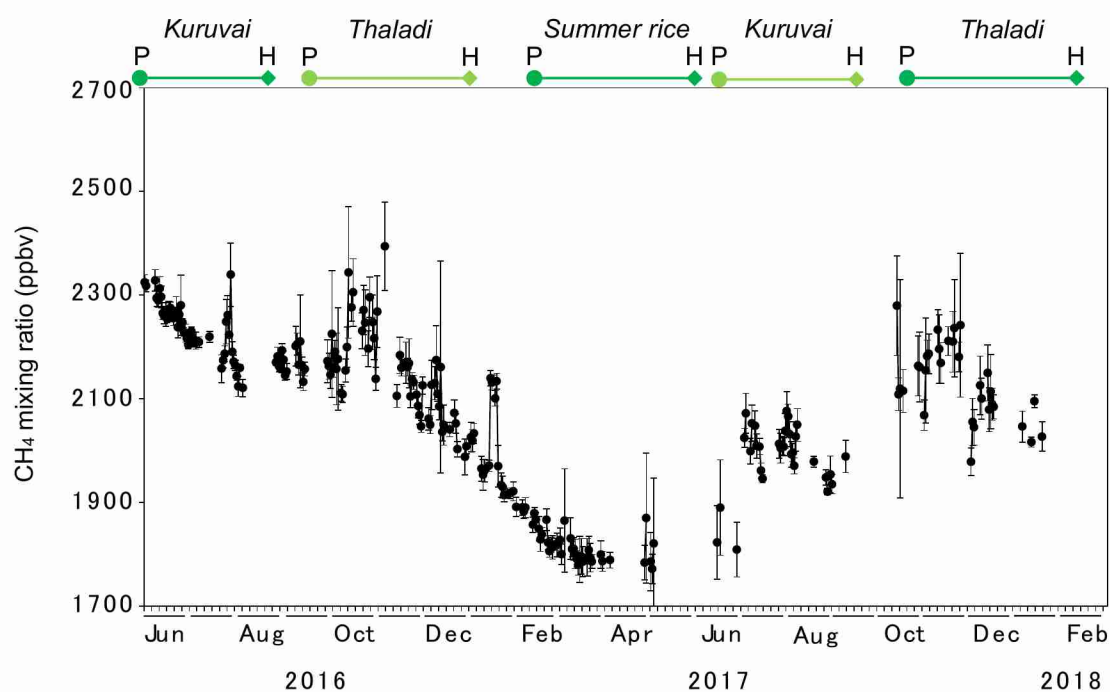
図(5)-13は観測期間における各月の風配図である。観測期間を通して5月から10月はSSW-WSW、12月から3月はNE-ENEが主要成分であり、主要な風向が季節変化することが明らかになった。4月と11月は西風と東風の移行期間であると考えられる。日中の大気メタン濃度の季節変化と風向の季節変化を比較すると、NE-ENEが主要成分である期間に日中の大気メタン濃度は減少傾向を示し、SSW-WSWが主要成分である期間に増加傾向にあることが明らかになった。

以上から、南インドの調査地域における大気メタン濃度の季節変化には、水稻栽培管理（代掻きや落水など）に伴う水田からのメタン発生パターンの変化、大気中のOHラジカルとの反応の変化、モンスーンなどによる風向変化などが関与していることが示唆された。

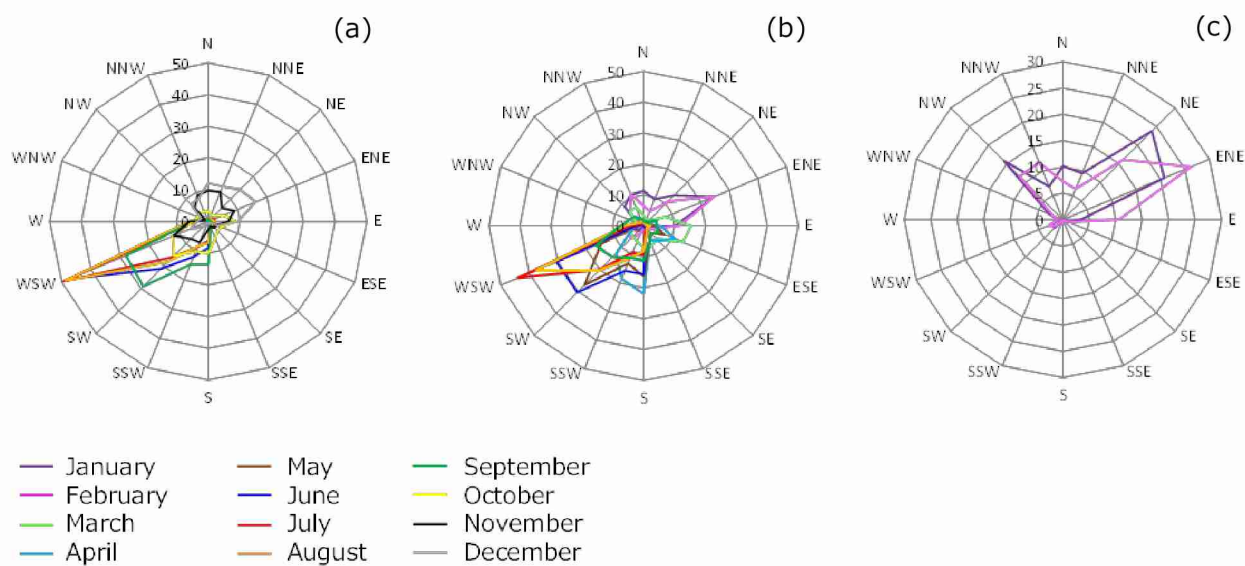


図(5)-11 2016年6月から2018年2月におけるレーザーメタン計による大気メタン濃度の時間変化

Kuruvai、Thaladi、Summer riceは調査地域の作期を示す。PとHはそれぞれ田植えと収穫の時期を示す。



図(5)-12 2016年6月から2018年2月におけるレーザーメタン計による日中（10時－14時）の大気メタン濃度の時間変化
Kuruvai、Thaladi、Summer riceは調査地域の作期を示す。PとHはそれぞれ田植えと収穫の時期を示す。



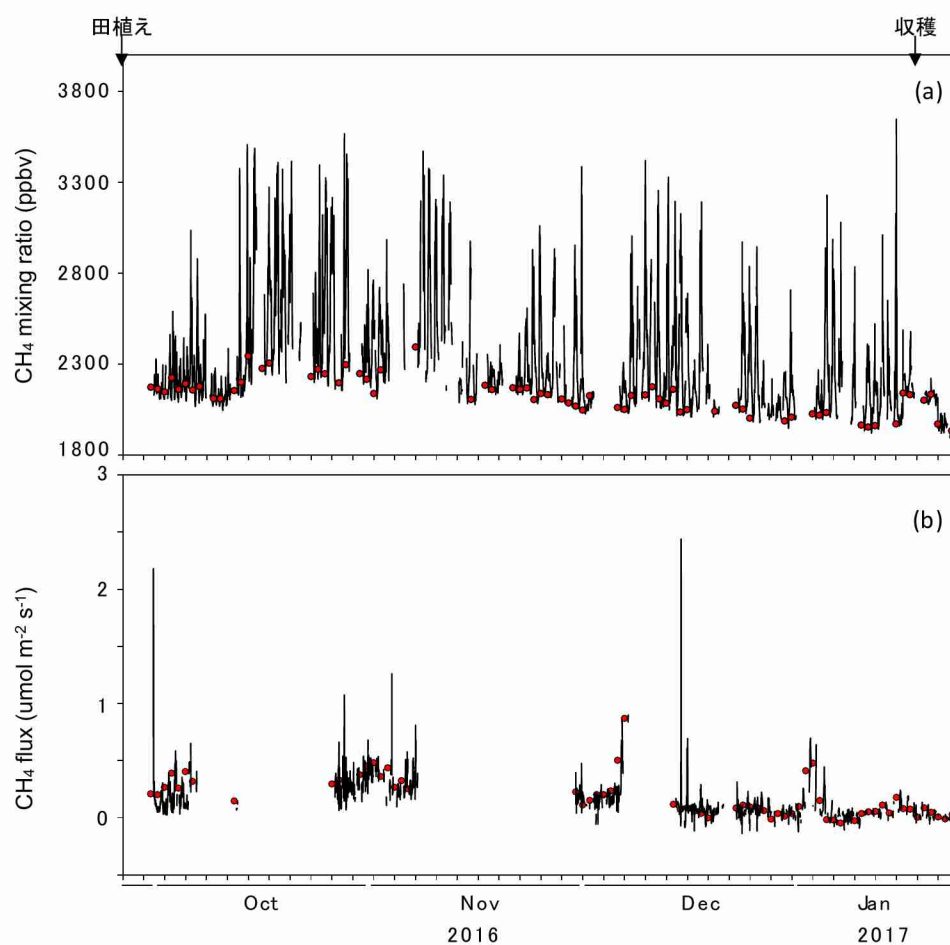
図(5)-13 2016年 (a)、2017年 (b)、2018年 (c) における各月の風配図
2017年10月、11月、12月は計測機器の不具合によりデータが欠損している。

4-6 水田からのメタンフラックスと大気メタン濃度の関係

水田からのメタン発生と大気メタン濃度の関係を明らかにするため、サブテーマ(4)のメタンフラックスのデータを用いて解析を行った。メタンフラックス、大気メタン濃度は共にデータが欠損している期間がある。大気メタン濃度だけでなくメタンフラックスも短期的かつ長期的に時間変化するため、解析には両者の連続した観測データが必要となる。そこで、メタンフラックスおよび大気メタン濃度のデータ取得率が高い2016年-2017年Thaladiの期間を解析対象とした。

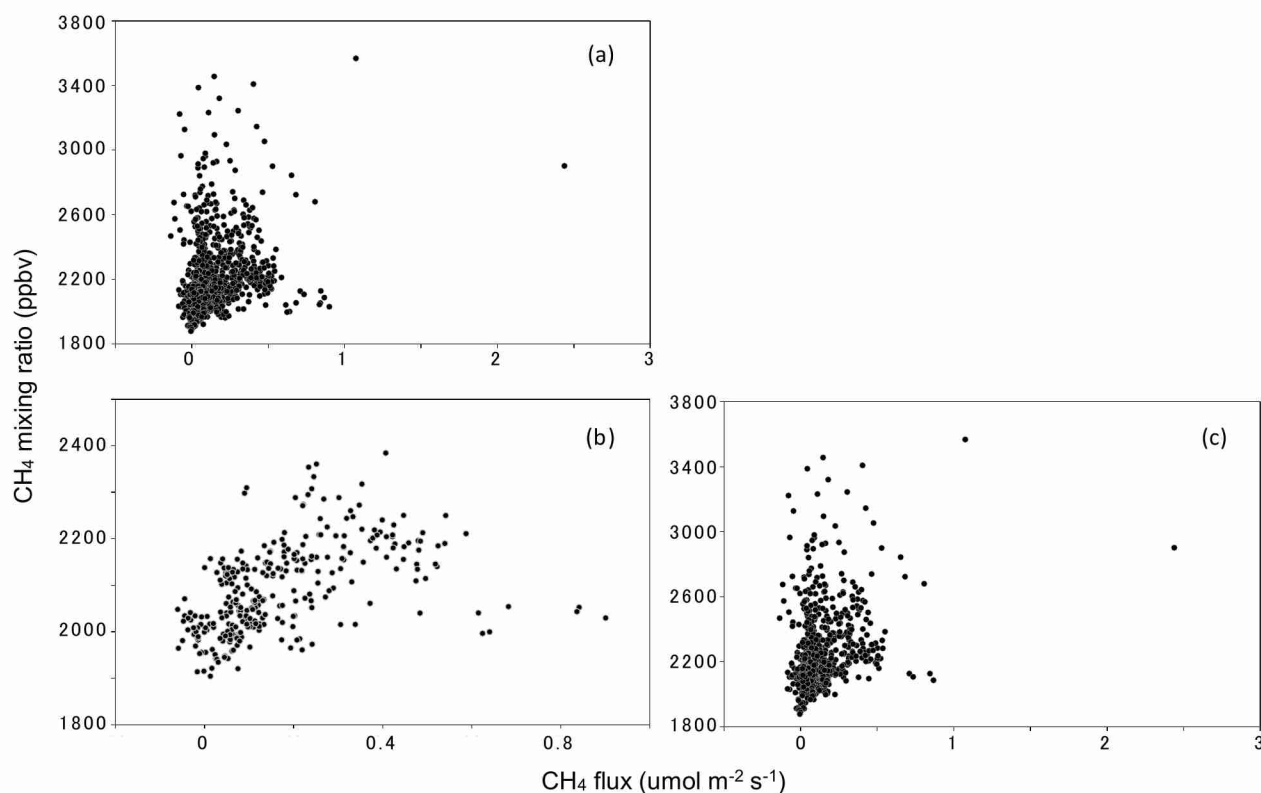
2016年-2017年Thaladiにおけるメタンフラックスと大気メタン濃度の時間変化を図(5)-14に示す。大気メタン濃度が2016年-2017年Thaladi期間を通して大きな時間変動を示したのに対して、メタンフラックスは12月以降の期間後半には時間変動が小さくなった（図(5)-14aと図(5)-14bの黒線）。また、図中の赤丸の凡例は日中（10時－14時）の大気メタン濃度およびメタンフラックスの平均値を示している。日中の大気メタン濃度は期間を通して1日の中で値が低い傾向にあるが、日中のメタンフラックスは1日の中で値が高い傾向にあり、大気メタン濃度とは日変化パターンが異なった。

図(5)-15はメタンフラックスと大気メタン濃度の関係を示す。2016年-2017年Thaladiの全期間においてメタンフラックスと大気メタン濃度の間には明瞭な関係は見られなかった（図(5)-15a）。期間を分けて解析した結果、日中（10時－14時）の期間において、メタンフラックスの増加に伴い大気メタン濃度も増加する傾向が見られた（図(5)-15b）。しかしながら、日中以外の時間においては、両者の間に明瞭な関係は見られなかった（図(5)-15c）。このように、メタンフラックスと大気メタン濃度の関係は時間変化する可能性が考えられた。日中（10時－14時）は、風速が大きく、大気がよく攪拌されるため（図(5)-8）、大気への水田からのメタン発生が増加するに従って大気メタン濃度も増加する傾向を示したと考えられる。その一方で、風速の低くなる時間帯は大気の攪拌が抑制される。そのため、単位時間当たりのメタン発生量（フラックス）が低くても、地表面付近に発生したメタンが滞留することで大気メタン濃度が高まる傾向が見られたと考えられる。このことから、水田からのメタン発生と大気メタン濃度と関係を明らかにするためには、大気安定度等の大気条件を併せて考慮することが必要であり、大気境界層の動態を表すモデルとの協働が今後の課題である。



図(5)-14 2016年-2017年Thaladiにおけるレーザーメタン計の大気メタン濃度(a)とメタンフラックス(b)の時間変化

黒の実線は30分平均値、赤丸の凡例は日中（10時–14時）の平均値を示す。矢印は田植えと収穫のタイミングを示す。



図(5)-15 2016年-2017年Thaladiにおけるメタンフラックスと大気メタン濃度の関係

(a)は2016年-2017年Thaladiの全データ、(b)は2016年-2017年Thaladiの日中（10時－14時）のデータ(c)は2016年-2017年Thaladiの日中以外のデータを示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

大気サンプリング等による観測は高精度で大気メタン濃度を明らかにすることができるが、手動の大気サンプリングでは日変化などの短期的な時間スケールにおける観測を行うことは困難で、現状では1週間に1回などの定時観測に限定されている。本研究は、野外の環境条件における大気メタン濃度の長期間の連続測定手法を確立し、南インド水田地域における日変化パターンおよび季節変化を明らかにした。

(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>

フラスコサンプリングによる高精度の観測データはGOSATデータを補完する上で重要なデータである。本研究で得られた高時間解像度のメタン濃度は、フラスコサンプリングにより得られる断片的な大気メタン濃度データの解釈に重要な役割を果たすデータとなる。

6. 国際共同研究等の状況

カウンターパート

V. Ravi・タミルナドゥ稲研究所所長・インド

サブテーマ3、4と共に南アジア稲作研究の中心機関と緊密な連携を図りながら測定を進めることができた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAQ, P. ELAYAKUMAR, K. VANITHA, C. UMAMAGESWARI, P. JOTHIMANI, V. RAVI, Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol.252,148- 158(2018)
Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.

<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) 出原雅也、秀森丈寛、中山智喜、松見豊、笹子宏史、川崎昌博、高橋けんし、林田佐智子、山本昭範、今須良一：大気化学討論会(2015)「実大気におけるリアルタイムその場観測を目的としたオープンパスレーザー分光メタンガス検出器の校正」
- 2) 林田佐智子、久慈誠、寺尾有希夫、須藤重人、犬伏和之、間野正美、山本昭範、Prabir Patra：日本気象学会2015年度秋季大会(2015)「衛星と現地観測による大気メタンデータの活用～南アジアにおける新展開～」
- 3) 犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、山本昭範、林田佐智子：日本熱帯農業学会第119回講演会(2016)「南インド水田における温室効果ガスの動態と土壌理化学性」
- 4) 須藤重人、山本昭範：2016年度日本土壌肥料学会佐賀大会(2016)「温室効果ガス3成分同時分析計測法技術の進展について」
- 5) 山本昭範、小野圭介、須藤重人、秀森丈寛、出原雅也、松見豊、犬伏和之、間野正美、竹内大樹、林田佐智子：2016年度日本土壌肥料学会佐賀大会(2016)「南部インド水田地帯における大気メタン連続観測」
- 6) 出原雅也、秀森丈寛、中山智喜、松見、笹子宏史、川崎昌博、高橋けんし、林田佐智子、山本昭範、今須良一：日本気象学会2016年度秋季大会(2016)「実大気における連続観測を目的としたオープンパスレーザー分光メタン検出器の校正」
- 7) 出原雅也、秀森丈寛、中山智喜、松見豊、笹子宏史、川崎昌博、高橋けんし、林田佐智子、山本昭範、今須良一：大気化学討論会2016(2016)「実大気の大気メタン連続観測へのオープンパスレーザー分光メタン検出器の応用」
- 8) 犬伏和之、竹内大樹、間野正美、須藤重人、山本昭範、小野圭介、林田佐智子、V. RAVI：日本熱帯農業学会第121回講演会(2017)「南インド水田における温室効果ガスの動態とその影響因子」
- 9) 間野正美、犬伏和之、須藤重人、A. Z. OO, 小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. RAVI：日本農業気象学会2017年全国大会(2017)「インドの水田における温室効果ガスフラックスの測定」
- 10) 山本昭範、小野圭介、須藤重人、A. Z. Oo、秀森丈寛、出原雅也、松見豊、犬伏和之、間野正美、林田佐智子、寺尾有希夫、V. RAVI：2017年度日本土壌肥料学会仙台大会(2017)「南部インド水田地帯における大気メタン濃度の経時変化」
- 11) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAQ：2017年度日本土壌肥料学会仙台大会(2017)「Effect of modified rice cultivation systems on methane and nitrous oxide emissions from paddy rice field」
- 12) K. INUBUSHI, Z. WANG, M. MANO, S. SUDO, A.Z. OO, A. YAMAMOTO, K. ONO, S. HAYASHIDA, V. RAVI, M.A. BATEN：Abstract for Annual Meeting of Tropical Agriculture(日本熱帯農業学会第123回講演会、2018)「Influence of physico-chemical properties of soils on greenhouse gases production in paddy soils from Bangladesh, India and Japan」

(3) 出願特許

1) 特願2016-023363、出願日：平成28年2月10日、発明の名称：3成分同時分析装置および3成分同時分析方法、発明者：須藤重人（75%）、山本昭範（25%）。

(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) STOCKER TF, QIN D, PLATTNER GK, TIGNOR MMB, ALLEN SK, BOSCHUNG J, NAUELS A, XIA Y, BEX V, MIDDLEY PM : Cambridge University Press, Cambridge (2013)

Climate change 2013: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

2) CUNNOLD D.W., STEELE LP., FRASER P.J, SIMMONDS P.G., PRINN R.G., WEISS R.F., PORTER L.W., O'DOHERTY S., LANGENFELDS R.L., KRUMMEL P.B., WANG H.J., EMMONS L., TIE X.X., DLUGOKENCKY E.J.: J. Geophys. Res., 107, D14, 4225. (2002)

In situ measurements of atmospheric methane at GAGE/AGAGE sites during 1985–2000 and resulting source inferences.

3) PATRA P.K., SAEKI T., DLUDOKENCKY E.J., ISHIJIMA K., UMEZAWA T., ITO A., AOKI S., MORIMOTO S., KORT E.A., CROTWELL A., RAVIKUMAR K., NAKAZAWA T. : J. Meteorol. Soc. Jpn., .94, 911–113. (2016)

Regional Methane Emission Estimation Based on Observed Atmospheric Concentrations (2002–2012).

Ⅱ-6 インバース解析によるアジアからのメタン発生量の推定と削減策の評価

国立研究開発法人 海洋研究開発機構

Prabir K. Patra

平成27(開始年度)～29年度累計予算額：10,258千円（うち平成29年度：1,910千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

大気メタンの観測値は地球上のあらゆる箇所からの発生情報を含んでいるが、同時にメタンは移流や対流によって輸送され、大気中で化学反応によって消滅する。そのため、地上サイトでの観測やリモートセンシングデータ（GOSAT等）のデータを元にメタン排出量の推定を行うためには、十分な信頼性を持つ大気モデルシステムが不可欠である。我々は大気大循環モデル(AGCM)に基づいて構築された大気化学輸送モデル(ACTM)を開発した。AGCM_ACTMに基づくシミュレーションの結果を本プロジェクトで取得されたバングラデシュとインドでの地上観測値およびGOSATの気柱平均混合比（XCH₄）と比較し、モデルの妥当性を検証した。検討の結果、従来のモデルには輸送過程（対流圏での対流過程および成層圏のブリュワー・ドブソン循環）に十分な再現性が認められなかったため、その改善を図るべく、大気力学モデルMIROC4.0に適合した新たなACTMを開発した。MIROC4に基づくACTMと最新の知見に基づいて設定したメタンエミッション推定情報を活用して、地上からのメタンエミッションの変化に対する、XCH₄の感度を評価した。その結果はMIROC4_ACTMでは従前のモデルに比べてGOSAT2のような将来の衛星ミッションからメタン排出の変動を検知する可能性を示しており、将来の緩和策策定に役立つであろう。

【キーワード】

メタン、CH₄、化学輸送モデル、インバースモデル、放出強度（または排出強度）、GOSAT

1. はじめに

大気メタン(CH₄)は二酸化炭素に次ぐ第二位の温室効果ガスであり、その排出量を明確化し、削減対策の立案に繋ぐことは国際的な環境政策によって極めて重要である。本プロジェクトでは、CH₄の発生が大きいと考えられている南アジアを対象地域に、CH₄排出量推定の精緻化を目指して研究を遂行した。

大気CH₄の観測値は地球上のあらゆる箇所からの発生情報を含んでいる。しかし、地上から排出されたCH₄は大気中で移流や対流によって輸送されるため、大気輸送モデルを用いて解析することが必要である。さらにCH₄は、水酸基(OH)、塩素(Cl)や励起状態の酸素原子(O¹D)との反応によって消滅し、その寿命は二酸化炭素に比べて短いため、化学反応を含む精緻な大気化学輸送モデル(ACTM)を用いて解析を行う必要がある。本サブテーマではこのような科学的要請を受け、大気大循環モデル(AGCM)に基づいて、大気輸送と化学反応を含み、高度80 kmまでの範囲を網羅する、精緻な大気化学輸送モデル(AGCM_ACTM)を開発した。さらにCH₄発生推定のため、AGCM_ACTMを用いたインバースシステムを開発した。

本プロジェクトでは、環境省が国立環境研究所・JAXAと協力して打ち上げた温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）によって観測された大気CH₄データの有効な活用方法の検討も目標としている。現在、GOSATのCH₄データとして短波長赤外で得られた気柱平均混合比（XCH₄）が公開されている。そこで本サブテーマでは、インド、バングラデシュで唯一の大気採集分析を行ってきた本プロジェクトサブテーマ2で得られた地上観測データと本ACTMシミュレーションの比較を行い、モデルの妥当性を検証し良好な結果を得た。その上で、本ACTMを用いて南アジアにおけるCH₄分布をシミュレーションし、サブ

テーマ1にその結果を提供し、協力してGOSAT・XCH₄の特性について吟味した（詳細はサブテーマ1の章参照）。検討の結果、GOSATから提供される気柱量積分された量であるXCH₄データを現状のモデルシステムに投入してインバース解析を行っても、地上からのCH₄排出量の精緻化が困難であることがわかってきた。その第一の理由はサブテーマ1の報告にあるとおり、南アジア域ではモンスーン循環によって中・上部対流圏にCH₄が輸送されるため、XCH₄変動のかなりの部分が地上付近ではなく、中・上部対流圏の変動に支配されることである。このため、XCH₄の変動は、大気中での輸送過程の情報を多く含んでいる。第二の理由は、現在のモデルシステムにみられる輸送過程の再現性が十分でないことである。特に対流圏の対流強度と成層圏のブリューワー・ドブソン循環の再現性が不十分である。これらの問題点を分析し、我々はより適切な力学モデルMIROC4.0に適合した新たなACTMを開発した。

MIROC4_ACTMの検証を行った結果、従来のモデルと比べて輸送過程に格段の改善が認められた。さらにGOSAT・XCH₄や地上観測値が南アジアからのCH₄排出量変動に対する感度があるかどうかの検討を行った。その結果、MIROC4_ACTMを活用すれば、XCH₄のデータから、CH₄発生量の情報を得る可能性を示すことができた。

本章では、第一節でACTMの詳細を説明し、第二節でAGCM_ACTMと観測値の結果から問題点を示す。それを踏まえて第三節、第四節でMIROC4.0に基づくACTMの開発とその検証結果について示し、第五節でアジアの稲作からのCH₄排出量(Rice CH₄ emissions)に対するXCH₄の感度について検討した結果を報告する。（なお、本章ではemissionを排出と記す。放出と同意である）

2. 研究開発目的

本プロジェクトの目的に沿って、本サブテーマでは、大気化学輸送モデルの開発とインバースシステムの構築、およびその検証を行うと共に、新しく開発したモデルシステムのCH₄排出量に対するXCH₄の感受性を調べ、インバースシステムにおけるGOSAT・CH₄気柱量および地上観測データのCH₄排出量推定における有用性を検討する。

3. 研究開発方法

(1) フォワードおよびインバースフラックスに基づくCH₄のモデリング

本研究ではまず、大気CH₄混合比を、気候システム研究センター/国立環境研究所/地球変動研究フロンティア研究センター（CCSR/NIES/FRCGC）の大気大循環モデル（AGCM、バージョン5.7b）に基づいて開発した大気化学輸送モデル（AGCM57b-ACTM; Patra et al., 2009）¹⁾を使ってシミュレーションした。ACTMは、T42スペクトルトラランケーション（約2.8×2.8°）の水平解像度、および67シグマ-圧力鉛直レベルで実行された。以下の連続方程式は、地球大気の異なる緯度（y）、経度（x）および高度（z）におけるCH₄の時間（t）発展について解かれる。

$$\frac{dCH_4(x, y, z, t)}{dt} = S_{CH_4}(x, y, t) - L_{CH_4}(x, y, z, t) - \nabla \cdot \Phi_{CH_4}(x, y, z, t) \quad (\text{式 (6)-1})$$

ここで、

CH₄ = 大気中のCH₄モル分率

S = ボトムアップ排出インベントリと陸域生態系モデルのシミュレーションから得られた、表面でのCH₄の排出源/吸収源。

L = CH₄の温度（T）依存損失率は、次で与えられる。



最後の項：移流、対流、拡散によるCH₄の輸送を定義する

式(6)-(1)の右辺の3つの項のうち損失と輸送の2つの項は、排出量Sを最適化する前に厳密に評価すべき

である。AGCMの気象要素は、JRA-25 (Onogi et al., 2007) ²⁾ およびごく最近ではJRA-55 (Kobayashi et al., 2015) ³⁾ の気象庁再解析フィールドの水平風 (UおよびV) および気温によって調整されている。対流圏での水酸基 (OH) ラジカルとの反応によるCH₄の化学的損失は、六フッ化硫黄 (SF₆) およびメチルクロロホルム (CH₃CCl₃) と比較して、試験されてきた (Patra et al., 2014) ⁴⁾。月ごとに変化する3次元のOH場は、Spivakovski et al. (2000; OH_0.99、デフォルトと呼ばれる) ⁵⁾ およびCHASERモデル (Sudo et al., 2002; OH_1.26、感度ケースと呼ばれる) ⁶⁾ から得られたもので、反応速度定数はSander et al. (2006) ⁷⁾ によるACTMシミュレーションを適用した。

CH₄の表面排出のインバースモデル化におけるベイジアン法では、以下の式を用いて53の陸域 (図(6)-1) について排出量 (S) とその不確かさ (CS) を見積もった (Houweling et al., 2017) ⁸⁾:

$$C_S = (G^T C_D^{-1} G + C_{S_0}^{-1})^{-1} \quad \text{式(6)-2}$$

$$S = S_0 + (G^T C_D^{-1} G + C_{S_0}^{-1})^{-1} G^T C_D^{-1} (D - D_{ACTM}) \quad \text{式 (6)-3}$$

S_0 = 地域毎の先験的排出源

C_{S_0} = S_0 の共分散(不確かさの二乗)、月毎の地域総排出量の70%に設定

D = 大気濃度観測データ

C_D = 大気濃度観測データの共分散 (CH₄の総観的変動に基づいて可変に設定)

D_{ACTM} = S_0 を用いたACTMシミュレーションによる大気濃度

G = 地域毎の排出源・受容源 (ソース・レセプター) の関係 (サイトにおける濃度) を定義するグリーン関数

ここでは、インバージョンによる月平均排出量の推定のため、NOAAの共同世界大気採取ネットワークの37サイトと、2つのJMAサイトからの乾燥空気混合比 (ppb) の大気CH₄測定値を使用している。すべてのデータは、温室効果ガス世界データセンター (WDCGG) のウェブサイト

(<https://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>) で入手できる。これらの測定サイトは、2001-2013年のインバース計算期間に関して、最小のデータギャップ (通常2ヶ月未満) に基づいて選択される。また、サイトを遠隔/海洋位置のみに限定した。その理由は、粗いACTMの解像度でも、大量排出近辺の大陸サイトが良好に表現されているからである。

(2) AGCM5.7b-ACTMとGOSAT XCH₄およびMIPASとの比較

世界各地の表面観測データは、地域規模でCH₄排出量を高精度に推定するにはまばらで不十分である。よって、近年、環境省とJAXAと国立環境研究所(NIES)により、温室効果ガス観測衛星 (GOSAT) が打ち上げられ (Kuze et al., 2009) ⁹⁾、衛星リモートセンシング観測が開始された。短波長赤外におけるリモートセンシング観測では気柱平均混合比 (XCH₄) を測定するため、対流圏だけでなく、成層圏でのCH₄プロファイルのモデリングが重要になる。成層圏のCH₄を検証する目的では、受動型大気測定マイケルソン干渉計 (MIPAS) データセットは我々の調査に必要な2つの基本要件を満たす。第一に、これらの成層圏のCH₄観測とモデルシミュレーションとの間に時間的および空間的な一致があること。第二に、成層圏のCH₄観測と空気の年齢(age)を組み合わせたデータセットがモデル内の輸送特性の評価に十分に適していること。我々の研究では、2005年1月から2012年4月までのMIPASの分解能低下期間について新たに改訂されたバージョン (V5R_CH₄_224/V5R_CH₄_225) (Ostler et al., 2016) ¹⁰⁾ を用いた。なお、AGCM57b-ACTMシミュレーションとの比較のために使用するGOSATのデータは、オランダ宇宙研究所 (SRON) でリトリバルされたXCH₄ (バージョンREMOTEC_V2.3; Butz et al., 2011) ¹¹⁾ を使用する。

(3) MIROC4.0-ACTMの開発

成層圏におけるブリューワー・ドブソン循環を表現できるようモデル輸送と対流圏の対流輸送をさらに改善するために、我々はMIROC4.0 AGCMベースのACTMを開発した。MIROC4-ACTMはスペクトル・ダイナミクス・コアを持ち、トレーサー移流にフラックス型セミラグランジュ方式を使用している。AGCM57b-ACTMで使用されているのと同様である。MIROC4-ACTMでは、対流圏下部では地形に沿ったシグマ座標であるが、それより上空の成層圏付近では気圧面に沿うように徐々に変化させるハイブリッド鉛直座標系を用い、成層圏および中間圏の輸送を妥当に表現している (Watanabe et al., 2008)¹²⁾。我々は、地球表面と0.0128hPa(約77km)の間に67の鉛直層を使用した。ハイブリッドなシグマ圧力の鉛直座標系の実装は、成層圏におけるブリューワー・ドブソン循環のシミュレーションを改善することが示されている (Patra et al., 2018)¹³⁾。

SF₆排出量は1988年から2012年まではEDGARv432空間地図から、それ以降の年は2012年排出マップを使用し、世界全体排出量は1990年、2000年および2010年でそれぞれ4.77, 5.53および7.36Gg/年である (EDGAR42,2013)¹⁴⁾。比較のために、AGCM57b-ACTMとMIROC4-ACTMの両方とも、それぞれ、1時間および5時間のニュートン緩和時間で、JRA-55の水平風 (U、V) と温度 (T) に調整されている。

(4) ACE-FTS CH₄を使用したMIROC4.0-ACTM検証

セクション3 (2) でAGCM57b-ACTMに対して行ったと同様に、MIROC4-ACTMシミュレーション結果を、高スペクトル分解能(0.02 cm⁻¹)フーリエ変換分光計であるカナダの衛星センサーACE (Atmospheric Chemistry Experiment) による掩蔽観測と比較した。この分析では、ACE-FTSリトリバルの最新バージョン (バージョン3.5–3.6) が使用されている (De Maziere et al., 2008)¹⁵⁾。この分析は、成層圏におけるCH₄の損失、成層圏-対流圏交換 (STE) の強さ、およびブリューワー・ドブソン循環によるCH₄の分布に関する情報を提供する。XCH₄測定を使用して、CH₄の排出源および吸収源のより良い予測を行うには、ACTMシミュレーションのこれらのすべての要素を正確に表現する必要がある。

(5) MIROC4.0-ACTMとNIES GOSAT XCH₄との比較、および稲作からのCH₄排出量(Rice CH₄ emissions)に対するXCH₄の感度

新しく開発したMIROC4-ACTMによってシミュレートされたXCH₄の変動性をよりよく理解するために、我々はその結果をGOSATのNIESリトリバルデータと比較した (バージョンV02.72_RA; Yoshida et al., 2013)¹⁶⁾。我々は、また、排出量シナリオを、EDGAR432 (Janssens-Maenhout et al., 2017)¹⁷⁾ による人為的なCH₄排出、VISIT (Ito and Inatomi, 2012)¹⁸⁾からの湿地排出量、Yan et al. (2009)¹⁹⁾による稲作による排出量、そして、それらのいくつかの組み合わせとして更新した。

ここでは異なる稲作による排出量を使って、二つの異なるシミュレーションケースを設定した。1) コントロールケース (Yan et al., 2009)¹⁹⁾ の稲作による排出量) と2) 感度比較ケース (EDGAR432の稲作による排出量) である。他のすべての自然および人為的排出量は同じとした。両方の稲作による排出量は年間総量が同じ程度であるが、季節的なサイクルは大きく異なっていた (セクション4 (5) で議論する)。

4. 結果及び考察

(1) フォワードおよびインバースフラックスに基づくCH₄モデリング

我々は、CH₄の先験的 (事前) 推定 (a priori) 排出量および事後推定 (posteriori) 排出量を用いて、いくつかのフォワード・シミュレーション (式(6)-3のD_{ACTM}) を実施した。CH₄の先験的全排出量のマップ例を図(6)-1に示す。インバースモデルの計算は、39ヶ所のサイトで観測されたCH₄濃度用いて行い、上述の53区画について補正された排出量と排出の不確かさの推定値 (図(6)-1、右) を得た。詳細は (Patra et al., 2016)²⁰⁾ に記述している。

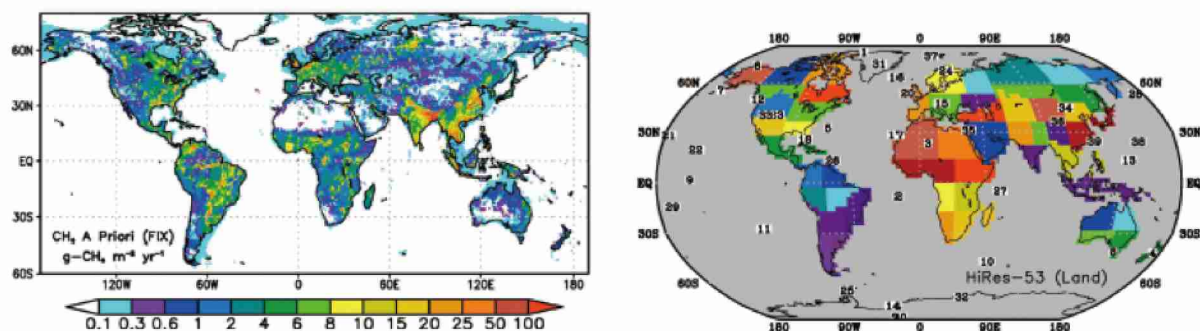


図 (6)-1： すべての自然および人為的起源の排出からなる年平均の CH_4 排出分布のマップ例（左）。採用されている53地域に対してインバースモデルによって推定された CH_4 排出量の推定値（右）（地表サイトで収集された大気データ数は図中の数値で示されている）。

図(6)-2は、アジア地域の2つの代表的な地点での CH_4 観測とシミュレーションを比較している。すなわち、日本の与那国島とモンスーンが支配するインド洋のセイシェル島である。与那国島は、夏季には元来の海洋の大気を、冬季には大陸域東アジアからの排出信号を観測するため、海洋における他のバックグラウンドサイトに比べて、季節変動の振幅は大きい。セイシェルでの測定は、北東モンスーン期（11月～3月）のインド亜大陸の排出の影響を受け、それ以外の季節では南半球の海洋大気の特徴を示す。この比較は、2000年代前半では、先験的排出インベントリを使用したACTMシミュレーション（図(6)-2の赤線）はすべてのサイトで観測より高すぎることを示している。しかし、近年観測された CH_4 濃度とは幾分一致していることを示唆している。インバージョンを行った後（緑色の線）では観測値との差異はほぼゼロ（各サイトおよび各月で与えられるデータの不確かさの範囲内）に収まる傾向がある。

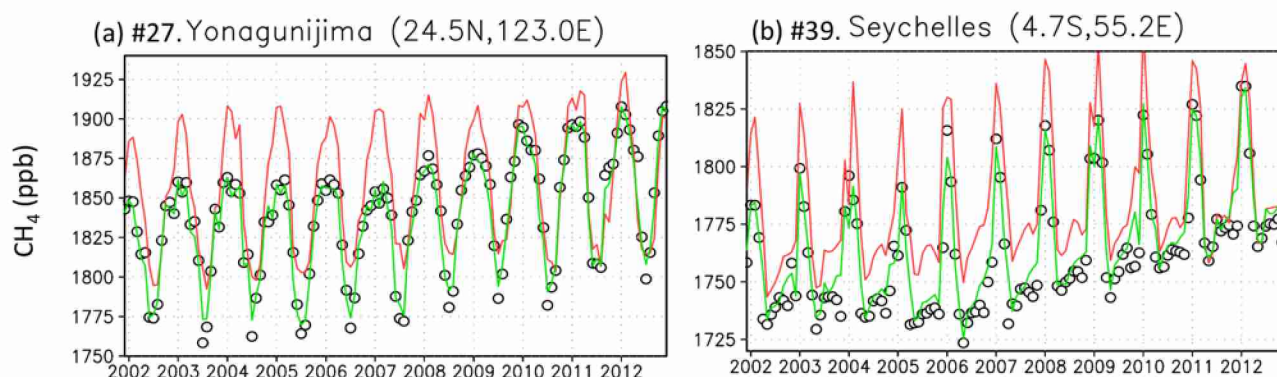


図 (6)-2: 先験的(a priori)排出量を用いてACTMでシミュレートした CH_4 (D_{ACTM})（赤）と事後推定 (posteriori)の排出量に対するシミュレーション結果（緑）とJMA (a; Yonagunijima) とNOAA (b; Seychelles; Dlugokencky et al., 2009)²¹⁾の測定値(○)の比較。Y軸の変動範囲は、2つのサイトの変動を可能な限り明確に示すよう設定されているのでスケールが異なっている。

本プロジェクトでは、バングラデシュのコミラ(Comilla)、インド北部地域からも、NIESの独自のイニシアチブによって、かなりの量の新しい観測が行われている。図(6)-3は、南アジア地域の3ヶ所のNIESの観測網サイトにおいてACTMによってシミュレートされた CH_4 と観測値との比較を示す。温室効果ガスの測定は、2012年の夏からコミラで行われ、これがアジア太平洋ネットワーク (APN) プロジェクトの一部となり、現在は本プロジェクトで受け継がれている。AGCM57b-ACTMは2つの異なる水平解像度の計算結果について示されている。1) T42スペクトルトランケーション (ACTM_T42; 約 $2.8 \times 2.8^\circ$) と、2) T106スペクトルトランケーション (ACTM_T106; 約 $1.125 \times 1.25^\circ$) である。図(6)-3aは、ACTMでシミュレートされた値が、観測された濃度を系統的に約75ppbだけ過小評価し、夏の後半および春季にそれぞれ一貫した季節的なピークおよび谷が観察されることを示唆している。図(6)-3b、cは、コミラとソー

ニーパットでは、ACTMシミュレーションが観測された濃度と季節変動を全体的によくシミュレートしていることを示しているが、詳細な変動には大きな不一致がある。例えば、コミラの観測(b)では、2013年の10月と11月のほとんどの週では、シミュレーションよりはるかに低い濃度（最大差800ppb）が示されている。ソーニーパットにおいては、2013年および2015年よりも、2014年で良好な一致を示した。

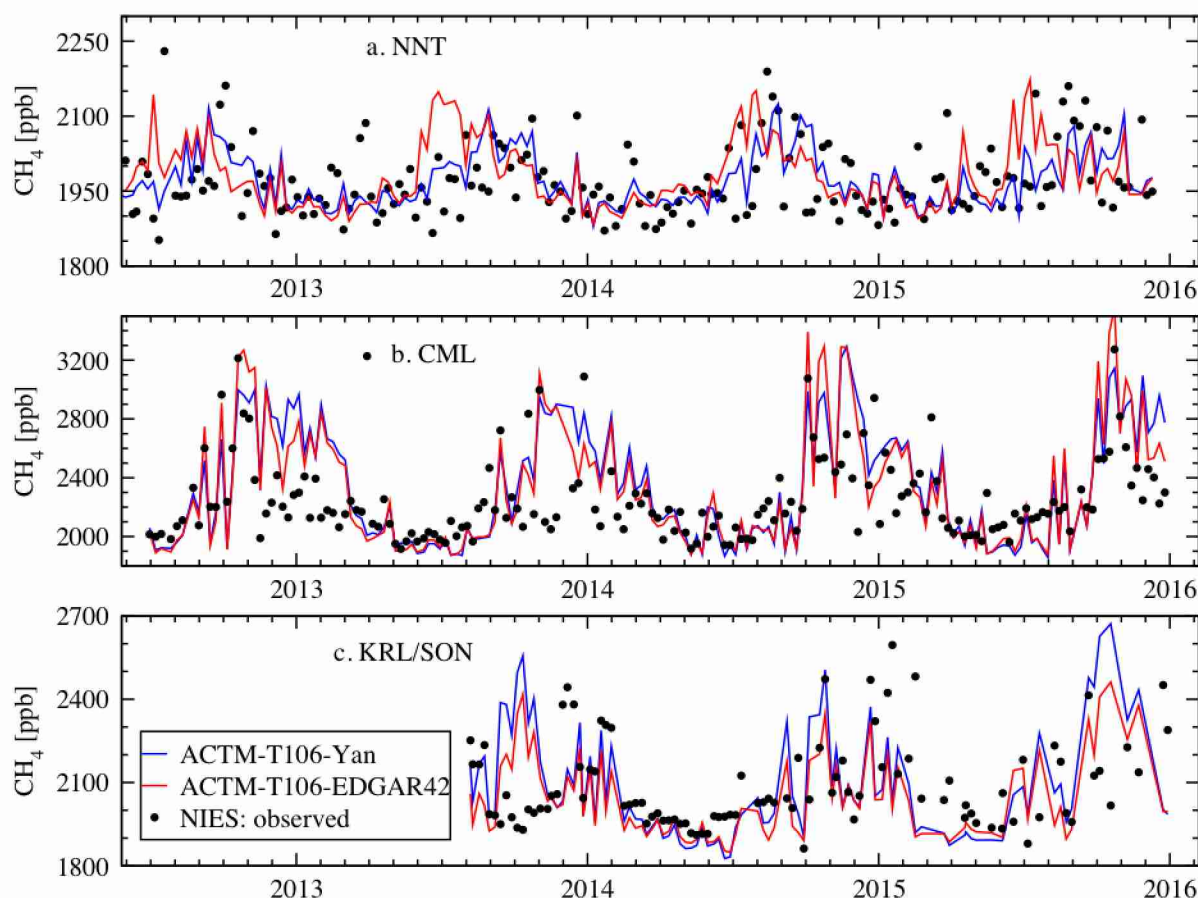


図 (6)-3: ナイニタール(Nainital) (a、NNT) 、コミラ (b、CML) およびカルナル/ソーニーパット (c、KRL/SON) での観測されたCH₄濃度とのACTM-T106シミュレーションの比較。コミラの測定は、ダッカ大学、バングラデシュ気象局、NIES、JAMSTECとの共同作業として実施されている。 ナイニタールの測定は、Aryabhatta観測科学研究所 (ARIES) とNIESとの共同プロジェクトによるものである。

CH₄に加えて、いくつかの他の化学種およびC同位体がコミラの大気試料から測定される。N₂OおよびSF₆のACTM-T42シミュレーションは、測定された変動とほぼ一致しており、相関係数 (r) はそれぞれ0.70および0.86であった (図(6)-4)。ACTMはSF₆を非常にうまくシミュレートすることができているので、モデル輸送には主要な疑義があるわけではない。CH₄については、ACTM-T106-CTLの場合、Yan et al. (2009)¹⁹⁾ によって推測された水田からの排出量を用いたシミュレーションは、陸域生態系モデルシミュレーションから得られたCH₄排出量 (Ito and Inatomi, 2012¹⁸⁾) を用いた場合と比較して、観測されたCH₄の変動をわずかがだが良好にシミュレートする。しかし、モデルの水平解像度をT42 (r = 0.37) からT106 (r = 0.60) に高めることで大きな改善が見られる。これらの結果は、将来のモデル開発のための重要な示唆を提供しているといえるだろう。

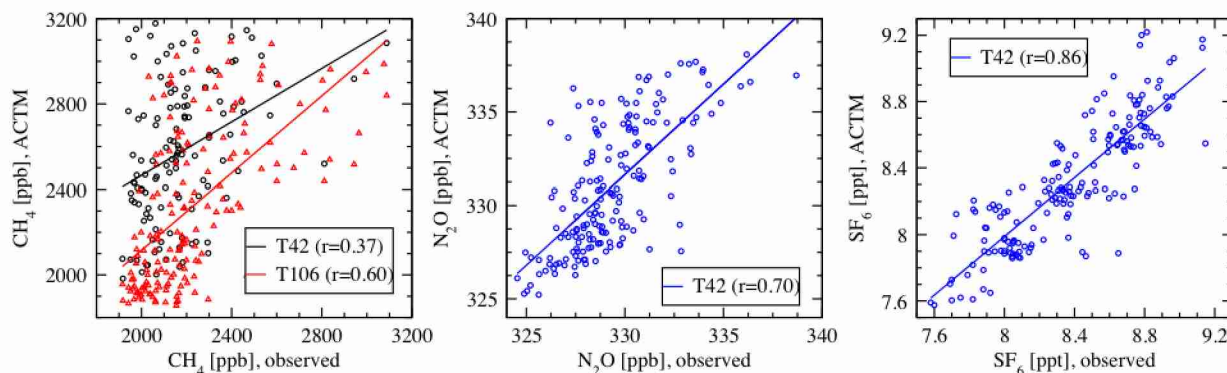


図 (6)-4: バングラデシュ・コミラにおける CH_4 , N_2O and SF_6 の観測値 (X 軸) とモデル計算の値 (Y 軸) の散布図。 N_2O は耕作地における窒素肥料の散布による排出信号を捉えている。一方、 SF_6 は大気輸送のトレーサーである。なお、ACTMを高解像度(T106)で走らせた場合には、 CH_4 の相関はT42よりよくなる。

(2) AGCM5.7b-ACTMとGOSAT XCH₄およびMIPASとの比較

GOSAT XCH₄データを排出インバージョンシステムに投入するという、このプロジェクトの目指す最終目標に向けて、まず我々は、ACTM (D_{ACTM})によってシミュレートされたXCH₄をGOSATで観測されたXCH₄と比較して評価した。モデルシミュレーションによって得られたXCH₄のインド・ガンジス河平原 (IGP) 上における東西勾配は、排出量シナリオに対応して異なる特徴を示す。水田からの CH_4 排出量についてEDGAR42の排出量を用いた事例(AGS)では、Yanの排出量を用いた事例 (CTL) に比べても、またGOSATによる観測値と比較しても、バングラデシュ全体ではるかに高いXCH₄が得られた。東IGP(90E,23N付近)と西IGP (70E,32N付近)における GOSAT観測値とACTMの結果を見ると、AGS 排出シナリオの場合は、水田からの排出をおそらく過大評価しているであろうと考えられる。東南アジア北部と中国南部でGOSAT XCH₄とACTMシミュレーションの間に見られる大きな違いの原因の理解には、さらなる分析が必要であろう。これらの領域は、インバージョンで使用される現場測定ネットワークによる制約をほとんど受けない (Patra et al., 2016²⁰; Saunio et al., 2017²²)。また、ACTMシミュレーションによるXCH₄は、GOSATによる観測値と比較して、高緯度側の中国北部や韓国付近でかなり過大評価されている。HIPPO (HIAPER Pole to Pole Observations) 航空機のキャンペーンの観測結果によれば、対流圏の CH_4 は南北に系統的偏りを示していないことから、ここで見られる高緯度におけるXCH₄の過大評価は、成層圏高度で CH_4 が過大評価されていることから生じる可能性が高い (Patra et al., 2016²⁰)。そこで、以下では成層圏の CH_4 についてMIPASとモデルシミュレーションとの比較を行った結果を示す。

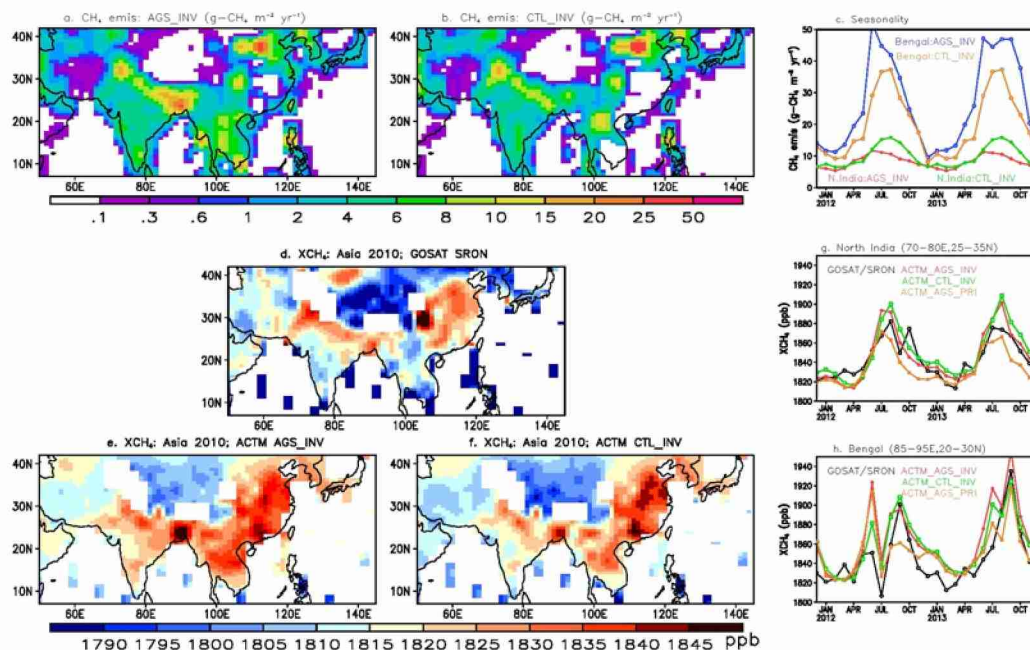


図 (6)-5: (a,b): ACTMシミュレーションで使用された2セットのCH₄排出量のマップ。(c):排出量の時系列。ベンガル湾と北インドについて示されている。(d): GOSATで観測された気柱平均混合比XCH₄。(e,f):aおよびb2つの排出シナリオを用いて行ったACTMシミュレーションで得られたXCH₄のマップ。(g,h)北インドおよびベンガル湾に対してシミュレーションされたXCH₄の時系列。場所は(c)と同じベンガル湾と北インド。CH₄フラックスとXCH₄の時系列が示されている。このシミュレーションは、ACTM_0.99バージョンで実行され、北半球に対する南半球の平均OH比は0.99である。

図(6)-6にモデルシミュレーションとMIPASで観測されたCH₄混合比の差を、年平均での帯状平均された鉛直分布として示した。図(6)-6 (左) は、ACTMの成層圏CH₄混合比がMIPASのCH₄混合比よりもはるかに高いことを表している。ACTMとMIPASの差は、上部対流圏・下部成層圏 (UTLS) 領域内では無視できる値であるが、上部成層圏では450ppbまで増加している。さらに、ACTMとMIPASの差には緯度依存性があり、中層および上部成層圏におけるCH₄の差異は高緯度に向かって増加する。成層圏におけるACTMのCH₄混合比に見られる高い正のバイアスは、XCH₄の高い正バイアスを引き起こす。我々は、2010年の高度と緯度の関数としてCH₄オフセットを導出するために、MIPASと共にカナダの衛星センサーACE-FTS(Atmospheric Chemistry Experiment-Fourier Transform Spectrometer)のCH₄プロファイルを組み合わせて使用した (MIPAS_ACEと表記する)。ACTMとMIPAS_ACEフィールドのCH₄の違いを図(6)-6 (右) に示す。MIPASをACE-FTSへオフセット調整すると、そのMIPAS_ACE CH₄フィールドは、下部成層圏ではほとんど、MIPASの場合より低いCH₄混合比となる。したがって、ACTMと衛星観測のCH₄の差は、MIPASフィールドよりもMIPAS_ACEフィールドの方がより大きい(Ostler et al., 2016¹⁰)。

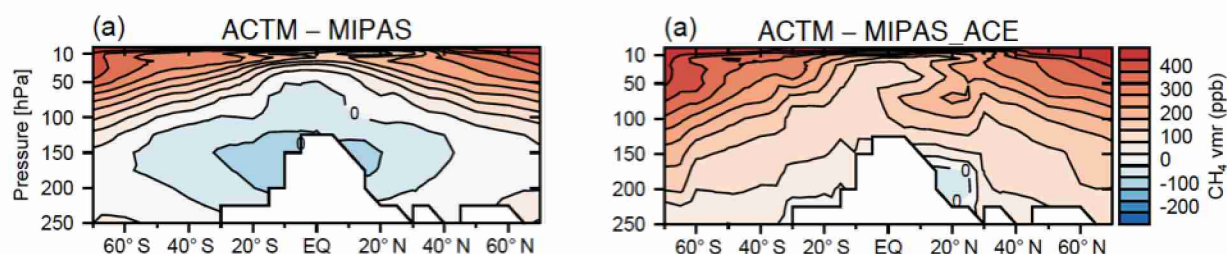


図 (6)-6: (左図) ACTMとMIPASの成層圏のCH₄体積混合比 (vmr) の差 (ppb)。帯状平均および2010年の年間平均値である。ACTM - MIPAS_ACEが右図に表示されている。

(3) MIROC4.0-ACTMの開発

MIPASとMIPAS_ACEの衛星データと比較した通り、高緯度の高高度でシミュレートされたCH₄の明らかな過大評価に留意し、成層圏においてシミュレートされたCH₄プロファイルに対する輸送と化学プロセスの影響の可能性を調べた。図(6)-7に、エアートレーサーの年齢(age)に関する緯度-気圧断面を図示する。エアーパーセルが地表に排出された後、上方へ移動するのに要した時間と、2つのACTMによって示された鉛直速度(ω)を示している。MIROC4-ACTMシミュレーション(a)では、AGCM57b-ACTMの場合(b)と比較して、対流圏のほとんどの地域で、より緩やかな上方輸送(大気寿命が長い)を示した。この状態は熱帯上空の200hPa以上の高度では逆の傾向であった。

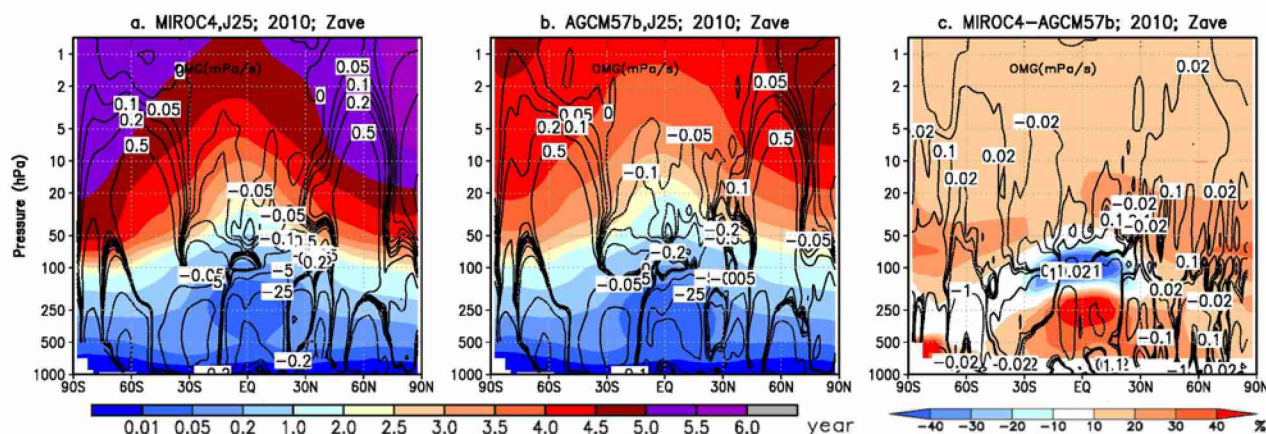


図 (6)-7.シミュレートされた大気年齢(カラーバー参照)と鉛直圧力速度(等高線)に関する帯状平均(Zave)の緯度-気圧断面図。a:MIROC4.0, b:AGCM5.7bの結果。鉛直速度の負(正)の値は上向き(下向き)の移動を示す。

成層圏では、MIROC4-ACTMのほうが大気年齢をより古いと計算している。中上部成層圏のほとんどの部分はAGCM57b-ACTMシミュレーションと比較して体系的に20%ほど古い。最大の違いは、約100-50 hPaの高度の高緯度下層成層圏で見られる(図(6)-7c)。このMIROC4-ACTMのシミュレーション結果は成層圏のSF₆修正大気年齢とよりよく一致するので、これは明らかに改善されていると言えるだろう(Patra et al., 2018¹³)。ここで、SF₆測定から推定された大気年齢は、極渦の中で過大評価されることには留意すべきである(Ray et al., 2017²³)。その理由は、SF₆は中間圏において、電子付着に起因する化学的損失が少ないからである。これは、ACTMシミュレーションおよび大気年齢の計算では考慮されていない。CO₂測定を使用して、Ray et al. (2017)²³は、2000年3月5日にキルナ(Kiruna)(68°N)上の標高22-32kmの範囲で5.5-6.0年の大気年齢を計算した。MIROC4-ACTMでシミュレーションされた大気年齢は、CO₂観測から計算された年齢に非常によく一致した(10%以内)。一方、AGCM57b-ACTMによってシミュレートされた大気年齢は観測年齢を30%ほど過小評価している(図(6)-8)。MIROC4-ACTMでシミュレートした極渦外のSF₆濃度もまた、AGCM57b-ACTMによるシミュレーションより良好に観測値と一致する。

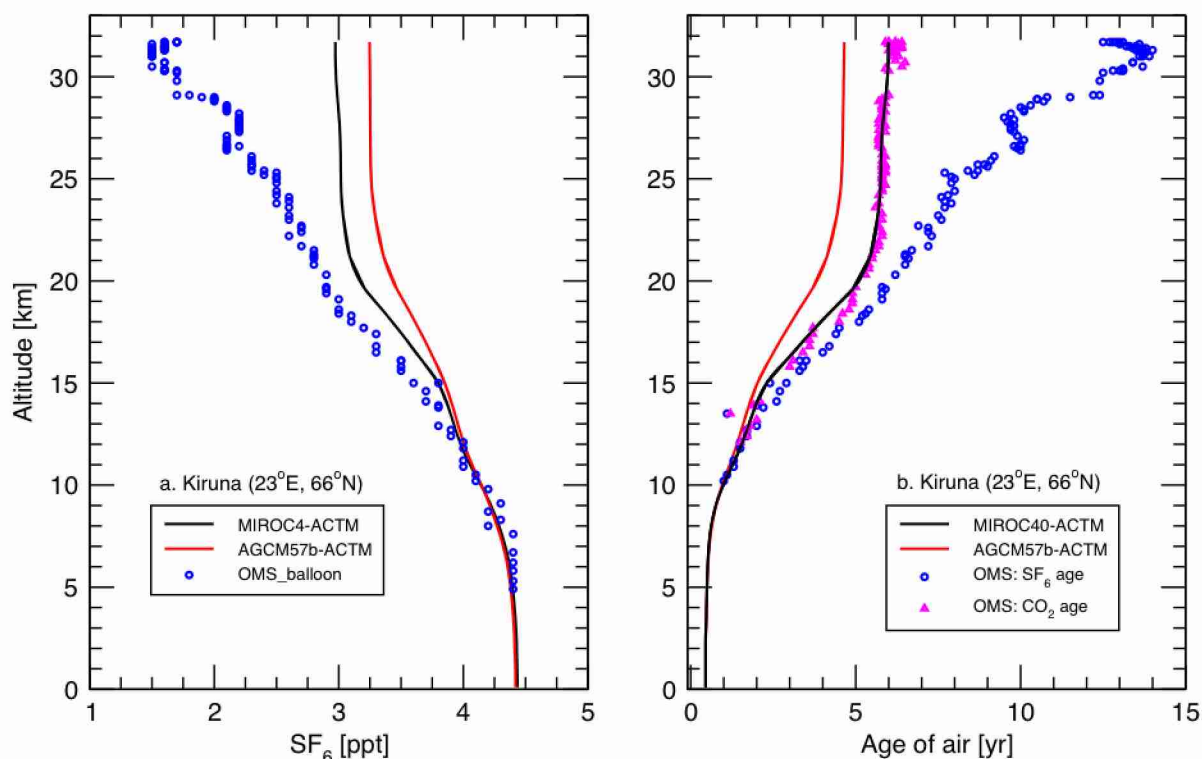


図 (6)-8.北極極循環内の観測値から推定されるSF₆濃度 (a : 左) と大気年齢 (b : 右) のACTMシミュレーションと観測の比較。熱帯、中高度および緯度において、SF₆鉛直プロファイルのシミュレーション値と観測値が比較されている(Patra et al., 2018¹³)。このモデルの結果は、成層圏の大気年齢プロファイルの全体的な傾向を表すために、月平均モデル出力からサンプリングされた。

(4) ACE-FTS CH₄を使用したMIROC4.0-ACTM検証

ACE-FTSは、衛星搭載センサーの中でも、CH₄鉛直プロファイルの最も正確な測定値の1つを提供する。我々は、ACE-FTSでの測定を用いて、MIROC4-ACTMシミュレーションを検証した。図(6)-9は、3ヶ月毎のACE-FTSとMIROC4-ACTMで得られたCH₄緯度-高度断面の比較(左と中の列)と、両者の差(右列)を示す。このシミュレーションは、ブリューワー・ドブソン循環の湧昇枝域(upwelling branch)を通るCH₄輸送の顕著な特徴を捕らえている。それは、夏半球、すなわち1月～3月の南半球(SH)および7月～9月の北半球に現れる。このモデルのシミュレーションはまた、CH₄の等値線上の鉛直および子午面勾配を捉えている。これは、下部成層圏(高緯度および低緯度では、30および35km以下の高度)では典型的には20%である。これは、成層圏-対流圏の交換がMIROC4-ACTMでは現実的にシミュレートされ、OH、ClおよびO¹Dとの反応による損失の大きさも十分にパラメータ化されていることを示唆している。モデル-観測のミスマッチは、XCH₄の部分カラム量が全体の2.5%未満となる中・上部成層圏で増加する。ACTMとFTSの差は高度と共に増大するが、30kmより上層の大気は全体の10%しかないので、XCH₄には2.5%程度しか影響しない。以上の結果は、MIROC4-ACTMでは、現場測定(in situ)に加えてXCH₄のインバースモデリングへの取り込みも十分可能であることを示している。

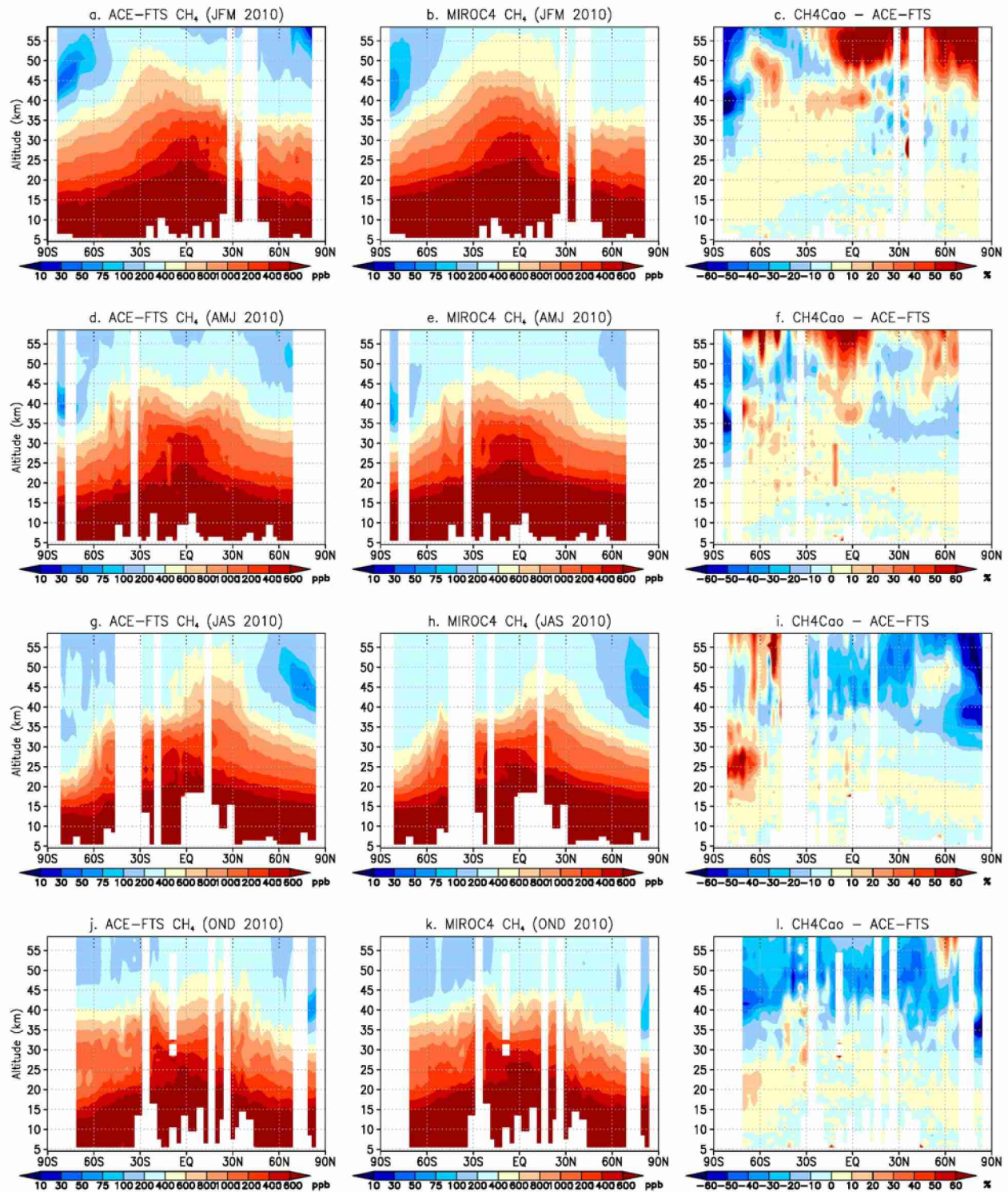
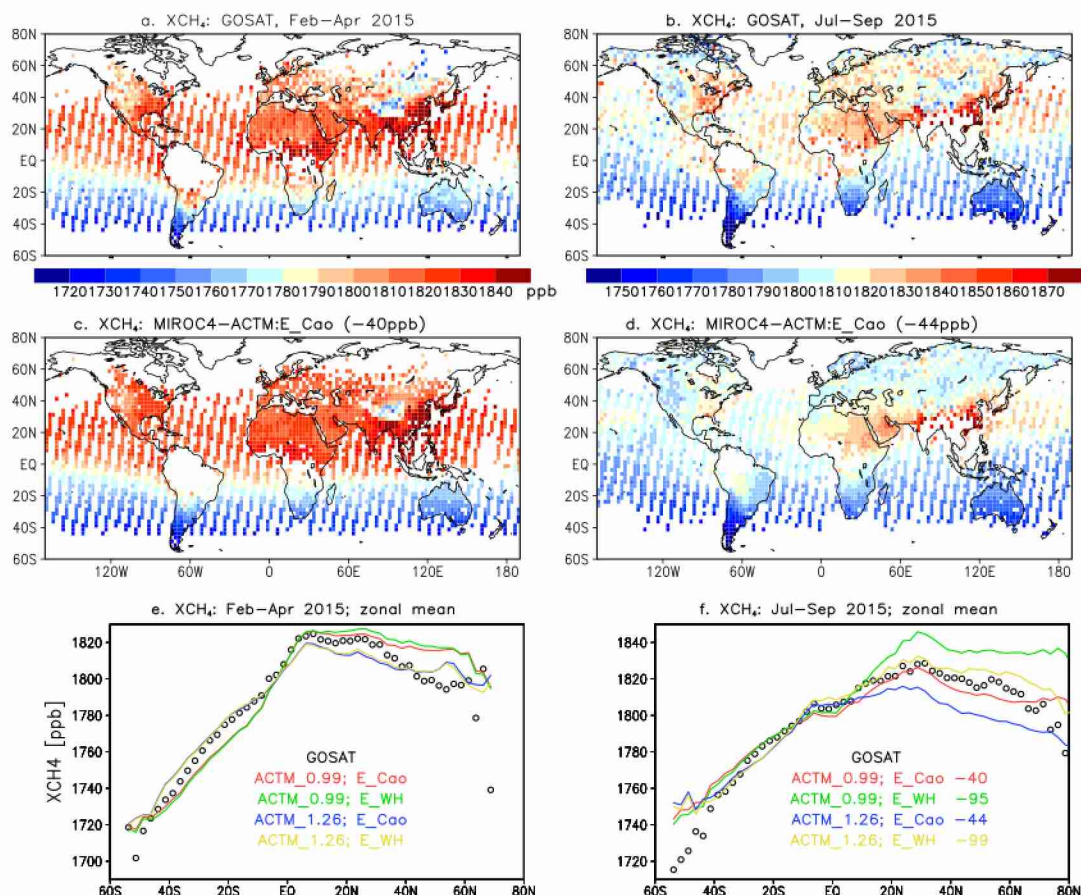


図 (6)-9: ACE-FTSによる観測の緯度-高度分布 (左列)、MIROC4-ACTMシミュレーション (中央列) および2つの間の差 (右列)。冬 (1月—3月)、春 (4月—6月)、夏 (7月—9月)、秋 (10月—12月) の季節が上から順に配置されている。

(5) MIROC4.0-ACTMとNIES GOSAT XCH₄との比較、および稲作からのCH₄排出量(Rice CH₄ emissions)に対するXCH₄の感度

図(6)-10は、GOSATのXCH₄(NIESリトリバルバージョン)とACTMシミュレーション結果を示している。パネルeおよびfでは、OH_0.99およびE_Cao、およびOH_1.26およびE_WHの化学プロセスおよび排出の組み合わせによって、GOSAT XCH₄がMIROC4-ACTMによって合理的にシミュレートできることを示唆

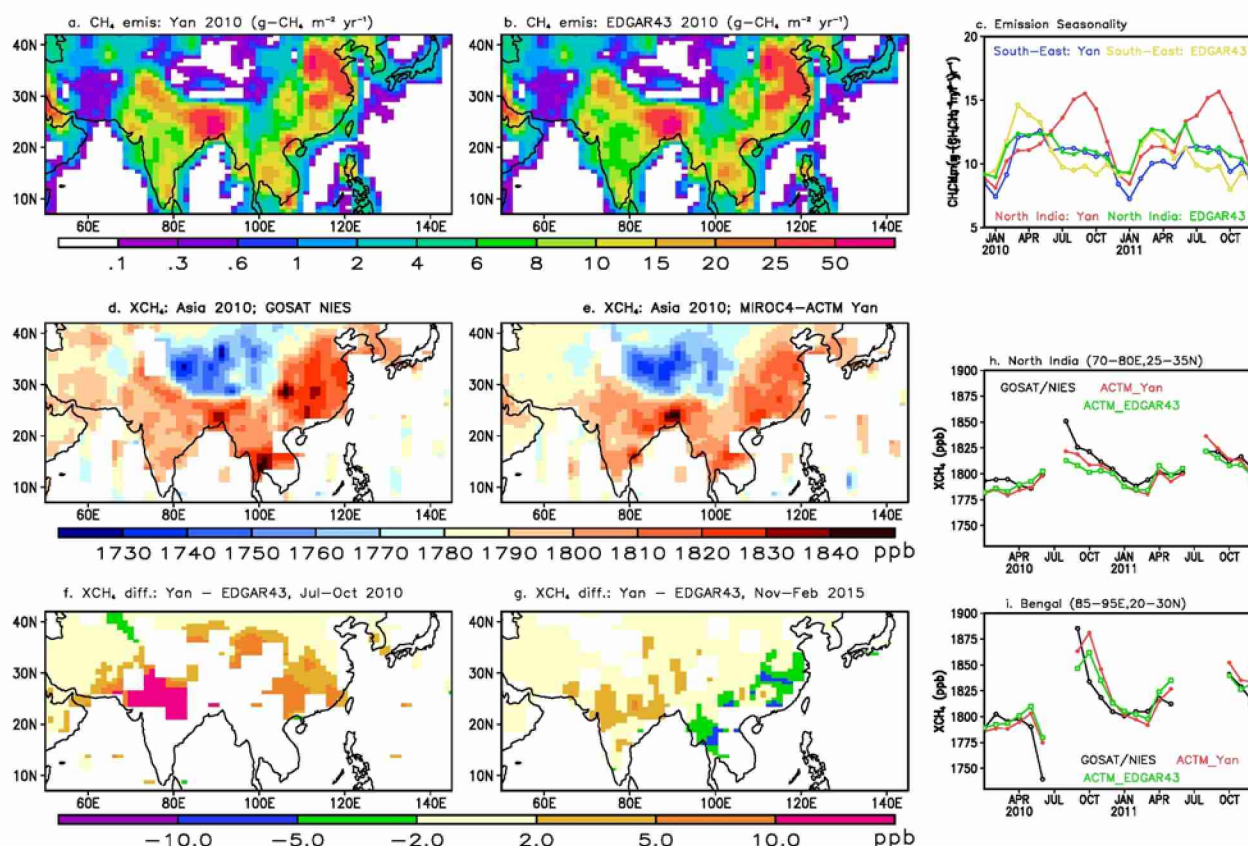
している。しかしながら、 CH_3CCl_3 のシミュレーションを用いた我々の独立した分析は、有効なOH分布としてOH_1.26の可能性を排除する。このシミュレーションでは、湿地と水田の排出シナリオとしてはVISITで二つのスキーム(E_Cao (Cao et al., 1998)²⁴⁾とE_WH (Walter and Heimann, 2000)²⁵⁾を用いて計算された二つの異なる排出シナリオを使った。人為起源排出シナリオとしては最新のEDGAR432を使っている。E_CaoおよびE_WH排出量については、この2つの組み合わせが、おそらく湿地と水田のための最良の排出シナリオであると我々は考えている。全体的に、ACTMシミュレーションは、米国の東部西部のコントラストと同様に、南アジアと東アジアでの高いXCH₄値をよく捉えている。



図(6)-10: (上段a,b) GOSAT (NIES リトリバル)の気柱平均 CH_4 混合比(XCH_4)マップ。NHの冬季(2015年2月-4月)(a)と夏季(2015年7-9月)(b)。(中段c,d) MIROC4-ACTM(中段)でシミュレートされたもの(冬季と夏季)。A prioriはまだMIROC4-ACTMに最適化されていないので、-40ppbと-44ppbのオフセットを適用した。これらのオフセットは、 CH_4 が排出変化や輸送のタイムスケールに比べて十分長い10年程度の寿命を持つので、 XCH_4 の空間的勾配を議論する上では問題にならない。(e,f) VISIT(E_CaoおよびE_WH)排出量シナリオに基づき、2つのOHフィールド、ACTM_0.99およびACTM_1.26、ならびに、2セットの湿地および水田排出を用いてシミュレートされた XCH_4 の緯度断面。

図(6)-11は、観測システムシミュレーション実験(OSSE)として提示された表面排出に関する XCH_4 の感度を示す。このプロジェクトでは、水田(稲作)からの可能な CH_4 排出削減戦略を立てるために、異なる土壌および水管理手法でフィールド実験を実施した(Oo et al., 2018a,b)^{26,27)}。我々は、シミュレートした表面付近の CH_4 濃度が表面排出の変動に非常に敏感であり(図(6)-3;青と赤の線の違いに見られる)、それが測定機器精度(5ppb未満)を超えて検出可能であることをすでに示した。しかしながら、表面排出の変化によってどの程度の XCH_4 変動が予想されるかはまだ不明である。Oo et al. (2018a²⁶⁾,b²⁷⁾)は、水と土壌を最適管理することで、 CH_4 の排出量をインドで25%まで削減できることを示唆した。ここでのOSSEでは、稲作からの CH_4 排出の季節サイクルが全く異なる、EDGAR432とYan et al. (2009)¹⁹⁾の排出イ

ンベントリを使用した。主な稲作期間（7月～10月）中、10と17gCH₄/m²/yrの排出差は、北西インド地域で10ppbのXCH₄の差を生じることがわかる。モンスーンのために、南アジア地域の大部分は雲に覆われてGOSAT（または現在の軌道上の他の衛星）による測定では不明瞭である。この10ppbの違いは、XCH₄のGOSAT測定精度の程度である。このため、全気柱量測定に対するGOSAT TANSO測定器の現在の精度では、水田排出量が年間25%変化してもこれを捉えることが出来る可能性はほとんどない。しかしもし、GOSAT SWIRとTIRスペクトルを組み合わせることで鉛直プロファイル情報を得ることができれば、稲作による排出削減は検出されるかもしれない。鉛直方向の情報の有用性は南アジア地域でさらに高まっている。なぜなら、そこでは、排出信号が夏の深い積雲対流によって急速に上向きに運ばれるからである(e.g., Chandra et al., 2017)²⁸⁾。



図(6)-11：稲による排出の2つの事例におけるCH₄排出の緯度経度分布（上段）、NIES GOSATによる観測値とMIROC4-ACTMシミュレーションの比較（中段）、水田排出の2つの事例におけるMIROC4-ACTMシミュレーションの違い（下段）。選択されたアジア地域におけるCH₄排出量とXCH₄のモデル観測値の比較は、時系列で右欄に示されている（凡例とパネル見出しを参照）。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

我々は、CH₄に関するモデル輸送と化学プロセスを評価するために、高度0-80kmの広い範囲をカバーする多数のモデル実験を行った。このことはGOSATによる衛星リモートセンシング観測がCH₄の気柱平均混合比(XCH₄)を提供することから考えて極めて重要である。地球表面付近のCH₄濃度のみが直接的に排出の影響を受け、上部対流圏、成層圏および中間圏のCH₄は主に輸送と化学プロセスによって決定されていることはよく理解されているとおりである。従って、XCH₄の観測からCH₄排出量を推定するためには、上部対流圏とその上層におけるCH₄鉛直プロファイルの正確な表現が非常に重要である。AGCM57bに基づく化学輸送モデル（ACTM）によるCH₄のシミュレーションは、遠隔海域で観測されたCH₄ (e.g., Yonagunijima and Sechelles)と、コミラ、ナイニタール、ソーニーパットで行われた測定をよく

再現していた。2つの異なるモデル水平解像度（T42 and T106）を用いたシミュレーションは、大陸観測をシミュレートするためにはより高い解像度（T106）でのシミュレーションが必要であることを示していた。我々のモデルシミュレーションと航空機観測との比較も良好な一致を示していた(Patra et al., 2016²⁰⁾)。

多数のシミュレーションとその結果の詳細な分析を通して、我々は、AGCM57b-ACTMシミュレーションが下部成層圏とその上層でのCH₄を過大評価することを見出した。様々な衛星観測で得られたXCH₄と比較したところ、高緯度ほどモデルで得られたXCH₄には系統的に高いバイアスがもたらされる。これらの知見に基づき、より力学的信頼性が高い、MIROC4の力学モデルに基づいてモデリングシステムを開発した。MIROC4は、AGCM57bの純粋なシグマ鉛直座標系とは異なり、ハイブリッドシグマ鉛直座標系を採用している。この鉛直座標系の改良によって、熱帯域上の成層圏で上向き輸送とその後の高緯度への輸送を制御するブリューワー・ドブソン循環の速度がはるかに良く表現されるようになった。大気年齢についても観測データを使って診断がなされ、良好な結果を得た。MIROC4-ACTMでシミュレートされたXCH₄はNIESバージョンの GOSAT XCH₄観測値と良好な一致を示した。

最後に、観測システムのシミュレーション実験において、稲作による表面排出量を変化させた感度シミュレーションを行った。その結果は、現在の精度で得られたGOSAT・XCH₄観測値情報から、稲作からの50%以上の排出量の変化を検出できることを示唆している。

このように、MIROC4-ACTMの開発により、気柱積分された観測値であるXCH₄を地上からのCH₄排出量推定に活用できる可能性が高くなった。将来GOSAT-2等の新たなミッションに向け、インバース解析の実現的応用に道を拓くことができたと考える。

（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>

このインバージョンモデルの結果は、グローバル・カーボン・プロジェクト（GCP）の統合イニシアチブ(synthesis initiative)にCH₄排出源と吸収源推定のために提出された。その結果は公開された文献として入手可能である (Saunois et al., 2016²⁹⁾, 2017²²⁾)。GCP CH₄の活動は継続されており、定期的更新の提供を目指している。また、モデル間相互比較プロトコルがCH₄インバースモデリングのために開発されている(著者：M. Saunois, P. Bousquet, P.K. Patra, and S. Houweling)。このGCP CH₄統合イニシアチブから得られた結果は、IPCC AR6の第5章で使用され、テマリーダーは主著者である。

我々のインバースの結果は、ACTMの以前のバージョン（AGCM5.7b-ACTM）を使用して、次のような最も重要な結論を提供した。1) 東アジア地域の排出増加率は、中国からの人為的排出のために過大評価されていた。2) 世界の熱帯地域における排出増加率は、腸内発酵による排出増加率と一致すべきである。そして、3) 北方陸域からの排出に大幅な増加はない。これらの知見は、Saunois et al. (2017)²²⁾の分析によってさらに支持されている。

MIROC4.0に基づいて開発された新しいACTMは、地上観測ネットワークやGOSAT（およびGOSAT-2）などの衛星リモートセンシングデータ等、さまざまな種類の測定値を取り込むことができる。本報告書で示した通り、XCH₄には鉛直層すべての情報が取り込まれるため、モデル内における成層圏でのCH₄鉛直勾配情報は、CH₄の排出源と吸収源についての将来の研究の発展への重要な鍵になると考えられる。本章で報告した観測システムのシミュレーション実験において、稲作による表面排出量を変化させた感度シミュレーションの結果は、GOSAT・XCH₄観測値情報から、稲作からの50%以上の排出量の変化を検出できることを示唆しており、次期GOSAT-2ミッションで得られるデータ活用へ向け、有効な情報を提示した。さらに平成30年度開始の推進費課題「GOSAT-2と地上観測による全球のCH₄放出量推定と評価手法の包括的研究」への貢献に繋がると期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画名：グローバル・カーボン・プロジェクト (GCP) の統合イニシアチブ (synthesis initiative)

カウンターパート氏名 M. Saunois,

所属 Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (気候環境科学研究所) ・パリ大学

参加者 他多数

経緯は5に記載

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. Z. OO, S. SUDO, K. INUBUSHI, M. MANO, A. YAMAMOTO, K. ONO, T. OSAWA, S. HAYASHIDA, P. K. PATRA, Y. TERAOKA, P. ELAYAKUMAR, K. VANITHA, C. UMAMAGESWARI, P. JOTHIMANI, V. RAVI: Agriculture Ecosystem & Environment, 252, 148-158 (2018a), Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.
- 2) N. CHANDRA, S. HAYASHIDA, T. SAEKI, P. K. PATRA: Atmos. Chem. Phys., 17, 12633-12643 (2017), What controls the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?,
- 3) M. SAUNOIS, P. BOUSQUET, B. POULTER, A. PEREGON, P. CIAIS, J.G. CANADELL, E. J. DLUGOKENCKY, G. ETIOPE, D. BASTVIKEN, S. HOUWELING, G. JANSSENS-MAENHOUT, F.N. TUBIELLO, S. CASTALDI, R.B. JACKSON, M. ALEXE, V.K. ARORA, D.J. BEERLING, P. BERGAMASCHI, D.R. BLAKE, G. BRAILSFORD, V. BROVKIN, L. BRUHWILER, C. CREVOISIER, P. CRILL, C. CURRY, C. FRANKENBERG, N. GEDNEY, L. HÖGLUND-ISAKSSON, M. ISHIZAWA, A. ITO, F. JOOS, H.-S. KIM, KLEINEN, P. KRUMMEL, J.-F. LAMARQUE, R. LANGENFELDS, R. LOCATELLI, T. MACHIDA, S. MAKSYUTOV, K.C. MCDONALD, J. MARSHALL, J.R. MELTON, I. MORINO, S. O'DOHERTY, F.-J.W. PARMENTIER, P.K. PATRA, C. PENG, S. PENG, G.P. PETERS, I. PISON, C. PRIGENT, R. PRINN, M. RAMONET, W.J. RILEY, M. SAITO, R. SCHRODER, I.J. SIMPSON, R. SPAHNI, P. STEELE, A. TAKIZAWA, B.F. THORTON, H. TIAN, Y. TOHJIMA, N. VIOVY, A. VOULGARAKIS, M. VAN WEELE, G. VAN DER WERF, R. WEISS, C. WIEDINMYER, D.J. WILTON, A. WILTSHIRE, D. WORTHY, D.B. WUNCH, X. XU, Y. YOSHIDA, B. ZHANG, Z. ZHANG, AND Q. ZHU: Atmos. Chem. Phys., 17, 11135-11161 (2017), Variability and quasi-decadal changes in the methane budget over the period 2000-2012.
- 4) A. OSTLER, R. SUSSMANN, P. K. PATRA, S. HOUWELING, M. DE BRUINE, G. P. STILLER, F. J. HÄNEL, J. PLIENINGER, P. BOUSQUET, Y. YIN, M. SAUNOIS, K. A. WALKER, N. M. DEUTSCHER, D. W. GRIFFITH, T. BLUMENSTOCK, F. HASE, T. WARNEKE, Z. WANG, R. KIVI, J. ROBINSON: Atmos. Meas. Tech., 9, 4843-4859 (2016), Evaluation of column-averaged methane in models and TCCON with a focus on the stratosphere.
- 5) P. K. PATRA, M. TAKIGAWA, SHINGO WATANABE, N. CHANDRA, K. ISHIJIMA: SOLA, under revision (2018), Improved Chemical Tracer Simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM).

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) A. Z. OO, S. SUDO, P. K. PATRA, V. RAVI, Farmers Forum, 44, 12-19 (2018b), SRI both economical and environment friendly.

- 2) P. K. PATRA, Tenki, 64, 769-785, (2017), モデル解析を基にした温室効果気体の全球規模循環に関する研究 -2016年度堀内賞受賞記念講演-.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) P. K. PATRA, et al., Global Carbon Project - CH₄ workshop, San Francisco, USA, 16 December 2015.
“Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012)”
- 2) P. K. PATRA, T. SAEKI, S. AOKI, S. MORIMOTO, T. NAKAZAWA, AOGS Annual Meeting, Beijing, August 2016.
“Anthropogenic emissions of CO₂ and CH₄ from china are likely overestimated”
- 3) P. K. PATRA (invited), IGAC Symposium, Breckenridge, September 2016.
“Quantifying hydroxyl in chemistry-climate models”
- 4) P. K. PATRA, Workshop on Satellite GHG Concentration Measurement and National GHG Emission Inventories, Tokyo, February 2017.
“An attempt to separate anthropogenic CO₂ emission from natural component using CH₄ emission inversion”
- 5) P. K. PATRA, S. NOMURA, Y. TERAOKA, T. MACHIDA, M. NAJIA, K. AHMED, N. CHANDRA, S. VENKATARAMANI, S. LAL and S. HAYASHIDA, ACAM meeting, Guangzhou, June 2017.
“Variabilities in greenhouse gases in South Asia due to monsoon”
- 6) P. K. PATRA (Keynote), National Training Workshop on Greenhouse Gases Measurements, Interpretation and Inverse Modelling, IITM, Pune, July 2017.
“Overview of Atmospheric greenhouse gases”
- 7) P. K. PATRA, 12th International Conference for Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (AMOS-ICSHMO), Sydney, February 2018.
“Budgets of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in the southern land and ocean”
- 8) P. K. PATRA (invited), JSPS-US Alumni 2018 Seminar on "Growing Atmospheric Pollution and Its Impact on Climate", Chapman University, Orange (USA), February 2018. “Understanding the sources of air pollutants key to effective mitigation policy – a case of methane”

(3) 知的財産権

- 1) 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) P. K. Patra: Institute of Environment and Sustainable Development, Banaras Hindu University, Varanasi, India, “Global Climate Change: Role of human activity, ecosystems and agriculture”
(インド・ヴァーラーナシーのバナラス・ヒンドゥー大学にて、大学院生 (約20名) ・教員 (約20名) を対象に、標記の講義を行った。) (2017年2月21日)

(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

- 1) P. K. Patra, R. Singh, H. El-Askary, G. Winckler: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 14-18 December 2015.
"A21L: Long-Range Transport of Dust and Pollution in the Past, Present, and Future" (セッション開催)

- 2) P. K. Patra : 2016 年度日本気象学会堀内賞受賞。対象研究業績「モデル解析を基にした温室効果気体の全球規模循環に関する研究」（日本気象学会参加者に向けて、温室効果気体の全球規模循環に関する研究成果を受賞講演として紹介した。）（2016 年 10 月 27 日）
- 3) P. K. Patra, K. Ichii, and J. Miettinen: “Climate-carbon nexus in tropical Asia”
（第13回アジア・オセアニア地球科学連合大会（2016年7月31日～8月5日）において招待講演を行い、気候と炭素循環の関連について理解を深めた。）
- 4) P. K. Patra: Local organizing committee and session chair (Theme 1.2 Air Quality), ACAM meeting, Guangzhou, June 2017.
- 5) P. K. Patra: Scientific Steering Committee, National Training Workshop on Greenhouse Gas Measurements, Interpretation and Inverse Modeling, IITM-Pune, July, 2017.

8. 引用文献

- 1) Patra, P. K., et al., J. Meteorol. Soc. Jpn., 87(4), 635-663 (2009), Growth rate, seasonal, synoptic, diurnal variations and budget of methane in the lower atmosphere.
- 2) Onogi, K., et al.: J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432 (2007), The JRA-25 Reanalysis.
- 3) Kobayashi, S., et al.: J. Meteor. Soc. Japan, 93, 5-48, (2015), The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics.
- 4) Patra, P. K., et al.: Nature, 513, 219-223 (2014), Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity.
- 5) Spivakovski C. M., et al.: J. Geophys. Res., 105, 8931-8980 (2000), Three dimensional climatological distribution of tropospheric OH: Update and evaluation.
- 6) Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto: J. Geophys. Res., 107(D17), 4339 (2002), CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description.
- 7) Sander S. P., et al.: Evaluation Number 15, JPL Publication 06-2, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA (2006), Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies.
- 8) Houweling, S., P. Bergamaschi, F. Chevallier, M. Heimann, T. Kaminski, M. Krol, A. M. Michalak, and P. K. Patra: Atmos. Chem. Phys., 17, 235-256 (2017), Global inverse modeling of CH₄ sources and sinks: An overview of methods.
- 9) Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., and Hamazaki, T.: Appl. Opt., 48, 6716-6733 (2009), Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring.
- 10) Ostler, A., et al.: Atmos. Meas. Tech., 9, 4843-4859 (2016), Evaluation of column-averaged methane in models and TCCON with a focus on the stratosphere.
- 11) Butz, A., et al.: Geophys. Res. Lett., 38, L14812 (2011), Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT.
- 12) Watanabe, S., H. Miura, M. Sekiguchi, T. Nagashima, K. Sudo, S. Emori, and M. Kawamiya: J. Earth Simulator, 9, 27-35 (2008), Development of an atmospheric general circulation model for integrated Earth system modeling on the Earth Simulator.
- 13) Patra, P. K., M. Takigawa, Shingo Watanabe, N. Chandra, K. Ishijima: SOLA, under revision (2018), Improved Chemical Tracer Simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM).
- 14) EDGAR42FT: (2013), <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=42FT2010>, October 2013, Global Emissions EDGAR v4.2 FT2010.
- 15) De Mazière, M., et al.: Atmos. Chem. Phys., 8, 2421-2435 (2008), Validation of ACE-FTS v2.2 methane

profiles from the upper troposphere to the lower mesosphere.

- 16) Yoshida Y., Kikuchi N., Morino I., Uchino O., Oshchepkov S., Bril A., Saeki T., Schutgens N., Toon G.C., Yokota T.: *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 1533-1547 (2013), Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data.
- 17) Janssens-Maenhout, G., et al.: *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/essd-2017-79>, in review (2017), EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970–2012.
- 18) Ito A. and M. Inatomi: *Biogeosciences*, 9, 759-773 (2012), Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty.
- 19) Yan X., H. Akiyama, K. Yagi, and H. Akimoto: *Global Biogeochem. Cy.*, 23, GB2002 (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.
- 20) Patra, P., K., et al.: *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 94, 91-113 (2016), Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012).
- 21) Dlugokencky, E. J., et al.: *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18803 (2009), Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden.
- 22) Saunio, M., et al.: *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 11135-11161 (2017), Variability and quasi-decadal changes in the methane budget over the period 2000-2012.
- 23) Ray, E. A., F. L. Moore, J. W. Elkins, K. H. Rosenlof, J. C. Laube, T. Röckmann, D. R. Marsh, and A. E. Andrews: *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 4626–4638 (2017), Quantification of the SF₆ lifetime based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex.
- 24) Cao, M., K. Gregson, and S. Marshall: *Atmos. Environ.*, 32, 3293-3299 (1998), Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change.
- 25) Walter, B. P., and M. Heimann: *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 745-765 (2000), A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate.
- 26) Oo, A. Z., et al.: *Agriculture Ecosystem & Environment*, 252, 148-158 (2018a), Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India.
- 27) Oo, A. Z., S. Sudo, P. K. Patra, V. Ravi, *Farmers Forum*, 44, 12-19 (2018b), SRI both economical and environment friendly.
- 28) Chandra, N., S. Hayashida, T. Saeki, P. K. Patra: *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 12633-12643 (2017), What controls the seasonal cycle of columnar methane observed by GOSAT over different regions in India?.
- 29) Saunio, M., et al.: *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 697-751 (2016), The Global Methane Budget: 2000–2012.

III. 英文Abstract

Improvement of Methane Emission Estimate from South Asia using GOSAT and Development of an Emission Mitigation Proposal

Principal Investigator: Sachiko HAYASHIDA

Institution: Nara Women's University

Kitaouya Nishimachi, Nara 630-8506, JAPAN

Tel: +81-742-20-3581 / Fax: +81-742-20-3441

E-mail: sachiko@ics.nara-wu.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies (NIES)

Institute for Agro-Environmental Science (NIAES)/National Agriculture and Food Research

Organization (NARO),

Chiba University

Tokyo Gakugei University

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

[Abstract]

Key Words: Global warming, Methane, GOSAT, Air Sampling, Atmospheric Chemistry Transport Model (ACTM), Inverse Analysis, Emission Estimate, Agriculture, Rice Cultivation, Emission Mitigation, South Asia, India, Bangladesh

Methane (CH_4) has the second highest radiative forcing among anthropogenic greenhouse gases. In South Asia, although a significant amount of CH_4 emission occurs, accurately quantifying it remains a challenge.

This project's first goal was to improve regional CH_4 emission estimates in South Asia. For this, we developed a state-of-the-art atmospheric chemistry-transport model (ACTM) and accumulated high-precision data regarding the CH_4 mixing ratio through weekly flask samplings at three sites (a mountainous region of North India, crop/rice field in North India, paddy field in Bangladesh). Using these *in-situ* measurements, we verified the inverse system using the ACTM. An analysis of columnar-averaged CH_4 mixing ratio (XCH_4) data from GOSAT revealed that the considerable amount of the CH_4 in the mid- and upper troposphere contributes to the XCH_4 due to complicated transport processes over South Asia. We also found the seasonal variations of the surface CH_4 and expected CH_4 emissions to be inconsistent in North India, which suggested that information regarding the vertical distribution of CH_4 is critical for improving the emission estimates of this region. Further, a new ACTM was developed to improve CH_4 transport processes in the model, by adapting a more sophisticated dynamical-model, which will have a good potential to improve emission estimates in the near future.

This project's second goal was to develop an emission mitigation proposal, based on local experiments, to reduce CH_4 emissions from rice paddies. Rice cultivation experiments with flux measurements from rice paddies have been conducted by the Tamil Nadu Rice Research Institute in South India. Their results demonstrate that CH_4 emissions from rice cultivation can be reduced by up to 20–40 %, in terms of the yield-scaled CO_2 -eq emission, with the application of proper cultivation management strategies. They applied alternate wetting and drying (AWD) irrigation, which better reduced CH_4 emissions than continuous flooding did, by introducing periodically aerobic conditions during rice-growing seasons. By combining AWD irrigation with a system of rice intensification, they succeeded in reducing CH_4 emissions significantly, while maintaining the rice yields. Based

on a GIS with rice paddy distribution data, mitigation potential was estimated to have reached 32 %. Measurements of CH₄ fluxes from rice paddies and continuous monitoring of atmospheric CH₄ using a laser instrument were conducted along with the experiments in the adjacent fields, and they supported the examination of emission estimates.