

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

メタンの合理的排出削減に資する東アジアの起源別収支監視と
評価システムの構築

(2-1710)

平成 29 年度～令和元年度

Development of a Monitoring and Evaluation System of the Methane Budget for
Different Source Categories in East Asia toward Intended Emission Reduction

＜研究代表機関＞

国立研究開発法人国立環境研究所

＜研究分担機関＞

国立研究開発法人海洋研究開発機構

令和 2 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 陸域メタン放出量とその緩和効果の推定モデルに関する研究 （国立研究開発法人国立環境研究所）	13
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-2 地域スケールのメタン放出量推定精度向上のための観測研究 （国立研究開発法人国立環境研究所）	32
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-3 メタンの気候変動フィードバック効果に関する研究 （国立研究開発法人海洋研究開発機構）	50
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	 68
------------------	----------

I. 成果の概要

課題名 2-1710 メタンの合理的排出削減に資する東アジアの起源別収支監視と評価システムの構築

課題代表者名 伊藤 昭彦 (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
物質循環モデリング・解析研究室室長)

研究実施期間 平成 29～令和元年度

研究経費 (累計額) 131,328 千円

(平成 29 年度 : 44,518 千円、平成 30 年度 42,292 千円、令和元年度 : 44,518 千円)

本研究のキーワード 温室効果ガス、セクター別排出分布、地上観測、同位体比測定、排出インベントリ、メタン放出モデル、地球システムモデル、緩和シナリオ

研究体制

- (1) 陸域メタン放出量とその緩和効果の推定モデルに関する研究 (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (2) 地域スケールのメタン放出量推定精度向上のための観測研究 (国立研究開発法人国立環境研究所)
- (3) メタンの気候変動フィードバック効果に関する研究 (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)

COP21 で合意されたパリ協定の温度目標を達成するには、人為的な温室効果ガス排出量を大幅に削減する必要があり、各国では削減目標 (NDC) を設定して削減に取り組んでいる。その実効性や達成状況を検証するとともに、合理的な排出削減への道筋を示すことは、科学に課せられた大きな課題である。メタン (CH_4) は、二酸化炭素 (CO_2) に次ぐ放射強制力を持つ一方、大気中での平均滞留時間が 10 年程度と比較的短いため、大気化学反応においても重要な役割を果たす短寿命気候汚染物質 (SLCP) の 1 つとしても注目されている。大気中濃度は産業革命前の 2 倍以上に達しており、1990 年代までの増加から顕著な停滞期を経て、2007 年以降に再び急増するなど特徴的な変化を示しているが、その科学的な説明には結論がでておらず温室効果ガス動態において大きな不確実要因となっている。

CH_4 収支の定量的評価を難しくしている原因の 1 つに、主要な放出・吸収源だけで多岐にわたり、その空間分布が非常に不均質であることがあげられる。また、永久凍土やハイドレートからの突発的な放出、泥炭地火災からの大量放出など、時間変動も予測困難なものが含まれる。これらの現象を数理モデル化し、コンピュータ上で数値的に予測する試みも行われているが、その推定結果には大きな不確実性が残されている。また、将来の気候変動が自然・人為起源の CH_4 放出にどのような影響を与えるかも未知数である。このような CH_4 収支の理解不足と予測能力の欠如は、排出削減による温暖化緩和に対して深刻な不確実要因となる。 CH_4 に関する研究は、大気化学、生態学 (物質循環)、地球システムモデル、さらに対策を主とする農学・工学など多岐にわたる一方、それらの総合化は近年まで行われてこなかった。現在は、分析化学の進歩による同位体比の精密測定、人工衛星を用いた大気 CH_4 分布測定など、利用可能なデータが質量ともに飛躍的に高まり、起源や分布に関する理解を深化させる新たな段階に入りつつある。

近年の大気中 CH_4 増加の原因は、石炭や天然ガスなど化石燃料採掘時のリーク (漏出)、人口や食生活を反映した反芻動物 (牛、羊など家畜) の飼育増、廃棄物や交通など都市活動などが挙げられるが、それらの寄与を精確に把握することは容易ではない。東アジア地域は、人口や経済・産業活動の急速な成長に伴い世界でも放出増加が大きい地域の一つと考えられており、重点的な研究が必要とされている。現状を踏まえた上で、増加要因を抑制することが「合理的排出削減」には不可欠であり、そのための監視・評価手法を構築する必要がある。また、将来の排出シナリオを作成する場合にも、排出セクター別の増加率と技術的な削減ポテンシャルを考慮する必要がある。近年の技術的進歩は、 CH_4 の起源別

収支把握を可能としつつある。例えば、安定炭素同位体比の精密測定により、大気中濃度増加に対する、家畜などの微生物発酵と化石燃料採掘リークの寄与を分離推定することが可能となりつつある。

全球あるいは地域スケールの CH_4 収支把握に関する試みは、国際的な枠組みでも進められている。Global Carbon Project では CH_4 収支に関する複数手法による統合解析を行い、2 年に 1 回のペースでレポート論文を刊行している。また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）評価報告書にも、それらを含む成果を参照し全球の CH_4 収支に関する最新知見が記載されている。気候変動予測を行う地球システムモデルには、2000 年頃に CO_2 収支による気候フィードバックが導入されたが、 CH_4 収支による気候フィードバックの導入も世界の開発機関で進められている。これらの国際動向を踏まえ、東アジア地域のデータを集約した CH_4 収支評価を行い独自モデルによる予測を高度化することには、科学的貢献だけでなく、緩和策を主とする環境政策を講じる上で非常に大きな意義がある。

2. 研究開発目的

本課題では大きな CH_4 放出源をもつ東アジア（日本、中国、台湾、韓国、北朝鮮、モンゴルを含む陸域）陸域を主たる対象として、 CH_4 収支監視のための先端機器を用いた観測と詳細モデルによる評価の高精度化、社会経済シナリオに基づく将来の CH_4 放出量推定に関する研究を行う。パリ協定における各国の排出削減目標に対する科学的な根拠や検証材料を提供し、より効果的な CH_4 排出削減の道筋を示して、温暖化政策立案に寄与する事を目標とする。サブテーマ別の実施内容は以下の通りである。

サブテーマ 1：陸域の主要な自然放出源に関するモデルを開発し、人為放出インベントリ解析と組み合わせることでアジア地域の CH_4 収支に関する高精度なマップを作成して、社会経済シナリオに基づいて過去から将来の排出量変化を評価する。東アジア地域の湿原、水田、火災、家畜について陸域モデル VISIT における推定手法の高度化と、予備的な広域シミュレーションを行う。過去から将来について、気候変動や土地利用変化に伴う CH_4 収支変動のモデル推定を行う。

サブテーマ 2：東アジア CH_4 収支の変化を捉えられるサイトにおいて、大気中の CH_4 濃度、同位体比、および関連するトレーサー成分の観測を実施し、他成分を組み合わせた統合的なデータ解析によって地域 CH_4 収支の高精度化を図る。 CH_4 の発生源を推定するために、 CH_4 の炭素同位体比と炭化水素類を高精度に測定するシステムを構築する。同位体および炭化水素類の測定システムを確立すると共に、これらの大気観測を波照間ステーションにおいて開始する。同位体および炭化水素類の測定システムを確立すると共に、これらの大気観測を波照間ステーションにおいて開始し、 CH_4 排出量やその変化傾向を明らかにする。

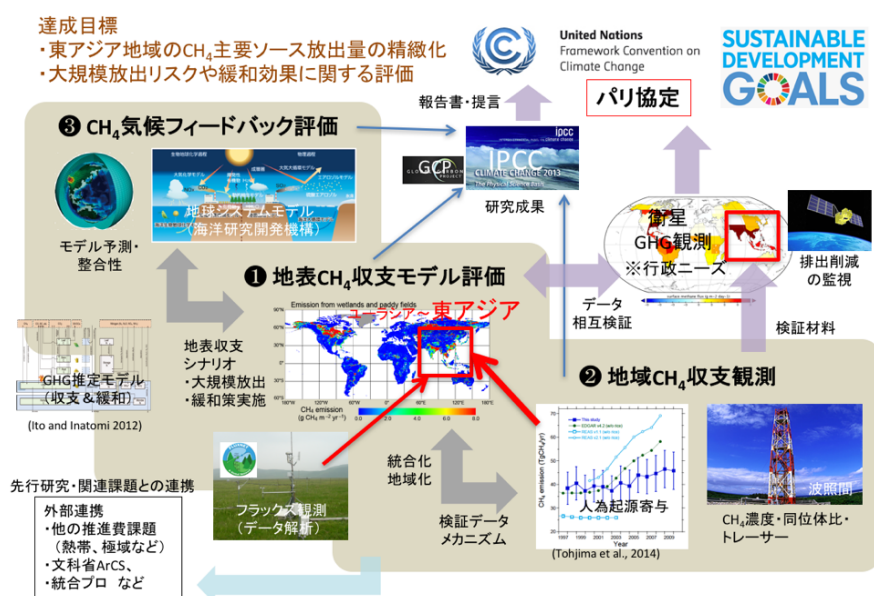


図 1 本課題の構成と期待されるアウトプットに関する概要

サブテーマ3：気候変動予測を行う地球システムモデルにCH₄循環スキームを組み込み、アジア陸域のCH₄収支変動（緩和策による削減や大規模放出イベント）が温暖化の進行に与える影響を評価する。大気中CH₄濃度や地表収支に関する過去～将来のシナリオ・データを精査し、現状とその情報源などをまとめる。大規模なCH₄放出イベントや緩和策実施による大気中CH₄濃度の低下がもたらす気候フィードバック（温度変化に伴いGHG放出量に変化することで温度変化を増幅または抑制する効果）を推定する。

本課題で評価された東アジア地域のCH₄収支は、パリ協定に代表される国地域別の排出削減を把握する科学的ベースとして提供される。また、温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）などリモートセンシングによる観測に基づくトップダウン的手法による評価に対して、独立した検証材料を提供することには大きな意義がある。さらに、温暖化予測に使用される地球システムモデルにCH₄動態とフィードバック効果を組み込むことで、温暖化予測の高度化に貢献する。

3. 研究開発の方法

本課題を構成する3サブテーマは緊密な連携を取りつつ事業を進めた。サブテーマ1と2の間ではボトムアップ評価結果及び観測データを共有して検証を実行し、サブテーマ1と3の間では湿原メタン放出を推定するモデル開発を共同で進めた。得られた知見を3サブテーマで分析し、科学的理解を深めるとともに政策貢献を向上させるための検討を行った。

（1）陸域メタン放出量とその緩和効果の推定モデルに関する研究

サブテーマ1では、人為排出インベントリ、地表状況のリモセンデータ、物質循環モデルを用いるボトムアップ的手法によって東アジア地域におけるCH₄の吸収排出量評価を行った。陸域におけるCH₄放出・吸収のうち、自然起源は湿原、シロアリ、野外火災、地質学的放出（火山や断層からの漏出）、土壌酸化、人為起源は化石燃料採掘、都市・工業活動、廃棄物、農地土壌、家畜を対象とした。湿原および土壌酸化については、物質循環モデル（VISIT）を使用し、高分解能な湿原マップに基づいて放出量の推定を行った。人為排出については、2019年にリリースされた新しいインベントリであるEDGAR5.0を使用した。対象期間は1990年から2015年（可能ならそれ以降も）であり、それぞれ空間分解能0.25度×0.25度の広域マップを作成し国・地域スケールの集計を行った。評価結果の不確実性を検討するため、他の人為排出インベントリや観測ベースの湿原放出データとの比較や、GOSAT衛星観測による逆推定で推定された地表CH₄収支との比較も実施した。合計放出が大きい国地域の分布、起源別の寄与率、経年的な変動傾向などを分析した。

東アジアの主要なCH₄放出源の1つである水田については、最近の衛星データ（Sentinel-1および2）による高分解能マップを新たに開発し推定精度の向上を図った。サブテーマ2で実施されているCH₄の安定炭素同位体比分析に対応して、モデル計算結果に基づいて、湿原由来CH₄の安定炭素同位体比の推定を試みた。また、水田の水管理による緩和効果を推定するためのモデル計算を実施した。将来の可能な排出削減幅を評価するため、社会経済的シナリオSSP/RCPにおける人為放出量を確認した後、セクター別の排出削減ポテンシャルに基づくシナリオに関する検討を行った。

（2）地域スケールのメタン放出量推定精度向上のための観測研究

サブテーマ2では、東アジア地域のCH₄排出源の観測に適した沖縄県の波照間ステーションで大気観測を実施し、CH₄の起源別放出の精度向上に資する観測データの取得および観測データとモデル計算を組み合わせた総合的な解析を行った。具体的な実施項目の研究方法を以下に記載する。

1) 大気中CH₄濃度の短期変動成分の解析

波照間ステーションにおける大気中CH₄濃度の連続観測を継続し、その観測データから長期変動や季節変動を除去して短期変動成分を抽出した。同様の解析を短期変動の比較を行うCO₂の観測データについても行った。続いて、ラグランジュ型の大気輸送モデル（LPDM）を利用して波照間ステーションでのフットプリント計算を1996年11月から2019年3月までの期間について3時間間隔で実施した。これを東アジア地域のフラックスと組み合わせることで、波照間ステーションにおけるCH₄と

CO₂の濃度変動を計算した。ここで用いたCH₄フラックスは、サブテーマ1で開発した東アジアのメタンフラックス（Ito2019A）である。ただし、このフラックスの水田放出を放出インベントリ EDGAR v. 4.3.2の水田放出に置き換えたCH₄フラックス（Ito2019B）も用意した。また、CO₂については、全球大気輸送モデルを用いた逆推定にもとづくCO₂フラックスを使用した。

2) CH₄の安定炭素同位体比の測定システムの構築とデータ解析

同位体比質量分析計を購入し、独自に開発した前処理装置と組み合わせて安定炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）の高精度測定システムを構築した。実験部品の適切な選定、大気試料からのCH₄濃縮の様々な予備試験による実験条件の最適化、標準ガスの入手などを実施し、最終的に液体窒素などの冷媒を使用しない画期的なCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ の分析システムとして、大気試料分析に十分な測定精度（0.1‰）を達成した。世界各国の研究グループとの相互比較を含めて開発に関連した技術情報を Umezawa et al. (2018)として、また本研究で開発した測定システムの技術情報を Umezawa et al. (2020)として公表済みである。また、波照間ステーションでの高濃度イベント時に採取される空気試料について分析する体制を整えるとともに、独自に開発した小型の大気試料サンプリングシステムを波照間ステーションに設置して試料採取と分析を実施した。これらにより取得される $\delta^{13}\text{C}$ の観測データをCH₄の高濃度イベント別に解析し、CH₄フラックス（Ito2019A）とLPDMによるモデル計算を組み合わせ、CH₄放出の起源別寄与率の評価を行った。

3) 炭化水素類測定システムの構築

ハロカーボン類のモニタリング用に開発された既存の大気濃縮装置/ガスクロマトグラフ/質量分析計（大気濃縮/GC/MS）をもとに炭化水素類の準連続観測実施のための装置改修と測定条件等の検討を行った。最適化を行い、装置の直線性や再現性が良好であることを確認するとともに、炭化水素類の標準ガスを整備した。このようにして炭化水素（エタンおよびプロパン）の観測システムを確立し、波照間ステーションにおける準連続観測を実施した。炭化水素とCH₄の観測データの相関解析や放出比の検討、LPDMによるモデル計算との比較を行い、CH₄の化石燃料放出の寄与率の評価を行った。

（3）メタンの気候変動フィードバック効果に関する研究

サブテーマ3では、CH₄がフィードバック過程を介して温暖化進行にどのような影響もたらしかるのかを調べるための、CH₄に関わる温暖化予測モデルの改良・開発、および温暖化シミュレーションとその解析、および東アジアを中心としたアジア域のCH₄収支との関わりについて議論を行った。具体的な研究方法を以下に記載する。

1) シナリオに基づくフィードバック効果の評価1：メタン濃度緩和

大気CH₄濃度の緩和が将来の温暖化進行をどの程度抑制しうるのかを調査するため、IPCC-AR5世代の地球システムモデル（温暖化予測モデル）と予測シナリオを用いたCH₄濃度緩和実験を実施した。ただし大気化学過程は解いておらず、CH₄濃度は所与のものとしてモデル入力値とする。将来予測実験に使用したシナリオはRepresentative Concentration Pathways（RCP）である。CH₄の大気中濃度緩和の影響を調べるため、以下2種類の実験を実施した。（1）通常のRCP8.5シナリオ実験、すなわち全ての温室効果ガス/エアロゾルの濃度/排出量等を、RCP8.5シナリオのものをそのまま使用する実験、（2）上の実験（1）のうち、大気CH₄濃度のみをRCP2.6のものに差し替えた予測実験、の2つである。これら2つの実験を組み合わせることにより、大気CH₄濃度緩和による温暖化進行の抑制を評価した。

2) シナリオに基づくフィードバック効果の評価2：温暖化と湿地メタン放出

将来のCH₄収支と温暖化進行の関係を考える上で、人為起源排出の将来動向は重要であるが、これに加え、自然起源のCH₄放出源が気候との相互作用関係を通じてどのように変化するかについても科学的知見が不足している。そこで、自然起源最大の放出源である湿地CH₄放出が、温暖化進行にともなってどのように変化するかを調べた。IPCC-AR6世代の最新地球システムモデルにサブテーマ1と協力して湿地CH₄放出スキームを導入し、2種の数値実験を行った。一つは理想化された感度実験で、大気CO₂濃度を瞬時に倍増させ、これによって生じた温暖化が、将来湿地CH₄の放出をどのように変

えるのかを調べる実験である。もう一つは、最新将来シナリオ Shared Socio-Economic Pathways (SSP)を用いたシナリオ実験である。ここでは、最も温暖化進行が大きい世界を想定している SSP5-8.5 シナリオを用いた。両実験ともに、湿地 CH₄ 放出に関するフィードバック過程を切り分けるため、大気 CO₂ 濃度および CH₄ 濃度は所与のものとしてモデルに与えている。

3) 大規模メタン放出による温暖化評価

短期間に大規模 CH₄ 放出イベントが生じた際、どの程度の温暖化が生じるのかを調査するため、CH₄ 放出量に基づいて将来の CH₄ 濃度と温暖化を予測することが可能な新たな地球システムモデルを開発し、大規模 CH₄ 放出イベントを想定した実験を行った。この新しいモデルでは、上の「2)シナリオに基づくフィードバック効果の評価 2：温暖化と湿地メタン放出」で改良を加えた地球システムモデルに対し、さらに大気化学反応・輸送サブモデルを結合し、全球気候-CH₄循環-炭素循環過程を包括的に解くことができるようになっている。これを用い、既往研究の推定値に基づく 5000 Tg CH₄ (1 Tg = 10¹² g) の大規模 CH₄ 放出を計算開始 1 年目に強制的に与える、という理想化実験を実施した。

4) 温暖化予測シナリオにおける東アジアの人為起源メタン排出の寄与

今後の CH₄ 濃度/人為排出量緩和を目指す上で、東アジア域の人為 CH₄ 排出量が予測シナリオ内でどのように想定されているのかを調査するため、世界の温暖化予測等で汎用的に用いられている予測シナリオ SSPs を解析し、東アジアを中心としたアジア域の人為 CH₄ 排出量の取り扱いを調べた。ここでは計 8 つの SSP シナリオを解析し、全球人為 CH₄ 排出に対する東アジア域の占める割合等を調べた。

4. 結果及び考察

課題全体について計画通りに内容が実施され、東アジア地域の CH₄ 収支をボトムアップ的手法や地上での大気観測に基づく手法によって起源別に明らかにするという研究目的を十分に満たす成果を挙げることができた。地球システムモデルやオフラインの CH₄ 放出モデルを開発利用することで、この地域の CH₄ 収支変動がもたらしうる気候フィードバック、ひいてはパリ協定など排出削減の実効性に関する重要な知見を得ることができた。計画達成状況は下表のようにまとめられる (○：達成)。

	H29	H30	H31/R1
サブ1	○ 排出インベントリと放出モデルの現状分析 ○ 推定精度の検討	○ 放出の広域シミュレーション ○ 排出寄与率推定と整合性 ○ 湿原スキームの改良	○ 放出変化の数値実験 ○ 地域収支の統合評価 ○ シナリオ開発と対策評価
サブ2	○ CH ₄ 同位体と炭化水素類の測定システム構築	○ 波照間ステーションでの大気成分観測 ○ 炭化水素類の準連続観測 ○ 同位体観測開始	○ 観測の継続 ○ 各種観測に基づく総合的解析
サブ3	○ 地球システムモデルにおけるCH ₄ の扱い精査 ○ データの利用方針検討	○ 予測計算のセットアップ ○ 湿原スキームの改良	○ オンライン実験の実施 ○ シナリオに基づくフィードバック効果の評価

(1) 陸域メタン放出量とその緩和効果の推定モデルに関する研究

サブテーマ 1 の目的としたボトムアップ的手法による東アジア地域の CH₄ 収支評価とマッピングが計画通りに実施され、それを踏まえて将来の排出削減シナリオの検討が行われた。自然起源については湿原放出や土壌酸化を地域スケールで評価するモデルを開発した。その成果を他サブテーマとともに検討し、学術論文 (Ito et al., 2019) として発表するなど、研究計画を着実に遂行して成果につなげた。具体的には以下のような成果が得られた。ボトムアップ的な手法により、東アジア地域の自然+人為起源を含めた合計の放出量は 68 Tg CH₄ yr⁻¹と推定された (2000-2015 年の平均)。そのうち人為起源は 87.5%を占め、化石燃料採掘に伴う放出が最大の放出源であった (図 2)。水田や家畜飼育の寄与が大きい中国中部、都市活動や廃棄物の寄与が大きい大都市域、そして炭鉱など化石燃料採掘地点が放出強度の大きい領域となっていた。1990 年以降の変動では、2001 年までは年間 60 Tg CH₄ yr⁻¹の放出でほぼ一定していたが、2002 年以降は明らかに増加し 2013 年には 80 Tg CH₄ yr⁻¹に達していた。湿原などの自然起源放出には気象条件に起因する年々変動が見られたが、人為起源で見られたような 10 年を超えるスケールでの変動は見られなかった。2010 年および 2015 年については月

別の収支評価が可能であり、2010年には農業・家畜起源の放出が3月にピークを持つなど不自然な点が見られたが、2015年の新しいインベントリでは改良が施されていた。その原因は人為排出インベントリであるEDGARにおいて東アジア地域の農業活動の季節性が正しく考慮されていないためと推察された。新しい高分解能水田マップの開発に成功し、農業起源放出の推定高度化を図った。観測データや他モデルとの比較により、湿原に代表される自然起源の推定結果は妥当な範囲にあることが確認された。GOSAT 観測による逆推定結果（L4a）との比較は、総放出の空間分布や経年変動パターンが概ねボトムアップ手法で妥当に把握されていることを示唆していた。

将来の東アジア（特に日本と中国）の排出量は、対策を講じない場合は2050年までに83 Tg CH₄ yr⁻¹前後まで増加すると推定されたが、削減技術（水管理などによる水田放出の抑制含む）を最大限活用することにより31 Tg CH₄ yr⁻¹まで抑制可能であることが示された。温暖化研究で使用されているSSPでは、SSP5以外は日本の人為CH₄排出は減少方向に向かっていた。しかし、どのシナリオでも単位GDPあたりの排出量を相当程度に削減しないと、パリ協定の削減目標である2030年までのNDCを確実に達成することは困難であることも示された。

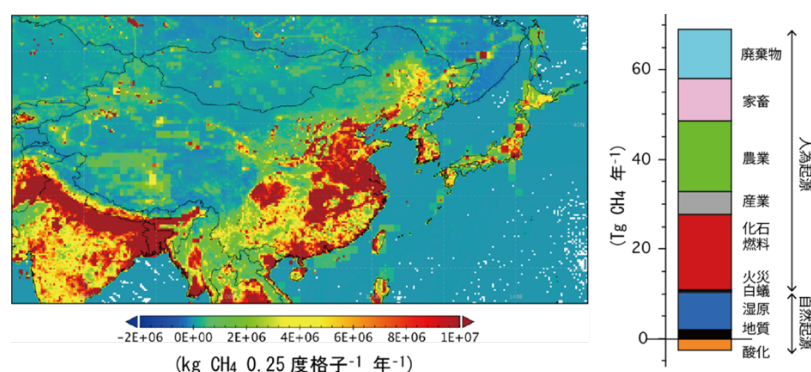


図2 ボトムアップ的手法で推定されたCH₄放出・吸収の分布とその内訳。2000-2015年の平均を示し、内訳は陸域部分のみの集計に基づく。

(2) 地域スケールのメタン放出量推定精度向上のための観測研究

サブテーマ2の研究計画で設定した通り、大気中CH₄の安定炭素同位体比やCO₂および炭化水素類など連動成分を測定する最先端のシステムを開発した。波照間ステーションでの大気成分に関する測定を行い、そのデータを用いて放出起源の推定を行った。さらに、サブテーマ1で推定された東アジア地域のCH₄収支における時空間変動と大気観測結果との整合性を調べることで、CH₄収支の妥当性を考察するなど、研究計画の内容を着実に実施した。具体的には以下のような成果が得られた。波照間ステーションにおいて大気成分の観測を行ったところ、CH₄とCO₂の短期変動には正の相関関係が認められた。そこで、CH₄とCO₂の短期変動の冬期間(11月から3月)の比($\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$)を計算し、1996年11月から2019年3月までの経年変化を計算した。観測結果によれば、 $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ は経年減少傾向を示すが、これは主に中国における化石燃料起源のCO₂放出が増加したことでCO₂の変動がCH₄に対して相対的に大きくなったためと考えられる。この結果を、上述の二つのCH₄フラックス(Ito2019AとIto2019B)を用いたモデル計算の結果と比べたところ、Ito2019Aを用いると観測による変化傾向をほぼ再現できる一方で、Ito2019Bを用いた場合は全期間を通じて観測結果を上回る結果となった。これはIto2019Bのフラックスが放出量を過大評価している可能性を示唆している。二つのフラックスの違いを考慮すると、水田からの放出推定量についてIto2019Aの方が現実の変化を反映している可能性がある。続いて、 $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ の観測結果を再現するように、波照間ステーションの有効フットプリント領域に当たる中国のCH₄フラックスを最適化させたところ、その放出量の経年変化はIto2019Aとよく一致した。中国の人為起源CH₄の放出量が2003年以降の急増したことおよび2010年以降にその増加が鈍化したことが示されており、本研究の観測結果はこれと整合的である。さらに、 $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ の季節変動についても調べたところ、中国起源の解析が難しい夏期を除き、Ito2019Aを用いた計算結果が観測結果を良く再現する一方で、Ito2019Bを用いた計算結果は2月から4月にかけて観測より大きい値

を示した。これは Ito2019B に用いた EDGAR v. 4. 3. 2 の水田フラックスが現実を反映していない可能性を示している。

波照間ステーションにおいて、2017 年 1 月から 2020 年 1 月までに出現した計 19 の汚染イベント時の大気試料について $\delta^{13}\text{C}$ の分析を行った。これらの汚染イベントの中には、 CH_4 濃度の増加に合わせて $\delta^{13}\text{C}$ が増加したイベントがあった。中国の化石燃料起源の CH_4 放出の $\delta^{13}\text{C}$ を変化させる感度実験を LPDM によるモデル計算で行ったところ、波照間ステーションにおける $\delta^{13}\text{C}$ の増加イベントを再現するためには、中国の化石燃料起源の CH_4 放出の $\delta^{13}\text{C}$ が世界の他の地域に比べて高い値でなければいけないことがわかった。これは先行研究による CH_4 放出源のデータベースと整合する結果である。また、全ての汚染イベントについて、観測された CH_4 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の関係から放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の値を推定したところ、 -37.8‰ から -57.9‰ の値が得られた。これは、汚染イベント時に波照間ステーションに到達した空気塊に寄与した様々な放出源が混合した平均的な値と考えられる。続いて、LPDM のモデル計算にもとづいて汚染イベント毎のカテゴリ別の放出源の寄与率を計算し（図 3）、LPDM のモデル計算による放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の値も推定したところ、観測からの推定値に比べてやや低い値を示した。この結果は、モデル計算に用いた CH_4 フラックス（Ito2019A）のうち、比較的高い $\delta^{13}\text{C}$ を持つ化石燃料関連の放出が過小評価であるか、あるいは、比較的低い $\delta^{13}\text{C}$ を持つ農業や廃棄物関連の放出が過大評価である可能性を示唆している。

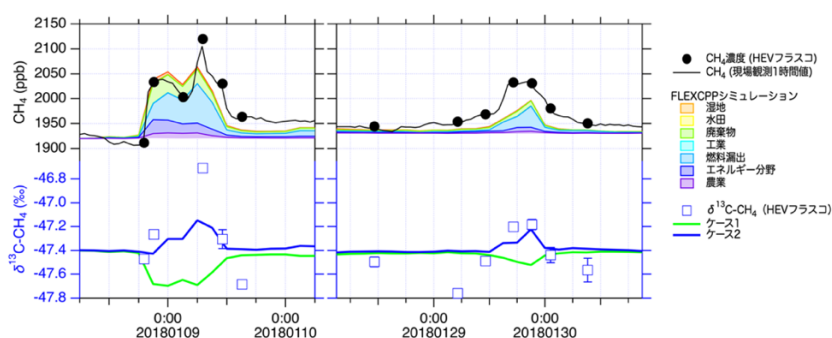


図 3 波照間ステーションで観測された汚染イベント時の CH_4 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の変動の例

波照間ステーションで観測された CH_4 濃度と C_2H_6 濃度には季節変動があり、両者とも冬期に高く夏期に低い濃度を示した。このようなベースライン変動を除去して短期変動 (ΔCH_4 と $\Delta\text{C}_2\text{H}_6$) を調べたところ、両者は高い相関を示し、その比 ($\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$) は冬期に大きくなる傾向が見られた。これは両者が共通した放出源を持ち、両者の放出比が大きい化石燃料起源の放出源の影響が冬期に強まることを示している。続いて、観測された汚染イベント毎に $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ と $\Delta\text{C}_3\text{H}_8/\Delta\text{CH}_4$ を計算し、これらを化石燃料放出源のデータベースで報告されている放出比と比較した。その結果、 C_2H_6 についてはデータベースの放出比が観測結果と整合的であった。そこで、 $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ を指標として各汚染イベントの化石燃料放出源の寄与率を推定し、これを LPDM のモデル計算で推定される寄与率と比較した。その結果、モデル計算による化石燃料放出源の寄与率は観測結果から得られる寄与率と比べて低い傾向があった。観測結果にもとづく推定結果の不確実性も大きいと考えられるが、モデル計算に用いた CH_4 フラックス（Ito2019A）において化石燃料起源の CH_4 放出を過小評価している可能性が示唆された。

(3) メタンの気候変動フィードバック効果に関する研究

サブテーマ 3 では、研究計画に沿って地球システムモデルに陸域の CH_4 循環スキームを導入し、 CH_4 循環に伴う気候フィードバックに関するシミュレーション解析を実施した。特にサブテーマ 1 とは緊密に連携し、 CH_4 循環スキームの一部を共有するなどにより効率的に研究開発を実施した。 CH_4 削減や大規模放出に関する数値実験を行い、他サブテーマとともに分析することで研究計画の内容を完遂した。より具体的成果を以下に説明する。

1) シナリオに基づくフィードバック効果の評価1：メタン濃度緩和

RCP シナリオのうち、最も放射強制力のレベルが高い RCP8.5 シナリオでは、2100 年までにその大気 CH_4 濃度が 3750 ppb まで増加する。本シナリオを用いて温暖化予測実験を行うと、2006 年から 2100 年までの全球気温の上昇は約 $+5.4^\circ\text{C}$ となった(他の温室効果ガス等の影響も含む)。一方、 CH_4 濃度だけを RCP2.6 シナリオ(大気 CH_4 濃度が 1250 ppb まで緩和される)に差し替えた実験では、2100 年までの全球気温の上昇は約 $+4.8^\circ\text{C}$ に抑制され、約 0.6°C の冷却効果をもたらしていた(図 4)。さらに、この温暖化緩和により陸域および海洋の C シンクが合わせて $+60 \text{ Pg C}$ 強化されていることがわかった。これは、 CH_4 濃度緩和が放射強制力を低下させるという直接的な効果を持つだけでなく、気候-炭素循環フィードバックを介してさらなる気候緩和作用を持ちうることを示唆する。本実験では、これら海陸の炭素シンクの強化が大気 CO_2 濃度および全球平均気温に影響を与えない設定であったが、この海陸炭素シンク強化によるさらなる冷却効果を試算したところ -0.24°C という値になり、海陸の C シンク強化を介した冷却効果も見逃すことができないという示唆が得られた。ただしこの見積もりは、モデル内での気候や炭素循環フィードバックの強度に大きく左右されることに注意する必要がある。

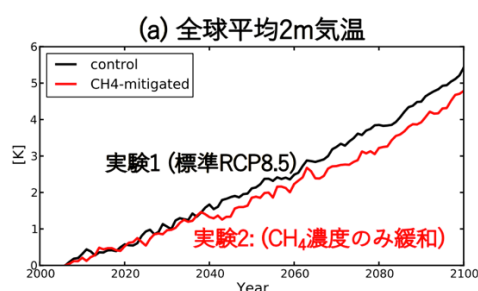


図 4 CH_4 濃度抑制(緩和)実験における温度変化

2) シナリオに基づくフィードバック効果の評価2：温暖化と湿地メタン放出

既存の地球システムモデルに対して湿地 CH_4 放出スキームを組み込み、産業革命以前の状態から瞬時に大気 CO_2 濃度を倍増させる理想化感度実験を行ったところ、特に湿地 CH_4 放出のホットスポットにおいてその放出量が強く増加し、温暖化は湿地 CH_4 放出に拍車をかける(気温-湿地 CH_4 放出過程は正のフィードバック関係がある)という結果が得られた。さらに本モデルを用いて SSP5-8.5 シナリオに基づく温暖化予測実験を行ったところ、全球の湿地 CH_4 放出は 21 世紀以降の温暖化にともなって増幅し、2100 年には $340 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ に至った(産業革命以前の状態から 1.86 倍)。土壌内での CH_4 生成速度は土壌温度および水分に強く依存するが、本モデルでは、特に土壌温度への感度がこの温暖化時増幅において重要であると推察された。温暖化による全球湿地 CH_4 の増幅効果(フィードバック)の感度は、 $37 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ となり、仮に全球平均気温が 5°C 上昇すると、産業革命以前での湿地 CH_4 放出量($160 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$)からほぼ倍増する。これに対し、東アジアを中心とするアジア域($65\sim 150^\circ \text{ E}$ 、 $15\sim 55^\circ \text{ N}$)では、産業革命前からの湿地 CH_4 放出の増加は 1.57 倍と、全球スケールでの増加割合に比べて小さい。その結果、アジア域での全球湿地 CH_4 の増幅効果(フィードバック)は $3.6 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ となり、全球への寄与は約 1/10 程度であると推定された。東アジア域における現状 CH_4 収支解析において、同地域では湿地由来の CH_4 フラックスが占める割合が大きいことが示されており(Ito et al., 2019)、本温暖化実験においても、同地域では人為 CH_4 排出が相対的に重要性であることを示唆する結果となった。

3) 大規模メタン放出による温暖化評価

上で開発した地球システムモデルに対してさらに大気化学反応・輸送モデルを結合し、 CH_4 エミッションに基づく気候-炭素循環- CH_4 循環予測を行うことのできる新たなモデルを開発した。本モデルを用い、大規模 CH_4 放出イベントを想定した実験(5000 Tg CH_4 を計算開始 1 年目に与える理想化された実験)を行ったところ、大気 CH_4 濃度は最大で約 2500 ppb まで上昇した。その結果、全球平均気温は最大で $+0.5^\circ\text{C}$ に達し、同等の CH_4 放出量を想定した既往研究の温暖化見積もり(最大で $0.23\sim 0.26^\circ\text{C}$ 程度)よりも大きい結果となった。このような既往研究との違いは、 5000 Tg CH_4 の放出を瞬時に(1 年間で)与えていることによると考えられる。その後大気 CH_4 濃度は、大気シンク等の一時的増強(大気シンクは

最大で約 $480 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ まで増加)により次第に低下した。また上に述べたように、温暖化進行により CH_4 放出が促進されうるが、本実験での全球平均気温の上昇は $+0.5^\circ\text{C}$ 程度であるため、湿地 CH_4 放出量が大きく増加することはなかった(最大で約 $+14 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$)。ただし、土壤中 CH_4 生成は温度増加に対して指数関数的な応答を示すため、他の温室効果ガス濃度変動に由来する昇温効果が加味されるとこの放出量はさらに増える可能性がある。さらに、上に述べたとおり、大気 CH_4 濃度の増加は温暖化を介して海陸 CO_2 シンクを低下させる効果も有しており、この効果を加味すると 5000 Tg CH_4 の CH_4 排出を与えたときの $+0.5^\circ\text{C}$ という昇温は、さらに大きくなる可能性がある。

4) 温暖化予測シナリオにおける東アジアの人為起源メタン排出の寄与

温暖化予測シナリオ SSPs における将来の人為 CH_4 排出において、東アジアを中心としたアジア域の将来人為排出がどのように見込まれているのかについて調査した。将来(2015 年以降)の人為 CH_4 排出量はシナリオによって大きく傾向が異なっており、緩和・適応が取られない世界観を持つ SSP3-7.0 シナリオの人為排出量が最大であった(2100 年では現在の排出レベルのおよそ 2 倍)。他の 3 シナリオ(SSP4-6.0, SSP5-8.5, SSP3-3.4)ではおおそ現在と同レベル、さらに温室効果ガス排出の強い緩和が想定されている他の 4 シナリオ(SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-3.4)では人為 CH_4 排出は大きく削減される。注目すべき点は、ベースラインシナリオである SSP3-7.0 を除き、全てのシナリオにおいてアジア域の人為排出量の削減が見込まれている点である。東アジアを中心としたアジア域では農業や汚泥といった人口に依存する人為 CH_4 排出が大きく、同地域における将来の人口動態の重要性を示唆する。さらに、ベースラインシナリオ(SSP3-7.0)および強い緩和・適応策が想定されるシナリオ(SSP1-1.9 等)いずれにおいても、全球人為排出に占めるアジア域の割合は大きく、現在の CH_4 収支のみならず将来においても、同地域の強い影響が見込まれていることが本シナリオ解析から明らかになった。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

過去の放射強制力において CO_2 に次ぐ寄与を持つ CH_4 について、地域スケール収支評価を高精度化する手法を構築し、東アジア地域の CH_4 収支を解明した。 CH_4 は大気中での寿命が 10 年程度と短いため、2030~2050 年の短中期的な排出削減において有用である。特に、温暖化研究で想定されるオーバーシュートシナリオのように、大気中の温室効果ガスを正味削減する場合、 CO_2 や N_2O では大気からの直接回収が必要なのにに対し、 CH_4 は排出削減から濃度低下に比較的導きやすく、緩和策の対象として重要度が増す可能性が高い。

重要な CH_4 放出源と考えられてきた東アジア地域について、サブテーマ 1 は独自のモデル開発を含むボトムアップ手法により、自然起源と人為起源の両方について収支を評価した。このような統合的かつ詳細な評価は欧米を含め他地域でもほとんど行われておらず、他地域にも適用可能な一般性を持つ手法を確立し、新規性の高い独自の成果を得ることができた。それにより CH_4 放出のホットスポットを特定し、大気中濃度変動に対する東アジア放出源の寄与など、科学的な問題の解決につながるものが期待される。新たに開発された空間詳細な収支マップから、特に放出が大きい領域、人為起源の寄与が高い領域、時間変動が顕著な領域を特定し、GOSAT などの衛星を含む観測の重点化に寄与する成果をもたらした。

サブテーマ 2 は波照間サイトでの連続観測やイベントサンプリングにより、東アジア地域における収支変動の特徴を捉え、広い空間代表性を持つ科学的に貴重なデータを取得した。 CH_4 の安定同位体比を高精度で測定可能なシステムは国内外で希少であり、本課題でそれを新たに構築したことは特筆すべき成果である。大気中濃度変動、安定同位体比、エタン (C_2H_6) などトレーサー成分の分析、大気輸送モデル LPDM を用いた解析を行うことで、観測データから科学的レベルの高い知見を得た。その中には、サブテーマ 1 のボトムアップ手法による収支評価に対する、起源別の寄与や季節変動に関する独立した検証材料の提供も含まれる。

サブテーマ 3 による、地球システムモデルへの湿原 CH_4 スキームの組込と、それを用いた気候フィードバック効果に関する分析は、世界的にも希少な取り組みである。 CH_4 動態を扱えるモデルが少な

いことに加え、既往研究による結果は一貫性を欠いているため、本課題により信頼性の高いモデル推定結果を与えた意義は大きい。また、CH₄削減が陸域・海洋によるCO₂吸収を促す効果や、大規模放出シミュレーションなど、地球システムモデルの特性を活かして未解明の現象・メカニズムの発見につながる発展性のある成果が得られた。

本課題では東アジアに着目したが、CH₄収支の地域性は大きく、本課題で扱わなかった地域（東南アジア・南アジア、高緯度域）や手法に関する研究も行われている。そこで、2019年の日本気象学会秋季大会において専門分科会「複数手法による大気中メタン動態の把握と予測」（コンビーナ：伊藤昭彦、梅澤拓、羽島知洋、齋藤尚子、プラビール・パトラ）を開催し、15件の研究発表を集めてCH₄研究の最新動向に関する情報交換や共通課題の検討を行った。

（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＞

本課題により、温室効果ガスおよびSLCPとして注目されるCH₄収支に関する理解が大きく深化し、重点課題（温暖化に関する現象解明、緩和策に関する研究）や行政ニーズに資する科学的成果をもたらした。東アジア地域のCH₄収支を、リモートセンシング手法を補完するボトムアップの手法で詳細に把握し、その成果を論文として刊行・公表（報道機関へのプレスリリース）した。空間代表性が高いサイトで大気中濃度と同位体比・トレーサー成分を観測することにより、行政での利活用に耐えられるよう推定結果の信頼性向上を図った。さらに、将来の排出削減検討に資するよう、現在の排出状況と技術的な妥当性を考慮した将来のCH₄排出シナリオの試作と検討を行った。

東アジア地域は、全世界の人為起源放出量のうち20%程度を占めると考えられる重要な放出源であり、その地域のCH₄放出・吸収をセクター別に、空間分布を含めて解明した意義は非常に大きい。石炭など化石燃料採掘に伴う放出の増加が指摘されていたが、本課題でもそれを支持する結果が得られており、今後の排出削減・緩和の対象とすべき排出源の絞り込みに有用な成果をもたらした。高分解能な水田のマッピングは、CH₄放出量の評価だけでなく、食料生産・水収支・生物多様性など様々な目的での応用が可能である。

本課題参画者はGlobal Carbon Projectが実施するグローバルなCH₄収支統合解析に協力しており、2016年に続いて2020年刊行予定の成果論文（Saunois et al., under review）にも共著者として名を連ねている。本課題で行われたCH₄関連研究の成果は、独立した論文としてだけでなくGlobal Carbon Projectへの貢献を介して、IPCC第6次評価報告書への成果インプットが期待される。温室効果ガスの全球動態解明に寄与することで、科学的な裏付けのある温暖化対策に貢献する。さらに、本課題においてCH₄動態を組み込んだ地球システムモデルは、世界でも先端的なCH₄収支による温暖化フィードバック効果を導入することで大幅な高度化が行われた。これにより次期以降のIPCC評価報告書に温暖化予測成果を提供し、独自の貢献を果たすことが期待される。

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) T. UMEZAWA, C. A. M. BRENNINKMEIJER, T. RÖCKMANN, C. VAN DER VEEN, S. C. TYLER, R. FUJITA, S. MORIMOTO, S. AOKI, T. SOWERS, J. SCHMITT, M. BOCK, J. BECK, H. FISCHER, S. E. MICHEL, B. H. VAUGHN, J. B. MILLER, J. W. C. WHITE, G. BRAILSFORD, H. SCHAEFER, P. SPERLICH, W. A. BRAND, M. ROTHE, T. BLUNIER, D. LOWRY, R. E. FISHER, E. G. NISBET, A. L. RICE, P. BERGAMASCHI, C. VEIDT AND I. LEVIN: Atmospheric Measurement Techniques, 11, 1207-1231, doi:10.5194/amt-11-1207-2018 (2018), Interlaboratory comparisons of $\delta^{13}\text{C}$ and

δD measurements of atmospheric CH_4 for combined use of data sets from different laboratories

- 2) A. ITO, Y. TOHJIMA, T. SAITO, T. UMEZAWA, T. HAJIMA, R. HIRATA, M. SAITO, and Y. TERAOKA: Science of the Total Environment, 676, 40-52 (2019), Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation.
- 3) A. ITO: Polar Science, 21, 26-36 (2019), Methane emission from pan-Arctic natural wetlands estimated using a process-based model, 1901-2016
- 4) G. WONG, R. HIRATA, T. HIRANO, F. KIEW, E.B. AERIES, K.K. MUSIN, J.W. WAILI, K.S. LO, and L. MELLING: Agricultural and Forest Meteorology, 282/283, 107869 (2020) How do land use practices affect methane emissions from tropical peat ecosystems?
- 5) T. UMEZAWA, S. J. ANDREWS, and T. SAITO: Journal of the Meteorological Society of Japan, 98(1), 115-127, doi:10.2151/jmsj.2020-007 (2020), A cryogen-free automated measurement system of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane.
- 6) S. INOUE, A. ITO, C. YONEZAWA: Remote Sensing, 12, 1622 (2020), Mapping paddy fields in Japan by using a Sentinel-1 SAR time series supplemented by Sentinel-2 images on Google Earth Engine

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 伊藤昭彦、米国地球物理大会連合2017年秋季大会 (2017)
“Evaluation of CH_4 and N_2O budget of natural ecosystems and croplands in Asia with a process-based model”
- 2) 伊藤昭彦、日本農業気象学会2018年大会 (2018)
「東アジア陸域におけるメタンフラックスのモデル推定と地域収支評価」
- 3) 伊藤昭彦、JapanFlux 10周年記念集会 (2018)
「パリ協定に向けた陸域生態系モデルによる温室効果ガス収支評価」
- 4) 伊藤昭彦、日本森林学会129回大会 (2018)
「東アジア森林生態系における温室効果ガス収支の長期変動に関するモデル解析」
- 5) 伊藤昭彦、日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018)
「東アジア地域におけるメタン収支の統合的評価に向けて」
- 6) 遠嶋康徳、曾継業、白井知子、勝又啓一、町田敏暢：日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018)
波照間における大気 CH_4 の観測から推定された中国からの CH_4 放出量の継続的な増加
- 7) 遠嶋康徳、曾継業、白井知子、勝又啓一、伊藤昭彦、笹川基樹、町田敏暢：日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019)
波照間で観測される大気中 CH_4 の短期変動の季節性と東アジア地域からの放出量との関係
- 8) Umezawa, T., and T. Saito: 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019)
A cryogen-free automated measurement system of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane
- 9) Umezawa, T., S. Andrews, and T. Saito: The 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2019) (2019)
A cryogen-free automated measurement system of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane
- 10) Sperlich, P., G. Brailsford, R. Moss, T. Bromley, S. Gray, R. Martin, H. Moossen, M. Rothe, W. Brand, S. Englund-Mitchell, B. Vaughn, J. White, T. Umezawa, T. Röckmann, E. Popa, E. Nisbet, R. Fisher, and D. Lowry: The 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2019) (2019)

Strategies to assess and reduce current inter-laboratory differences in $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ and $\delta^2\text{H}\text{-CH}_4$ measurements in air samples

- 11) 伊藤昭彦, 遠嶋康徳, 羽島知洋, 斉藤拓也, 梅澤拓, 平田竜一, 齊藤誠, 寺尾有希夫, 殷帥, 井上晋平: 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
ボトムアップ手法による東アジア地域メタン収支評価
- 12) 寺尾有希夫, 梅澤拓, Manish Naja, Md. Kawser Ahmed, 野村渉平, 町田敏暢, 向井人史, Prabir Patra: 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
南アジアにおけるメタン排出の起源別推定のための大気中メタン安定炭素同位体比観測
- 13) 梅澤拓, 斉藤拓也, 遠嶋康徳, 寺尾有希夫, 伊藤昭彦: 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
東アジアのメタン排出源のセクター別評価に向けて: 波照間ステーションで観測される高濃度メタンイベントに伴うメタンの安定炭素同位体比と炭化水素の変動
- 14) 斉藤拓也, 梅澤拓, 遠嶋康徳: 第24回大気化学討論会 (2019)
波照間で観測されたメタンとエタンの関係
- 15) 羽島知洋, 井上忠雄, 伊藤昭彦, 湿地メタン放出-気候フィードバック研究のための地球システムモデル開発, 気象学会2019秋季大会, 2019/10/30, 福岡.
- 16) 井上 忠雄, 羽島 知洋, 伊藤 昭彦, "Plans for developing an Earth system model with CH_4 dynamics", JPGU2018, 2018/5/24, 幕張.
- 17) 井上 忠雄, 羽島 知洋, 伊藤 昭彦, "湿地メタン放出-気候フィードバック研究のための地球システムモデル開発", 気象学会秋季大会, 2018/11/1, 仙台.
- 18) 井上晋平, 米澤千夏, システム農学会 2019 年度春季大会 (2019)
「日本列島各地の水稲作付圃場を対象とした Sentinel-1A による湛水状態の抽出」

7. 研究者略歴

研究代表者

伊藤 昭彦

名古屋大学農学部卒業、筑波大学生物科学研究科修了、博士（理学）、現在、国立環境研究所物質循環モデリング・解析研究室室長

研究分担者

1) 齊藤 誠

筑波大学生命環境科学研究科修了、博士（理学）、現在、国立環境研究所地球環境研究センター物質循環モデリング・解析研究室主任研究員

2) 平田 竜一

北海道大学農学研究科修了、博士（農学）、現在、国立環境研究所地球環境研究センター陸域モニタリング研究推進室主任研究員

3) 遠嶋 康徳

東京大学理学部卒業、東京大学理学部地殻化学実験施設・助手、博士（理学）、現在、国立環境研究所環境計測研究センター動態化学研究室室長

4) 梅澤 拓

東北大学理学部卒業、東北大学大学院理学研究科修了、博士（理学）、現在、国立環境研究所環境計測研究センター動態化学研究室研究員

5) 羽島 知洋

東京大学農学部卒業、東京大学大学院農学生命科学研究科修了、博士（農学）、現在、海洋研究開発機構地球環境部門 環境変動予測研究センター 地球システムモデル開発応用グループ グループリーダー代理

II. 成果の詳細

II-1 陸域メタン放出量とその緩和効果の推定モデルに関する研究

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 物質循環モデリング・解析研究室 伊藤 昭彦・齊藤 誠
陸域モニタリング研究推進室 平田 竜一

〈研究協力者〉 国立環境研究所 地球環境研究センター 井上晋平

平成 29(開始年度)～令和元年度研究経費（累計額）：44,228 千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成 29 年度：8,118 千円、平成 30 年度：17,592 千円、令和元年度：18,518 千円）

〔要旨〕

サブテーマ 1 は、ボトムアップ的な手法により東アジア地域の CH₄ 収支に関する詳細なセクター別のマップを開発し、過去から将来の変動を解析することで研究計画の内容を達成した。東アジア地域は湿原などの自然起源、化石燃料採掘や都市活動、農業などの人為起源により大きな CH₄ 放出源と考えられているため、その分布と変動を詳細に把握して温暖化緩和への科学的な基礎データとして提供する必要がある。2000-2015 年の平均として東アジア地域は 66.5 Tg CH₄ yr⁻¹ の正味放出源となっており、そのうち約 88% が人為起源によるものと推定された。化石燃料採掘と農地土壌（主に水田）の寄与が各 15 Tg CH₄ yr⁻¹ 以上と大きく、次いで廃棄物と自然湿原の放出が寄与していた。1990 年以降の経年変化では、2002 年以降の増加が顕著であり化石燃料採掘と家畜起源の増加が主要因であった。この変動パターンは大気中 CH₄ 濃度の増減傾向とは必ずしも整合していないものの、近年の大気中 CH₄ 増加にはある程度の寄与があると推測された。各放出・吸収源について空間分解能 0.25 度のマップを作成し、放出強度、その時間変動、人為起源寄与率などの空間パターンを示し、観測重点化の観点で考察を行った。現在の収支把握結果をサブテーマ 2・3 と共有し、東アジア地域における将来の CH₄ 排出シナリオを示し、既存の社会経済シナリオ等との整合性を検討した。

〔キーワード〕

自然起源、人為起源、ボトムアップ評価、メタン放出モデル、排出インベントリ

1. はじめに

パリ協定に代表される気候変動対策の目標を着実に達成するためには、現在の温室効果ガス収支を精確に把握し、過去の変動状況とそのメカニズムを理解する必要がある。本サブテーマでは、湿原をはじめとする自然起源、化石燃料採掘や水田に代表される人為起源の CH₄ 放出源が分布する東アジア地域を対象に、ボトムアップ的な手法による収支の評価を行った。東アジア地域には日本、中国、韓国などの人口が多く経済活動が盛んな国々が含まれ、グローバルな収支に相当大きな寄与を持つと見込まれ、従って気候変動の緩和策実施においても重要性が高い地域の 1 つになる。大気観測によるトップダウン評価は、広域をカバーできる反面、空間分解能や起源別寄与の把握に不利な点があり、独立したボトムアップ評価は科学的信頼度を高める上で不可欠である。特に GOSAT などの衛星観測に対しては、観測重点化の指針となるデータを示し、逆推定における先験情報を与えるなどの利点もある。

これまで、東アジア地域における CH₄ 収支の定量化を試みた例はいくつかあるが、上述のような制限のあるトップダウン手法によるものや¹⁾、個別の国や放出源を扱うもので^{2,3)}、統合的な分析は行われてこなかった。一方、ボトムアップ手法の制限は、主要セクターを網羅するデータセットの不足、データ間の空間分解能や精度の不均一などであった。しかし、近年の温室効果ガス動態に関する研究の進展

により、自然起源と人為起源を網羅するデータを収集し分析することが可能になった。本課題では、欧米などにも先駆けてボトムアップ手法による地域スケールの CH₄ 収支把握を行った⁴⁾。

2. 研究開発目的

サブテーマ 1 は、陸域の主要な自然放出源に関するモデルを開発し、人為放出インベントリ解析と組み合わせてアジア地域の CH₄ 収支に関する高精度なマップを作成して、社会経済シナリオに基づいて過去から将来の排出量変化を評価する。ボトムアップ的手法では、個々の放出・吸収源のデータを積み上げるため、セクター別に寄与を定量化できるなどの利点があり、地域における排出削減・緩和の基礎となるデータを提供する。従来の方法に比して、独自の生態系物質循環モデルや最新のデータを用いて網羅性や信頼度を高め、統合的な分析に耐えるデータセットを構築する。従来の地域スケール収支評価では、国別の統計値を用いることが多く空間分布の把握が難しかったが、本課題では格子点ベースの空間詳細なデータを使用してマッピングを行う。現在利用可能なデータを用いて検証を行い、また東アジアで特徴的な放出源（例えば水田）については、独自に高精度な評価法を開発するなどの高度化を進める。構築されたデータセットを分析することで、グローバルな CH₄ 収支に対する東アジア地域の寄与を推定し、過去の大気中濃度変動に対して果たしてきた役割などを考察する。本サブテーマで開発するデータは、サブテーマ 2 における観測ベースの推定、サブテーマ 3 における地球システムモデル数値実験の基礎を提供する。

現在の CH₄ 収支状況を踏まえた上で、将来の合理的排出削減に関する検討を行うことも目的に含まれる。現在の将来予測に用いられている SSP などのシナリオでは、簡便な手法や仮定に基づいて CH₄ 収支動向が扱われており、必ずしも合理的な予測を与えていない可能性がある。本サブテーマでは、詳細なセクター別の放出・吸収状況、気候変動に対する自然起源の応答、技術的な削減可能性などを勘案した合理的な排出削減シナリオ案を提示する。

3. 研究開発方法

ここでは東アジア地域として日本、中国、韓国、北朝鮮、モンゴル、台湾を対象とした（詳細は Ito et al. (2019) として発表済み）。収支を評価する期間は 1990 年から 2015 年とし、代表的な収支状況を示す場合は 2000 年から 2015 年の平均を示す。

1) ボトムアップ的手法による収支評価

本課題では表 3.1.1 に示す自然起源および人為起源の CH₄ 放出源・吸収源について評価を行った。自然起源と人為起源の合計値に対する人為起源の寄与率は、地域収支の合計値および空間マップの各格子について計算を行った。

表 3.1.1. ボトムアップ評価の対象としたメタン放出・吸収セクターと使用データ。

自然起源／人為起源	セクター（放出/吸収）	使用データ・推定方法
自然起源	湿原（放出）	VISIT モデル推定＋湿原マップ
	シロアリ[共生微生物]（放出）	土地利用分布に基づく推定
	野外火災[バイオマス燃焼]（放出）	GFED4s バイオマス燃焼＋Akagi et al. (2011) 排出係数
	地質学的起源（放出）	Etiope et al. (2019) 放出データ
	乾燥土壌による酸化（吸収）	VISIT モデル推定
人為起源	化石燃料採掘（放出）	EDGAR5.0
	工業・交通・居住地（放出）	EDGAR5.0
	廃棄物・埋立（放出）	EDGAR5.0
	農地土壌[水田]（放出）	EDGAR5.0 [比較：VISIT モデル推定]
	家畜[反芻動物腸内発酵]（放出）	EDGAR5.0 [比較：FAOSTAT]

1) -1 湿原

東アジア地域における湿原の分布は Global Lake and Wetland Dataset⁵⁾に基づいて決定した。湿原が分布する格子については、大気-陸域間の温室効果ガス・微量ガス交換を扱う VISIT モデル⁶⁾により CH₄ 放出量を推定した。VISIT モデルにおいては、湿原の土壌多層モデルを組み込んでおり地下水位変動に応じた CH₄ 放出量の変動を再現する。地下部から大気への CH₄ 輸送経路は、物理拡散、植物体通気組織中の移動、気泡輸送であり、環境条件によってそれらの寄与は変化する。地下水位より上部の好氣的領域では酸化が卓越し、地下水位より下部の嫌氣的・還元的領域では CH₄ 生成が卓越するよう設定されている。また、植物からの基質供給を考慮して生産力の季節変化を考慮している。地下水位の変動は、衛星観測による湛水域変動によってベースとなる季節変動を与え、それに VISIT モデルによって推定した水収支（降水から蒸発散と流出を差し引いた差分）に基づく経時変化を加味している。

1) -2 シロアリ

シロアリからの放出は以前から認識されていたが、その分布に関する直接的なデータは乏しく、既往研究でも間接的な推定が行われてきた。本課題では、シロアリの分布を強く規定する土地利用形態に基づく推定を行った。サバンナや草原ではシロアリが多く、森林や耕作地では少ないことが知られており、既往研究に基づいて単位面積あたりのシロアリ密度、および単位バイオマス量あたりの放出係数を与えて推定を行った。本項目は年間値を計算し、土地利用変化に伴う年々の変化は求められるが、季節変化は求めている。

1) -3 野外火災

野外火災の不完全燃焼に伴い CH₄ が放出されることが知られている。ここでは衛星観測に基づく火災データセット Global Fire Emission Dataset version 4s (GFED4s)⁷⁾によって月別のバイオマス燃焼量を求めた。その量に燃焼時の CH₄ 放出係数⁸⁾を乗じることで放出量を求めた。衛星観測は、野外火災と農業残渣燃焼などを含むため、後述する人為起源放出との重複が生じる可能性があった。そのため、各格子内における耕作地面積率に基づいて、上で求められた火災起源放出を按分し、自然起源と評価された分のみを野外火災に割り当てた。ただし GFED4s は Terra/Aqua 衛星に搭載された MODIS データを使用するため 1997 年以降のデータのみが提供されている。

1) -4 地質学的起源

地中深くの地球化学的反応で生成された CH₄ が火山周辺や断層から放出されることは以前から知られていたが、その分布は複雑で広域的な評価は困難であった。最近になって全球データセット⁹⁾が作成されたため、それを用いることで東アジア地域の分布と総量を推定した。長期平均値のみが与えられているため、年々や季節の変動は考慮されない。

1) -5 好氣的土壌による酸化

草原や森林の比較的乾燥した土壌ではメタン酸化菌による酸化が卓越し、その速度は大気と土壌の間の CH₄ 濃度勾配と微生物活性に左右される。VISIT には CH₄ 酸化プロセスが組み込まれており、4 種類の評価法から選択することができる。ここでは、土壌中の拡散係数に関する土壌含水率依存性と微生物活性の温度依存性を考慮した Curry による定式化を採用し月々の変動を推定した。

1) -6 人為起源放出

人為起源放出の 5 セクター（化石燃料採掘、都市および産業、廃棄物、家畜、農業）については、2019 年にリリースされた EDGAR5.0¹⁰⁾によって分布と年々変動を決定した。EDGAR インベントリは数年に一度のアップデートが行われており、課題実施期間前半で使った前バージョン 4.3.2 との比較を行った。東アジアにおいて農業起源の主要部分の水田からの放出であり、湿原と同じく VISIT モデルによる推定も可能である。ここでは収支集計には EDGAR5.0 を使用し、推定高度化のための水田マップ開発や、緩和策評価の感度実験には VISIT モデルを適用した。

1) -7 不確実性評価のための比較分析

湿原はグローバルな CH₄ 収支においても最大の放出源の 1 つであり、微気象学的方法を用いて多数の湿原サイトにおいて観測が行われてきた。最近では機械学習アルゴリズムを用いて地点データの地域スケ

ール拡張が試みられており、ここでは Random Forest を使用した Peltola らのデータセット¹¹⁾を用い、VISIT モデルによる推計結果と比較を行った。

人為放出に関しては、EDGAR4.3.2 のほか、北京大学が作成した中国の人為放出インベントリ¹²⁾、国際応用システム分析研究所による GAINS モデルによる推定、米国環境局 (USEPA) 報告書、国連気候変動枠組み条約インベントリ (UNFCCC) との国別比較を実施した。

さらに地域スケールの収支分布と変動に関して、温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) による L4 逆推定結果との比較を行った (v0104、2010-2014 年のデータを使用)。

1) -8 同位体

CH₄ 放出源のうち化石燃料起源と微生物起源 (湿原、農業、家畜など) では顕著に異なる安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) を持つことが知られており、それが大気観測から CH₄ 起源を分離評価する鍵の一つとなっている。化石燃料など人為起源 CH₄ の $\delta^{13}\text{C}$ については多数の測定が行われ、全球的なデータセットが構築されている。一方、自然起源 CH₄、特に湿原からの放出に関しては、環境条件や植生の生育状況によって基質やそれを用いる微生物相が変化し、 $\delta^{13}\text{C}$ 値にも大きな変動が生じることが知られている。ここでは CH₄ 生成の基質として CO₂ と酢酸に注目し、その組成によって $\delta^{13}\text{C}$ 値が変動すると考えた。VISIT モデルにより推定された湿原 CH₄ フラックスに対し、植生活動や微生物による土壌有機物分解が盛んなほど多くの酢酸が生成されるという仮定の下、 $\delta^{13}\text{C}$ 値を予報的に推定することを試みた。

2) 東アジアにおける CH₄ 放出の合理的削減に向けたシナリオ分析

将来の人為起源 CH₄ シナリオについて、従来の温暖化研究で使用されてきた SSP (Shared Socioeconomic Pathway) における 2100 年までの放出量データを国際応用システム分析研究所のデータベースより入手した。個々の排出源について削減技術に基づく削減ポテンシャルに基づき、対策のない BAU シナリオと、最大限対策を講じた場合の緩和シナリオを作成した。また、将来の国内総生産 (GDP) 予測を用いて、単位 GDP あたりの排出量を漸減する仮定に基づき、SSP1-5 に対応した国別の排出シナリオを作成した。それらのシナリオに基づき、将来の東アジアにおける合理的な排出削減の道筋を検討した。

4. 結果及び考察

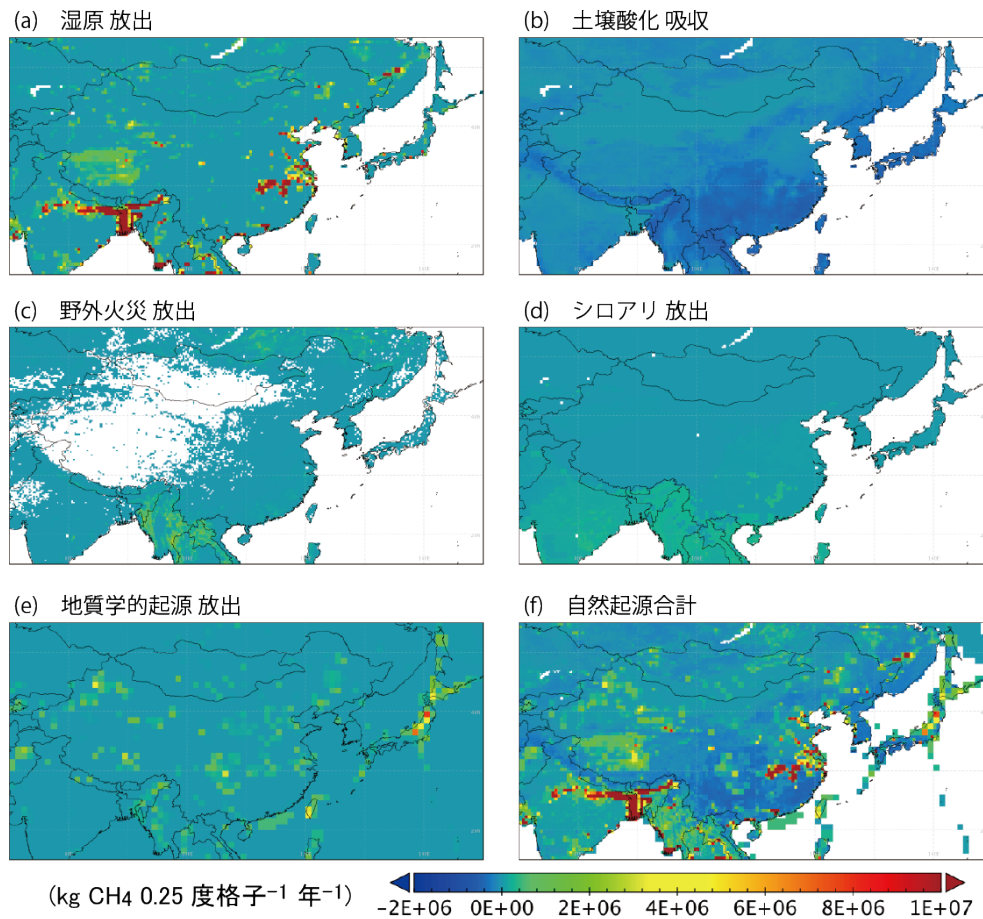
4. 1. ボトムアップ手法による東アジア CH₄ 収支評価

ボトムアップ的手法による評価の結果、東アジア地域は 2000-2015 年の平均で 66.5 Tg CH₄ yr⁻¹ の正味放出源となっていた (表 4.1.1)。地表で唯一の吸収源となる乾燥土壌での酸化は 2.5 Tg CH₄ yr⁻¹ であり、総放出量は自然起源と人為起源を合計して 69 Tg CH₄ yr⁻¹ であった。正味収支のうち 87.5% は人為起源によるものであり、東アジア地域の CH₄ 放出の大部分を占めていることが明らかとなった。

寄与が大きい放出源としては、化石燃料採掘 (総放出の 25.1%)、農地土壌 (同 23.8%)、廃棄物および埋立地 (16.6%)、家畜・反芻動物 (13.7%) が挙げられる。自然起源の寄与は約 12% に留まっており、その大部分は湿原由来であった。地質学的起源による放出量は、当初の想定よりも大きく 2.0 Tg CH₄ yr⁻¹ (収支の約 3%) であった。火山や断層の放出量には大きな時間的・空間的変動が伴うと考えられるため、今回使用したデータセットにも相当の不確実性が含まれていると考える必要がある。それでも、従来無視されてきた地質学的起源の放出は、東アジアの CH₄ 収支における空間分布を考える際に考慮に入れるべき項目であることが示唆された。一方、グローバルな収支では注目されるシロアリや野外火災 (バイオマス燃焼) は、いずれも 1% 未満の小さな寄与しか示さなかった。今回用いた手法では世界の陸域のシロアリ起源放出量は約 18 Tg CH₄ yr⁻¹ と推定されたが、そのうち東アジアが占める寄与は 2.5% に過ぎなかった。シロアリは熱帯サバンナなどに主に分布するため、東アジアでは、サバンナに相当する植生タイプが少ない、耕地率が高い、高緯度側は低温で分布が制限される、などの理由でシロアリの寄与が小さかったことが推察される。また、野外火災についても、湿潤な東アジア地域では野外火災自体が比較的発生しにくく、周辺にある東南アジアやシベリアと比べても明らかに火災起源の放出量は少なかった (世界合計 12 Tg CH₄ yr⁻¹ のうち 1% 程度)。

表 4.1.1 東アジア地域の起源別メタン収支のまとめ

人為/ 自然	排出セクター	CH ₄ 放出／吸収量 (Tg CH ₄ yr ⁻¹)							
		日本	中国	韓国	北朝鮮	台湾	モンゴル	香港	合計
人為	化石燃料採掘	0.06	16.10	0.08	0.41	0.01	0.14	0.00	16.80
	工業・交通	0.08	4.80	0.09	0.06	0.03	0.01	0.00	5.08
	廃棄物/埋立地	0.40	9.68	0.48	0.19	0.24	0.02	0.12	11.13
	水田	0.83	14.49	0.36	0.14	0.09	0.02	0.00	15.93
	家畜	0.62	7.92	0.27	0.05	0.02	0.34	0.00	9.21
	合計	1.98	52.99	1.28	0.86	0.38	0.53	0.13	58.16
自然	湿原	0.194	7.818	0.084	0.047	0.003	0.149	0.000	8.295
	シロアリ	0.017	0.415	0.006	0.005	0.006	0.003	0.000	0.452
	火災	0.003	0.093	0.001	0.003	0.000	0.025	0.000	0.124
	乾燥土壌	-0.183	-2.138	-0.048	-0.045	-0.016	-0.112	0.000	-2.542
	地質	0.649	1.186	0.000	0.013	0.094	0.061	0.000	2.003
	合計	0.679	7.372	0.042	0.024	0.087	0.126	0.000	8.331
人為＋自然合計		2.7	60.4	1.3	0.9	0.5	0.7	0.1	66.5
人為起源寄与率 (%)		74.5	87.8	96.8	97.3	81.5	80.9	100.0	87.5

図 4.1.1 自然起源 CH₄ 放出の分布 (2000-2015 年平均)

国別に見ると、収支のうち 90.8% (60.4 Tg CH₄ yr⁻¹) は中国で発生したものであり、広大な国土面積を持つため自然起源についても全東アジア地域の 88.5% を占めていた。起源別の寄与も、東アジア全体とほぼ同傾向であり、化石燃料採掘の寄与が最大であった。日本は地域収支の 4.0% を占めていたが、国別には 2 番目の寄与を持っていた。日本の収支に占める人為起源の割合は 74.5% と地域平均よ

りも低かったが、それには地質学的放出による自然起源の寄与の大きさが原因の1つとなっていた。地質学的放出において、日本は地域（陸域）放出量の約1/3を占め、これは面積比から考えて明らかに大きく、火山や断層が多く分布する地質学的条件と整合するものである。日本の人為起源放出においては、農業と家畜が73%を占める主要放出源であり、既往の統計値における傾向（参考：UNFCCCに提出されたインベントリオフィス(GIO)確報値では2013年の農業・家畜放出のシェアは76.2%）と概ね整合している。韓国と北朝鮮は、人為起源については合計すると日本を上回る放出量があるが、自然起源（特に湿原）放出が少なく、結果的に人為起源放出が国別放出の95%以上を占める特徴があった。対照的にモンゴルは、人為起源の寄与率が約81%と全体の中では比較的低かった。人為起源の約64%を家畜起源が占めるが、放牧が主要産業であることを反映している。モンゴルは草原面積が広く乾燥土壌による酸化も生じていたが、南部には砂漠が広がり微生物活動が水分不足で抑制されるため、国土面積に比して酸化吸収量は大きくなかった。結果的に、点在する湿原や火災による放出が上回り、国全体の自然起源としても放出源となっていた。

自然起源（図4.1.1）のうち湿原の放出は中国中部の揚子江下流域、チベット高原、中国北部の湿原などが強い放出源となっており、自然起源全体の分布を特徴付けていた。乾燥土壌による酸化は比較的均質に分布していたが、温度が高い南部で吸収速度が高い傾向が見られた。火災による放出は、隣接する東南アジアやシベリアと比べて小さく散在していた。シロアリによる放出は、中国南部の温暖な草原で比較的高かったが、いずれの地域でも収支を決定するほどの規模ではなかった。地質学的起源は、日本の東北地方で特に強く、他にも台湾、中国中部・西部に強い放出源が見られた。自然起源の合計としては、湿原や地質学的放出による強い放出がホットスポットを形成し、周辺領域における乾燥土壌での酸化による弱い吸収が生じる分布が見られた。

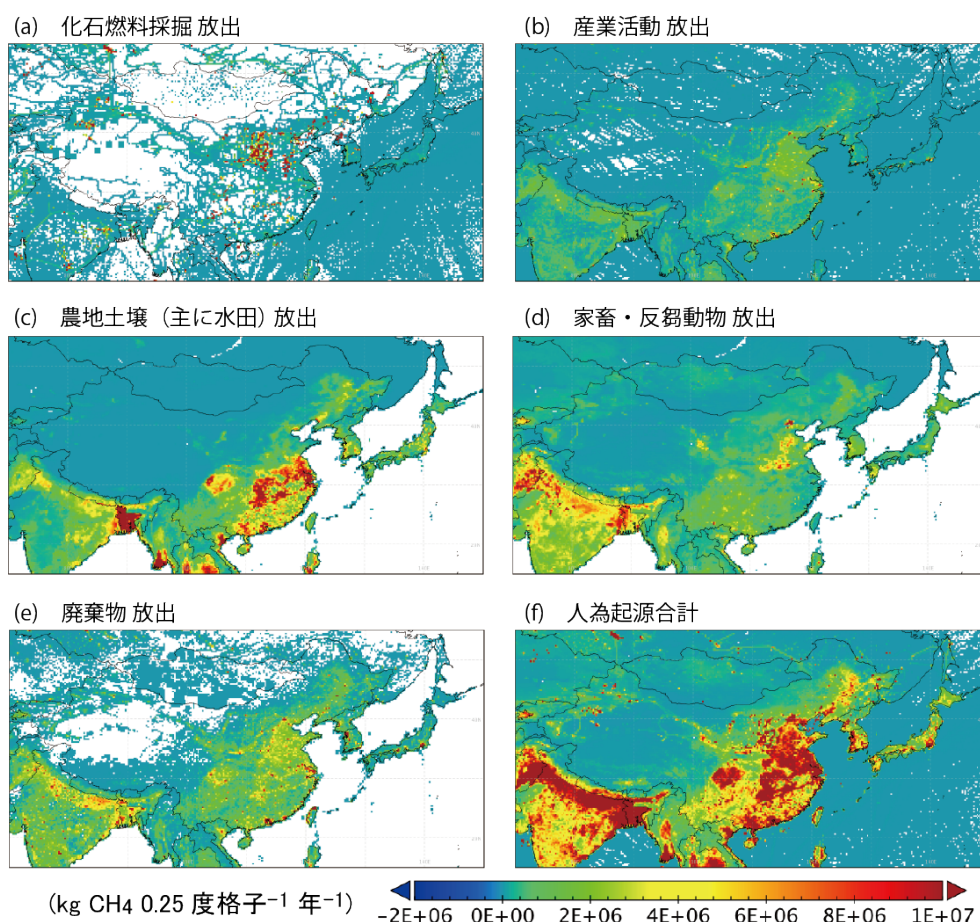


図 4.1.2 人為起源 CH₄ 放出の分布（2000-2015 年平均）

人為起源（図 4.1.2）のうち、化石燃料採掘では中国中・北部などで強い放出が見られたほか、輸送にかかわる経路上にも線状の放出源が分布していた。都市・産業活動からの放出は、メガシティと呼ばれる東京、北京、ソウルなどを含む都市域で大きく、交通起源も含むため中国中部などでは多数の中小都市のため連続的に放出が分布していた。農地土壌では、水田が分布する四川盆地など中国中南部ほか、各国の水田地帯（日本の東北など）が放出源となっていた。家畜起源の放出は、中国中部（山東省や河南省）に明らかな強い放出源があり、日本国内では九州、北海道、北関東が比較的高かった。廃棄物起源の放出は、都市・産業活動起源と共通した空間分布パターンを示したが、交通起源がなく埋立地を含む分、より都市域や沿岸域に多く分布する傾向があった。人為起源全体として、中国東部には様々な起源が寄与する人為放出があり、日本や韓国の主要都市域も強い放出源となっていた。

自然起源と人為起源を合計したもの（図 4.1.3(a)）が、衛星観測など上空からトップダウン的手法から推定される収支に相当する。地域収支の 87.5% が人為起源であることから予想されるとおり、全体的な放出源の分布は概ね人為起源の分布に規定されている。それでも、人為起源がほとんどない内陸部の乾燥地帯が土壌酸化による吸収源となっている点や、チベット高原に湿原に由来する強い放出を持つ領域が現れる点など、自然起源で説明されるパターンが存在することには注意が必要である。より明示的に、各格子における人為起源の寄与率をマップ化した（図 4.1.3(b)）。赤領域は人為起源が優占しており中国北部～南部、朝鮮半島、西日本などは人為起源の寄与が大半であることが分かる。一方、自然起源が優占する地域も中国内陸部・チベット高原、揚子江下流（湿原放出）、東日本（地質学的放出など）などに存在する。なお、モンゴル以北でも自然起源が優占しているが、ロシア・シベリアに属するため今回の解析には含まれていない。

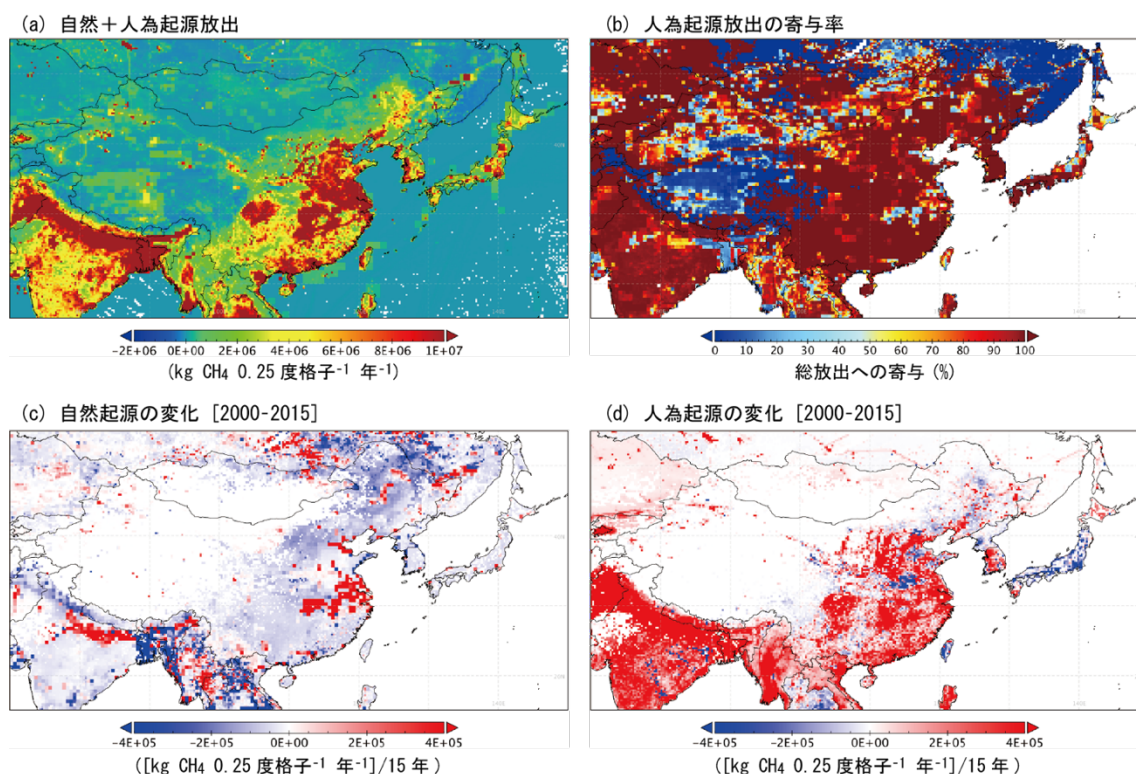


図 4.1.3 東アジア地域の CH₄ 収支に関する分析マップ。(a) 自然起源と人為起源の合計、(b) 合計収支に対する人為起源の寄与、(c) 自然起源の時間変化、(d) 人為起源の時間変化。

1990～2015 年の年別収支（図 4.1.4）は、東アジア地域の CH₄ 放出量が近年増加傾向にあることを示していた。2002 年以前はいずれの放出源においても変動は小さく、60 Tg CH₄ yr⁻¹ 前後の放出であったが、2002 年以降は明らかな増加トレンドを示し 2013 年には 74 Tg CH₄ yr⁻¹ に達していた。この期間の増加に最も寄与したのは化石燃料採掘であり、この期間に採炭量で世界第一位にまで生産を伸ばした中国の寄与が大きい（2002 年の 10.1 Tg CH₄ yr⁻¹ から 2013 年の 21.2 Tg CH₄ yr⁻¹ へ倍増）。次いで増加

に寄与したのは廃棄物起源（ $2.4 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 増加）であり、人口や都市活動、埋立地の拡大が背景要因と考えられる。また、農業起源の放出も若干の増加を示していた。この間の自然起源の変動は小さく、湿原放出の増加幅もわずか（ $0.45 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 増加）であった。図 4.1.3(c) は自然起源の変化分布を示しており、湿原が分布する揚子江下流域では増加する一方、周辺の土壌酸化が卓越する地域では酸化吸収量が概ね微増していた（酸化吸収は CH_4 濃度勾配に比例するため大気中濃度の増加が影響を与える点に注意）。人為起源についても増加域と減少域が明確に分かれ、中国や韓国では一部の都市域を除くと概ね増加傾向が示された（図 4.1.3(d)）。中国中部の一部で減少域が見られたが、畜産の中心域と重なっており、畜産自体は全体的に増加していたことを考えると、中心的な地域では形態や分布に変化が生じていたと考えられる。北朝鮮の減少は経済活動の停滞と関係があると考えられる。一方、日本については都市域だけでなく、北海道と九州南部を除く広い地域で減少傾向が見られた。その一因は水田面積の減少にあると考えられるが（北海道では水田面積減少が緩やか）、産業起源や廃棄物からの放出抑制など、京都議定書以降の温室効果ガス排出削減策の効果も反映されていると考えられる。日本全体では、1990 年の $3.4 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ から 2015 年の $2.5 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ まで概ね一貫して減少傾向が見られた。増加率のみを見れば、モンゴルは 1990 年の $0.4 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ から 2015 年の $0.96 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ まで +140% と東アジアの中で最大であった。

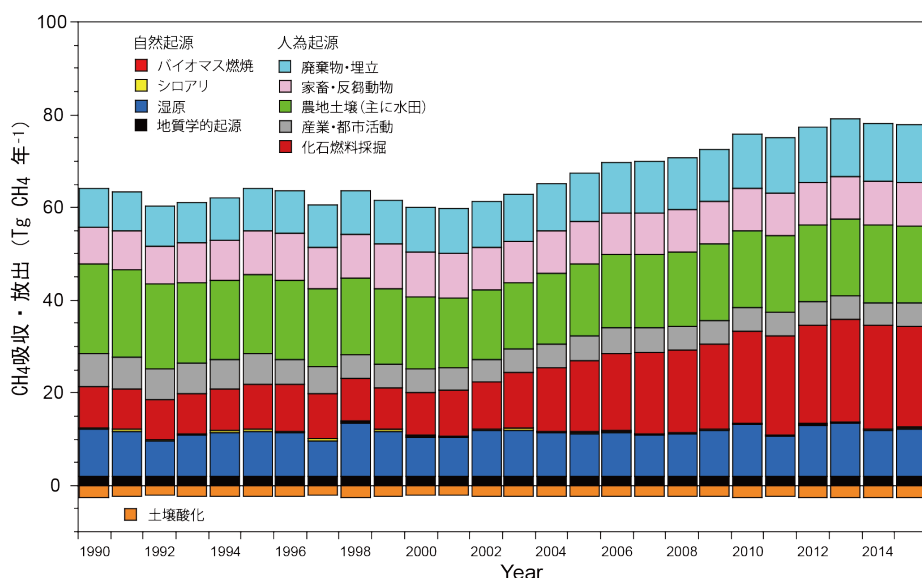


図 4.1.4 東アジア地域の CH_4 収支における経年変化。

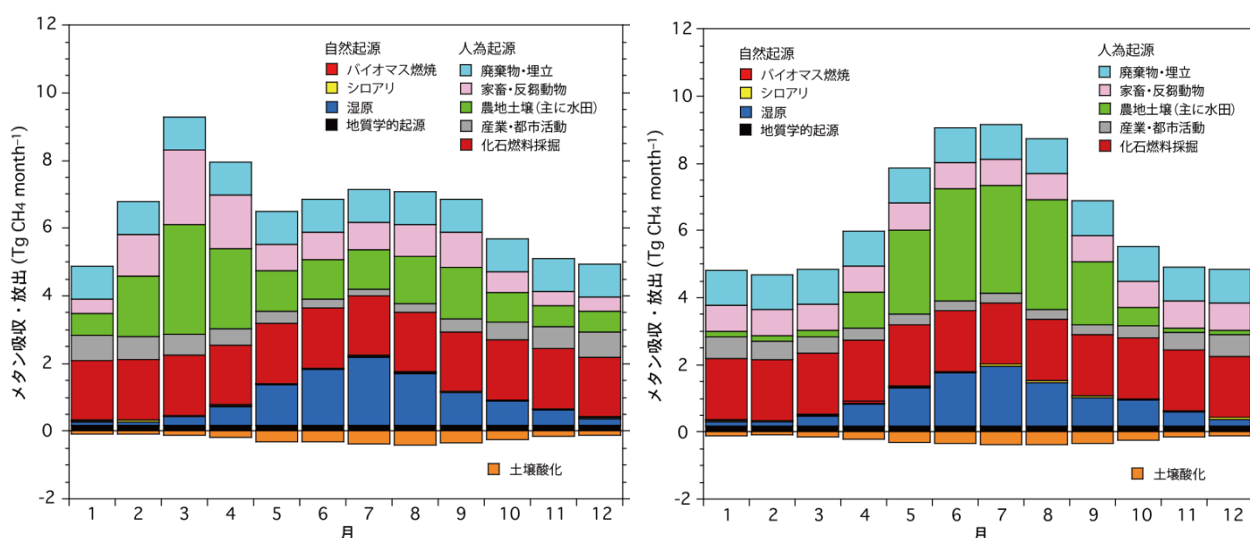


図 4.1.5 東アジア地域の CH_4 収支季節変化（左：2010 年[EDGAR4.3.2]、右：2015 年[EDGAR5.0]）。

主要な自然起源および人為起源の月別データが揃う 2010 年および 2015 年について、東アジア CH_4 収支の季節変化を調べた (図 4.1.5)。EDGAR4.3.2 データによる 2010 年では、湿原放出や土壌酸化は気温が高く微生物活動が盛んになる 6~8 月の夏季にフローが大きくなる傾向が見られた。収支の中では目立たないが、野外火災 (バイオマス燃焼) にも季節性があり、地域全体では 4 月にピークを示し、モンスーンの影響で湿潤になる 6~8 月は放出量が抑制されていた。シロアリと地質学的起源による放出では季節性は考慮されていない。人為起源放出では、農業と家畜が 3 月にピークを示す点が特徴的である。しかし、東アジア地域の気象条件や農事暦から考えて、早春である 3 月に CH_4 放出が最大となるのは現実と整合しないと考えられる。使用した EDGAR4.3.2 データでは、ヨーロッパにおける農業データとモデルに基づいて北半球の農業・家畜起源放出を推定しており、東アジア地域の実態に合わなかった可能性が高い。そのような不整合は、FAOSTAT などの農業データを使用した EDGAR5.0 による 2015 年のデータでは大幅に修正されており、農業起源の放出は 6-8 月にピークを示し、家畜起源放出は季節変化が除かれている。このような季節変化などの短い時間スケールの CH_4 収支変動は、大気観測との照合による検証や変動の解釈に有用であり、地域特有の産業活動や環境条件を踏まえた評価を行うことが重要である。

ボトムアップ的手法では、使用するデータそのものに含まれるバイアスや誤差、地域スケールへの積み上げに起因する偏りなどにより、必ずしも精確な評価結果を与えていない可能性がある。例えば人為起源放出量の推定では、一般的に活動量に排出係数を乗じる形での推計がなされているが、いずれの値も事業体や自治体ごとに変動があるはずであり、国地域の代表値を決定することは容易ではない。そのため別データに基づく代替推定や、地域内で排出係数が一定などの仮定を置くことで推定が行われている場合がある。問題は、その方法がインベントリやモデルごとに異なることが結果の差違に大きく影響している点である。ここでは、本課題で使用した EDGAR5.0 と他のインベントリの比較を行った (図 4.1.6)。中国では、EDGAR5.0 は 2001 年まで最も高い総人為放出量を与えていたが、2002 年以降の増加はむしろ前バージョンである EDGAR4.3.2 等と比較して緩やかであった。UNFCCC、USEPA、GAINS、REAS2.1、Peng は概ね整合的な排出量を与えており、いずれも EDGAR5.0 より $10 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 以上低い値となっていた。中国において EDGAR インベントリが高目の放出量を与えていることは以前から指摘されており、石炭採掘に伴う漏出量を多めに見積もっている可能性などが考えられていた。排出係数の見直しなどで修正が進められてきたが、少なくとも現バージョンでも他と比べて高めの値を与えている。しかし、過去から現在までの増加トレンドは前バージョンより大幅に小さくなっており、UNFCCC などのデータと同規模になっている。日本の人為起源放出量は、2015 年までどのインベントリにおいても減少傾向を示しているが、平均的な規模においてはやはり大きなばらつきが見られた。EDGAR5.0 と EDGAR4.3.2 は 2003 年頃までほとんど同じ値を与えていたが、それ以降の減少傾向は EDGAR5.0 の方が緩やかであった。UNFCCC インベントリでは 1993 年に一時的な落ち込みが見られるが、この年は記録的なコメの不作が発生したため、農業起源の放出量が低く見積もられた可能性がある。

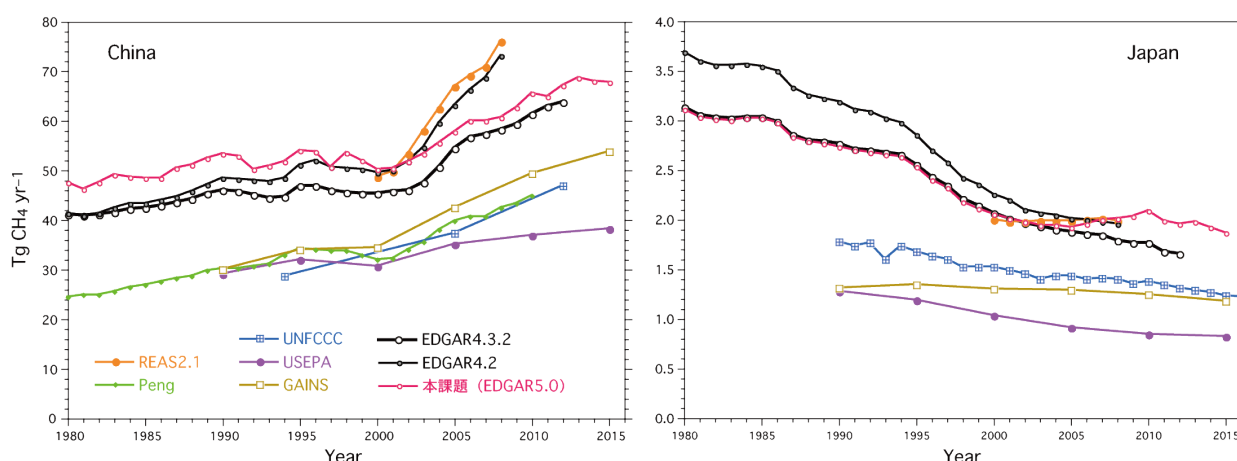


図 4.1.6 人為起源排出に関する各種インベントリ間の国別集計値の比較. (a) 中国、(b) 日本.

湿原からの放出量は、地域スケールでの評価が最も難しい項目の1つと考えられる。湿原における観測はチャンバーや微気象学的方法によって行われてきたが、空間的変異だけでなく時間的変動が大きく、年間や地域の合計値を求めることは容易ではない。モデル推定でも同様なことが当てはまり、広域スケールのモデル相互比較の結果は大きなモデル間のばらつきを示している。例えば Global Carbon Project の CH_4 統合解析に参加した 11 モデル間では、東アジアの湿原 CH_4 放出量は $1.6 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ から $10.7 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ までのばらつきが見られた ($6.0 \pm 2.7 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$)。北緯 45 以北については、Peltola らによる観測ベースの湿原メタン放出マップを比較に使用することが可能である。図 4.1.7 はそのデータにおける CH_4 放出分布と、本課題で使用したモデル推定との比較を示している。なお、Peltola らのデータは高緯度域を主に扱っており、東アジアに含まれるのは一部であるが、使用したモデルの妥当性を検証する補助材料になると可能と考えられる。VISIT モデルによる湿原 CH_4 放出は明らかに季節変化を示しており、そのパターンは Peltola らの観測データと整合的であった。放出量の絶対値では、GLWD を用いた場合は VISIT モデルの方が高い放出量を与える傾向があった。しかし、湿原・湛水域マップを別データ (SWAMPS) に置き換えた場合、Peltola データと差は大幅に縮小したことから、湿原域の不確実性が推定結果に影響を及ぼしていた可能性がある。また、モデル推定の特徴として冬季の放出量を非常に低く推定する傾向が見られた。これは、モデル推定において地温が 0°C 以下になると微生物活動が停止すると仮定し CH_4 生成が行われなくなるためである。しかし、近年の観測では冬季の CH_4 放出フラックスを示す事例が増えており、モデルにおける CH_4 生成の温度依存性関数を改良する余地があることを示唆している。

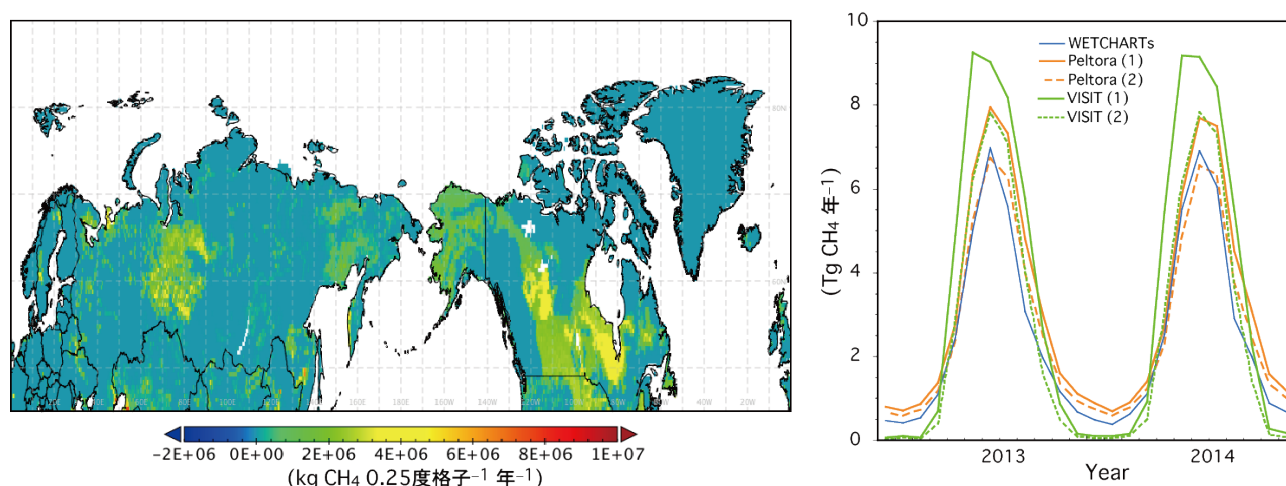


図 4.1.7 渦相関法による湿原 CH_4 フラックス観測結果との比較。Peltola et al. (2019) による地点観測データを機械学習アルゴリズム (ランダムフォレスト) で空間的に拡張したデータを使用。(左) 2013-14 年の平均放出分布。(右) 左の領域における月別の季節変化。本課題で使用した物質循環モデルによる推定結果と比較した。湿原マップは (1) GLWD、(2) SWAMPS または PEATMAP。

GOSAT によって観測された大気カラム CH_4 濃度から逆推定により地表フラックスが空間分解能 1 度で推定されている (L4a プロダクトとして提供)。このトップダウン推定結果と、本課題のボトムアップ的推定の整合性を確認することは、両手法の信頼性を確認する重要な作業である。図 4.1.8 に GOSAT 観測により最適化された東アジア地域の CH_4 収支 (all_flux_grd_opt) の分布と、本課題による評価結果の比較を示した。空間分布パターンはボトムアップ的推定結果と類似しており、中国中部から南部にかけての強い放出域、東京など主要都市の放出、そして内陸部に点在する放出がよく一致している。細部を見ると、中国・四川盆地の放出をボトムアップの方が高めに見積もっている、日本の東北地方に分布する地質学的起源の強い放出が GOSAT 逆推定には現れていない、などの不一致点も見られる。両手法とも固有の誤差を含むため、どちらが正解とは判断できないが、異なる手法で共通性の高いパターンが得られたことは地域 CH_4 収支の信頼度を支持している。年々変化の傾向も概ね同調しており、対象期間では

2013 年以降に放出量が大きく高まり、本課題と GOSAT の結果が非常に近くなっている（ただしそれ以前の期間の小さな増減パターンは必ずしも一致していない）。2010 年の季節変化については、前述のようにボトムアップ評価で使った人為放出インベントリに起因する問題が残されている点に注意が必要である。GOSAT 推定では 7 月に放出のピークを示しており、水田や湿原の放出増加を反映していた、より実態に近い季節変動を示していると考えられる。

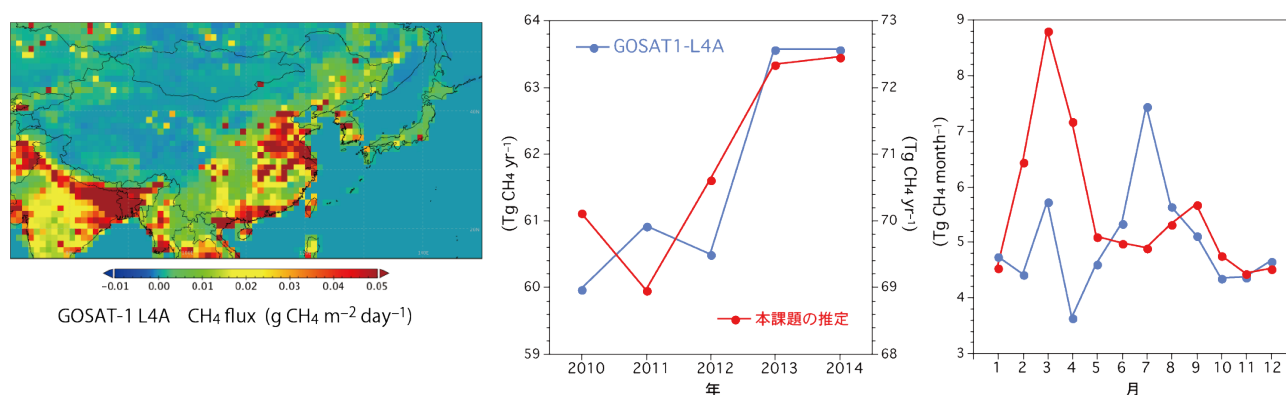


図 4.1.8 GOSAT-1 L4A プロダクトと本課題による推定結果との比較。(左) 2010–2014 年の平均地表 CH_4 収支分布、(中) 東アジア地域の年間収支、(右) 月単位の季節変化(2010 年)。

4. 2. 収支評価の検証と高度化に向けた取り組み

アジア地域における CH_4 収支の特徴として、水田に代表される農地土壌起源の寄与が挙げられる。従って、水田面積とその分布は地域 CH_4 収支の評価に大きな影響を与える。現在までに、各国統計や衛星観測データを用いて農地・水田のマップが数種類作成されてきたが、いずれも使用データが古くアップデートが見込めない、低空間分解能など手法に起因する不確実性が大きいという問題があった。そこで項目では、近年の高分解能な衛星観測データを用いた水田マップの試作を行った (Inoue et al., 2020)。欧州宇宙機関による Sentinel-1 による合成開口レーダー観測、および Sentinel-2 による光学センサー観測を用いて、東アジア地域について空間分解能 30m のマップを作成した。そこでは、合成開口レーダーによる地表面後方散乱の最大値と季節変化に基づいて水田域の候補を抽出し、さらに光学センサーによるマスキング処理を行うことで誤判定を減らす工夫を行った。地表での判定検証には、Google Street Map による画像を使用し、北海道+13 県の 100 地点における比較を行った。

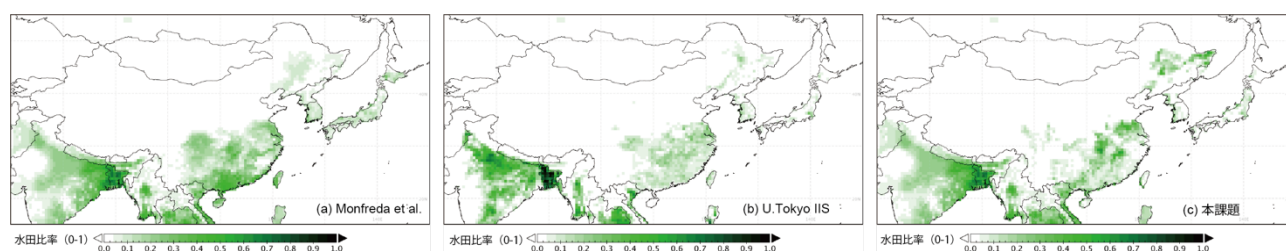


図 4.1.9 アジア地域の水田マップ。(a) Monfreda et al. (2008)、(b) 東京大学生産技術研究所作成データ、(c) 本課題による新規マップ（東アジア以外は(a)と共通）。

従来の水田マップと比較して、新しい水田マップ（2018 年対象）は主要な水田域の分布を現実的に検出できていた（図 4.1.9）。しかし、中国北部や北海道の一部（十勝平野など）で過大評価する傾向があり、平坦な農地との判定に課題が残されていることも分かった。水田マップの差による地域 CH_4 収支評価への影響を調べるため、VISIT モデルによる推定結果を比較した（図 4.1.10）。新しい水田マップを使用することで、中国南部などで放出量が抑制され、東アジア地域の合計値として約 $2.5 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 低く推定された。ただし、中国中部や北部など、一部の地域では新しい水田マップを使用することで放出量が高く推定された。今回開発した水田マップは国内で現地情報に基づく検証を行っているが、国外で

の検証は課題として残されている。今後は、手法をより高度化して推定精度を高めるとともに、年次毎の変化も出せるようデータ更新していく予定である。

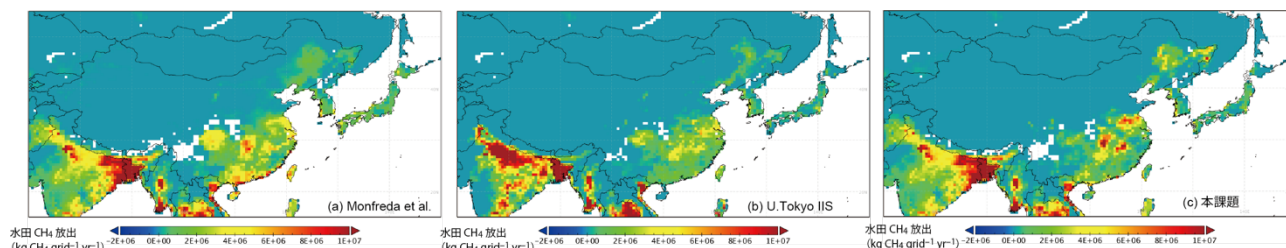


図 3.1.10 異なる水田マップを用いた CH₄ 放出量の推定結果. VISIT モデルによる計算結果の 2000-2015 年の平均. (a) Monfreda et al. (2008)、(b) 東京大学生産技術研究所作成データ、(c) 本課題による新規マップ（東アジア以外は(a)と同じ）.

大気中 CH₄ の起源を推定する上で、安定炭素同位体比は有力な手掛かりを与える新たな手法として注目されている。本課題のサブテーマ 2 では、質量分析装置を導入し CH₄ の安定炭素同位体比を測定するシステムを新たに開発し、CH₄ の起源推定に利用可能な精度であることを実証した。より高い信頼度で起源推定を行うには、発生源での CH₄ の安定炭素同位体比について先験情報があることが望ましい。実際、化石燃料採掘については多数の測定データを集計して石炭、天然ガスなど種類別の代表的な値が提示されている。しかし、微生物起源については CH₄ 生成の基質や条件によって同位体組成が変動することが知られており、一律の代表値を当てはめることが困難である。特に、温度や水分環境が大きく変動する湿原起源の CH₄ 安定炭素同位体比には、大きな時空間変動があることが知られていた。その予測で鍵となる要因として、CH₄ 生成の基質に着目した。微生物の CH₄ 生成では CO₂ と酢酸 (CH₃COOH) が主要な基質となっており、植生や土壌有機物からの有機酸供給が豊富な条件では後者の比率が高まると考えられている。また CO₂ 由来の CH₄ ($\delta^{13}\text{C}$: -78‰前後) の方が、酢酸由来の CH₄ ($\delta^{13}\text{C}$: -45‰前後) よりも安定炭素同位体比が低いことが知られている。

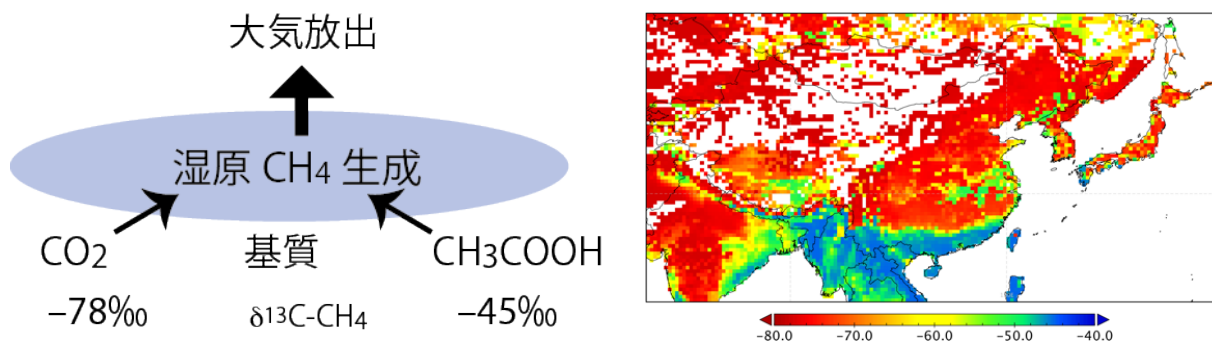


図 4.1.11 (左) 基質組成で異なる同位体比を持つ CH₄ が生成される説明図. (右) VISIT モデルの計算結果に基づいて推定した湿原 CH₄ の安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, ‰) 分布。

そこで、湿原起源の CH₄ について VISIT モデルの出力に基づいて安定炭素同位体比の試算を行った。ここでは、根系から有機物を滲出させる植生の活性を代表する指標として根呼吸、土壌有機物分解を行う微生物活性を代表する指標として従属栄養的呼吸を使用した。つまり、それらの合計である土壌呼吸速度と酢酸供給量の間に正の関係を仮定し、土壌呼吸速度が低い条件では CH₄ を、高い条件では酢酸を主に CH₄ 生成の基質として使用するとした。ここで基質に占める酢酸の割合を α とし、生成される CH₄ の安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$) を

$$\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4 = \alpha \cdot \text{酢酸由来}\delta^{13}\text{C} (-45\text{‰}) + (1-\alpha) \cdot \text{CO}_2 \text{ 由来}\delta^{13}\text{C} (-78\text{‰})$$

として計算した。図 4.1.11 に示したのが推定された $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ の分布であり、低緯度側で同位体比 -50‰ 以上と高く、高緯度側で -70‰ 以下と低い値を取る傾向がある（実際には冬季に値が低下する季節変化し

がみられる)。また、湿原が多く分布する揚子江下流域やチベット高原では比較的高い値を取っていた。このような結果は、大気試料測定で得られた異なる空間代表性を持つ CH_4 安定炭素同位体比データの解釈に有用と考えられる。今回の手法には未検証の仮定が含まれており、今後も手法を高度化するための共同研究を進展させる予定である。

4. 3. 将来の合理的削減シナリオに関する検討

温暖化研究においては、将来の大気中温室効果ガス濃度について RCP (Representative Concentration Pathway)、それに対応する社会経済的シナリオとして SSP (Shared Socioeconomic Pathway) が使用されてきた。そこでは主要国における将来の経済活動や人口動態を踏まえ、温室効果ガス排出の予測が示されている。それらは統合評価モデルと呼ばれる社会経済モデルが使用されており、経済原則や産業活動との整合性は保たれているが、温室効果ガスの排出削減技術などに基づく制約が十分に考慮されていない可能性がある。また、パリ協定に対する国別の排出削減目標 (NDC) との整合性は前提条件とはされていない。

現在公開されている SSP では国・地域 (アジア、EU など) ・全世界の放出量が与えられているが、本課題で対象とした東アジアで集計した値は示されていない。東アジアの主要国である日本や中国のデータについては、日本で開発された AIM-CGE による SSP3 シナリオ 2 種類とドイツで開発された REMIND-MAGPIE による SSP5 シナリオ 2 種類が提供されている (両国で東アジアの 90% 以上を占める)。図 4.1.12 左に示されたように SSP370 では、日本の CH_4 放出量は、2015 年以降緩やかに減少し 21 世紀末までに半減している。SSP3-LowNTCF (短寿命気候汚染物質を抑制) シナリオでは、2020 年まで一時的に増加した後、対策実施により放出量が急減し 2100 年までに現在の 4 分の 1 以下に低下している。一方、SSP5 シナリオ温暖化対策に消極的であり、SSP534 では現在とほぼ同程度の放出量が続く、最も放射強制力が高くなる SSP585 では 2090 年まで漸増することが予想されている。これら SSP5 ベースのシナリオは、2030 年までに CH_4 放出を 2013 年比で 12.3% 減少させる、パリ協定の日本国 NDC を達成しないことは明らかである。

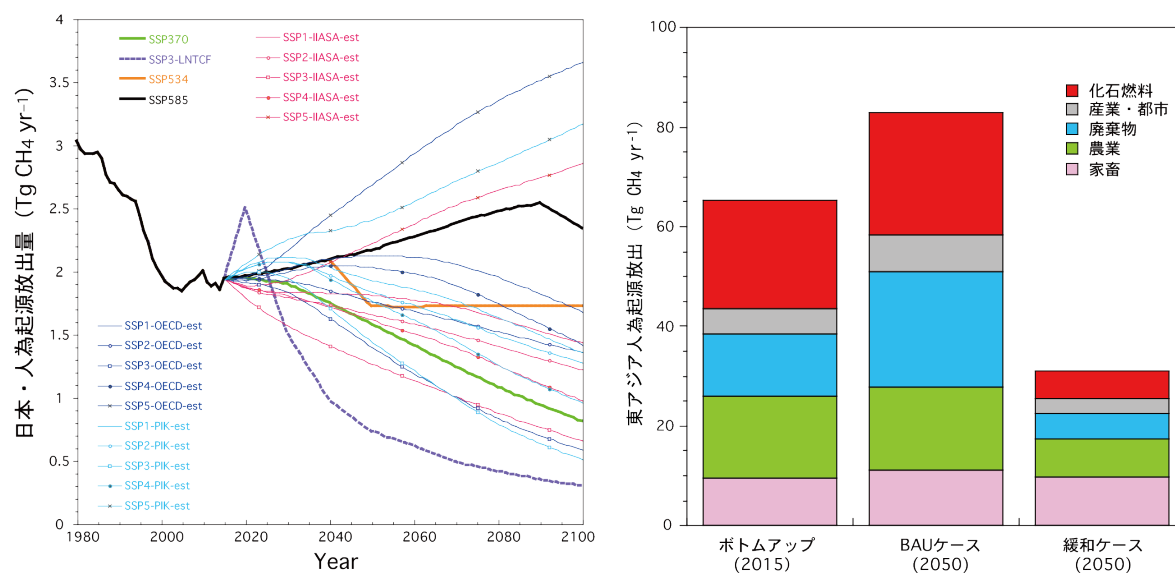


図 4.1.12 日本および東アジアの CH_4 放出シナリオ。(左) SSP における排出量と GDP 予測に基づいて作成した日本の放出量シナリオ。ここでは 2014 年までの過去の排出量について EDGAR インベントリと整合するよう係数で補正している。(右) 排出削減の技術的ポテンシャルを考慮した 2050 年の放出量。

他の SSP についても、GDP 予測に基づくシナリオ作成を行った。エネルギー (採掘・工業)、農業 (農地・家畜)、廃棄物について GDP あたりの放出量を仮定し、シナリオ作成を行った。図 4.1.12 左にその一例を示し、IIASA、OECD、PIK (ポツダム気候影響研究所) による SSP1-5 の GDP 予測に基づい

た日本の排出シナリオである。ここでは単位 GDP あたりの放出量が各部門で毎年 1%抑制することを想定しているが、SSP5 を除く多くのシナリオで 2015 年以降の漸減が予想されている。ここで示した例の場合、15 ケース中 8 ケースで 2030 年での NDC 目標を達成している。

個々の排出源における技術的な削減ポテンシャルに基づいた分析を行った。国際応用システム分析研究所など (Höglund-Isakkuson et al., 2020)¹³⁾ による部門別の放出削減技術と 2050 年までの削減可能ポテンシャル (表 4.1.3) を使用した。ここでは農業残渣の焼却に伴う放出は規定により 100%削減可能であるが、産業における化石燃料やバイオ燃料の使用時に発生する CH₄ については現実的な削減は難しいとしている。注目すべきことに、農業部門のうち水田に関しても水管理 (中干しなど)、少ない灌漑量でもコメの質を維持できる品種改良、土壌改良などの技術を活用することで放出量を 49%まで削減可能と見積もっている。これは、水田からの放出が大きいモンスーンアジア地域において大きな意味を持つ。実際に、2050 年までの東アジア人為放出量の推定結果 (図 4.1.12 右) では、対策を施さない BAU シナリオでは 2015 年比 27%増の 83 Tg CH₄ yr⁻¹ まで増加するが、最大限緩和技術を使用した場合は 53%減の 31 Tg CH₄ yr⁻¹ まで削減可能であることが示されている。なおその場合でも、家畜 (反芻動物) 起源の削減幅は 11%に留まっており、この結果は統合評価モデルを用いた分析においても家畜起源排出削減がボトルネックになるという研究例¹⁴⁾と整合している。

本課題で使用した VISIT モデルを水田に適用し、水管理の影響を調べるための感度実験を行った。最も極端なケースとして、水田を全て廃止し別の CH₄ 放出を行わない土地利用に転換することが考えられる (食料生産の必要性はここでは考えない)。VISIT モデルの計算では、水田からの CH₄ 放出は全世界で 38.5 Tg CH₄ yr⁻¹ であり、そのうち東アジア起源は 8.8 Tg CH₄ yr⁻¹ であった (2000-2015 年平均)。つまり、水田全廃により同量の CH₄ 放出を削減できることを指す。次に、水管理による CH₄ 放出削減を評価するため、現存する水田について地下水位を湛水時でも地表から 15cm 下に (通常設定では地表より 3cm 上)、落水時には地表から 90cm 下に (通常設定では地表より 50cm 下) 設定した計算を行った。その場合、世界全体の水田 CH₄ 放出量は 20.5 Tg CH₄ yr⁻¹ となり、通常設定の 47%減となった。東アジアの水田放出量も、同様に 46%減の 4.7 Tg CH₄ yr⁻¹ となった。この感度実験で得られた削減ポテンシャルは、表 4.1.3 に挙げられた他機関の推定結果と整合的である。水管理の変化が穀物生産の量および質に与える影響など、現実には起こりうる複合的な要因を考慮した検討を今後行う必要がある。

これら社会経済要因や技術的要因を考慮した分析を総合すると、東アジアにおける人為放出を削減することは現実的に可能であることが示唆される。従来削減が難しいとされてきた水田など農業起源を含めても技術的な開発と検討が進んでおり、それは農業起源が多くを占める日本の NDC 達成にも科学的な裏付けを与えることが期待される。ここでを行った分析ではコスト要因が含まれていない一方、最近提唱された大気中 CH₄ の酸化による直接的な濃度上昇抑制などの新技术¹⁵⁾も反映されていない。これらの要因を総合的に考慮しつつ合理的なシナリオをアップデートしていくことが今後求められる。

表 4.1.3 排出源別の緩和技術と削減ポテンシャル評価の例
(Höglund-Isakkuson et al., 2020)¹³⁾

排出源と想定される緩和技術	2050 年までの 削減ポテンシャル
家畜 (牛) 飼料の変更、品種改良、堆肥の管理など	-11%
農業 (残渣燃焼) 焼却処分の禁止	-100%
農業 (水田) 水管理、品種改良、土壌改良	-49%
化石燃料 (石炭採掘) 採掘前の脱ガス、酸化を促す換気装置	-58%
産業 (バイオ燃料・化石燃料) 該当技術なし	0%
廃棄物 (家庭・固形) リサイクル、有機質廃棄物の埋立抑制	-82%
廃棄物 (産業・固形) 再利用、有機質廃棄物の埋立抑制	-74%

5. 本研究により得られた成果

達成された項目：排出インベントリと放出モデルの現状分析、推定精度の検討、自然起源放出のシミュレーション、放出寄与の推定と整合性、湿原スキームの改良、放出変化の数値実験、地域収支の統合評価、シナリオ開発と対策評価

達成されなかった項目：なし

(1) 科学的意義

サブテーマ1では、独自のボトムアップ的手法を構築し、東アジア地域の CH_4 収支を詳細に解明する研究計画の内容を達成した。また課題全体を統括する役割についても目的を果たした。自然起源と人為起源の計 10 種類の放出・吸収についてそれぞれ最善の推定を組み合わせることで、従来にない包括的で信頼性の高い収支評価が可能となった。これは、GOSAT などの衛星観測によるトップダウン的な収支把握とは独立した手法による知見を提供し、地域スケールの CH_4 動態に関する理解を深化させる上で大きな意義がある。また、VISIT モデルで推定した湿原 CH_4 放出フラックスは、推進費課題 2-1701 など他課題に提供し、大気中 CH_4 濃度変動の分析に関する共同研究を進めた。

ここで得られた地域スケール CH_4 収支に基づいて、大気中 CH_4 濃度の変動に対する東アジア地域の寄与を考察することも可能となった。大気中の CH_4 濃度は 1990 年頃まで年間 12 ppb 以上の増加を示したが、特に 1991 年のピナツボ火山噴火以降に顕著に低下し、1998 年の強いエルニーニョ発生時に一時的に増加速度が高まったものの、2000 年代前半にはほぼ増加速度ゼロまで停滞した。しかし、2007 年頃より増加速度が再び大幅に高まっており、その原因について様々な仮説が提示されている。同時期に大気中 CH_4 の安定炭素同位体比が低下していることから、低い同位体比を持つ微生物起源の可能性が考えられるが確証は得られていない。図 4.1.13 が示すように、2000 年代前半まで東アジア地域の CH_4 放出量はほぼ一定であり、この時期の大気中 CH_4 濃度の上昇速度低下を説明する主要因とは言えない。一方、2002 年以降の顕著な放出量増加は、時期的にはややズレがあるが大気中 CH_4 濃度の増加をある程度まで説明できる可能性がある。2002 年以降、東アジアの CH_4 放出量は年間 15 Tg $\text{CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 以上増加しており、それは大気中 CH_4 濃度を 5 ppb 以上高める効果に相当する (1ppb あたり 2.78 Tg CH_4)。他の要因として熱帯湿原の変動やシェールガス掘削の寄与などが指摘されているが、東アジア地域が世界的にも重要な CH_4 放出源であることは本課題で裏付けられており、今後さらにデータを積み重ねてその寄与を把握する必要がある。

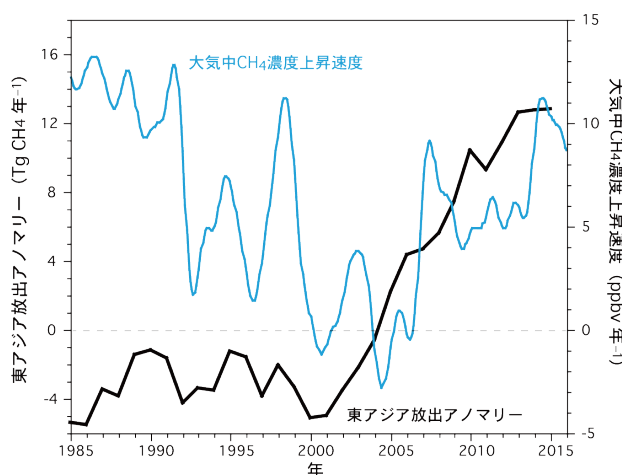


図 4.1.13 東アジアの CH_4 放出アノマリーと大気中 CH_4 濃度上昇速度の対比。大気中 CH_4 濃度上昇速度は World Data Center for Greenhouse Gases より。

(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>

本課題では、日本や中国といった人口が多い経済大国を含む東アジア地域における CH₄ 収支把握を行うことで、例えばパリ協定のグローバルストックテイクなどへ向けて、地域の温室効果ガス収支とその精度を評価する科学的材料を与える。近年の研究では、全温室効果ガス排出とその削減効果に占める CH₄ の寄与が注目されており、本課題を実施する政策的意義は大きい。人為起源だけでなく自然起源も含む収支全体を評価対象とすることで、削減の対象となり得る排出源を切り分けて特定し、大気 CH₄ 濃度へのインパクトを合理的に評価することが可能となる。一方、GOSAT など人工衛星ではすべての排出が混合した結果（大気カラム濃度）が観測され、地表面放出量は不確実性を含む先験情報や気象データから逆推定される。本課題のようなボトムアップ的推定は、衛星観測によるトップダウン的評価を補完して比較検証材料を提供し、大気データからの逆推定における先験情報を与えうる点で非常に有意義である。また、排出インベントリとモデルを用いた評価により、CH₄ 排出ホットスポットの空間分布や国地域別の寄与を明らかにする可能性が示された。それを最新の手法による地表観測データで裏付けることにより、これまでにない高い信頼度で東アジア地域の CH₄ 収支を把握できる見込みである。研究計画に挙げられた、（地球システムモデルのように気候フィードバックを含まない）モデルのオフライン実験により、将来の人為 CH₄ 放出パターンに関する考察を行った。さらに、地球システムモデルを用いたフィードバック評価を行うことで、排出削減がどの程度の温暖化抑制効果を持つのかまで同課題内で示すことが可能である。それにより、現在の IPCC で採用されている排出シナリオ、気候予測、影響評価、対策検討のパラレルアプローチに貢献し、特に地域スケールでの CH₄ の寄与について独自の成果を提供することが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

・ Global Carbon Project CH₄ synthesis : Pep Canadell 博士（オーストラリア・CSIRO）、Phillipe Ciais 博士（フランス・IPSL）、Benjamin Poulter 博士（米国・NASA-GSFC）などが中心的にとりまとめ、メタン関係の研究者による地域・グローバルスケールの CH₄ 収支統合解析に観測データやモデル推定結果を提供し論文執筆に参加した（伊藤昭彦、遠嶋康徳、齊藤誠）。複数手法による推定結果を統合するもので、広域スケールの CH₄ 収支評価としては最も信頼性が高く、IPCC 報告書などに該当成果を提供する位置づけにある。2020 年に発表された最新版（Saunois et al., 2020）についてプレスリリースを行い、オンラインでの解説イベントには 200 人以上が参加した。

・ 陸域からの CH₄ 放出量を直接測定する手法として、渦相関法により野外でフラックスを観測する技術が開発され、湿原モデルの検証データを提供している。2019 年 10 月に岐阜県・高山市で開催された AsiaFlux 20 周年ワークショップに合わせて、この分野の第一人者で国際的フラックス観測の中心的研究者である米国カリフォルニア大学バークレー校教授である Dennis Baldocchi 教授を招聘し、湿原 CH₄ フラックス観測データの統合解析に関する検討を行った。

7. 研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) A. ITO, Y. TOHJIMA, T. SAITO, T. UMEZAWA, T. HAJIMA, R. HIRATA, M. SAITO, Y. TERAOKA: Science of the Total Environment, 676, 40-52 (2019), Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation.
- 2) A. ITO: Polar Science, 21, 26-36 (2019), Methane emission from pan-Arctic natural wetlands estimated using a process-based model, 1901-2016
- 3) G. WONG, R. HIRATA, T. HIRANO, F. KIEW, E. B. AERIES, K. K. MUSIN, J. W. WAILI, K. S. LO, L. MELLING: Agricultural and Forest Meteorology, 282/283, 107869 (2020), How do land use practices affect methane emissions from tropical peat ecosystems?

- 4) S. INOUE, A. ITO, C. YONEZAWA: Remote Sensing, 12, 1622 (2020), Mapping paddy fields in Japan by using a Sentinel-1 SAR time series supplemented by Sentinel-2 images on Google Earth Engine

<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) 伊藤昭彦、米国地球物理大会連合 2017 年秋季大会（2017）
“Evaluation of CH₄ and N₂O budget of natural ecosystems and croplands in Asia with a process-based model”
- 2) 伊藤昭彦、日本農業気象学会 2018 年大会（2018）
「東アジア陸域におけるメタンフラックスのモデル推定と地域収支評価」
- 3) 伊藤昭彦、JapanFlux 10 周年記念集会（2018）
「パリ協定に向けた陸域生態系モデルによる温室効果ガス収支評価」
- 4) 伊藤昭彦、日本森林学会 129 回大会（2018）
「東アジア森林生態系における温室効果ガス収支の長期変動に関するモデル解析」
- 5) 伊藤昭彦、日本地球惑星科学連合 2018 年大会（2018）
「東アジア地域におけるメタン収支の統合的評価に向けて」
- 6) A. ITO: 8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (2019)
“Bottom-up synthesis of methane budget of East Asia, 1990-2015. 8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases”
- 7) 井上晋平、米澤千夏、システム農学会 2019 年度春季大会（2019）
「日本列島各地の水稲作付圃場を対象とした Sentinel-1A による湛水状態の抽出」
- 8) 伊藤昭彦、日本気象学会 2019 年度秋季大会（2019）（専門分科会コンビーナ）
「ボトムアップ手法による東アジア地域メタン収支評価」
- 9) A. ITO, K. ICHII: AsiaFlux 2019: 20th Anniversary Workshop (2019)
“Model studies for mining flux data: empirical, process-based, and machine learning.” (Keynote Presentation)
- 10) A. ITO: European Geosciences Union 2019 General Assembly (2019)
“Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO₂ budget caused by disturbance-induced emissions and non-CO₂ carbon export flows: a global model assessment”
- 11) A. ITO: American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (2019)
“Bottom-up mapping of GHG budget in Asian and northern regions”
- 12) S. INOUE, A. ITO, C. YONEZAWA: 40th Asian Conference on Remote Sensing (2019)
“Mapping paddy field in East Japan using Sentinel-1 time series assisted by Sentinel-2”
- 13) 伊藤昭彦、日本農業気象学会 2020 年大会（2020）（要旨発表）
「アジアから高緯度帯の陸域温室効果ガス収支に関するボトムアップ評価」
- 14) 伊藤昭彦、日本森林学会 130 回大会（2020）（要旨発表）
「東アジアおよびユーラシア陸域における温室効果ガス収支の広域評価」

（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) エコイノベーションとエコビジネスに関する研究会（SPEED 研究会）夏季セミナー（2017 年 7 月 14 日、東急今井浜ホテル、参加者約 50 名）にて「生態系サービスと持続可能な社会」気候調節サービスの例として生態系のメタン交換の研究を紹介した。
- 2) 国立環境研究所一般公開（2018 年 4 月 21 日、参加者約 150 名）にて「メタンを知ろう、測ろう」最新機器を用いた大気中メタン測定の実演デモンストレーションとして、人間の呼気の CH₄ 濃度を準リアルタイムで測定した。また CH₄ 収支研究の紹介としてメタン収支や推進費の内容を、ポスターを使用し対話形式で解説した。
- 3) 国立環境研究所公開シンポジウム（神戸：2018 年 6 月 15 日、参加者約 450 名；東京：2018 年 6 月 22 日、参加者約 800 名）にて「東アジアのメタン放出を減らすには？」推進費の内容を紹介したポスター展示と研究代表者による一般参加者との対面した解説を行った。
- 4) 市民公開講座「ともに考えよう地球温暖化と私たちの暮らし」（主催：アースドクターふなばし、2018 年 6 月 16 日、船橋市中央公会堂）にて CH₄ 収支と推進費での東アジア研究を紹介するポスターを掲示した。
- 5) 国立環境研究所夏の大会（2019 年 7 月 20 日、参加者 6165 名）にて「メタンを知ろう、測ろう(2)」最新機器を用いた大気中メタン測定の実演デモンストレーションとして、湿原土壌から放出された空気中の CH₄ 濃度を準リアルタイムで測定について体験型の展示を行った。また CH₄ 収支研究の紹介としてメタン収支や推進費の内容を、ポスターを使用し対話形式で解説した。

（５）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 共同プレスリリース「東アジアのメタン放出分布をボトムアップ手法で詳細にマップ化」、2019 年 6 月 17 日、国立研究開発法人国立環境研究所 国立研究開発法人海洋研究開発機構。

（６）その他

第 14 回日本学術振興会賞 「陸域生態系モデルの開発とその地球温暖化研究への応用」本課題で開発利用するメタン放出プロセスを含む陸域モデルの開発と温暖化研究への応用が受賞対象に含まれる。

8. 引用文献

- 1) Thompson RL, Stohl A, Zhou LX, Dlugokencky E, Fukuyama Y, Tohjima Y, Kim S-Y, Lee H, Nisbet EG, Fisher RE, Lowry D, Weiss RF, Prinn RG, O'Doherty S, Young D, White JWC (2015) Methane emissions in East Asia for 2000-2011 estimated using an atmospheric Bayesian inversion. *Journal of Geophysical Research Atmosphere* 120: 4352-4369. DOI: 10.1002/2014JD022394
- 2) Peng S, Piao S, Bousquet P, Ciais P, Li B, Lin X, Tao S, Wang Z, Zhang Y, Zhou F (2016) Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010. *Atm Chem Phys* 16: 14545-14562. DOI: 10.5194/acp-16-14545-2016
- 3) Miller SM, Michalak AM, Detmers RG, Hasekamp OP, Bruhwiler LMP, Schwietzke S (2019) China's coal mine methane regulations have not curbed growing emissions. *Nature Communications* 10: 303. DOI: 10.1038/s41467-018-07891-7
- 4) Ito A, Tohjima Y, Saito T, Umezawa T, Hajima T, Hirata R, Saito M, Terao Y (2019) Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation. *Science of Total Environment* 676: 40-52. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.263
- 5) Lehner B, Döll P (2004) Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology* 296: 1-22.

- 6) Ito A, Inatomi M (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences* 9: 759-773. DOI: 10.5194/bg-9-759-2012
- 7) van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L, van Leeuwen TT, Chen Y, Rogers BM, Mu M, van Marle MJE, Morton DC, Collatz GJ, Yokelson RJ, Kasibhatla PS (2017) Global fire emissions estimates during 1997-2016. *Earth System Science Data* 9: 697-720. DOI: 10.5194/essd-9-697-2017
- 8) Akagi SK, Yokelson RJ, Wiedinmyer C, Alvarado MJ, Reid JS, Karl T, Crounse JD, Wennberg PO (2011) Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atm Chem Phys* 11: 4039-4072. DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011
- 9) Etiope G, Ciotoli G, Schwietzke S, Schoell M (2019) Gridded maps of geological methane emissions and their isotopic signature. *Earth System Science Data* 11: 1-22. DOI: 10.5194/essd-11-1-2019
- 10) Crippa M, Oreggioni G, Muntean D, Schaaf E, Lo Vullo E, Solazzo E, Monforti-Ferrario F, Oliver JGJ, Vignati E (2019) Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries JRC Science for Policy Report, pp.
- 11) Peltola O, Vesala T, Gao Y, et al. (2019) Monthly gridded data product of northern wetland methane emissions based on upscaling eddy covariance observations. *Earth System Science Data* 11: 1263-1289. DOI: 10.5194/essd-11-1263-2019
- 12) Peng S, Piao S, Bousquet P, Ciais P, Li B, Lin X, Tao S, Wang Z, Zhang Y, Zhou F (2016) Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010. *Atm Chem Phys* 16: 14545-14562. DOI: 10.5194/acp-16-14545-2016
- 13) Höglund-Isaksson L, Gómez-Sanabria A, Klimont Z, Rafaj P, Schöpp W (2020) Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe - results from the GAINS model. *Environmental Research Communications* 2: 025004. DOI: 10.1088/2515-7620/ab7457
- 14) Harmsen M, et al. (2019) The role of methane in future climate strategies: mitigation potentials and climate impacts. *Climate Change*: DOI: 10.1007/s10584-019-02437-2
- 15) Jackson RB, Solomon EI, Canadell JG, Cargnello M, Field CB (2019) Methane removal and atmospheric restoration. *Nature Sustainability* 2: 436-438. DOI: 10.1038/s41893-019-0299-x

Ⅱ-2 地域スケールのメタン放出量推定精度向上のための観測研究

国立研究開発法人 国立環境研究所

環境計測研究センター

動態化学研究室

遠嶋康徳（リーダー）

梅澤拓（研究分担者）

斉藤拓也（研究協力者）

地球環境研究センター

炭素循環研究室

寺尾有希夫（研究協力者）

平成 29～令和元年度研究経費（累計額）：54,990 千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成 29 年度：29,640 千円、平成 30 年度：12,350 千円、令和元年度：13,000 千円）

〔要旨〕

サブテーマ 2 では研究計画の内容である CH₄ 分析システムの開発、観測実施、そのデータを用いた起源推定を達成した。東アジア地域の CH₄ 放出源の評価には、大気観測にもとづくトップダウン解析が有効に利用できる。本研究では、沖縄県八重山諸島波照間島の波照間ステーションにおいて、CH₄ を含む温室効果ガス濃度の現場観測、CH₄ の安定炭素同位体比のフラスコ観測、炭化水素類の現場観測を実施した。波照間ステーションでは、主に東アジア大陸からの空気塊の輸送にともなう人為起源微量気体の高濃度イベントが冬期には頻繁に観測される。まず、この高濃度イベントで CH₄ 濃度と二酸化炭素濃度が高い正の相関関係を示すことを利用し、両者の比を計算することで、中国を含む波照間ステーションの有効フットプリント領域内の CH₄ 放出量の変化を評価した。大気輸送モデルを用いて波照間ステーションでの高濃度イベントを計算したところ、サブテーマ 1 で開発した東アジアの CH₄ フラックスを用いた場合に CH₄ 濃度と二酸化炭素濃度の変動比が良く再現され、CH₄ フラックスの長期増加傾向や季節変動には観測結果との整合性が認められた。次に、CH₄ の安定炭素同位体比の高精度測定システムを開発し、波照間ステーションで高濃度イベント出現時に採取された空気試料の分析を行った。観測データを大気輸送モデルの計算結果と比較したところ、モデル計算は高濃度イベントに寄与した放出源の同位体比を過小評価する傾向が見出された。サブテーマ 1 で開発した CH₄ フラックスの放出源別の相対的寄与として、化石燃料関連の放出が過小評価あるいは農業や廃棄物関連の放出が過大評価されている可能性がある。さらに、波照間ステーションで炭化水素類を準連続的に観測するシステムを構築し、エタンとプロパン濃度の CH₄ 濃度との関係を解析した。高濃度イベント時のエタンと CH₄ の変動比を利用して化石燃料放出源の寄与率を推定して大気輸送モデルの計算結果と比較したところ、サブテーマ 1 で開発した CH₄ フラックスについて化石燃料起源の寄与が過小評価されている可能性が示唆された。以上のように、本サブテーマでは、波照間ステーションでの CH₄ 濃度、CH₄ の安定炭素同位体比、炭化水素の観測データを総合的に解析することで、サブテーマ 1 で開発した東アジアの CH₄ フラックスの放出量や季節性、そのカテゴリー別寄与の先駆的な評価を行った。

〔キーワード〕

波照間ステーション、汚染イベント、大気輸送モデル、安定炭素同位体比、炭化水素

1. はじめに

国立環境研究所は、沖縄県波照間島の波照間ステーション（24.05° N、123.80° E）においてメタン（CH₄）を含む大気中の温室効果ガスおよび関連成分の現場観測を継続している。観測された大気中の濃度変化には、冬期を中心に CH₄ や二酸化炭素（CO₂）、亜酸化窒素（N₂O）等の人為起源微量気体が高濃度となる汚染イベントがしばしば見られる。こうした冬期の汚染イベントは、東アジアモンスーンの影響を受けて大陸から空気塊が輸送されてくることに起因するため、他成分との相関関係や大気輸送モデルを使った解析を利用して大陸における放出量の推定が行われてきた^{1,2)}。大気中の微量気体の濃度

の時空間変動は、大陸における放出・吸収（フラックス）と大気輸送によって主に決まるため、大気輸送が分かれば濃度の時空間変動からフラックスを推定することが可能となる。本研究では、波照間ステーションでの大気観測データと大気輸送モデルによるシミュレーションを組み合わせ、東アジアからのCH₄フラックスの評価を行った。また、実効的な排出削減策の検討にあたっては放出源別にCH₄フラックスの評価を行うことが重要である。そこで本研究では、主要な放出源別に異なる特徴を示す安定炭素同位体比と化石燃料起源のCH₄放出のトレーサーとなる炭素水素類に着目し、これらの観測を波照間ステーションで開始して、CH₄フラックスの放出源別の寄与を評価した。

2. 研究開発目的

サブテーマ2では、東アジアCH₄収支の変化を捉えられるサイトにおいて、大気中のCH₄濃度、同位体比、および関連するトレーサー成分の観測を実施し、他成分を組み合わせた統合的なデータ解析によって地域CH₄収支の高精度化を図る。大気中のCH₄濃度、CH₄の安定炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）および炭化水素（エタン（C₂H₆）およびプロパン（C₃H₈））の観測を波照間ステーションで実施し、サブテーマ1で推定された東アジア地域のCH₄フラックスの経年変化や起源別の寄与について、大気観測データにもとづく評価を目的とする。

波照間ステーションでは、冬期に大陸からの大気輸送が卓越するため、観測される微量気体の大気中濃度の短期変動は大陸におけるフラックス強度と密接に関係する。そこで、本サブテーマでは、ラグランジュ型大気輸送モデル（LPDM）とサブテーマ1で推定されたフラックスを用いて大気中の濃度変動を再現し、観測された短期変動と比較することでフラックスの強度やカテゴリー別の寄与を評価する。第一に、波照間ステーションで観測されるCH₄濃度の変動はCO₂の変動と極めてよい正の相関を示すことから、CH₄とCO₂の短期変動の比を比較することで、CH₄フラックスの長期的な変化傾向や季節変動を評価する。第二に、排出源によって異なる値を持つCH₄の $\delta^{13}\text{C}$ の測定システムを開発して波照間ステーションで出現する高濃度イベントの $\delta^{13}\text{C}$ 観測を実施し、CH₄フラックスのカテゴリー別の寄与を評価する。第三に、化石燃料起源のCH₄放出のトレーサーとして炭化水素の測定システムを構築し、炭化水素とCH₄の変動比を解析して、化石燃料関連のCH₄放出の寄与を評価する。

3. 研究開発方法

サブテーマ2では、東アジア地域のCH₄排出源の観測に適した沖縄県波照間島の波照間ステーションで大気観測を実施し、CH₄の起源別放出の精度向上に資する観測データの取得と観測データを組み合わせた総合的な解析を行う。実施内容は以下の3項目となる。

1) 波照間ステーションにおける大気中CH₄濃度の連続観測を継続し、その短期変動を放出量が比較的良好にわかっているCO₂の変動と比較することで、CH₄排出量の変動やその変化傾向を推定する。なお、同様の解析は波照間ステーションで観測された大気中ラドン（Rn）や六フッ化硫黄（SF₆）についても実施したが、測定精度および解析に必要な東アジア地域フラックスの信頼性の点でCO₂が優れていることがわかったため、本報告書ではCO₂を使った解析結果についてのみ報告する。

2) CH₄の排出起源別の分離評価に有用な $\delta^{13}\text{C}$ の高精度測定システムを構築し、波照間ステーションにおいて汚染イベント時に採取される空気試料（イベントサンプリング）を分析して、その観測データを東アジア地域の起源別CH₄フラックスの評価に利用する。

3) 化石燃料起源CH₄の放出プロセスで随伴して放出される炭化水素（エタンおよびプロパン）の測定システムを確立して波照間ステーションにおいて準連続的な観測を実施し、CH₄の化石燃料放出を評価するための指標として活用する。

1) 大気中CH₄濃度の短期変動成分の解析

1)-1. 短期変動成分の抽出

波照間ステーションにおいて観測された大気中のCH₄およびCO₂濃度の1時間値の時系列を図

3.2.1に示す。両者ともに長期的な増加傾向（トレンド）と季節変動に加えて、数時間から数日程度

の時間スケールを持つ短期変動を見せる。この短期変動は主に総観スケールの大気輸送の変化と観測点周辺の地域的なフラックス分布を反映したものと考えられ、短期変動成分を抽出すれば地域的なフラックスに関する情報を取り出すことができると期待される。そこで、それぞれの観測結果からベースライン（地域的な放出がないと仮定した場合に予想される濃度変動）を推定し、観測値からベースラインを差し引くことで短期変動成分（ ΔCH_4 と ΔCO_2 ）を求めた。

ベースラインは 101 時間の時間窓内で濃度が 20 パーセント以下以下のデータの平均値を求め、これを時間窓の中心におけるベースラインとした。この計算を、時間窓を動かしながらデータ全体について実施し、得られた平均値に対して 49 時間の移動平均を用いてさらに平滑化した。観測結果から求められたベースラインも図 3.2.1 に示した。

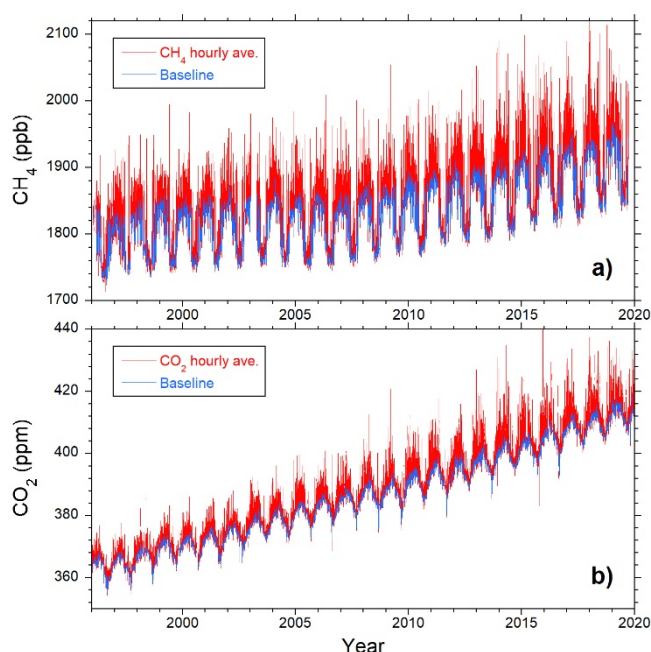


図 3.2.1 波照間で観測された (a) CH_4 および (b) CO_2 の時系列。赤は時間値を青はデータ処理で得られたベースラインを示す。

1)-2. LPDMによる短期変動成分の計算

東アジアからの CH_4 の放出量と波照間で観測される短期変動成分との関係を定量的に把握するために、ラグランジュ型の大気輸送モデル (Lagrangian Particle Dispersion Model, LPDM) を用いた。ここで用いた LPDM は、Stohl らが開発した FLEXPART³⁾ をベースに、C 言語でコーディングされた FLEXCPP (<http://db.cger.nies.go.jp/metex/flexcpp.html>) である⁴⁾。FLEXCPP では観測地点から 10,000 個の粒子を時間に対して逆方向に移流・拡散させ、地表面高度 500m 以内の位置に滞在する延べ時間を緯度・経度について $1^\circ \times 1^\circ$ の解像度で計算する。使用した気象場は NCEP の再解析データ (<http://cfs.ncep.noaa.gov/>) であり、1996 年 11 月から 2019 年 3 月までの期間について 3 時間間隔で計算を実施した。

図 3.2.2 に波照間ステーションでの観測に対する冬期 5 か月間のフットプリント ($1^\circ \times 1^\circ$ グリッドにおける粒子滞在時間から計算された $1 \text{ g CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ のフラックスに対する濃度変化として表示) の平均値を示す。図中の赤線で囲まれた領域 ($1 \text{ g CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ のフラックスに対して 0.1ppb 以上の濃度変化を生じさせる領域) を波照間ステーションでの濃度変化に実質的に影響を与える領域として有効フットプリント領域 (EFA) 呼ぶこととする。短周期濃度変動は FLEXCPP で計算される各グリッドの滞在時間とそのグリッドにおける CH_4 および CO_2 のフラックス (次節参照) からそれぞれの放出量を求め、各グリッドの濃度増加分の合計として濃度変動 (ΔCH_4 と ΔCO_2) を計算した。

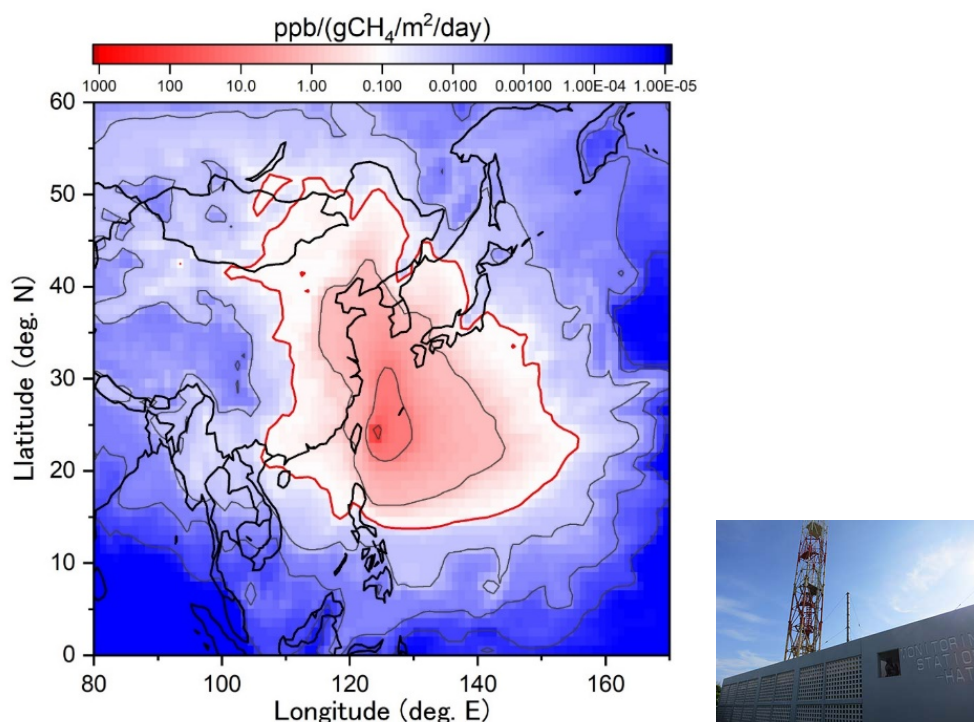


図 3.2.2 波照間ステーション（右写真）での大気観測に対する 11 月から 3 月の平均フットプリント。赤線で囲まれた領域は波照間ステーションでの観測に実質的な影響を与える領域（有効フットプリント領域、EFA）。

1)-3. CH₄およびCO₂フラックス分布

前述した濃度増加分の計算には Ito et al. (2019)に基づく CH₄フラックスマップを用いた⁵⁾。Ito et al. (2019)では人為起源 CH₄フラックスとし EDGAR v. 4.3.2 を、バイオマス燃料起源 CH₄フラックスとしては GFED v. 4s (<http://globalfiredata.org/index.html>)を用い、さらに湿原や水田からの CH₄フラックスや土壌による CH₄酸化については陸域生態系モデル VISIT を用いて推定している。なお、水田から放出される CH₄は人為起源に分類され、EDGAR v. 4.3.2 の推定でも農業土壌 (agricultural soil) 起源に含まれている。そこで、水田からのフラックスについて EDGAR v. 4.3.2 の代わりに VISIT の結果を用いたものを Ito2019A、その逆を Ito2019B とし、この 2 種類の CH₄フラックスマップを濃度計算に用いた。

CO₂のフラックスマップは、全球大気輸送モデルを用いた逆推定で求められた 1° × 1° の月別フラックス分布を用いた (P. K. Patra 私信)。CO₂フラックス分布は化石燃料起源 CO₂ (^{ff}CO₂)、陸域生物圏 CO₂ (^{bio}CO₂)、および海洋 CO₂ (^{oc}CO₂) のフラックス分布からなり、^{ff}CO₂は化石燃料統計に基づくものであり、^{bio}CO₂および ^{oc}CO₂については逆推定によって最適化されたものとなっている。

上記のフラックスマップと LPDM を用いて計算される ΔCH₄および ΔCO₂の一例を観測結果と共に図 3.2.3 に示す。LPDM による計算結果は濃度変化のタイミングや変動傾向を比較的良好に再現していることが分かる。しかし、濃度増加量については必ずしもよく再現されていないピークもあり、これらの違いの要因として、a) 輸送モデルの不確かさ、b) 計算に用いたフラックス分布の不確かさ、c) 推定したベースラインの不確かさ、が考えられる。

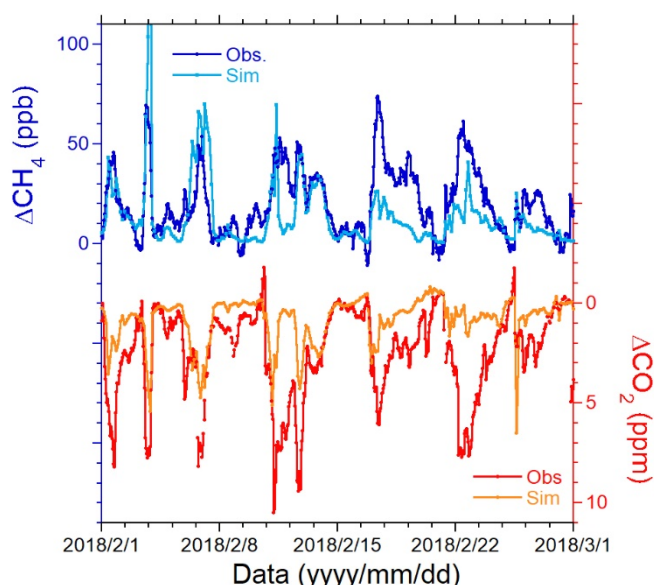


図 3.2.3 波照間ステーションでの観測および計算にもとづく（上） ΔCH_4 および（下） ΔCO_2 の時系列の一例。濃色が観測値、淡色が計算値を表す。 CO_2 のY軸は反転している。

2) CH_4 の安定炭素同位体比の測定システムの開発

本研究で開発した CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ の高精度測定システム（CPR-GC-IRMS）の写真を図 3.2.4（左）に、概略図を図 3.2.5 に示した。この測定システムを用いた CH_4 の分析ステップは、(1)大気試料中の CH_4 の濃縮、(2)ガスクロマトグラフ（GC）による残存大気成分の分離、(3)酸化炉での CH_4 から CO_2 への変換、(4)同位体比質量分析の4つに分けられる。本研究の測定システムは、ステップ(1)において液体窒素などの冷媒を使用しない点で先行研究に比べて画期的であり、測定の自動化や実験労力の軽減に大きな効果を上げた。開発にあたり、様々な CH_4 濃縮トラップの予備試験や温度条件の最適化、最適なGCカラムの選定、酸化炉の温度設定、標準ガスの入手などを実施し、大気試料を分析する体制を整えた。このシステムで達成した測定精度はおおよそ0.1‰と評価され、これは大気中 CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ の変動を捉えるのに十分である。これらの技術的な情報を Umezawa et al. (2020)として日本気象学会の英文誌に発表した。また、これに先行して大気試料の $\delta^{13}\text{C}$ 測定を行う世界の研究グループの技術的情報や相互比較を集約し、Umezawa et al. (2018)として公表した。

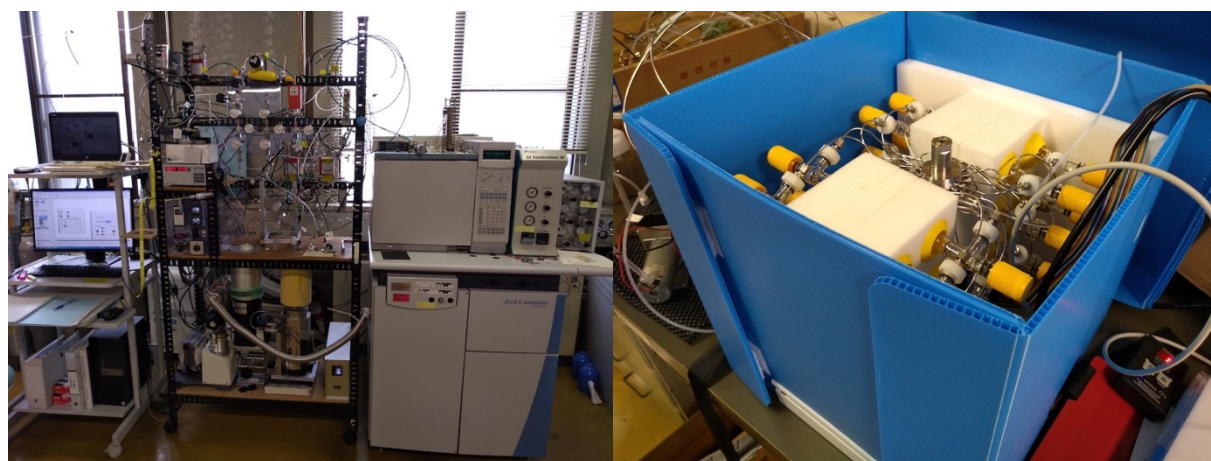


図 3.2.4 （左）国立環境研究所に設置された大気 CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ 分析システム（CPR-GC-IRMS）の写真。本研究課題により、同位体比質量分析計（左図の右下）を購入し、独自に開発した前処理装置（左図の中央左寄り）と組み合わせて全システムを構築した。（右）波照間ステーションに新たに設置された小型大気試料サンプラー（CASPER）の写真。

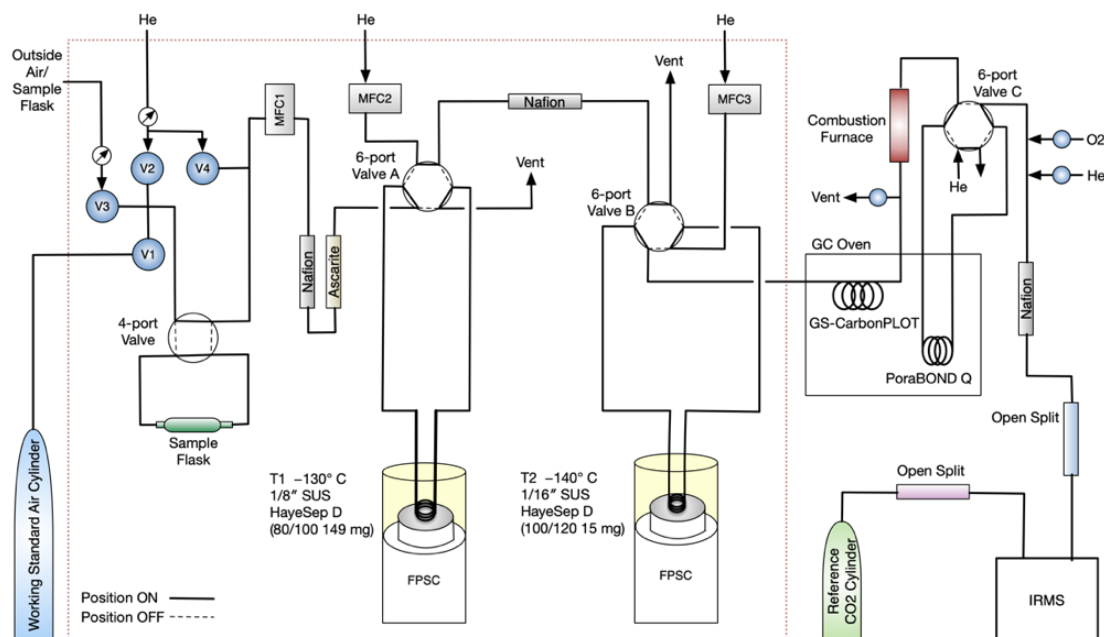


図 3.2.5 CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ の高精度測定システム (CPR-GC-IRMS) の概略図。

波照間ステーションにおいては、2種類の大気サンプリングシステムを利用して大気試料を採取し、実験室に持ち帰って CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ の分析を行った。一つ目のイベントサンプリングシステム（ここでは HEV と呼称する）は、波照間ステーションに到達する汚染イベントを予測して予め決めた時刻で 2.5L のガラスフラスコに採取する。本研究の開始時に既に波照間ステーションで稼働しており、様々な微量気体の分析に利用されていた。本研究で対象とした大陸起源の汚染イベントは主に冬期に出現するが、研究期間初年度の 2017 年 12 月から 2018 年 4 月にはまだ $\delta^{13}\text{C}$ の測定システムの開発中だったため、HEV 大気試料を容量 100 mL のガラス容器に分取保存した。これらのアーカイブ試料は測定システムの稼働後に分析された。研究期間二年目以降の HEV 試料は随時分析を行った。二つ目のサンプリングシステムは $\delta^{13}\text{C}$ 分析に特化した小型大気試料サンプラー（ここでは CASPER と呼称する）であり、波照間ステーションでの汚染イベントの観測機会を増やすため、研究期間三年目に波照間ステーションに追加設置した。CASPER の写真を図 3.2.4（右）に示した。CASPER は容量 100 mL のガラス容器を 16 本備えている。いずれかのガラス容器に常時外気が流れており、独自に開発したプログラムを用いて写真中央の 16 ポートマルチポジションバルブを特定の時間間隔で切り替える。波照間ステーションでの CO_2 や CH_4 濃度の現場観測データを監視し、汚染イベントの出現後に各試料容器での大気試料の採取を CASPER の時刻ログで確認し、汚染イベントを捉えた大気試料を確保する。

3) 波照間ステーションにおける炭化水素類測定システムの構築

波照間ステーションにおいて炭化水素の準連続観測を実施するため、ハロカーボン類のモニタリング用に開発された既存の大気濃縮装置/ガスクロマトグラフ/質量分析計（大気濃縮/GC/MS）をもとに装置の改修と測定条件等の検討を行った。まず、MS の電子衝撃法による C_2H_6 と C_3H_8 のフラグメントパターンと妨害成分との関係から、大気主成分等による妨害がない最も大きなフラグメントイオンを選定し、 C_2H_6 と C_3H_8 のモニターイオンをそれぞれ質量電荷比 $m/z=27$ と $m/z=29$ とした。次に、標準ガスを用いて、大気濃縮装置の低温トラップによる捕集と脱着温度等について検討し、トラップの充填剤として HayeSep-D を採用するとともに、最適条件を決定した。図 3.2.6 は C_2H_6 と C_3H_8 が定量的に捕集されていることを確認するため、試料量を変えて分析した結果である。両成分とも 0.1 L から 1.5 L の範囲で非常に良い直線性を示した。また、1 L の大気サンプルを繰り返し分析した際の再現性は両成分ともに 1% 以下であり、良好な結果が得られた。定量のための標準ガスには、ア

ルミ製高圧ガス容器に大気を充てんしたワーキングスタンダードを用い、重量充てん法によって作製された標準ガスを用いて値付けを行った。大気濃縮/GC/MSによる C_2H_6 と C_3H_8 の観測を波照間ステーションで開始するとともに、過去の観測データについても精査することで2017年以降の C_2H_6 および C_3H_8 の観測データを整備した。

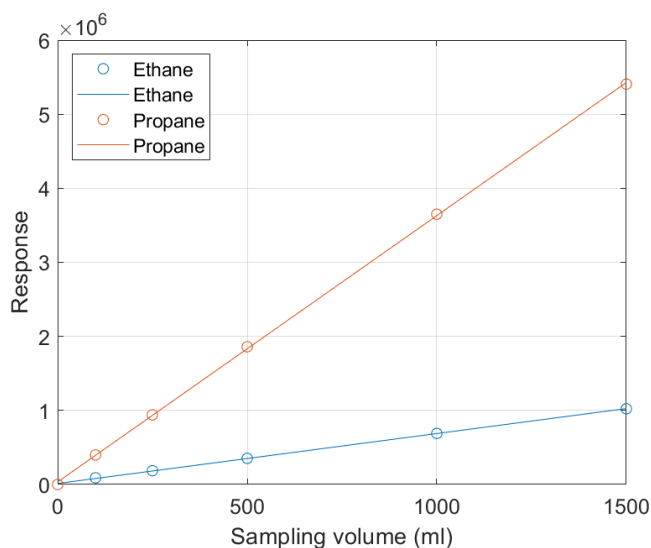


図 3.2.6 つくばで採取された大気サンプルの濃縮量と装置のレスポンスの関係。

4. 結果及び考察

1) 大気中 CH_4 濃度の短期変動成分の解析にもとづく放出量の評価

1)-1. 波照間における $\Delta CH_4 / \Delta CO_2$ 比の観測結果と計算結果の比較

波照間において冬期に観測された ΔCH_4 と ΔCO_2 の間には正の相関関係が認められた。そこで、1996年11月から2019年3月までの観測および計算結果に基づく冬期5か月間（11月から3月）の CH_4 および CO_2 の間の変動比（ $\Delta CH_4 / \Delta CO_2$ 比）を取り、その経年変化を図4.2.1に示す。例えば、1997年冬の変動比とは、1996年11月から1997年3月までの ΔCH_4 と ΔCO_2 の散布図の傾き

（ $\Delta CH_4 / \Delta CO_2$ 比）をRMA (Reduced Major Axis) 法で月別に求め、その5ヶ月間の平均値を求めた。観測に基づく $\Delta CH_4 / \Delta CO_2$ 比は経年減少傾向を見せるが、これは主に中国における $^{ff}CO_2$ 排出量の増大により大気中 CO_2 濃度の変動が CH_4 よりも相対的に大きくなったことを反映したものと考えられる。図4.2.1ではIto2019AとBの2つのフラックスに基づく計算結果を図示したが、Ito2019Bを用いると全期間を通じて計算結果が観測結果を上回り、Ito2019Aを用いると観測された変化傾向をほぼ再現できることが分かった。

一般に $^{ff}CO_2$ 排出量はエネルギー統計に基づき推定され、また、解析期間である冬期は生物活動が活発ではない期間に相当していることから、本解析で用いられた冬期の CO_2 フラクスマップは、 CH_4 よりも不確実性が小さいと考えられる。したがって、図4.2.1に示された結果はIto2019AフラクスマップのEFAからの放出量の妥当性を示すと同時に、Ito2019Bの放出量が過大評価されている可能性を示唆するものである。Ito2019AとBの違いを考慮すると、水田（もしくは農業土壌）起源のフラックスについてはVISITに基づく推定結果のほうがより現実の変化を反映している可能性がある。ここでは冬期5か月間（11月から3月）のみを対象としており、水田からの CH_4 放出が夏季に比べて抑制された期間であることに注意する必要がある。水田起源のフラックスについては後述の季節変動の比較についても参照されたい（1-3を参照）。

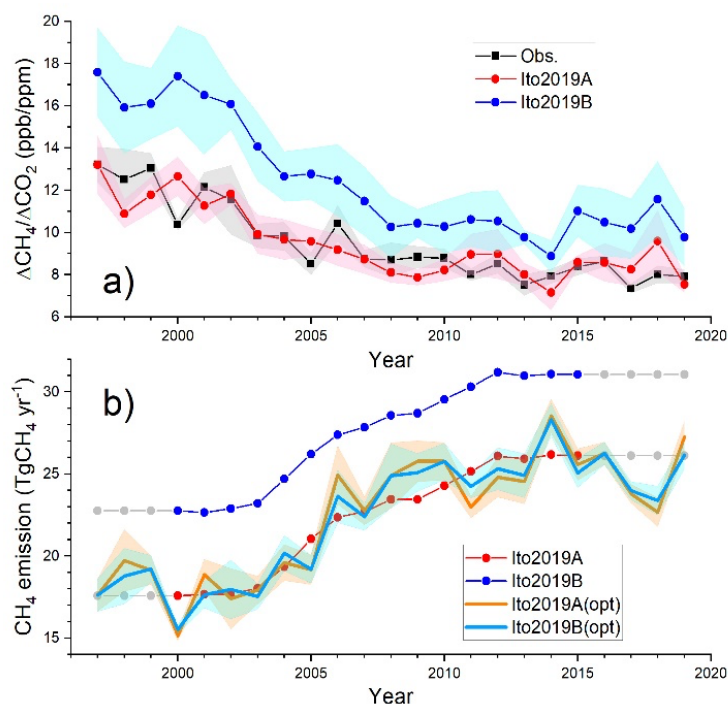


図 4.2.1 波照間ステーションにおける (a) $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ 比の経年変化、および (b) Ito et al. (2019) と本研究にもとづく中国起源 CH_4 放出量の経年変化。

1)-2. 中国における冬期の CH_4 放出量の推定

波照間ステーションで観測される CH_4 濃度の変動は主に EFA 領域内のフラックス変動を反映し、韓国・日本のフラックスの影響は小さいことが先行研究から分かっている¹⁾。そこで、 $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ 比の計算と観測結果が一致するように、EFA 領域内の中国のフラックス全体を最適化させて得られた結果を図 4.2.1b に示した。ここでは、EFA 領域外の中国からの CH_4 放出量は初期値のまま加算されている。最適化された中国からの CH_4 放出量は、Ito2019A と B の CH_4 フラックスマップを使用したいずれの場合でもほぼ同じ変化を示したが、これらは Ito2019A の初期値の放出量変化とよい一致を示した。最適化された放出量変化は初期値の変化と比べて年々変動が大きい、これはモデル計算結果が観測結果を完全には再現できないことに起因する誤差である可能性が高い。冬期は微生物起源の CH_4 放出が小さいことから、ここで推定された放出量は主に人為起源放出量の変化を反映するものと考えられる。中国の人為起源 CH_4 の放出量が 2003 年以降に急増したことは先行研究でも報告されているが^{1,2)}、本研究の結果は中国の放出量の増加傾向が 2010 年以降鈍化した可能性を示唆するものである。

1)-3. 中国における CH_4 フラックスの季節変動の推定

Ito2019A および B において中国からの CH_4 放出量の月別変化を見ると (図 4.2.2 左)、Ito2019B の 2 月から 4 月の放出量が Ito2019A より大きくなっていることが分かる。両者は水田 (もしくは農業土壌) 起源フラックスに違いがあるが、VISIT に基づく水田からの放出量が 1 月に極小、6 月から 7 月に極大となるのに対し、EDGAR v. 4.3.2 の農業土壌起源放出量は 3 月に極大を示す。そこで、月別の $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ 比の観測結果と計算結果を比較し、どちらの放出量の季節変化が妥当であるかを調べた。なお、4 月から 10 月には必ずしも空気塊が大陸から輸送されるわけではなく、特に夏季はその輸送頻度が少なくなるため、 ΔCH_4 の計算結果で中国起源の寄与率が 50% を超える場合のみに解析を限定し、全観測期間のデータを用いて $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ の月別平均値を求めた (図 4.2.2 右)。6 月から 9 月は中国起源の寄与率が特に小さく、 $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ 値のバラツキも大きいため、観測結果と計算結果の直接の比較は難しい。夏季を除くと、Ito2019A を用いた計算結果は観測された $\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ の

変化をよく再現するが、Ito2019Bを用いた計算結果では2月から4月に観測結果より大きな値を取ることが分かった。この結果は、EDGAR v. 4.3.2の農業土壌起源放出量の季節変化に見られる3月のピークが現実を反映していない可能性を強く示唆するものである。

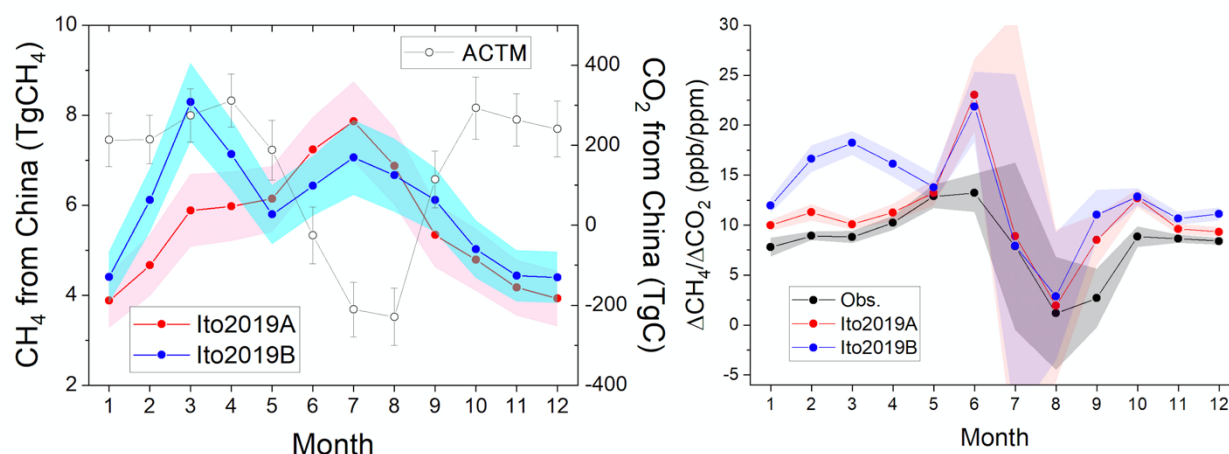


図 4.2.2. (左) Ito et al. (2019)に基づいて求められた2種類の中国起源 CH_4 放出量および本研究で使用された CO_2 放出量の月別変化（全球大気輸送モデル ACTM による逆推定）、および（右）波照間における $\Delta \text{CH}_4 / \Delta \text{CO}_2$ 比の月別変化。

2) CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ の観測結果にもとづく放出源別の寄与の評価

波照間ステーションにおいて2018年1月に高濃度 CH_4 を観測した汚染イベントの2例を図 4.2.3 に示した。これらの汚染イベントでは、 CH_4 濃度の増加とともに $\delta^{13}\text{C}$ の増加が観測された。上述の Ito2019A の CH_4 放出マップを用いた CH_4 濃度の LPDM シミュレーションは高濃度 CH_4 の出現を良く再現した。大気輸送の変動によって波照間ステーションの風上に位置する放出源は異なってくるため、濃度増加への放出カテゴリ別の寄与は汚染イベント毎に異なる。例えば図 4.2.3 では、石炭採掘や石油・天然ガスの使用に関連した放出（燃料漏出・エネルギー分野）や廃棄物処理に関連した放出が濃度増加に著しく寄与したことが計算結果からは示唆されている。また、これらの汚染イベントについての $\delta^{13}\text{C}$ の計算では、カテゴリ別放出源の $\delta^{13}\text{C}$ 値を2通りに仮定して計算を行った（図中のケース1と2）。ケース1では、 CH_4 放出源の文献調査データベース⁶⁾にもとづいて各放出源カテゴリに $\delta^{13}\text{C}$ の全球平均値を与えた。ケース2では、同データベースにもとづいて各放出源カテゴリに $\delta^{13}\text{C}$ の中国地域の平均値を与えた。同データベースによれば、化石燃料関連（工業・燃料漏出・エネルギー分野）の $\delta^{13}\text{C}$ の値は中国地域で高い値を示すとされ、これが計算結果の違いの原因である。観測結果は汚染イベント時の $\delta^{13}\text{C}$ の増加を示したが、このような $\delta^{13}\text{C}$ の増加はケース2でのみ再現されており、これは中国地域の化石燃料関連の CH_4 放出の $\delta^{13}\text{C}$ の値が世界の他の地域に比べて高い値を持つことを支持しており、上述のデータベースと整合する結果である。

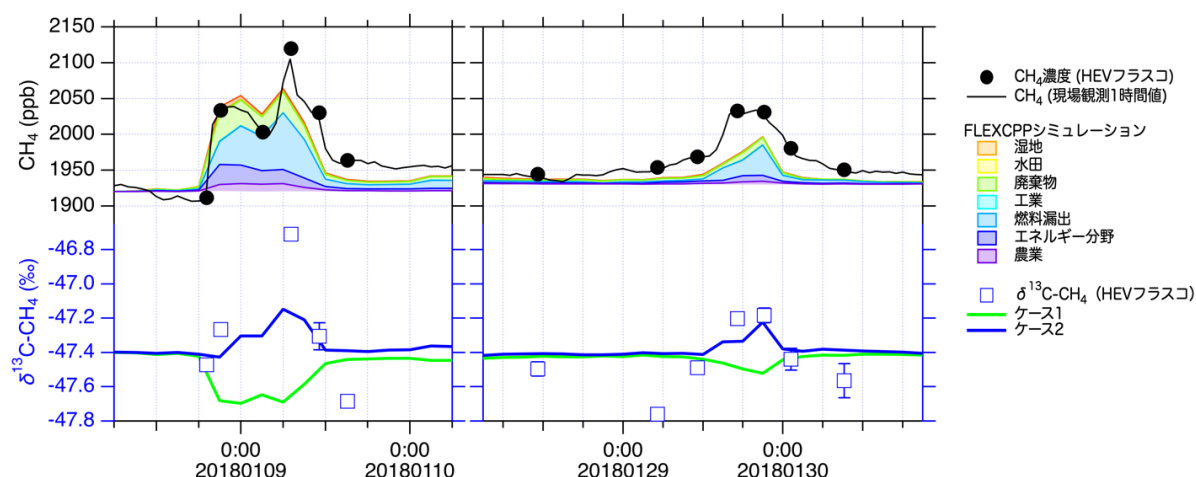


図 4.2.3. 2018 年 1 月に波照間ステーションで観測された汚染イベント時の CH_4 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の変動の例。 $\delta^{13}\text{C}$ のシミュレーションは、化石燃料関連の排出源の同位体比の値を 2 通り仮定した場合の計算を行った（ケース 1 と 2）。

2017 年 12 月から 2020 年 1 月まで、高濃度 CH_4 の汚染イベントの観測を継続し、 $\delta^{13}\text{C}$ データを取得できたイベント数は合計 19 となった。これらの CH_4 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の観測データにもとづき、汚染イベントに寄与した放出源の平均的な $\delta^{13}\text{C}$ の値を計算することができる。図 4.2.4 には全ての汚染イベントについて、 $\delta^{13}\text{C}$ と CH_4 濃度の逆数との関係を図示した。この図でわかるように、 CH_4 濃度の増加（図 4.2.4 では横軸の左方向への変化に対応する）に合わせて、図 4.2.3 のように $\delta^{13}\text{C}$ が増加したイベントだけではなく、 $\delta^{13}\text{C}$ が減少したイベントやほとんど変動が見られなかったイベントも見られた。このような $\delta^{13}\text{C}$ と CH_4 濃度の逆数との図をキーリングプロットと呼び、各汚染イベントに寄与した放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の値がこの相関図の回帰直線の切片として導出できる。

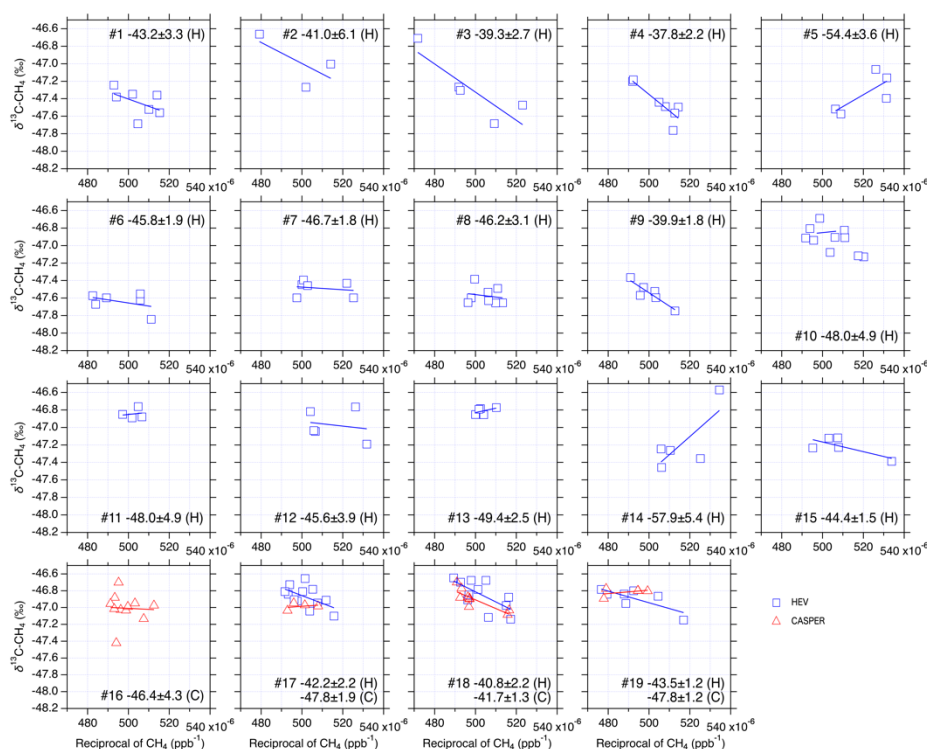


図 4.2.4. 2017 年 12 月から 2020 年 1 月までに観測された全 19 イベント時の $\delta^{13}\text{C}$ と CH_4 濃度の逆数との関係（キーリングプロット）。青が HEV 試料、赤が CASPER 試料の測定結果で、各パネルには回帰直線の切片の値を示した。

キーリングプロットから推定された放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の値をイベント番号別に図 4.2.5（上）に図示した。各イベントに寄与した平均的な放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の推定値は、 -37.8‰ から -57.9‰ の範囲であった。CH₄濃度の増加に対して $\delta^{13}\text{C}$ の変動が非常に小さかったイベントも多く、放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の推定値の信頼度にはイベント毎の違いが大きいため、図 4.2.5（上）ではキーリングプロットの決定係数に応じて記号のサイズと色を変えて図示した。ここで推定された放出源の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、各汚染イベント時に波照間ステーションに到達した空気塊について、風上の放出源の影響が混合した平均的な値を示していると解釈できる。計算では放出カテゴリ別の寄与率が計算できるため、観測による $\delta^{13}\text{C}$ の推定値と比較することで、計算に使用したカテゴリ別放出マップの妥当性を評価できると考えられる。

図 4.2.5（上）には、2019 年 3 月までの汚染イベント（イベント番号 11 まで）の計算結果による放出源の $\delta^{13}\text{C}$ 値も合わせて示した（白抜き青丸）。これらの値は観測と同様、大気変動にもとづくキーリングプロットから計算した。観測結果と比べてやや低い値を示しているが、イベント毎の変動の傾向は比較的良く捉えられている。また、これらの汚染イベント時のシミュレーションにおける放出カテゴリ別の寄与率を図 4.2.5（下）に示した。各放出源を合算した平均的な $\delta^{13}\text{C}$ の値も示した（塗り潰しの青丸で右軸を参照）。燃料漏出（Fugitive）の寄与が大きいイベントでは放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の平均値が高くなる一方、燃料漏出の寄与が比較的小さく廃棄物（Waste）や水田（Rice paddy）、農業（Agriculture）の寄与が大きいイベントでは放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の平均値が低くなっていることがわかる。この放出源 $\delta^{13}\text{C}$ の変動は予測される大気変動（図 4.2.5 上）と同期しており、風上の放出源のカテゴリ別寄与の変動が大気変動の主要因であると解釈できる。

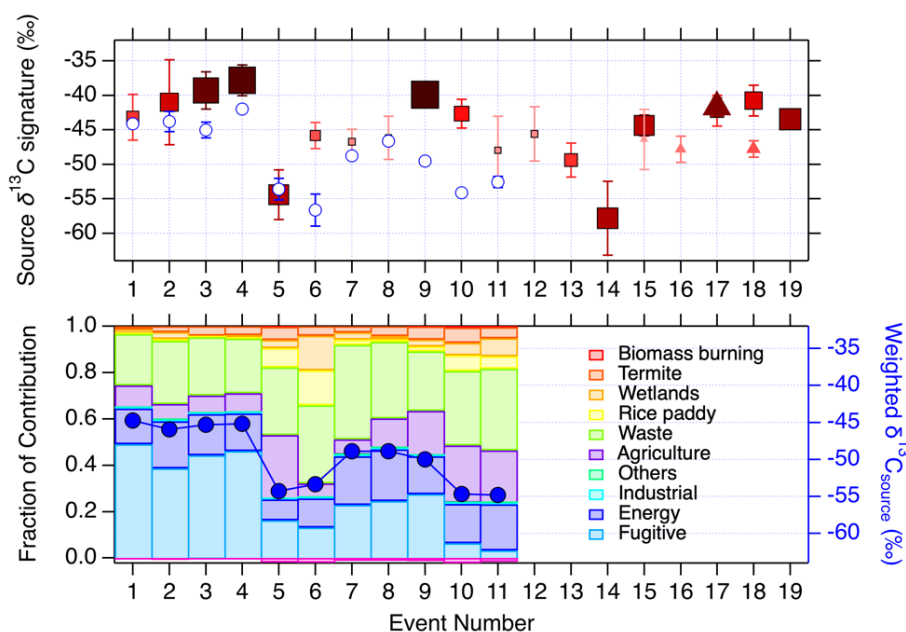


図 4.2.5.（上）各汚染イベント時の CH₄濃度の増加に寄与した放出源の $\delta^{13}\text{C}$ の推定値。HEV 試料（四角）と CASPER 試料（三角）のデータからの推定値は、どちらもキーリングプロットの決定係数 (R^2) が大きいほどサイズが大きかつ色が濃くなるように図示した。白抜き青丸は計算結果のキーリングプロットによる放出源 $\delta^{13}\text{C}$ の推定値。（下）各汚染イベント時のモデル計算による放出源別の寄与率。各放出源に代表的な $\delta^{13}\text{C}$ の値を与えて重み付け平均した結果が塗り潰しの青丸（右軸）。

そこで、観測と計算による放出源 $\delta^{13}\text{C}$ の推定値の関係を図 4.2.6 に図示した。この図からわかるように、計算結果は観測結果に比べて放出源の $\delta^{13}\text{C}$ を過小評価する傾向があり、本研究での計算に使用した CH₄フラックス（Ito2019A）のカテゴリ別の寄与率に改良の余地があることを示唆してい

る。比較的高い $\delta^{13}\text{C}$ の特徴を持つ化石燃料関連のカテゴリの寄与を増加させるか、あるいは、比較的低い $\delta^{13}\text{C}$ の特徴を持つ農業や廃棄物関連のカテゴリの寄与を減少させることによって、計算結果を改善できる可能性がある。このような CH_4 フラックスの評価の精度向上に向け、汚染イベントのデータ数を増やすための観測の継続とともに、対応する計算結果の更新も継続する必要がある。

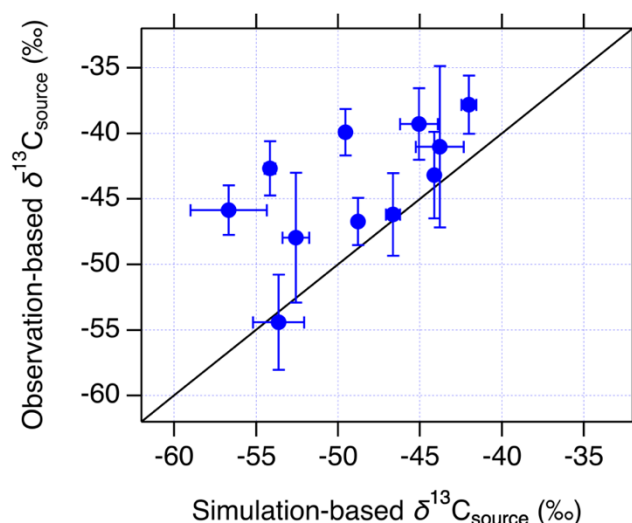


図 4.2.6. 観測結果（縦軸）と計算結果（横軸）にもとづく放出源 $\delta^{13}\text{C}$ の推定値の関係。

3) 炭化水素の観測結果にもとづく化石燃料起源放出の評価

図 4.2.7 に、2017 年 1 月から 2019 年 7 月の間の CH_4 濃度と C_2H_6 濃度の観測結果を示す。ここでは、各 100 時間の下位 10 パーセンタイル値としてベースライン濃度を統計的に求めた。 CH_4 と C_2H_6 はともに季節変動が見られ、ベースライン濃度が冬期に高く夏期に低かった。これは、波照間で見えられる空気塊が冬期は主に北から、夏期には主に南から輸送されること、両成分の緯度分布が北半球中緯度にピークを持つこと、そして両成分の消失源が夏期にピークを持つことと整合的である。また、ベースライン濃度の変動に加えて、短期変動が C_2H_6 でも頻繁に観測された。観測された濃度からベースライン濃度を差し引いて求めた短期変動 (ΔCH_4 および $\Delta\text{C}_2\text{H}_6$) は、両成分の間で高い相関を示すとともに、冬期には $\Delta\text{C}_2\text{H}_6$ の変動が ΔCH_4 より相対的に大きくなる傾向が見られた（図 4.2.8）。これは、両成分が共通した放出源を持つこと、夏期より冬期に $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ 比が高い放出源の影響を受けていることを示している。上述のように、 C_2H_6 は化石燃料起源 CH_4 に随伴して主に放出されるため、冬期の高い $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ 比は化石燃料の影響が冬期に特に大きくなることを示している。このように冬期に高い $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ 比が観測されたことは、一般に気温や水位に依存して水田や湿地など生物起源の CH_4 放出量が冬期に低くなるという季節性と矛盾しない。

短期変動成分 (ΔCH_4 と $\Delta\text{C}_2\text{H}_6$) は、主に周辺地域からの汚染による濃度増加を表すが、その変動幅は放出源からの輸送距離が長くなるにつれて減衰し、比較的遠方にある放出源の影響をベースライン濃度の変動と区別することは困難になる。そこで、統計的手法を用いて、周辺地域からの汚染に関する情報を特に強く持つと考えられる汚染イベントを抽出して放出源解析に用いた。具体的には、最小振幅 (30 ppb)、閾値 (0.1 ppb) の条件で CH_4 の短期変動成分からピーク (CH_4 の汚染イベント) を抽出し、そのピークの前後 12 時間に含まれる ΔCH_4 と $\Delta\text{C}_2\text{H}_6$ の傾き ($\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$) を RMA 法により求めた。また、 C_2H_6 と同様に、 C_3H_8 についても汚染イベントにおける ΔCH_4 と $\Delta\text{C}_3\text{H}_8$ の傾き ($\Delta\text{C}_3\text{H}_8/\Delta\text{CH}_4$) を求めた。

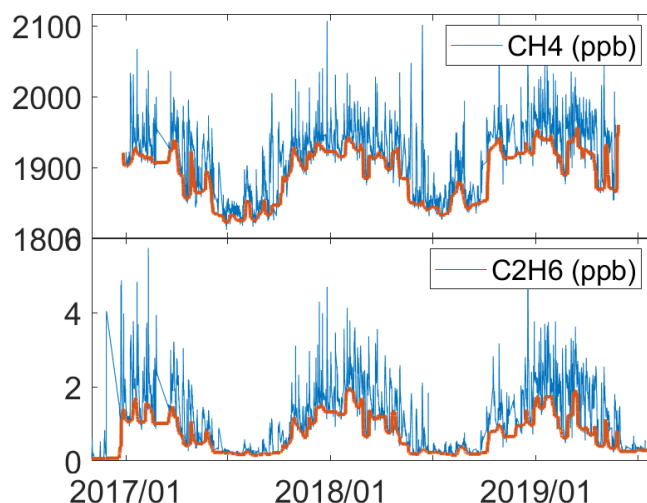


図 4.2.7 波照間ステーションで観測された CH_4 と C_2H_6 の濃度（青線）、および統計的に推定されたそれぞれのベースライン濃度（赤線）の変動。

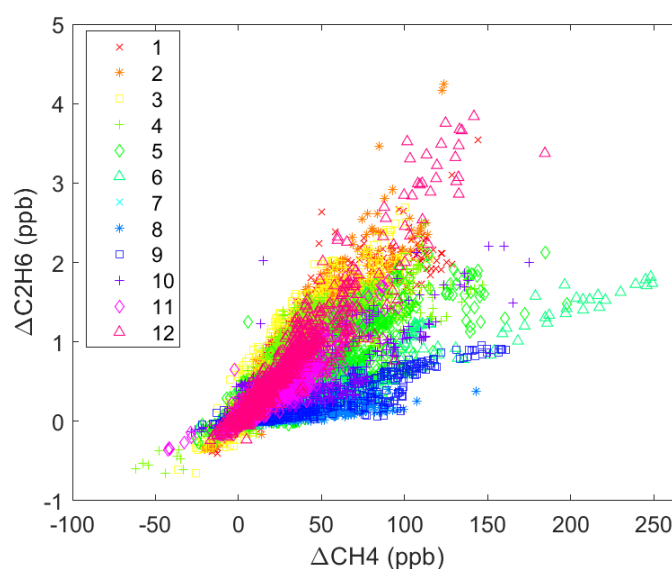


図 4.2.8 観測月別の CH_4 濃度と C_2H_6 濃度の短期変動成分（ ΔCH_4 と $\Delta\text{C}_2\text{H}_6$ ）の相関関係。

図 4.2.9 に、各汚染イベントについて求めた $\Delta\text{C}_3\text{H}_8/\Delta\text{CH}_4$ と $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ の散布図を示す。生物学的な CH_4 の放出源は C_2H_6 や C_3H_8 の放出を伴わないため、 $\Delta\text{C}_3\text{H}_8/\Delta\text{CH}_4$ と $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ はともに化石燃料放出源の指標となる。観測される比は化石燃料放出源と生物起源放出源（ $\Delta\text{C}_x\text{H}_y/\Delta\text{CH}_4 \approx 0$ ）をエンドメンバーとする 2 成分系の寄与率で決まるため、両放出源のエンドメンバーの間に分布すると予想される。そこで、化石燃料起源の放出源のデータベース⁶⁾を用いて中国の化石燃料放出源による放出比を計算し、観測と比較した。ここでは、化石燃料放出比は、天然ガスなど由来型ガスと石炭掘削由来の各放出源の中央値を放出量で重みづけ平均した値とした。その結果、 $\Delta\text{C}_2\text{H}_6/\Delta\text{CH}_4$ については、データベース中の化石燃料放出比は波照間ステーションでのほとんどの観測値より高く、すなわちエンドメンバーとして観測結果と矛盾しない。一方、 $\Delta\text{C}_3\text{H}_8/\Delta\text{CH}_4$ については、データベース中の放出比が観測値の中央付近に位置しており、すなわちエンドメンバーとして観測値の多くを説明できない。その原因としては、化石燃料放出比が過小見積もりされていることや化石燃料以外の放出源が $\Delta\text{C}_3\text{H}_8/\Delta\text{CH}_4$ の観測結果に影響している可能性が考えられる。

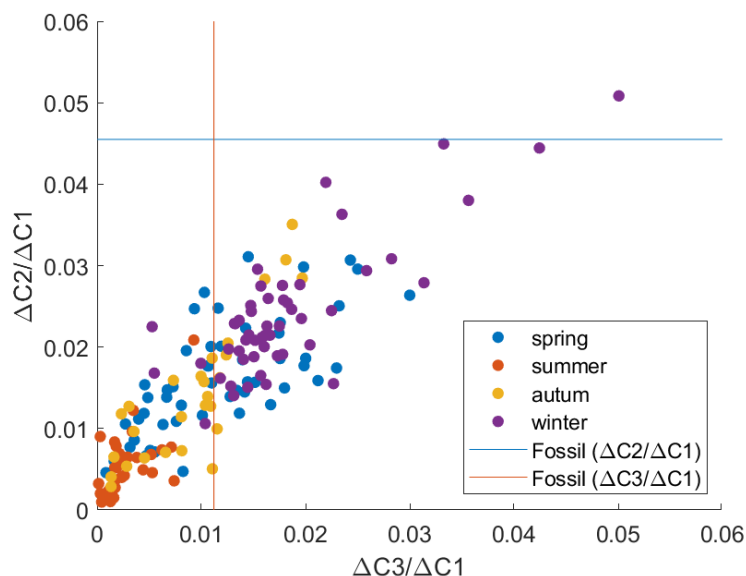


図 4.2.9 各汚染イベントにおける $\Delta C_3H_8 / \Delta CH_4$ と $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4$ の相関関係。図中の各線は、化石燃料放出源の放出比データベース⁶⁾で報告されている $\Delta C_3H_8 / \Delta CH_4$ と $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4$ の代表値を示す。

続いて、 $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4$ を指標として各汚染イベントにおける化石燃料放出源の寄与率を推定した。この推定では、化石燃料起源および生物起源のエンドメンバーをそれぞれ $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4 = 0.045$ および $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4 = 0.001$ と仮定し、大陸の影響を強く受ける冬期のデータを対象とした。また、サブテーマ I で開発された CH_4 フラックスを評価するため、上述の LPDM を用いた放出源のセクター別計算を行い、化石燃料寄与率を求めた。

図 4.2.10 に観測とモデル計算で推定された化石燃料寄与率の比較結果を示す。観測ベースの推定結果では化石燃料寄与率が約 4 割を中心に分布したのに対し、モデルベースの推定結果は 3 割程度を平均として 0～6 割の寄与率を示した。各汚染イベント別に見ると、モデルによる推定結果では 2 割を下回る低い寄与率が比較的多く認められた。このような低い寄与率を観測結果と矛盾しないように説明するためには、化石燃料起源のエンドメンバーとして $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4$ が 0.1 から 0.2 程度の値を仮定する必要がある。しかし、これらの値は化石燃料放出源のデータベース⁶⁾において中国の放出比の最大値（外れ値を除く）に匹敵する高い値であり、代表的な値としては考えにくい。この場合、モデル計算が化石燃料起源 CH_4 の寄与を過小見積もりしている可能性が示唆される。一方、バイオ燃料やバイオマス燃焼など化石燃料以外の C_2H_6 放出源の関与も考えられる。これらの放出量は、化石燃料に対して 3 割以下と小さいと考えられているが（先行研究による東アジアのエタン放出量の推定値は、化石燃料：1.9 Tg/yr、バイオ燃料：0.4 Tg/yr、バイオマス燃焼：0.1 Tg/yr⁷⁾）、 $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4$ 放出比（ $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4 = 0.066^{7)}$ ）は化石燃料起源と同程度であり、 $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4$ の観測結果に寄与している可能性がある。以上の考察から、モデル計算が化石燃料起源 CH_4 の寄与を過小見積もりしているか、あるいはバイオ燃料やバイオマス燃焼といった C_2H_6 の随伴を伴う他の放出源が寄与している可能性が示唆される。 $\Delta C_2H_6 / \Delta CH_4$ にもとづく観測ベースの推定結果にはエンドメンバーの不確実性が大きく、放出比データベースの拡充・高度化が今後の課題と考えられる。

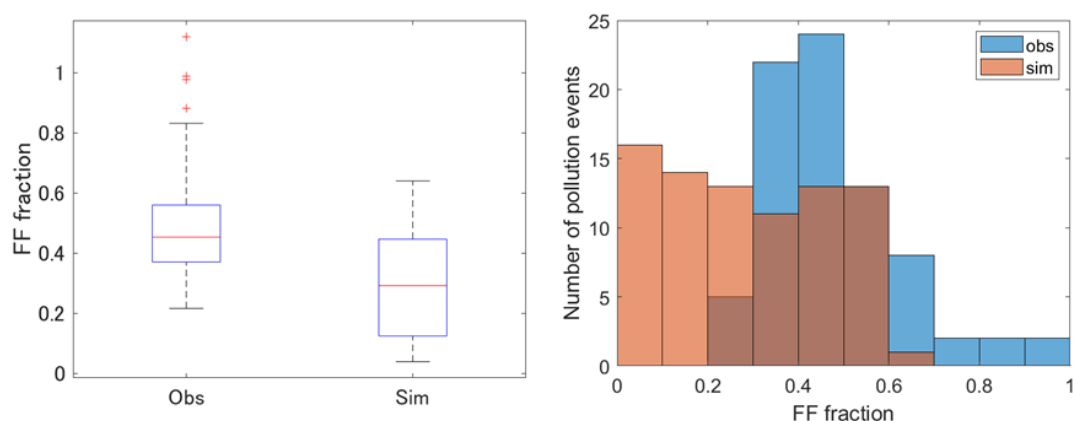


図 4.2.10 波照間ステーションで観測された汚染イベントについて観測 (Obs) 及びモデル計算 (Sim) を用いて推定された化石燃料放出源寄与率の比較 (左：箱ひげ図、右：ヒストグラム)。

5. 本研究により得られた成果

達成された項目：CH₄ 同位体と炭化水素類の測定システム構築、波照間ステーションでの大気成分観測、炭化水素類の準連続観測、同位体比の観測、各種観測データやモデル計算に基づく統合的解析
達成されなかった項目：なし

(1) 科学的意義

サブテーマ 2 では CH₄ 発生プロセスに関する情報を有する炭素同位体や炭化水素類の高精度分析システムの開発、観測の実施、そのデータを用いた起源推定という研究計画内容を十分に達成することができた。まず研究計画に沿って、観測に基づいて東アジアの CH₄ を起源別に評価するシステムの基礎を築いた。波照間ステーションで冬期 (11 月から 3 月) に観測された CH₄ および CO₂ 濃度の短期変動成分と、LPDM を用いて計算された短期変動成分と比較することで、Ito et al. (2019) で報告された東アジア域の CH₄ フラックスの妥当性を評価した。その結果、Ito et al. (2019) で推定された中国の長期的な放出量トレンド (2003 年から 2010 年の増加と 2010 年以降の停滞) は観測結果と整合的であることが分かった。一方、水田 (農業土壌) 起源 CH₄ フラックスの季節変動について、EDGAR v. 4.3.2 の推定結果が 2 月から 4 月の放出量を過大評価している可能性が示唆され、VISIT に基づく季節変動の方が観測結果と整合的であった。長期的な放出量トレンドについては先行研究を更新した成果が得られ、放出インベントリの季節変動の検討は本研究で初めて得られた知見である。

また、本研究により波照間ステーションでの $\delta^{13}\text{C}$ の測定が可能となったことで、様々な CH₄ 放出源のカテゴリー別の寄与を評価できる観測データが初めて取得できた。この基礎となった $\delta^{13}\text{C}$ の測定システムは、同様のシステムと比較しても先駆的な技術を取り入れた効率的な試料分析を可能にした。放出カテゴリー別の LPDM 計算を組み合わせ、サブ 1 で整備した CH₄ 排出マップのカテゴリー別の寄与を $\delta^{13}\text{C}$ の観測データをもとに評価した。さらに、本研究では CH₄ フラックスの内訳を評価するために波照間ステーションでの C₂H₆ 観測システムを構築し、C₂H₆ と CH₄ の変動比の解析による化石燃料放出源の寄与の評価も行った。 $\delta^{13}\text{C}$ と C₂H₆ の観測結果にもとづく解析はともに化石燃料放出の寄与率が過小評価である可能性を示唆した。東アジア地域の CH₄ 放出量や放出源のカテゴリー別の寄与を大気観測データ (CH₄ 濃度、 $\delta^{13}\text{C}$ 、C₂H₆) にもとづいたトップダウン解析により総合的に解析した研究は前例がなく、将来の排出インベントリの高精度化にも資する先駆的な成果である。

(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>

波照間ステーションにおけるCH₄濃度の観測データは国内外の研究グループに提供され、モデルを利用した全球CH₄収支の解析研究に活用されるため、温室効果ガス収支の国際的な統合解析プロジェクト Global Carbon Project (GCP)で取りまとめられる全球CH₄収支の評価にも大きな貢献が期待される。メタンの安定炭素同位体比や炭化水素を利用した本研究の成果は東アジアの起源別収支評価に関わる重要な知見であり、モデル解析や全球CH₄収支評価への貴重な検証材料を提供できる。このように期待される学術論文やGCPの成果は、いずれもIPCC報告書の重要な基礎的知見となる。

6. 国際共同研究等の状況

Global Carbon Project CH₄ synthesis : Pep Canadell 博士 (オーストラリア・CSIRO) 、Phillipe Ciais 博士 (フランス・IPSL) 、Benjamin Poulter 博士 (米国・NASA-GSFC) などが中心にとりまとめ、CH₄関係の研究者による地域・グローバルスケールのCH₄収支統合解析に観測データやモデル推定結果を提供し論文執筆に参加した (伊藤昭彦、遠嶋康徳、齊藤誠)。複数手法による推定結果を統合するもので、広域スケールのCH₄収支評価としては最も信頼性が高く、IPCC 報告書などに該当成果を提供する位置づけにある。

AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment) : Ronald Prinn 教授 (米国・MIT) 、Ray Weiss 教授 (米国・Scripps 海洋研究所) を中心に 9 か国・11 研究機関から構成される大気中微量ガスの国際共同観測プログラムであり、CH₄を含む微量ガスの観測結果は IPCC などに提供されている。CH₄のトレーサーを含む VOC の観測に関して波照間ステーションは AGAGE 関連サイトとして位置づけられ、測定法や観測結果について共同研究を進めている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) T. Umezawa, C. A. M. Brenninkmeijer, T. Röckmann, C. van der Veen, S. C. Tyler, R. Fujita, S. Morimoto, S. Aoki, T. Sowers, J. Schmitt, M. Bock, J. Beck, H. Fischer, S. E. Michel, B. H. Vaughn, J. B. Miller, J. W. C. White, G. Brailsford, H. Schaefer, P. Sperlich, W. A. Brand, M. Rothe, T. Blunier, D. Lowry, R. E. Fisher, E. G. Nisbet, A. L. Rice, P. Bergamaschi, C. Veidt and I. Levin: Atmospheric Measurement Techniques, 11, 1207-1231, doi:10.5194/amt-11-1207-2018 (2018)
Interlaboratory comparisons of $\delta^{13}\text{C}$ and δD measurements of atmospheric CH₄ for combined use of data sets from different laboratories
- 2) T. Umezawa, S. J. Andrews, and T. Saito: Journal of the Meteorological Society of Japan, 98(1), 115-127, doi:10.2151/jmsj.2020-007 (2020)
A cryogen-free automated measurement system of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane

<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) 遠嶋康徳, 曾継業, 白井知子, 勝又啓一, 町田敏暢: 日本地球惑星科学連合2018年大会 (2018)
波照間における大気 CH₄ の観測から推定された中国からの CH₄ 放出量の継続的な増加
- 2) 遠嶋康徳, 曾継業, 白井知子, 勝又啓一, 伊藤昭彦, 笹川基樹, 町田敏暢: 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019)

波照間で観測される大気中 CH_4 の短期変動の季節性と東アジア地域からの放出量との関係

- 3) Umezawa, T., and T. Saito : 日本地球惑星科学連合2019年大会 (2019)
A cryogen-free automated measurement system of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane
- 4) Umezawa, T., S. Andrews, and T. Saito : The 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2019) (2019)
A cryogen-free automated measurement system of stable carbon isotope ratio of atmospheric methane
- 5) Sperlich, P., G. Brailsford, R. Moss, T. Bromley, S. Gray, R. Martin, H. Moossen, M. Rothe, W. Brand, S. Englund-Mitchel, B. Vaughn, J. White, T. Umezawa, T. Röckmann, E. Popa, E. Nisbet, R. Fisher, and D. Lowry : The 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2019) (2019)
Strategies to assess and reduce current inter-laboratory differences in $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ and $\delta^2\text{H}\text{-CH}_4$ measurements in air samples
- 6) 伊藤昭彦, 遠嶋康徳, 羽島知洋, 斉藤拓也, 梅澤拓, 平田竜一, 齊藤誠, 寺尾有希夫, 殷帥, 井上晋平 : 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
ボトムアップ手法による東アジア地域メタン収支評価
- 7) 寺尾有希夫, 梅澤拓, Manish Naja, Md. Kawser Ahmed, 野村渉平, 町田敏暢, 向井人史, Prabir Patra : 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019)
南アジアにおけるメタン排出の起源別推定のための大気中メタン安定炭素同位体比観測
- 8) 梅澤拓, 斉藤拓也, 遠嶋康徳, 寺尾有希夫, 伊藤昭彦 : 日本気象学会2019年度秋季大会 (2019) (専門分科会コンビーナ)
東アジアのメタン排出源のセクター別評価に向けて: 波照間ステーションで観測される高濃度メタンイベントに伴うメタンの安定炭素同位体比と炭化水素の変動
- 9) 斉藤拓也, 梅澤拓, 遠嶋康徳 : 第24回大気化学討論会 (2019)
波照間で観測されたメタンとエタンの関係

(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) 国立環境研究所一般公開 (2018年4月21日、参加者約150名) にて「メタンを知ろう、測ろう」最新機器を用いた大気中メタン測定の実演デモンストレーションとして、人間の呼気の CH_4 濃度を準リアルタイムで測定した。またメタン収支研究の紹介としてメタン収支や推進費の内容を解説したポスター展示を行った。
- 2) 公開シンポジウム「変わりゆく環境と私たちの健康」(主催: 国立環境研究所、2019年6月14日および21日、北九州市立男女共同参画センター ムーブ(福岡県北九州市: 参加者210名) およびメルパルクホール(東京都港区: 参加者640名)) にてポスターセッション発表「東アジア地域のメタン排出源を監視する」
- 3) 国立環境研究所一般公開 (2019年7月20日、参加者6165名) にて「メタンを知ろう、測ろう」温室効果ガスであるメタンに関するクイズや、メタン発生土壌からの空気の濃度測定の実演デモンストレーション、解説を行った。またメタン収支研究の紹介としてメタン収支や推進費の内容を解説したポスター展示を行った。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 共同プレスリリース「東アジアのメタン放出分布をボトムアップ手法で詳細にマップ化」、2019年6月17日、国立研究開発法人国立環境研究所 国立研究開発法人海洋研究開発機構。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Y. Tohjima, M. Kubo, C. Minejima, H. Mukai, H. Tanimoto, A. Ganshin, S. Maksyutov, K. Katsumata, T. Machida, and K. Kita: Atmospheric Chemistry and Physics, 14, 1663-1677, doi:10.5194/acp-14-1663-2014 (2014)
Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄/CO₂ and CO/CO₂ correlations observed at Hateruma Island
- 2) R. Thompson, A. Stohl, L. X. Zhou, E. Dlugokencky, Y. Fukuyama, Y. Tohjima, S.-Y. Kim, H. Lee, E. G. Nisbet, R. E. Fisher, D. Lowry, R. F. Weiss, R. G. Prinn, S. O' Doherty, D. Young, and J. W. C. White: Journal of Geophysical Research Atmospheres, 120, 4352-4369, doi:10.1002/2014JD022394 (2015)
Methane emissions in East Asia for 2000-2011 estimated using an atmospheric Bayesian inversion
- 3) A. Stohl, C. Forster, A. Frank, P. Seibert, and G. Wotawa: Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 2461-2474, doi:10.5194/acp-5-2461-2005 (2005)
Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2
- 4) J. Zeng, H. Nakajima, T. Matsunaga, H. Mukai, K. Hiraki, Y. Yokota: Lagrangian modeling of the atmosphere, Geophysical Monograph Series 200, 163-172, doi:10.1029/2012GM001245 (2013)
Linking Carbon Dioxide Variability at Hateruma Station to East Asia Emissions by Bayesian Inversion
- 5) A. Ito, Y. Tohjima, T. Saito, T. Umezawa, T. Hajima, R. Hirata, M. Saito, and Y. Terao: Science of the Total Environment, 676, 40-52, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.263 (2019)
Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation
- 6) O. A. Sherwood, S. Schwietzke, V. A. Arling, and G. Etiope: Earth Syst. Sci. Data, 9, 639-656, doi:10.5194/essd-9-639-2017 (2017)
Global Inventory of Gas Geochemistry Data from Fossil Fuel, Microbial and Burning Sources, version 2017
- 7) Z. A. Tzompa-Sosa, E. Mahieu, B. Franco, C. A. Keller, A. J. Turner, D. Helmig, A. Fried, D. Richter, P. Weibring, J. Walega, T. I. Yacovitch, S. C. Herndon, D. R. Blake, F. Hase, J. W. Hannigan, S. Conway, K. Strong, M. Schneider, E. V. Fischer: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122, 4, 2493-2512, doi:10.1002/2016JD025767 (2017)
Revisiting global fossil fuel and biofuel emissions of ethane

Ⅱ－３ メタンの気候変動フィードバック効果に関する研究

国立研究開発法人海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター 羽島 知洋

〈研究協力者〉

国立研究開発法人海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター 井上 忠雄（平成 29 年 12 月～）

平成 29 年度～令和元年度研究経費（累計額）：32,110 千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成 29 年度：6,760 千円、平成 30 年度：12,350 千円、令和元年度：13,000 千円）

〔要旨〕

サブテーマ 3 では、CH₄ がフィードバック過程を介して温暖化進行にどのような影響もたらしているのかを調べるため、CH₄ に関する温暖化予測モデル(地球システムモデル)の開発・改良と全球温暖化シミュレーションの実施、そのフィードバックに関する解析と東アジアを中心としたアジア域の CH₄ 収支との関係について調べた。(1)大気 CH₄ 濃度の緩和が将来の温暖化進行をどの程度抑制しているのかについて調査するため、IPCC-AR5 世代の地球システムモデルとシナリオ(Representative Concentration Pathways, RCPs)を用いた CH₄ 濃度緩和実験を実施した。RCP8.5 シナリオ実験では 2100 年までに全球気温の上昇が約+5.4℃となるが、CH₄ 濃度だけを RCP2.6 シナリオに差し替えると約 0.6℃の冷却効果をもたらした。さらに、この温暖化緩和により陸域および海洋の C シンクが強化されており、気候-炭素循環フィードバックを介したさらなる冷却効果を示唆する結果が得られた。(2)自然起源のうち最大の放出源である湿地 CH₄ 放出が、温暖化進行にともなってどのように変化するかを調べるため、IPCC-AR6 世代の最新地球システムモデルに湿地 CH₄ 放出スキームを導入し、最新将来シナリオ Shared Socio-Economic Pathways (SSP) に基づくシナリオ (SSP5-8.5 シナリオ) 実験を実施した。特に湿地 CH₄ 放出のホットスポットにおいてその放出量が増加し、温暖化は湿地 CH₄ 放出に拍車をかけることが確認されるとともに、2100 年には 340 Tg CH₄ yr⁻¹ までその放出量が増加するという結果が得られた(産業革命以前の状態から 1.86 倍)。これに対し、東アジアを中心とするアジア域では、産業革命前からの湿地 CH₄ 放出の増加は 1.57 倍と、全球と比較してその感度は小さく、同地域では相対的に人為 CH₄ 排出が重要であるという示唆が得られた。(3)大規模 CH₄ 放出イベントによる温暖化を評価するため、上で開発した地球システムモデルに対してさらに大気化学反応・輸送モデルを結合し、CH₄ エミッションに基づく気候-炭素循環-CH₄ 循環予測が可能な新たなモデルを開発した。これを用いて大規模 CH₄ 放出イベントを想定した実験(1 年目に 5000 Tg の CH₄ 放出を強制する実験)を行ったところ、大気 CH₄ 濃度は最大で約 2500 ppb まで上昇し、全球平均気温は最大で+0.5℃に達した。この温暖化進行により湿地からの CH₄ 放出も促進されるが、本実験での全球平均気温の上昇は+0.5℃程度であるため大きな増加は見られなかった。ただし、土壌 CH₄ 生成の温度依存性や気候-炭素循環フィードバックを介した温暖化の増幅効果を考えると、この+0.5℃という昇温はさらに大きくなる可能性がある。(4)東アジア域における将来の CH₄ 濃度/人為排出量緩和が今後どのように見込まれているのかを調べるため、最新温暖化予測シナリオ SSPs における東アジアを中心としたアジア域の人為 CH₄ 排出量を解析した。その結果、ベースラインシナリオである SSP3-7.0 を除き、全てのシナリオにおいてアジア域の人為排出量の削減が見込まれていることが明らかになった。東アジアを中心としたアジア域では農業や汚泥といった人口に依存する人為 CH₄ 排出が大きく、同地域における将来人口の重要性を示唆していた。また、いずれのシナリオにおいても全球人為排出量に占めるアジア域の割合が大きく、同地域が将来の全球 CH₄ 収支においても重要な存在として見込まれていることが明らかになった。

〔キーワード〕

湿地 CH₄、気候-CH₄ フィードバック、気候-炭素循環フィードバック、地球システムモデル

1. はじめに

大気中メタン(CH_4)は CO_2 に次いで第2の温室効果を持つと同時に、人為 CH_4 排出の増加にともなってその大気中濃度が上昇している。この傾向は CO_2 と同様であるが、 CO_2 と比べて CH_4 はその大気寿命が比較的短い(CH_4 全球収支において大気シンクの影響が大きい)ため、その排出削減がより効果的に濃度低下に現れる点が特徴である。その一方で CH_4 のソースやシンクは多様であり、 CH_4 の各種過程において未解明な点が多く、また全球や東アジアにおける現状収支の推定にも大きな不確実性が残される。 CH_4 排出の削減が今後の温暖化進行にどのような影響を与えるのかを考えるにあたり重要な点は、人為 CH_4 排出の今後の動向、大気中 CH_4 濃度の変動、さらに気候や炭素循環との各種フィードバック過程を通じた温暖化増幅(/緩和)効果である。温暖化の進行にともない、このような各種フィードバック過程がどのように作用し、そしてどの程度温暖化の進行を変えうるのかについて調べることは、パリ協定で定められる厳しい温暖化目標を実現する上で必要な科学的課題である。特に東アジアでは農業をはじめとする人為起源排出も多く、同地域がこのようなフィードバック過程および温暖化進行にどのように影響しているのかを明らかにする必要がある。

2. 研究開発目的

サブテーマ3では、気候変動予測を行う地球システムモデルに CH_4 循環スキームを組み込み、アジア陸域の CH_4 収支変動(緩和策による削減や大規模放出イベント)が温暖化の進行に与える影響を評価する。このため、 CH_4 循環過程に焦点を置いた温暖化予測モデルの開発・改良および各種数値実験を実施し、全球・アジアの CH_4 収支変化と将来の温暖化進行の関係を調査する。

3. 研究開発方法

本サブ課題では、限られた研究実施期間内に効率的に研究開発を行うため、本サブ課題の研究目的を達成する上で必要となるモデル開発を実施しつつ、これと平行して都度利用可能なモデルを最大限活用しながら研究を行った。概略は以下の通りである。

- 研究初年度では、IPCC-AR5等で活用されてきた温暖化予測モデル(地球システムモデルMIROC-ESM, Watanabe et al., 2011)と予測シナリオ(Representative Concentration Pathways, RCPs)が利用可能であったため、これを用いることにより、将来の CH_4 濃度緩和がどの程度の温暖化緩和作用をもちうるのかについて調査を行った。ここで用いたモデルには CH_4 循環過程が含まれておらず、 CH_4 濃度をモデル入力値としている。この内容は「3-1/4-1 シナリオに基づくフィードバック効果の評価1: CH_4 濃度緩和」で詳述する。
- 次年度～最終年度では、IPCC-AR6世代の最新の温暖化予測モデル(地球システムモデルMIROC-ES2L, Hajima et al., 2020)のプロトタイプ版、および最新予測シナリオ(Shared Socio-Economic Pathways, SSPs)が利用可能であった。自然起源最大の CH_4 放出源である湿地 CH_4 放出が、温暖化進行にともなってどのように変化しうるのかを調べるため、この最新温暖化予測モデルに対して湿地 CH_4 放出スキームを導入し、その上でSSPsを用いた予測実験を実施した。ここでは湿地 CH_4 放出速度は明示的に計算されるものの、本モデルでは大気中 CH_4 化学反応・輸送過程等は扱えないため、湿地 CH_4 放出量は診断的に予測される(したがって大気 CH_4 濃度をはじめとする各種温室効果ガス濃度は、上と同じく入力値としてモデルに与える)。この内容の詳細は「3-2/4-2 シナリオに基づくフィードバック効果の評価2: 温暖化と湿地メタン放出」で示す。
- 最終年度では、上で開発したモデルに対してさらに大気化学・輸送過程を導入した温暖化予測モデルの開発が完了した。本モデルを用いることにより、大規模 CH_4 放出イベントによって生じる温暖化を評価するための実験を行った。この実験では、大規模 CH_4 放出量をモデルに与えると、全球 CH_4 動態および大気中濃度が各種フィードバック作用下で解かれ、温暖化が予測される。この内容の詳細は「3-3/4-3 大規模メタン放出による温暖化評価」で示す。
- さらに最終年度では最新予測シナリオ(SSPs)を解析し、将来の人為 CH_4 排出において東アジアが果

たす役割について考察を行った。この詳細は「3-4/4-4 温暖化予測シナリオにおける東アジアの人為起源メタン排出の寄与」で述べる。

3-1. シナリオに基づくフィードバック効果の評価1：メタン濃度緩和

CH₄の大気濃度緩和が将来の温暖化進行に対してどのような影響を与えるのかを調査すべく、温暖化予測モデルを用いたCH₄濃度緩和実験を実施した。ここで用いた温暖化予測モデルは、IPCC第5次報告書世代の地球システムモデルMIROC-ESM(Watanabe et al. 2011)である。本モデルは、気候モデルMIROCをベースとし、全球の炭素循環過程(大気-海洋/陸域のCO₂交換速度を計算するための生態系・物質循環サブモデル)が導入されている。ただし大気化学過程を解くことはできないため、CH₄濃度はあらかじめシナリオ化されたものをモデル入力値として与え、シミュレーションを実施している(図3.3.1)。将来予測実験に使用したシナリオはRCPs(IPCC第5次報告書世代で主流であった濃度シナリオ; RCP8.5のように末尾に続く数字がシナリオで想定している温暖化時の放射強制力(W m⁻²)を表す)である。CH₄の大気濃度緩和の影響を調べるため、ここでは以下2種類の実験を実施した。

1. 通常のRCP8.5シナリオ実験、すなわち全ての温室効果ガスやエアロゾルの人為排出量等を、RCP8.5シナリオのものをそのまま使用する実験
2. CH₄濃度緩和の効果を見積もるため、上の実験1のうち、大気CH₄濃度のみをRCP2.6のものに差し替えた予測実験

である。予測の期間は2006-2100の95年間であり、大気CO₂濃度やCH₄濃度などすべての温室効果ガス濃度は、RCPシナリオとして提供されている将来濃度シナリオを強制的に与えて実験を行った(図3-3-1)。したがってこの実験では、CH₄濃度の低下にともなう放射強制力の低下と気候変動、さらには気候変動を介した炭素循環過程への影響がシミュレートされる(図3.3.2)。ただし、同シナリオの大気CO₂濃度も強制的に与えているため、海陸CO₂シンクの変化はさらなる大気CO₂濃度変化やそれにとともなう放射強制力を生じない。このような実験設定は、一見すると現実プロセスを反映していないように見えるが、一部のフィードバック過程をあえて停止させることによりフィードバック過程の切り分けとその評価を容易にさせている。

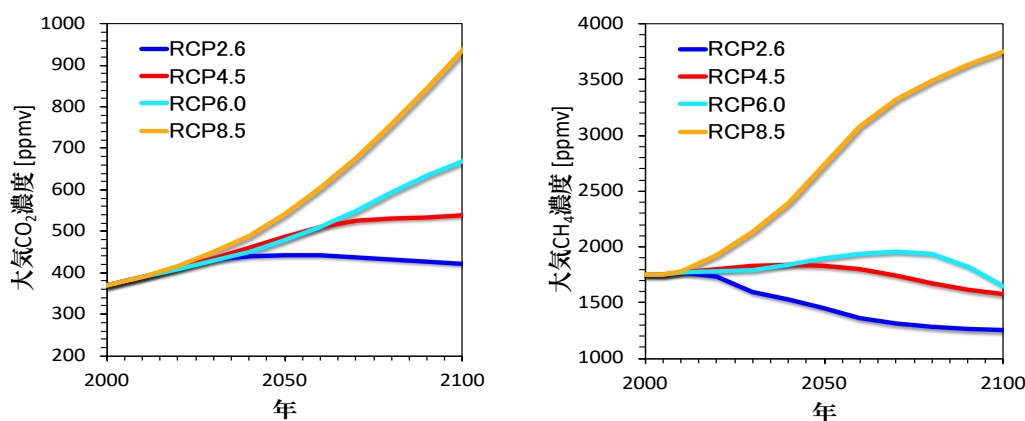


図 3.3.1 RCP シナリオにおける大気 CO₂ 濃度(左)と CH₄ 濃度(右)。

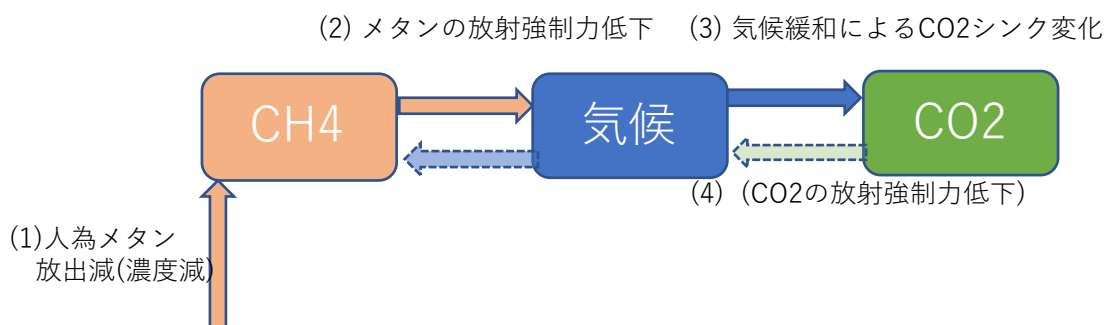


図 3.3.2 本実験における CO₂-CH₄-気候フィードバックの取り扱い概要。特定の予測シナリオにおいて CH₄ 濃度だけを低下させ (1)、CH₄ の放射強制力の低下により温暖化が緩和 (2)、CH₄ 濃度緩和により気候変動が生じ、海陸の CO₂ シンクが変わる (3)。本実験では大気 CO₂ 濃度を強制的に与えているため、海陸 CO₂ シンクの変化によって生じる大気 CO₂ 濃度の変化と気候影響は実験結果に反映されない (4)。

3-2. シナリオに基づくフィードバック効果の評価 2：温暖化と湿地メタン放出

今後の CH₄ 収支と温暖化進行の関係を考える上で、人為起源排出の将来動向が重要である。これに加え、将来の気候変動にともなって自然起源の CH₄ 放出源も変化していく可能性があるが、これがどのように変化するのかについて未解明な部分が多い。そこで、自然起源最大の CH₄ 放出源である湿地 CH₄ 放出が、温暖化進行にともなってどのように変化するかを調べた。このため、既存の地球システムモデルに湿地 CH₄ 放出スキームを導入し、その上で温暖化予測実験を行った。具体的には、以下のような開発作業および数値実験を実施した。

モデル開発

ここでは、IPCC-AR6 世代の最新の地球システムモデル(MIROC-ES2L, Hajima et al., 2020)をベースに各種改良や実験を行った。このモデルは、一世代前の地球システムモデル(MIROC-ESM, IPCC-AR5 世代のモデル)と比べ、窒素循環といった物質循環過程の高度化が施されている。モデル特性の大きな変化として、大気 CO₂ 濃度増加に対する全球平均気温の上昇度合い(過渡的気候応答、Transient Climate Response)が小さくなっていることが挙げられる(MIROC-ESM は TCR = 2.2°Cであったのに対し、MIROC-ES2L では 1.5°C, Hajima et al., 2020)。MIROC-ESM は気候感度が高くかつ炭素循環の温暖化応答も大きく、CO₂ 排出に対する気候-炭素循環全体の感度が比較的高い(人間の温室効果ガス排出に対して「悲観的」な温暖化予測をする)。一方、MIROC-ES2L では気候感度が低くかつ炭素循環の応答特性も変わったことにより、気候-炭素循環の感度が比較的低い(人間の温室効果ガス排出に対して「楽観的」な予測結果を出す)傾向がある。

地球システムモデルに導入・結合した湿地 CH₄ 放出スキームは、サブテーマ 1 の CH₄ 収支解析でも使用している陸域生態系モデル VISIT の、湿地 CH₄ 放出スキーム(Walter and Heimann, 2000)と同じものである。本スキームは、土壌鉛直層のそれぞれにおいて、CH₄ 生成速度(土壌温度、根の鉛直分布、生物生産の季節性に依存)、土壌層内での酸化消失(土壌層内 CH₄ 濃度と土壌温度に依存)および土壌層間の拡散プロセス(土壌層間の CH₄ 濃度差に依存)を解く。大気への放出は、1) 拡散、2) 大気への突発的放出、3) 植物体を介した放出、の 3 過程で行われる。地下水位面以下の嫌氣的環境下では CH₄ 生成が卓越し、地下水位面より上層では酸化消失が卓越する。

これら湿地メタン放出プロセスを計算するためには、土壌温度、生物生産の季節性、および土壌水分量(地下水位面)といった情報が必要になる。このため、地球システムモデル内の他コンポーネントで計算されるこれら変数を、湿地 CH₄ 放出スキームに受け渡すことにより計算を行っている(日単位)。また、地球システムモデルから診断される湿地面積割合(本来は降水の地表面流出割合を計算するための診断的変数)を用いることにより、各陸面グリッドを湛水している部分/していない部分に分け、湛水し

ている部分のみから湿地 CH_4 放出が生じると仮定した。なお、MIROC-ES2L で診断される湿地面積割合を Global Lakes and Wetlands Database (GLWD, Lehner and Doll et al. 2004) の湿地分布と比較すると、一部大きな隔たりが見られた（特に強い CH_4 放出源と目されるハドソン湾周辺における湿地等）。そこで、モデルに与える土壌テクスチャーマップを修正する（具体的には、湿地地帯の土壌タイプが” Coarse （粗い） ”となっていたものを、” Organic （有機質） ”に変更する等）とともに、パラメータ調整やバグ修正等を行った。

将来の湿地メタン放出予測

上で開発した湿地 CH_4 放出過程入りの地球システムモデルを用いて、今後の温暖化進行と湿地 CH_4 放出量の変化を予測する実験を行った。行った数値実験は 2 種類あり、一つは理想化された感度実験である。この実験では、大気 CO_2 濃度を瞬時に倍増させることによって温暖化を引き起こし、それにより湿地 CH_4 の放出がどのように変化するかを調べる。このような大気 CO_2 濃度の瞬時倍増実験は、気候モデルの基礎感度実験として普及しており、湿地 CH_4 放出スキーム導入のテスト実験も兼ねて実施した。もう一つの実験は、最新将来シナリオ SSP (Shared Socio-Economic Pathways) を用いた実験である。ここでは、最も大きな温暖化進行が想定されている SSP5-8.5 シナリオを用いた。両実験ともに、湿地 CH_4 放出のフィードバックを切り分け・評価のため、大気 CO_2 濃度および CH_4 濃度は、SSP シナリオの濃度をモデルに強制的に与えている（図 3-3-3）。

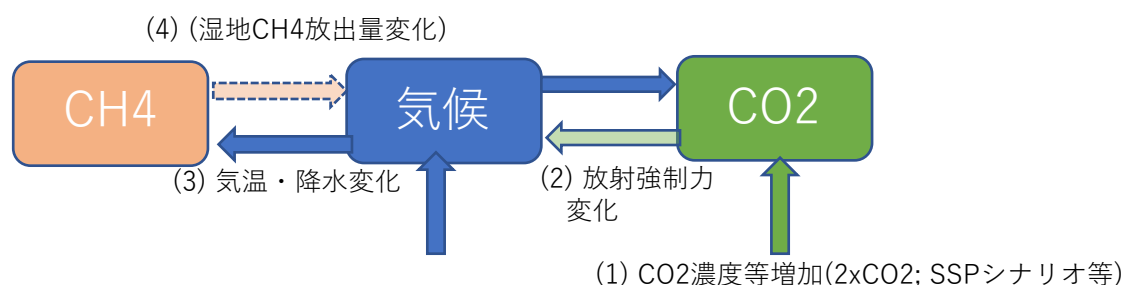


図 3.3.3 本実験における CO_2 - CH_4 -気候フィードバックの取り扱い概要。大気 CO_2 濃度の瞬時倍増シナリオや SSP シナリオに記述された温室効果ガス濃度等をモデルに与え (1)、これにより放射強制力が変化し気候変動が生じる (2)。気候変動は CH_4 過程に影響を及ぼし (3)、湿地 CH_4 放出量の変化が予測される (4)。本実験では大気 CO_2 濃度をはじめとする温室効果ガス濃度はシナリオとして与えているため、海陸 CO_2 シンクの変化や湿地 CH_4 放出による大気 CO_2 / CH_4 濃度変化は生じない。

3-3. 大規模メタン放出による温暖化評価

ここでは、大規模 CH_4 放出が引き起こす温暖化を評価するため、 CH_4 放出量に基づいた予測が可能な新たな地球システムモデルを開発し、その上で大規模 CH_4 放出を想定した数値実験を実施した。

モデル開発

上の「3-2 シナリオに基づくフィードバック効果の評価 2：温暖化と湿地 CH_4 放出」では、 CH_4 循環過程の入っていない地球システムモデル MIROC-ES2L に対し、湿地 CH_4 放出スキームを導入した。ここではさらに、大気化学反応・輸送サブモデル (CHASER, Sudo et al., 2002) を結合することにより、全球気候- CH_4 循環-炭素循環過程を包括的に解くことのできる新たな地球システムモデル開発を行った。通常、CHASER 単体での運用の際には、大気下面の CH_4 濃度を強制的に与え、それより上層での CH_4 動態をシミュレートするが、本モデル内では大気下面から与えられた CH_4 フラックスを基に、対流圏およびその上層での CH_4 輸送、消失といった化学反応、沈着 (土壌酸化) 過程を解く (すなわち、 CH_4 エミッションによる駆動が可能である)。大気物理-大気化学コンポーネントモデル間の結合方式は Watanabe et

al., (2011)に倣った。なお大気化学モデルが結合されると、CH₄をはじめとする温室効果ガスやエアロゾルの冷却効果等が、ベースモデルである MIROC-ES2L の振る舞いから変化する。そこで、これにともなう各種パラメータ調整やバグフィックスの作業等も行った。特に、産業革命以前の人為影響が極めて小さい時期において、モデル内で CH₄ のソースとシンクがバランスし一定の大気 CH₄ 濃度を再現できることが重要である。具体的には、以下の全球 CH₄ 収支式

$$\begin{aligned}
 &(\text{人為排出}) + (\text{湿地放出}) + (\text{バイオマス燃焼起源放出}) + (\text{その他自然起源放出}) \\
 &= (\text{大気シンク}) + (\text{土壌酸化}) + (\text{大気 CH}_4 \text{ 変化量})
 \end{aligned}$$

において、左辺の人為 CH₄ 排出をゼロとしたときに、右辺の大気 CH₄ 変化量がほぼゼロになるような調整が必要である。本研究では、モデルに対して固定値として与える「その他自然起源放出」を調整パラメータとして用い、これを 51.7 Tg CH₄ yr⁻¹ と設定することにより、産業革命以前の状態でほぼ一定の大気 CH₄ 濃度を得た。

大規模メタン放出を想定した理想化実験

上で開発したモデルを用いることにより、大規模 CH₄ 放出イベントによって生じる温暖化予測を行った。大規模 CH₄ 放出イベントの一つとして急激な永久凍土の融解と CH₄ 放出が挙げられ、この発生が危惧されているが、本モデルには永久凍土（エドマ層）の融解にともなう CH₄ の一次・二次放出過程は入っていない。そこで、ここでは仮想的に、産業革命以前の定常的な状態から強制的に突発的な CH₄ 放出をモデルに与え、2 年目以降にその CH₄ 放出をゼロにするという実験を行った。最初の 1 年目に与える CH₄ 放出量は 5000 Tg CH₄ yr⁻¹ とした：横畠ら（環境研究総合推進費 2-1605，永久凍土大規模融解による温室効果ガス放出量の現状評価と将来予測，代表者 斉藤 和之）において、将来の温暖化時におけるエドマ層の永久凍土融解による温室効果ガス一次・二次放出量を 3943-6756 Tg CH₄（2100 年までの累積値）と推定しており、これを参考にした。この 5000 Tg CH₄ という大規模放出が 1 年間で放出されるというシナリオは非現実的ではあるが、1) 大規模 CH₄ 放出に対する気候-CH₄ 循環過程に関する基礎的知見・情報を得るためには、簡素かつ普遍的な実験設定が好ましいこと、2) 永久凍土融解にともなうメタン放出過程/放出量に関する知見が多く得られず、より現実的なシナリオをデザインすることが困難であること、3) 5000 Tg CH₄ という数値を、永久凍土融解によって生じうるポテンシャル(上限)と捉えられること、4) 限られた研究実施期間において効率的にシミュレーションを行う上で適した実験設定であったこと、を理由にこのような実験デザインとした。なおこの実験では、大規模 CH₄ 放出にともなう CH₄ 動態に焦点を当てるため、CH₄ を除く温室効果ガス濃度等は産業革命以前の状態を保つように設定している（図 3.3.4）。

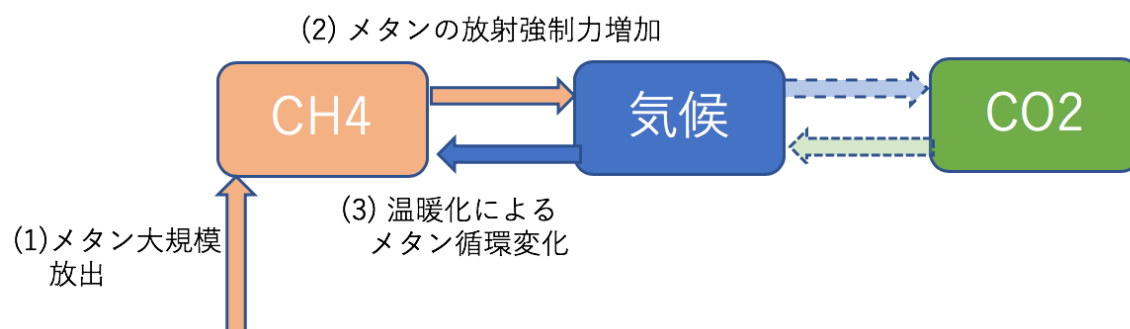


図 3.3.4 本実験における CO₂-CH₄-気候フィードバックの取り扱い概要。5000 Tg CH₄ yr⁻¹ の大規模 CH₄ 放出量を計算 1 年目に与え (1)、大気 CH₄ 濃度の増加にともなう放射強制力により温暖化が生じる (2)。温暖化および大気中 CH₄ 濃度の変化は、CH₄ 循環過程（大気シンクや湿地 CH₄ 放出過程）に影響を及ぼし、大気 CH₄ 濃度が変化する (3)。本実験では CH₄ を除くその他温室効果ガス濃度等は一定を保つように強制されているため、CH₄ 以外の温室効果ガスの濃度変化とそれによる気候変動は生じない。

3-4. 温暖化予測シナリオにおける東アジアの人為起源メタン排出の寄与

IPCC 第 5 次報告書世代の温暖化予測で用いられていた予測シナリオ RCPs は、既往シナリオの放射強制力の広がりのおよそ大半をカバーするという観点からデザインされ、4 種類のシナリオ (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5; 数字が放射強制力を意味する) で構成されていた。これに対し、現在の温暖化予測研究等で主流 (IPCC 第 6 次報告書世代) となっている予測シナリオ SSPs では、RCPs と同様に放射強制力を前提としつつ、この放射強制力を達成するための社会経済的背景がシナリオに反映されている。SSPs は、地球温暖化と直接関係しない社会経済の多様な発展の可能性を、緩和と適応の困難度で 5 種類に区分しており、SSP1, SSP2, SSP3 はこの順に緩和と適応の困難度がともに増加する。また SSP4 は緩和の困難度は低いが適応の困難度は高い世界、SSP5 はその逆で、それぞれ格差と従来型発展で特徴付けられる (以上、筒井 2016 より)。このような社会経済的ストーリーラインと放射強制力を組み合わせ、統合評価モデル等を用いて温室効果ガス排出量・濃度として定量化・公開されているものが SSPs の実体である。具体的には、SSPs 主要シナリオは 4 つ (放射強制力の小さい順に SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) であり、やや利用優先度は下がるものの他のシナリオ (SSP1-1.9, SSP4-3.4, SSP5-3.40S, SSP4-6.0) も存在する (O'Neill et al., 2016)。現在、この SSPs を入力とし、気候モデル・地球システムモデルを用いた温暖化予測が世界で実施されている (CMIP6, Eyring et al., 2016)。

SSPs では、仮に放射強制力が同じシナリオであっても、その放射強制力に至るまでの社会経済的背景が異なっているため、放射強制力の内訳 (たとえば CO_2 や CH_4 の寄与) も異なる。本研究では、これら計 8 つの SSP シナリオを解析し、現在の温暖化予測における主流シナリオにおいて東アジアを中心としたアジア域において、将来の人為 CH_4 排出がどのように見込まれているのかについて調査した。

4. 結果及び考察

4-1. シナリオに基づくフィードバック効果の評価 1: メタン濃度緩和

本実験で用いた RCP8.5 は、2100 年までに大気 CO_2 濃度が約 935 ppmv、大気 CH_4 濃度は 3750 ppb まで増加する。RCP8.5 シナリオを用いた予測実験を行うと、2006 年から 2100 年までの全球気温の上昇は約 +5.4°C となった (図 4.3.1(a) 黒線)。加えて、陸域および海洋による炭素貯留量の変化 (陸域および海洋の正味 CO_2 交換速度の累積値) を調べた結果が図 4.3.1(b) と (c) である (この実験では大気 CO_2 濃度を強制的に与えているため、これら陸域および海洋の正味 CO_2 交換速度は大気 CO_2 濃度変化に影響しない)。大気 CO_2 濃度増加によって生じる植物への CO_2 施肥効果により、陸域への炭素貯留が促されるが、特に 21 世紀後半からは昇温にともなう陸域生態系の生態系呼吸量が卓越し、その炭素貯留量は減少に転じる。このため、2100 年時点における陸域炭素貯留量は 2006 年時点を下回る。陸域に比べ、海洋の温暖化応答はあまり大きくないことが知られており (Arora et al., 2013)、大気-海洋の CO_2 分圧差によってもたらされる CO_2 吸収と海洋内部への取り込みが進行することにより着実に CO_2 が蓄積され、2100 年では 350 PgC まで蓄積される (以上の実験は、Hajima et al., 2012 と同じもの)。

このような標準 RCP8.5 実験と比較し、本研究で新たに実施した CH_4 濃度緩和実験 (図 4.3.1 赤線) の全球平均気温や炭素貯留量の振る舞いは大きく変わっている。RCP2.6 シナリオの CH_4 濃度は 1250 ppb まで低下するが、これにより CH_4 濃度緩和実験では全球平均気温が +4.8°C と、標準 RCP8.5 実験よりも約 0.6°C 低下している。さらに、この気候緩和は気候-炭素循環相互作用を介して陸域の炭素貯留量にも影響を及ぼしており、RCP8.5 標準実験に比べて +51 Pg C ほど陸の炭素シンクが強化されている。同じく海洋も、その度合いは小さいがシンクが +9 Pg C 強化されていた。

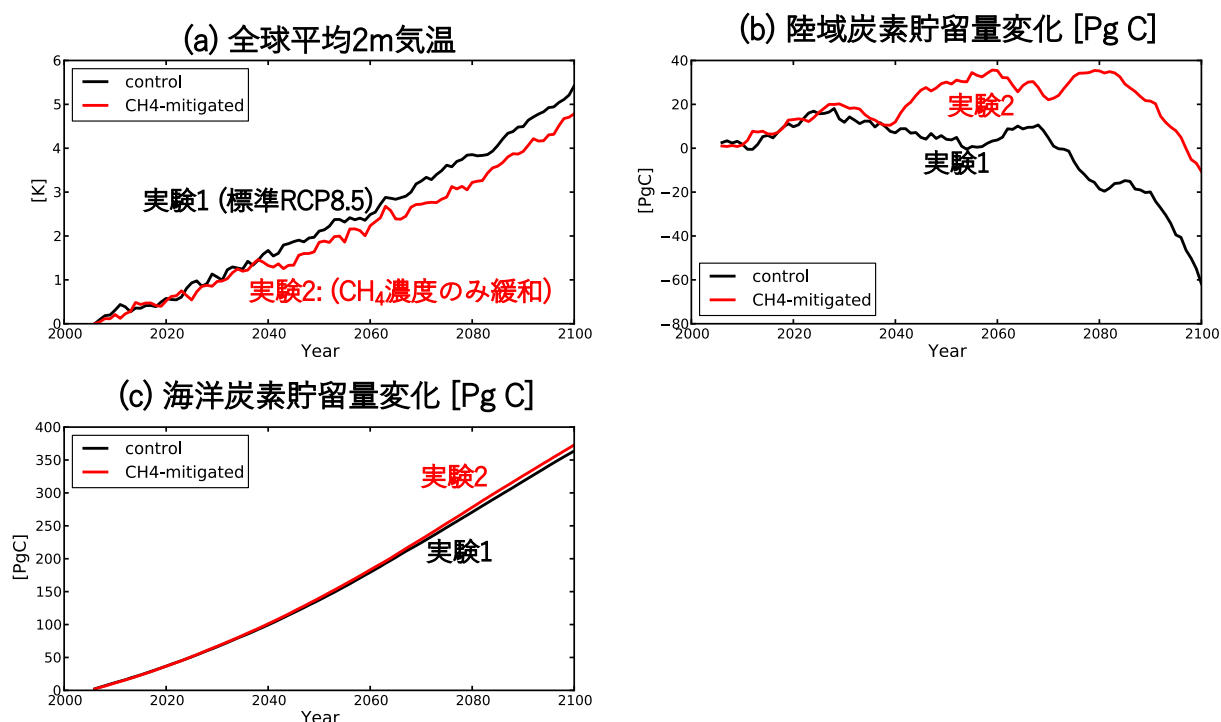


図 4. 3. 1 MIROC-ESM を用いた標準 RCP8.5 実験(黒線)と CH₄ 濃度緩和実験(赤線)。CH₄ 濃度緩和実験では、大気 CH₄ 濃度だけ RCP2.6 のものを使用し、その他は RCP8.5 と同じである。

このように、RCP8.5 実験において大気中 CH₄ 濃度のみを RCP2.6 に差し替える CH₄ 濃度緩和実験では、温暖化抑制にともなって海陸炭素シンクが強化される(計約+60 Pg C)という結果が得られた。これはつまり、CH₄ 濃度緩和が放射強制力を低下させるという直接的な効果(図 3.3.2 の(2))だけでなく、気候-炭素循環フィードバックを介してさらなる気候緩和作用を持ちうること(図 3.3.2 の(4))を示している。通常、CO₂ 以外の温室効果ガス(たとえば CH₄)の排出が増えると、それによってさらに温暖化が加速され、この昇温分が海陸の炭素シンクを弱めるということは容易に想像できる。本実験では逆に CH₄ 濃度を低下させており、これによる冷却効果が海陸の炭素シンクを強化する、という過程が描き出されている。

上に述べたように、本実験における大気 CO₂ 濃度は、RCP シナリオとして記述されている CO₂ 濃度によって強制されているため、これら海陸の炭素シンクの変化は気温に影響しない。そこで、CH₄ 濃度緩和によってもたらされる海陸炭素シンクの強化が、どの程度の冷却効果を持ちうるのかについて以下のように見積もった。

まず、大気 CO₂ 濃度増加に対する全球平均気温の変化 α を

$$\alpha = \Delta T / \Delta \text{CO}_2$$

と定義する(Friedlingstein et al., 2006)。ここで ΔT は 2006 から 2100 までの全球平均気温の変化、 ΔCO_2 は RCP8.5 シナリオにおける大気 CO₂ 濃度変化である。MIROC-ESM では $\Delta T=4.8$ [°C]であり(CH₄ 濃度のみ RCP2.6 シナリオに差し替えた RCP8.5 実験)、 $\Delta \text{CO}_2=936-381=555$ [ppmv] であるため、 $\alpha=8.6 \times 10^{-3}$ [°C ppmv⁻¹]となる。CH₄ 濃度緩和により MIROC-ESM では+60PgCの炭素シンク強化が生じたが、これは 28.3 [ppmv]に相当する(変換係数 2.12 [Pg C ppmv⁻¹])を使用)。したがって、この炭素シンク強化によって生じた気温低下は、 $\alpha \times 28.3 = 0.24$ °Cとなる。CH₄ 濃度緩和とその放射強制力低下によって生じた直接的な気温低下 0.63°Cに合わせると、合計 0.87°Cの冷却となり、この気候-炭素循環フィードバックを介した副次的な冷却効果も見逃すことができないという結果が得られた。

このような結果を定量的に解釈する際には、モデルの予測結果に含まれる不確実性に留意する必要がある。例えば Friedlingstein et al., (2013)では、CMIP5(IPCC-AR5 世代)の地球システムモデルにおいて、21 世紀末までの温暖化を 3.7 ± 0.7 °C (RCP8.5 シナリオを使用した実験、2081-2099 年平均と

1986-2005 年平均の差として評価)としており、予測結果に大きなばらつきがあることが分かっている。これは炭素循環も同様であり、炭素循環の人為排出に対する応答もモデル間で大きく異なることが知られている(Arora et al., 2013)。したがって、モデル内の気候感度や炭素循環の感度が変われば、当然のことながら CH_4 濃度緩和によって生じる冷却効果と炭素循環のシンク強化の程度も変わりうる。

4-2. シナリオに基づくフィードバック効果の評価 2：温暖化と湿地メタン放出

モデル改良・結合：湿地メタン放出スキーム

湿地 CH_4 放出スキームを組み込んだ地球システムモデルを用いて、産業革命以前の準定常状態を再現した結果が図 4.3.2 の左列である。なお、気温といった基本的な物理環境場の再現性評価は、ベースモデルの記述論文(Hajima et al. (2020)や Tatebe et al. (2019))で既に行われており詳細を省くが、北米やシベリア等に存在する湿地 CH_4 放出のホットスポットが再現されていることが確認できる。

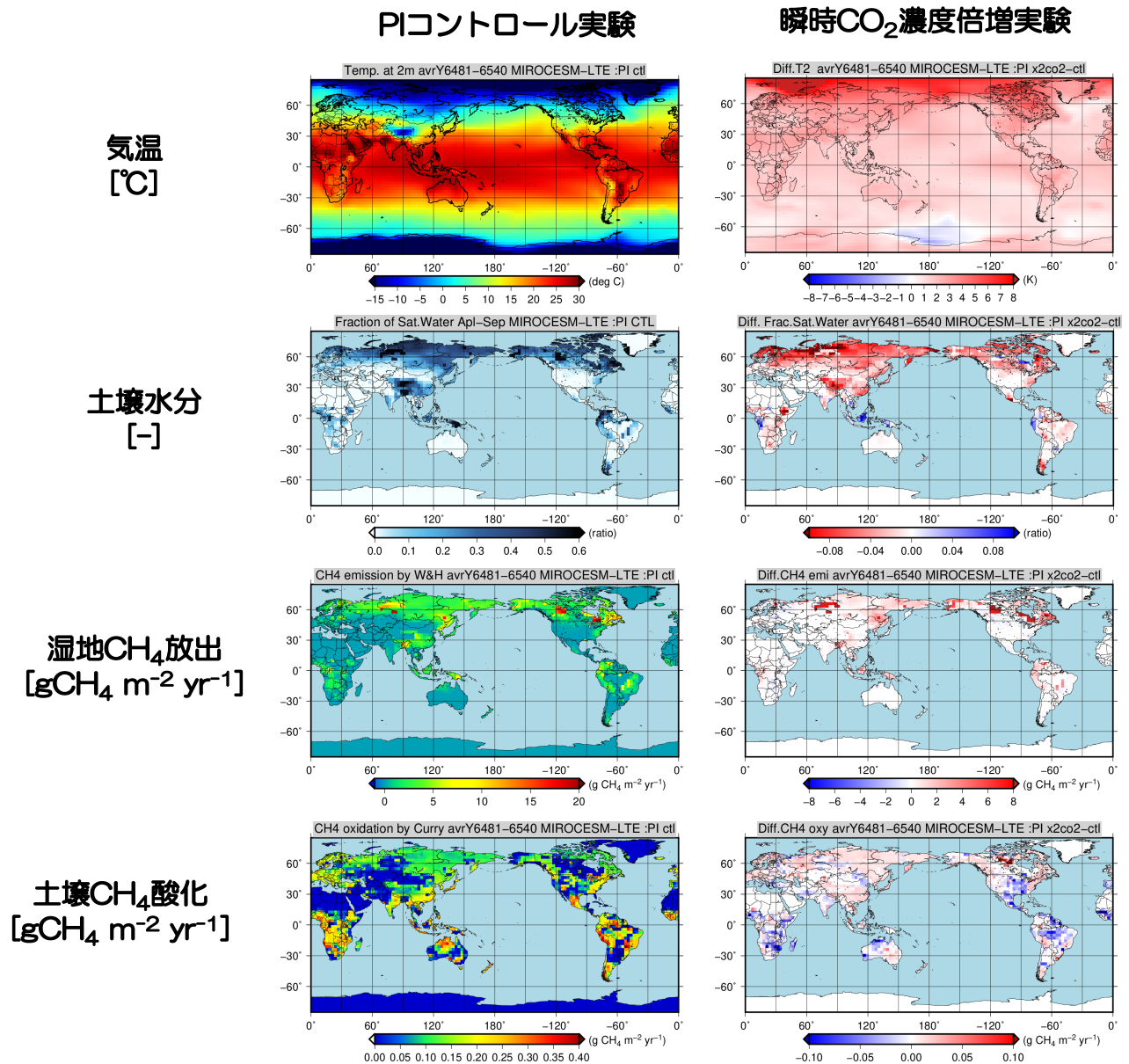


図 4.3.2 湿地 CH_4 放出(および土壌酸化スキーム)を導入した地球システムモデルによる、産業革命以前での準定常状態(PI コントロール実験：左)と大気 CO_2 濃度瞬時倍増実験における変化量(右)の結果。上から気温[°C]、飽和含水率[-]、湿地 CH_4 放出速度[g $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$]、土壌表面消失速度[g $\text{CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$]である。

産業革命以前の状態から瞬時に大気 CO_2 濃度を倍増させる理想化感度実験の結果が、図 4.3.2 の右列である。放射強制力により気温は上昇し、特に北極付近でその増幅が大きい。また、湿地面積割合に強く関係する土壌水分量は、多くの地域で減少する結果となった。これは、温暖化にともなって降水量が増える地域がある一方で、蒸発散量が卓越したためだと考えられる。土壌水分の低下や湿地面積割合の低下が生じるものの、気温上昇の効果がこれを相殺・卓越し、特に湿地 CH_4 放出のホットスポットにおいてその放出量が強く増加する結果となった。このことから、気温－湿地 CH_4 放出の間には正のフィードバック、すなわち、温暖化にともなって湿地 CH_4 の放出量が増加し、これがさらに温暖化を増幅させるという効果があることが確認された。なお、湿地 CH_4 放出スキームとともに、土壌表面における大気 CH_4 の土壌酸化過程も導入した：特に北半球の高緯度では土壌酸化速度は増加したが、その値は湿地 CH_4 放出に比べて極めて小さく、湿地 CH_4 放出増加のごく一部を相殺するにすぎない。

数値実験：将来の湿地メタン放出予測

上の湿地 CH_4 放出スキームを導入した地球システムモデルを用い、SSP5-8.5 シナリオに基づく予測実験を行い、湿地に由来する CH_4 放出が将来にどの程度増加するのかを調べた(図 4.3.3 および表 4.3.1)。20 世紀において全球の湿地 CH_4 放出量はほぼ $160 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ と一定であるものの、21 世紀以降の温暖化にともなって増加し、2100 年には $340 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ となった(産業革命以前の状態から 1.86 倍)。

章 3-2 において記述したように、本モデルの湿地 CH_4 放出は、主に気温(土壌温度)とモデル内で診断される陸面グリッド内の湿地面積割合が強く影響する。気温上昇は CH_4 生成を活性化し、また湿地面積割合は CH_4 生成が行われる面積を決めるからである。本実験では、気温は産業革命以前の状態よりも $+3.7^\circ\text{C}$ 上昇した。また、陸降水量も 6%ほど増加するが、診断される湿地面積は 82%まで減少する。これは、降水量が増える一方で、温暖化による蒸発散量も増加したためであると考えられる。湿地割合は全球湿地 CH_4 放出量に線形に影響するのに対し、気温(土壌温度)変化に対し微生物の温度依存性は指数関数的に増加する。その結果、気温上昇の効果が湿地面積割合の減少の効果を上回り、このような全球湿地メタンの増加をもたらしたと考えられる。以上のことから、温暖化による全球湿地 CH_4 の増幅効果(フィードバック)は、 $37 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ となり、仮に全球気温が 5°C 上昇すると、産業革命以前での湿地 CH_4 放出量($160 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$)レベルからほぼ倍増することが分かった。

東アジアを中心とするアジア域($65\sim 150^\circ \text{ E}$ 、 $15\sim 55^\circ \text{ N}$)全体における湿地 CH_4 放出量は、全球と同様な増加傾向を示す一方で、産業革命前からの増幅割合は 1.57 倍と、全球スケールでの増加割合に比べて小さい。これは、対象領域における湿地面積割合が小さくなっている(0.76 倍)が主な原因であると考えられる。その結果アジア域では、温暖化による全球湿地 CH_4 の増幅効果(フィードバック)は $3.6 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ となり、 1°C 上昇あたりの放出増加量は全球の約 1/10 程度となる。過去-現在における湿地メタン放出量そのものも、同地域の全球への寄与はあまり大きくなく(本実験の産業革命以前の状態ではその寄与は約 19%)、21 世紀末ではこの寄与がさらに小さくなる(約 15%)。Ito et al., 2019 による複合手法に基づいた東アジア域の CH_4 収支解析においても、東アジアにおいては自然起源排出に比べ人為起源 CH_4 排出がより重要であることが示されているが、本研究で得られた湿地 CH_4 放出の将来予測実験もこの結論を支持するものであった。

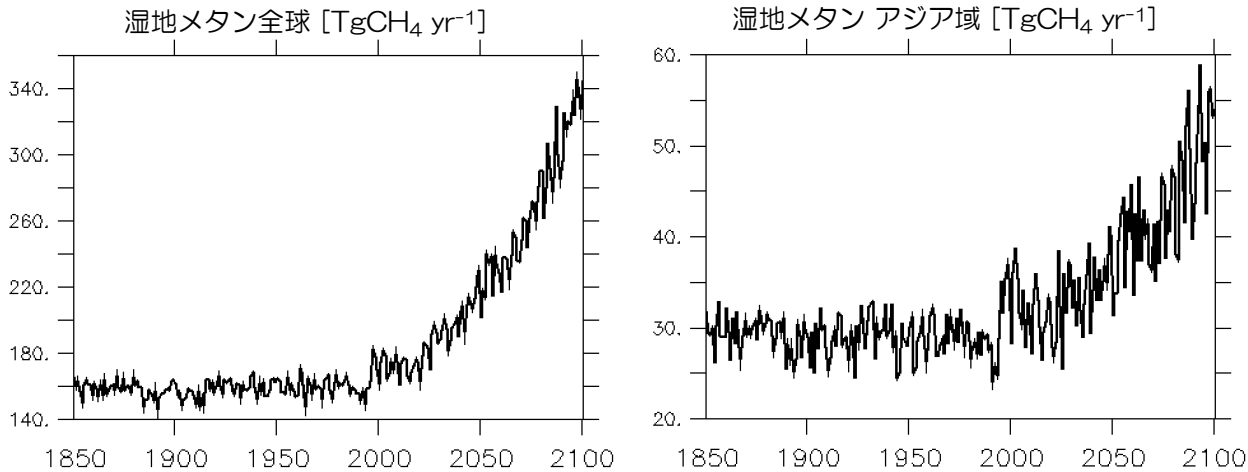


図 4.3.3 湿地 CH₄ 放出スキームを導入した地球システムモデルによる、SSP5-8.5 シナリオでの湿地 CH₄ の全球放出速度(左)と東アジアを中心としたアジア域(65～150° E、15～55° N)での放出速度(右)。

表 4.3.1 湿地 CH₄ 放出スキームを導入した地球システムモデルによる SSP5-8.5 シナリオでの予測結果のまとめ。“1850”は、1850-1879 年の平均を、“2100”は 2071-2100 年の平均を表す。

	全球				アジア域(65～150° E; 15～55° N)			
	1850 (産革前)	2100 (SSP585)	2100-1850	(2100-1850) /1850	1850 (産革前)	2100 (SSP585)	2100-1850	(2100-1850) /1850
気温 [°C]	15.2	18.9	3.7	1.24	13.7	18.4	4.7	1.34
陸降水 [mm]	288.4	305.8	17.4	1.06	701	774	73	1.10
診断湿地面積 [m ²]	2.38E+22	1.95E+22	-4.31E+21	0.82	5.23E+21	3.95E+21	-1.282E+21	0.76
湿地メタン放出 [TgCH ₄ yr ⁻¹]	159.7	296.5	136.8	1.86	29.74	46.71	16.97	1.57
湿地メタン感度 [TgCH ₄ yr ⁻¹ °C ⁻¹]			37.0				3.6	

4-3. 大規模メタン放出による温暖化評価

大規模 CH₄ 放出イベントを想定した実験(計算開始 1 年目に 5000 Tg CH₄ の CH₄ 放出を与える実験)の結果、およびコントロール実験の結果を図 4.3.7 および表 4.3.2 に示す(積分期間は各 15 年)。方法に記述したとおり、本実験では CH₄ 濃度ではなく CH₄ 排出量を与えることによってモデルが駆動される。ここでは、湿地 CH₄ 放出はモデル内で明示的に計算されるが、それ以外の自然起源放出量は調整パラメータとして用いており、これを 51.7 Tg CH₄ yr⁻¹ と設定することにより、コントロール実験における大気 CH₄ 濃度がほぼ一定(773 ppb)となった。1 年目に 5000 Tg CH₄ を強制的に与える実験では、実験開始 1 年後に大気 CH₄ 濃度が約 2500 ppb まで上昇し、その後低下する。この CH₄ 濃度の低下は CH₄ の大気中寿命の短さによる：コントロール実験における大気シンクは 215 Tg CH₄ yr⁻¹ であるが、一時的な大気 CH₄ 濃度の上昇により最大約 480 Tg CH₄ yr⁻¹ まで増加する(なお本実験では、大気下層 CH₄ の土壌表面における酸化消失(沈着)速度は大気化学モデル中で計算されている；大気シンクに比べ著しく小さく、この CH₄ 濃度低下には大きく影響していない)。大気 CH₄ 濃度の増加により全球平均気温はある程度の時間ラグをもって応答し、最大ピーク時には+0.5℃の温暖化が確認された。横畠ら(2019)は、エドマ層融解に伴うほぼ同量の CH₄ 放出による 21 世紀末での昇温を (0.23-0.26 °C) と推定しているが、本研究の結果はこれよりも大きい。この違いは、本実験では 5000 Tg CH₄ の CH₄ エミッションを 1 年間で与えているために大気中消失が追いつかず、大気中 CH₄ 濃度がより高くなっていることがその理由であると考えられる。

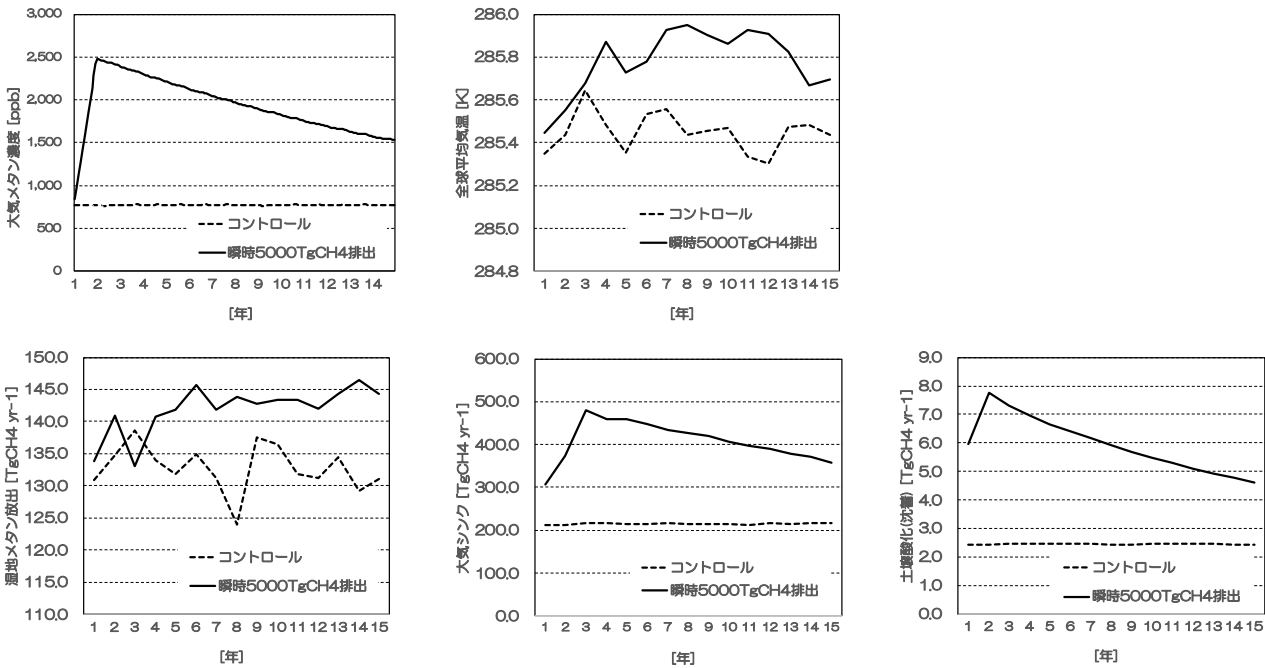


図 4.3.4

CH₄ 循環過程が結合された地球システムモデルによる、5000 Tg CH₄ 強制放出実験(黒実線)とコントロール実験(黒点線)の結果。シミュレーション開始1年目に、その年の累積CH₄排出量が5000 Tg CH₄となるような全球一様のCH₄フラックスを大気下面から強制的に与え、2年目以降にこのフラックスをゼロとしている(ただし、湿地CH₄放出量・大気シンク・土壌表面酸化はモデル内で明示的に計算されている；バイオマス燃焼由来の放出およびその他自然起源放出量は固定値としてモデルに与え続けている)。

表 4.3.2 CH₄ 循環過程が結合された地球システムモデルを用いた 5000 Tg CH₄ 排出実験の結果。(1): コントロール実験の X 年平均値、(2): 1 年目に 5000 Tg CH₄ yr⁻¹ を強制放出させた実験におけるピーク値、(3): (2)-(1) の結果。

	人為起源 (強制放出) [TgCH ₄ yr ⁻¹]	湿地メタン放出 [TgCH ₄ yr ⁻¹]	バイオマス燃焼 (固定値) [TgCH ₄ yr ⁻¹]	その他自然起源 (固定値) [TgCH ₄ yr ⁻¹]	大気シンク [TgCH ₄ yr ⁻¹]	土壌酸化 [TgCH ₄ yr ⁻¹]	大気CH ₄ 濃度 [ppb]	全球平均気温 [K]
(1)コントロール実験平均値	0	132.8	11.9	51.7	215.0	2.4	772.7	285.4
(2)5000TgCH ₄ 排出実験ピーク値	5000	146.4	11.9	51.7	478.8	7.8	2482.0	285.9
(2)-(1)	5000	13.6	0.0	0.0	263.8	5.3	1709.3	0.50

4-2 章でも述べたように、全球平均気温が上昇すると気候-湿地 CH₄ 放出の間に存在する正フィードバックにより、湿地からの CH₄ 放出が促進されうる。しかしこの実験では、全球気温の上昇は 5000 Tg CH₄ に由来する昇温分のみ(+0.5 °C)であるために温暖化シグナルが比較的弱く、湿地 CH₄ 放出速度の上昇はあまり大きくない(最大で約+14 Tg CH₄ yr⁻¹)。したがって、5000 Tg CH₄ の大規模 CH₄ 放出によって生じる温暖化実験では、気候-湿地 CH₄ 放出フィードバックの寄与は小さいと言える。ただし、この実験では CH₄ を除くその他温室効果ガス濃度は産業革命以前の状態と同レベルに維持されているため、他の温室効果ガス濃度変動に由来する昇温が存在せず、もしこの昇温分を加味すれば、指数関数的な温度依存性を示す土壌中 CH₄ 生成過程の性質によりこの湿地 CH₄ 放出量はさらに増える可能性がある。さらに 4-1 章で述べたように、大気 CH₄ 濃度の増加(減少)は海陸 CO₂ シンクを低下(強化)させ、大気 CO₂ 濃度を増加(減少)させるようなフィードバック過程も存在する。本実験では CH₄ 循環過程の応答のみを切り分けるために強制的に大気 CO₂ 濃度を一定としたが、このような気候-炭素循環-CH₄ 循環相互作用も合わせて考慮に入れると、5000 Tg CH₄ を与えたときの昇温はさらに大きくなる可能性がある。

4-4. 温暖化予測シナリオにおける東アジアの人為起源メタン排出の寄与

社会経済予測シナリオ SSPs において、将来の人為 CH_4 排出がどのように見込まれているのかについての概観を得るため、全球の人為 CH_4 総排出量とその他 CH_4 フラックスとの比較を行った(図 4-3-5)。なお過去の人為排出については、結合気候モデル相互比較プロジェクト CMIP6 において、気候モデル・地球システムモデルを駆動するための外部強制力として公開・共通利用されているフォーシングデータ(Hosely et al., 2018)を利用した(CMIP6 では、観測事実に基づく外部強制力をモデルに与えることにより 1850-2014 年の過去再現実験が行われ、2015-2100 年の将来予測では SSPs を外部強制力として与えている)。

産業革命以前(1850 年)では人為 CH_4 排出量はゼロに近いが、その排出は徐々に増加し、1950 年頃に境に急激にその排出量が増え(図 4.3.5、黒破線)、2014 年には $300 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ を超えている。2015 年以降の人為 CH_4 排出量は各種色線で示されているが、シナリオによってその変化傾向大きく異なることがわかる。特に SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP5-3.4 といったシナリオでは、強い温室効果ガス排出の緩和が想定されているため、人為 CH_4 排出量が大きく低下している。一方、緩和・適応が取られない世界観を持つ SSP3-7.0 の排出が最大となっている。注意すべき点は、本来強い温暖化が想定される SSP5-8.5 シナリオ(放射強制力の想定値が 8.5 W m^{-2})の人為 CH_4 排出が最大ではない点である。これは、SSPs における各種温室効果ガスの排出パスが、必ずしも各シナリオの全放射強制力レベルに比例している訳では無いことを意味している。このように全球積算値で見ると、ベースラインシナリオ(緩和・適応策が考慮されていない)SSP3-7.0 ではその人為排出が現在よりもおよそ倍増しており、他の 3 シナリオ(SSP4-6.0, SSP5-8.5, SSP4-3.4)ではおおよそ現在と同レベル、さらに他の 4 シナリオ(SSP2-4.5, SSP1-2.6, SSP1-1.9, SSP5-3.4)では大きく削減されていることが分かる。

人為 CH_4 排出に比べ、バイオマス燃焼に由来する過去の CH_4 放出(図 4.3.5 赤破線)は小さい。またその将来変化はシナリオ間でばらつくものの、そのばらつきも極めて小さい。なお、4-2 節で示した湿地 CH_4 の予測結果(SSP5-8.5 シナリオを用いた予測)も図中に青線として示してある；湿地 CH_4 放出量の将来増加分が他と比較しても小さくないことが確認できる。

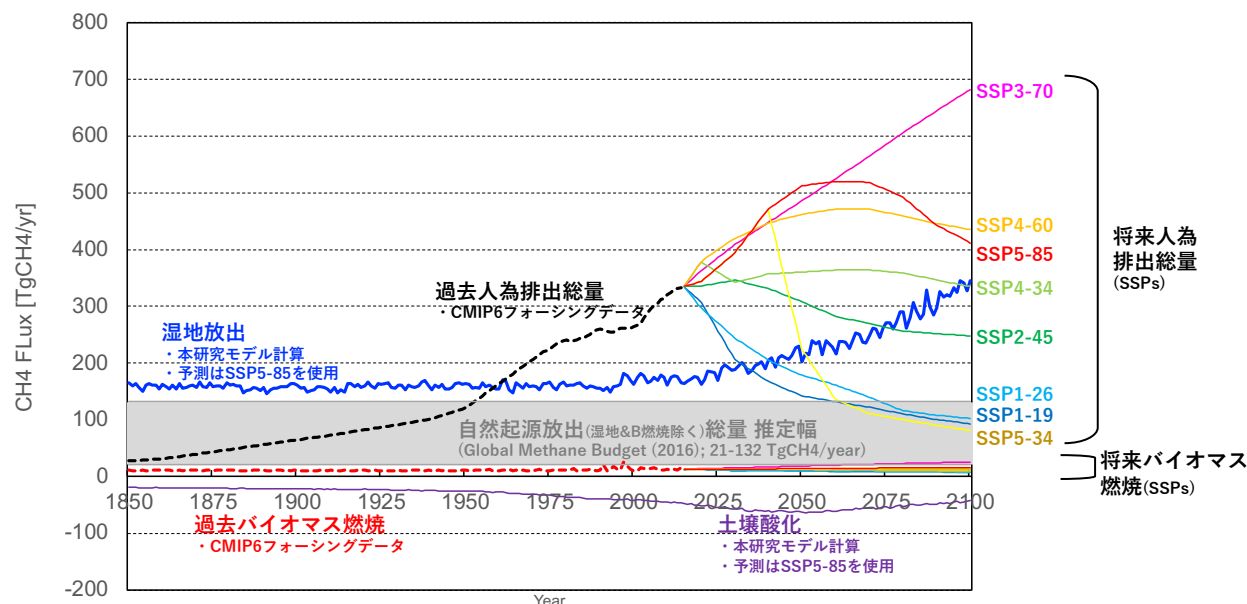


図 4.3.5 SSPs における人為 CH_4 排出総量と他の CH_4 フラックスとの比較。比較に用いたものは SSP1-1.9(薄青線)、SSP1-2.9(水色線)、SSP2-4.5(緑線)、SSP3-7.0(紫線)、SSP4-3.4(薄緑線)、SSP4-6.0(橙線)、SSP5-3.4(茶線)、SSP5-8.5(赤線)の計 8 シナリオの人為排出総量とバイオマス燃焼由来の放出である。過去の人為排出総量(黒破線)およびバイオマス燃焼由来のフラックス(赤破線)は CMIP6 の過去再現実験のための公式入力値(観測事実に基づく)を示す。湿地 CH_4 放出速度(青線)および土壌酸化速度(紫線)は本研究での計算結果。

このような SSPs における人為 CH_4 排出の地理分布を調べた結果を図 4.3.6 に示す。パネル(a)は現在の人為 CH_4 放出速度の空間分布 (CMIP6 入力データを使用) である。これを見ると、農業および畜産の影響が強いと推察される北アメリカ東部、南～東アジア、ヨーロッパにおいて広範な人為 CH_4 排出が確認できる。その他、中央ロシア、南米、アフリカ、東南アジア等でも人為 CH_4 排出が確認できる。

このような現状と比較し、SSPs ではどのような分布変化が想定されているのかを調べた結果が、図 4.3.6 のパネル(b)～(i)である。ベースラインシナリオである SSP3-7.0 では、多くの地域において人為 CH_4 排出が増加している(ただしヨーロッパ等、増加がほぼ無い地域も見られる)。また、強い温暖化緩和が見込まれる SSP1-1.9, 1-2.6, 5-3.4 等では、人為 CH_4 の排出削減が多くの地域にみられる。SSP1-1.9 および SSP1-2.6 では、再生可能エネルギーへのシフトによる急激なエネルギーセクターからの排出減と、人口動態に依存した緩やかな農業・汚泥からの排出の減少により、このような強い人為 CH_4 排出の減少が描かれている (Gidden et al., 2019)。また、最も放射強制力が強い想定 of SSP5-8.5 では、エネルギーセクターからの排出増加が見込まれているものの、農業排出の減少にともなってアジア域における人為 CH_4 排出減少につながっている。ここで注目すべき点は、ベースラインシナリオである SSP3-7.0 を除き、全てのシナリオにおいて東アジア域の人為排出量の減少が見込まれている点である。SSPs は統合評価モデルを用いて各セクターからの人為温室効果ガス排出量のシナリオを作成しているが、農業や汚泥といった人為 CH_4 排出は将来の人口動態に大きく依存しており (Gidden et al., 2019)、東アジアでは将来の人口動態が重要であるかもしれないという示唆が得られた。

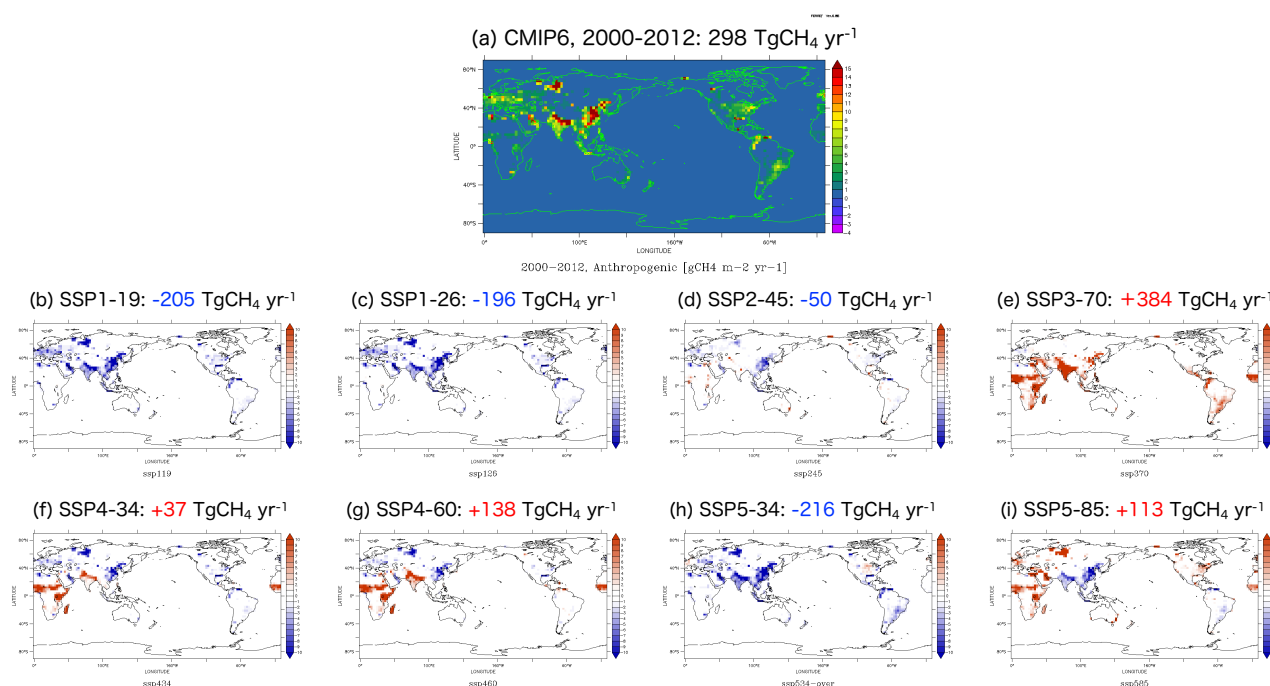


図 4.3.6 CMIP6 データにおける現在の人為排出総量(a)と、各 SSP における 2100 年までの増分(b～i)。各パネル上部に全球積算値を示す。

将来の人為 CH_4 排出量に対する東アジアの寄与を調べるため、全球の人為 CH_4 排出量変化に対するアジアの寄与率を調べたものが図 4.3.7 である。なお SSPs では、東アジアおよびインドをはじめとする南アジアは同様の振る舞いを示していることが多いため(図 4-3-6)、ここでは東アジアを中心としたアジア域 (65～150° E、15～55° N) でその寄与を求めている。CMIP6 入力データにおける現在の人為 CH_4 排出量は 298 Tg CH₄ yr⁻¹ であり、そのうちアジア域は 36%を占める。SSP3-7.0 では全球の人為 CH_4 排出総量は+384 Tg CH₄ yr⁻¹ となるが、アジア域はそのうち 31%を占め、依然としてアジア域の寄与率は

高い。さらに、強い緩和策を想定している SSP1-1.9 や SSP1-2.6 では全球でおよそ 200 Tg CH₄ yr⁻¹ の減少が見込まれているが、そのうち約 40%をアジア域が占める。他の多くのシナリオにおいてもアジアの寄与は大きい。

現状東アジアの CH₄ 収支解析では、同地域から放出される CH₄ 放出量 67.3 Tg CH₄ yr⁻¹ のうち、約 90% が人為 CH₄ 排出を占めていることが分かっている (Ito et al., 2019)。さらに本解析の結果から、現在だけでなく将来においても、東アジアを中心とするアジア広域が、様々なシナリオにおいて全球人為排出量の増加/削減に大きく寄与することが、SSPs において見込まれていることが分かった。特に SSPs では、将来のアジア域の人為 CH₄ 排出量の減少は、農業や汚泥といった人口動態に強く依存するセクターによってもたらされているようであり、このようなシナリオの現実性を踏まえた今後の議論が必要であることが示唆された。

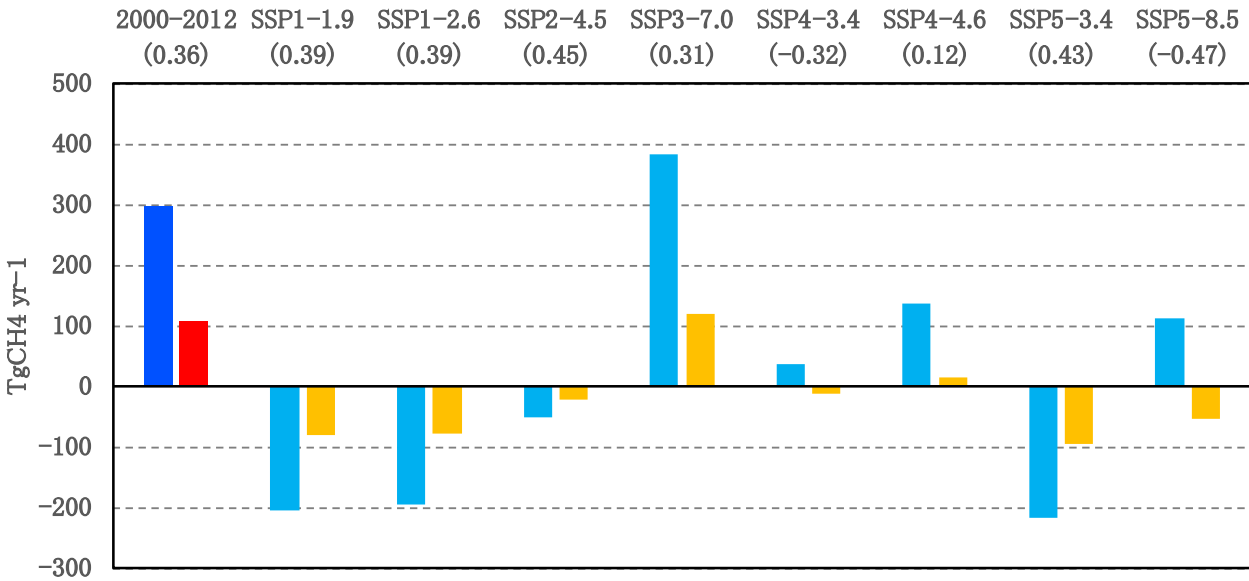


図 4.3.7
SSPs における人為 CH₄ 排出の将来変化量の比較：全球積算値(水色)と東アジアを中心としたアジア域 (65°E、15°N)の積算値(オレンジ色)。左端は、現在(2000-2012 年平均)の比較(全球(青棒)とアジア域(赤棒))であり、CMIP6 公式入力値から得ている。括弧内の数値は、全球積算値に占めるアジア域の割合を表す。

5. 本研究により得られた成果

達成された項目：地球システムモデルにおける CH₄ の扱い精査、データの利用方針検討、予測計算のセットアップ、湿原スキームの改良、オンライン実験の実施、シナリオに基づくフィードバック効果の評価

達成されなかった項目：なし

(1) 科学的意義

サブテーマ 3 では、地球システムモデルに陸域 CH₄ 収支スキーム導入し、各種実験を行うことで気候フィードバックに関する知見を得るとともに、合わせてアジア陸域と全球 CH₄ 収支の関係についてのシミュレーション解析と議論を行い、当初研究計画内容を十分に達成した。本研究では、これまで CO₂ を中心に開発・研究が行われてきた地球システムモデルによる温暖化予測において、CH₄ 動態とそのフィードバック過程に主眼を置いた新たな研究を展開した。IPCC 第 6 次報告書世代の最新の地球シ

システムモデルおよび最新予測シナリオ(SSPs)を組み合わせつつ、将来のCH₄動態(特に自然起源最大である湿地CH₄と気候変動との関係)を調査した研究例はこれまでなく、湿地CH₄放出をはじめとするその他自然起源CH₄放出過程(例えば永久凍土融解によるCH₄放出)と気候変動との相互作用過程の重要性を示した。また、気候-CH₄循環-炭素循環を包括的に扱うことのできる地球システムモデルを新たに開発した。人為CH₄排出の増加/緩和が、様々な相互作用過程を通じてさらなる温暖化の加速/緩和をもたらするという結果は、このような複雑なモデルならではの、今後、多くの場面における研究活用や新たな研究潮流につながる可能性を有している。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

CO₂に比べてCH₄は温暖化抑制に関して排出削減の即効性が高いものの多様な放出源が存在するため、この中から主たる排出源を特定し緩和施策を迅速に行うことが効果的であると考えられる。特にパリ協定で掲げられた1.5℃および2.0℃の温度目標を達成するには、大気中の温室効果ガスを減少させるネガティブエミッションの必要性が指摘されており、その中でCH₄は有力な削減対象になる。東アジアの現状CH₄収支解析では、同地域における人為CH₄排出の寄与が極めて大きい(約90%)ことが示され、自然起源放出よりも人為起源排出管理に傾注することが一つの有効な手立てであること示唆されている。さらに現在の主流シナリオ(SSPs)においても、東アジア域を中心としたアジア域からの人為CH₄排出量は、全球の人為CH₄放出の将来動向に大きく影響することが見込まれている。これは将来の人口動態に関わるセクター(農業等)に強く依存しているようであり、世界で汎用的に使用されているシナリオの実現可能性も含め、これらセクターからの排出削減を議論が必要である。本研究成果に基づくさらなる科学的知見は、IPCC-AR7やUNFCCCの「科学および技術の助言に関する補助機関」等を通じて発信される可能性を有する。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. ITO, Y. TOHJIMA, T. SAITO, T. UMEZAWA, T. HAJIMA, R. HIRATA, M. SAITO, Y. TERAOKA: Science of the Total Environment, 676, 40-52 (2019), Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 羽島知洋、井上忠雄、伊藤昭彦、湿地メタン放出-気候フィードバック研究のための地球システムモデル開発、気象学会 2019 秋季大会、2019/10/30、福岡。
- 2) 井上 忠雄、羽島 知洋、伊藤 昭彦、"Plans for developing an Earth system model with CH₄ dynamics", JPGU2018, 2018/5/24, 幕張。
- 3) 井上 忠雄、羽島 知洋、伊藤 昭彦、"湿地メタン放出-気候フィードバック研究のための地球システムモデル開発", 気象学会秋季大会, 2018/11/1, 仙台。

(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) 羽島知洋、海洋研究開発機構 横浜研究所一般公開、2017 年 11 月、「メタンはどこからくるの? (全球編)」地球システムモデルのメタン研究について

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 共同プレスリリース「東アジアのメタン放出分布をボトムアップ手法で詳細にマップ化」国立研究開発法人国立環境研究所 国立研究開発法人海洋研究開発機構、2019/6/17

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- Arora, V. K., Boer, G. J., Friedlingstein, P., Eby, M., Jones, C. D., Christian, J. R., Bonan, G., Bopp, L., Brovkin, V., Cadule, P., Hajima, T., Ilyina, T., Lindsay, K., Tjiputra, J. F., & Wu, T. (2013). Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 earth system models. *Journal of Climate*, 26(15), 5289-5314.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00494.1>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H. D., ... Zeng, N. (2006). Climate-Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *Journal of Climate*, 19(14), 3337-3353. <https://doi.org/10.1175/JCLI3800.1>
- Friedlingstein, P., Meinshausen, M., Arora, V. K., Jones, C. D., Anav, A., Liddicoat, S. K., & Knutti, R. (2014). Uncertainties in CMIP5 climate projections due to carbon cycle feedbacks. *Journal of Climate*, 27(2), 511-526. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00579.1>
- Gidden, M. J., Riahi, K., Smith, S. J., Fujimori, S., Luderer, G., Kriegler, E., Van Vuuren, D. P., Van Den Berg, M., Feng, L., Klein, D., Calvin, K., Doelman, J. C., Frank, S., Fricko, O., Harmsen, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Hilaire, J., Hoesly, R., ... Takahashi, K. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic

- scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development*, 12(4), 1443-1475.
- Hajima, T., Ise, T., Tachiiri, K., Kato, E., Watanabe, S., & Kawamiya, M. (2012). Climate Change, Allowable Emission, and Earth System Response to Representative Concentration Pathway Scenarios. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 90(3), 417-434. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-305>
- Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M. A., Abe, M., Ohgaito, R., Ito, A., Yamazaki, D., Okajima, H., Ito, A., Takata, K., Ogochi, K., Watanabe, S., and Kawamiya, M. (2020). Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks, *Geoscientific Model Development*, 13, 2197-2244, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>.
- Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J. J., Vu, L., Andres, R. J., Bolt, R. M., Bond, T. C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M. C. P., O' Rourke, P. R., & Zhang, Q. (2018). Historical (1750-2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emission Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development Discussions*, 11, 369-408. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>
- Ito, A., Tohjima, Y., Saito, T., Umezawa, T., Hajima, T., Hirata, R., Saito, M., & Terao, Y. (2019). Methane budget of East Asia, 1990-2015: A bottom-up evaluation. *Science of the Total Environment*, 676, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.263>, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>
- Lehner, B. and Döll, P. (2004). Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology* 296/1-4, 1-22.
- O' Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Sudo, K., Takahashi, M., Kurokawa, J. I., & Akimoto, H. (2002). CHASER: A global chemical model of the troposphere 1. Model description. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(17). <https://doi.org/10.1029/2001JD001113>
- Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Sudo, K., Sekiguchi, M., Abe, M., Saito, F., Chikira, M., Watanabe, S., Mori, M., Hirota, N., Kawatani, Y., Mochizuki, T., Yoshimura, K., Takata, K., O' ishi, R., ... Kimoto, M. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12, 2727-2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019> ◉
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., & Kawamiya, M. (2011). MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 845-872. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>
- 筒井純一 (2016). 共有社会経済パス (Shared Socioeconomic Pathways, SSP). *天気* 63(7), 65-67
- 横畠徳太, 伊藤昭彦, 田中克政, 羽島知洋 (2019) 環境研究総合推進費 2-1605 終了研究成果報告書 永久凍土大規模融解による温室効果ガス放出量の現状評価と将来予測 [代表 斉藤 和之].

III. 英文Abstract

Development of a Monitoring and Evaluation System of the Methane Budget for Different Source Categories in East Asia toward Intended Emission Reduction

Principal Investigator: Akihiko ITO

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
 16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN
 Tel: +81-29-850-2981 / Fax: +81-29-850-2299
 E-mail: itoh@nies.go.jp

Cooperated by: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

[Abstract]

Key Words: Greenhouse gas, Sectorial emissions, Ground observation, Stable isotopic measurement, Emission inventory, Methane emission model, Earth system model, Mitigation scenario

The methane (CH_4) budget of East Asia was evaluated using a bottom-up approach including emission inventory, land-surface remote sensing, and a biogeochemical model. Our analysis covered both natural (wetlands, termites, biomass burning, soil oxidation, and geological sources) and anthropogenic (fossil fuels, industrial and urban activities, waste, livestock, and agriculture) sectors. With all the sectors included, the region was estimated to be a net CH_4 source of $67 \text{ Tg } \text{CH}_4 \text{ yr}^{-1}$, about 88% of which was from anthropogenic sources. In the interannual variability, an emission increase after 2002 was evident and attributable to the rapid increase of leakage from fossil fuel mining and agriculture. The source-sink maps clearly indicate hotspots of CH_4 emissions. Based on the contemporary budget, we developed preliminary scenarios to project future CH_4 emissions for discussing climatic mitigation options.

Measurements of atmospheric CH_4 at Hateruma Island (HAT) have shown synoptic-scale variations with frequent enhancement of CH_4 concentration, primarily due to advection of air masses from continental East Asia. The observed variations were analyzed by using a Lagrangian particle dispersion model combined with the CH_4 emissions estimated in this study. The result supported the increasing trend and seasonality of the emission estimates. To evaluate the contributions of different CH_4 source sectors, we set up a novel measurement system for a stable carbon isotope ratio of CH_4 for analyzing air samples collected at HAT. The measurement results suggest either an underestimation of fossil fuel emissions or overestimation of waste/agricultural emissions. To further help in the assessment of the CH_4 emission estimate, we performed atmospheric measurements of ethane, a tracer for fossil fuel-related CH_4 emissions. From the measurements, one can infer that larger fossil fuel sources than in the emission inventory are likely.

The climatic feedback effect of the CH_4 budget was investigated using MIROC-based Earth System Models (ESMs). First, we implemented a wetland CH_4 emission scheme in the ESM, by which climatic impacts on CH_4 emissions and climatic feedback from influencing the atmospheric CH_4 concentration were explicitly included. Then, we conducted a series of

experiments using different future scenarios of atmospheric CH₄ concentrations and emissions. The low future methane concentration experiment showed that restricting the CH₄ concentration may mitigate global warming by 0.6° C, accompanied with propagating impacts on carbon and CO₂ cycles. Also, the surge emission experiment that involves injecting 5000 Tg CH₄ into the atmosphere indicated that such abrupt CH₄ emissions (e.g., from permafrost and methane hydrate) would raise the global mean temperature by 0.5° C though it should gradually attenuate.