

2015年度秋季大会スペシャル・セッション 「温室効果気体研究の観測・測定技術の進展による 新たな展開」報告

世話人：町田敏暢*¹・村山昌平*²・森本真司*³・
松枝秀和*⁴・青木周司*⁵・藤谷徳之助*⁶

1. はじめに

温室効果気体（以下、GHG：Greenhouse Gases）の地球規模の循環の解明は、将来の気候変動とそのフィードバック機構を精緻に予測するために不可欠である。大気中の二酸化炭素（以下、CO₂）濃度の観測から始まったGHG循環の研究は、その後、メタン（以下、CH₄）など多種類の気体に及び、面的には海洋や陸域生態系の観測へ、時間的にはアイスコア解析等の古環境にまで広がり、さらに同位体比や酸素（以下、O₂）等の関連物質観測など、幅広い分野で進められている。近年は計測の高度化、多様なプラットフォームへの展開などによって、観測の空白域が埋められつつある。さらに、観測データの統合化とその品質評価も重要な課題となり、GHGの標準スケールに関する技術開発も進んでいる。

本セッションは、これら最先端の観測手法や測定技術について情報交換を行い、今後の研究の展望を議論し、分野間の連携を促進することを目的として、10月28日午後にA会場で開催された。本稿ではスペシャル・セッションの概要を報告する。

2. セッションの概要

冒頭、世話人を代表して町田より開催趣旨について説明が行われた。その中で、近年はレーザー分光法の活用やリモートセンシング法による計測の高度化、航空機・船舶・気球等の多様なプラットフォームの展開、標準スケールの技術開発、大気・海洋・陸域観測など、多くの分野で成果が得られていること、GHGをトレーサーとする大気輸送の研究にも注目が集まっていること等が紹介された。また、今後発展の期待される話題について、モデルや関連研究からの要望や提言もいただきたい旨、発言があった。

セッションは150名以上の出席を得て開催された。GHGのみならず、O₂等の測定法、標準ガス製造、衛星観測、海洋における観測、陸域におけるフラックス観測、さらにはデータ管理、多様な分野における最新の研究成果など、計22件の発表があり、活発な討論が行われた。以下、各講演の概要を示す。

①中澤高清（東北大院理）：温室効果気体循環に関する最近の知見と課題

代表的なGHGであるCO₂・CH₄・一酸化二窒素（以下、N₂O）の循環について、理解の現状と課題を概説する。最近のCO₂研究によると、大気残留量と化石燃料からの放出量の推定精度は高いが、土地利用改変による放出量と海洋および陸域生態系による吸収量は解析手法や研究によって異なっており、それぞれの値の不確かさも大きい。また、IPCC AR5が採用した近年のCO₂収支を見てみると、海洋吸収は時間とともに少しずつ増加しており、陸域吸収は1990年頃に急増し、その後ほぼ一定

*¹ Toshinobu MACHIDA, 国立環境研究所.

*² Shohei MURAYAMA, 産業技術総合研究所.

*³ Shinji MORIMOTO, 東北大学大学院理学研究科.

*⁴ Hidekazu MATSUEDA, 気象研究所.

*⁵ Shuji AOKI, 東北大学大学院理学研究科.

*⁶ (連絡責任著者) Tokunosuke FUJITANI, 国立環境研究所. fujitani.tokunosuke@nies.go.jp

© 2016 日本気象学会

か微増となっているが、大気中の O_2/N_2 比の解析や CO_2 濃度の逆解析などは、必ずしもそのような時間変化を支持している訳ではない。 CH_4 収支に関しては、トップダウン法とボトムアップ法による推定値に大きな違いがみられる（例えばIPCC AR5）。また、1990年代以降に観測された濃度上昇の減速・停止と再上昇などについても十分な理解が得られていない。 N_2O については、ボトムアップ法を基に推定した各過程の放出量と消滅量には大きな不確かさがあり、全球収支もトップダウン法による結果と異なっている。

GHG循環の解明にとって観測データは不可欠であり、多様なプラットフォームを利用した広域観測を充実させる必要がある。また、新たな高精度計測法の開発を行い、多くの要素にわたる観測を実施することも、循環解析の拘束を強めるために重要である。

②澤 庸介（気象研）他：民間航空機を用いた温室効果気体の広範囲モニタリング

日本における民間航空機を用いたGHGの観測は、1979年から東北大学で日本上空において CO_2 の観測が実施され、その後気象研究所などによって、オーストラリア～日本間の長期観測が実施された。2005年以降は、CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for TRace gases by Air-Liner) プロジェクト（国立環境研・気象研・日本航空等）によって、世界規模で CO_2 の連続測定が実施され、高頻度・広域の観測が実現し、濃度変動の広域伝播の理解や、地域的な CO_2 放出・吸収の検出も可能となってきている。

今後は、同化モデルとの連携により、観測データの時間・空間分解能を十分に利用した解析が重要であり、また、逆解析による放出・吸収量推定も進める必要がある。

③菅原 敏（宮教大）他：インドネシア上空成層圏の温室効果気体と重力分離の観測

成層圏におけるGHGの挙動を明らかにするために、クライオ実験グループ・SOWERグループによって大気球を用いた大気サンプリングをインドネシアで実施し、赤道域における高度17 kmから29 kmの間の8高度において、サンプルが得られた。熱帯対流圏界面より上部の CO_2 濃度分布は中緯度と相違していることが分かった。また、熱帯成層圏においても重力分離が形成されていることが明らか

となったが、その強さは日本上空と比較して1/3程度と極めて小さい。今後、ゾンデ観測データ、衛星データ、モデルなどによる総合的な解析を進める。

④遠嶋康徳（環境研）他：大気中酸素濃度の観測に基づく研究と課題

分析技術の進歩により、 O_2 ・アルゴンなどの大気主成分のわずかな濃度変動が検出可能となり、 CO_2 及び O_2 の濃度変化率と、化石燃料消費に伴う CO_2 放出量及び海洋からの正味の O_2 フラックスを用いることによって、海洋と陸上生物圏のそれぞれの炭素吸収量の推定が可能となった。これまでの観測から、陸域生物圏の吸収量が近年増加傾向となっていることが示された。また、 O_2 濃度と CO_2 濃度の和として定義される大気ポテンシャル酸素（以下、APO: Atmospheric Potential Oxygen）の時空間変動を観測することで、海洋における生物生産・鉛直混合・大規模循環等の各プロセスに関する情報を得ることができる。 O_2 濃度の測定においては、絶対的な基準がないことから、今後、標準ガスの調製が期待される。

⑤石戸谷重之（産総研）他：気候変動と炭素循環の包括的評価を目指した大気中アルゴン濃度と酸素濃度の高精度観測

大気中のアルゴンと窒素の比(Ar/N_2)の微小変動を超高精度で観測することにより、例えば海洋貯熱量の変動、大気重力分離の変動等の、海洋および大気の物理的な状態の変動を検出するための試みを実施している。現在実施している地上観測によって、APOの季節変動に対する大気海洋間熱交換の寄与と海洋生物活動の寄与を分離して評価することが期待される。また、経年的な変動から、海洋貯熱量の変動を見積もることが可能である。気候変動と炭素循環の包括的な評価に向けて、 Ar/N_2 とAPOの同時観測の長期・広域展開を促進する。

⑥豊田 栄（東工大院総理工）他：大気中一酸化二窒素の同位体分子種 (isotopocule) の長期観測

重要なGHGの一つである N_2O には、天然（土壌・海洋等）と人為（農業・バイオマス燃焼等）の発生源がある。また、種々の同位体を含む分子種が存在し、これらの自然存在比は N_2O の起源、生成・消滅過程の進行度に応じて変動することから、全球収支の推定に有効な指標である。沖縄・シベリア・カナダにおける大気観測試料を分析し、 N_2O

濃度の増加には農業等の人為発生源の寄与が高まっていることが明らかとなった。

⑦藤谷徳之助（環境研）他：「温室効果ガスの標準ガス相互比較実験（iceGGO）」活動の概要

地球温暖化観測に関する関係府省・機関間の緊密な連携を図るための拠点として「地球観測連携拠点（温暖化分野）（JACCO）」が2006年に設立され、その事務局として地球温暖化観測推進事務局/環境省・気象庁（OCCCO）が設置された。OCCCOのもとに、連携施策の一つである「データ標準化」を推進するため、「温室効果ガス観測データ標準化ワーキンググループ」を設置し、平成24年から「温室効果ガスの標準ガスの相互比較実験」（iceGGO：inter-comparison experiments for Greenhouse Gases Observation）を継続的に実施している。これまでのiceGGO活動によって、今後のデータ統合に向けた標準スケールの違いやその調製方法等に関する重要な成果が得られている。これまでの活動の概要を報告するとともに、今後の展開についても述べた。

⑧下坂琢哉（産総研）他：質量混合法によるSIトレーサブルな大気観測用標準ガスの開発

大気中のGHG濃度の観測値に要求される精度は非常に高く、また、広範囲・長期間にわたる同等性が要求される。これらの要求を満たすためには標準ガスの濃度がSI（International System of Units）トレーサブル^(注1)であることが必要である。そのために、質量比混合法によりCO₂等の大気観測用標準ガスの開発を行っている。要求される精度を達成するために、親ガスと希釈ガスをそれぞれの質量に適した天秤で測定し、1回の希釈で調製する方法を開発した。

（注1）測定器が校正の連鎖によって国際標準（SI）に辿り着けることが確かめられている場合、この測定器により得られた結果は国際標準にトレーサブルであるという。

⑨小出 寛（気象庁）：WMO温室効果ガス世界資料センターのデータ管理と利用

気象庁が運営する世界気象機関（WMO）温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）は2015年に25周年を迎えた。世界中のGHG観測データの収集・配布、WMO温室効果ガス年報のデータ解析やデータサマリー（報告書）の公表等を行っており、平成24年からはウェブサービスの一層の改善に取り

組んでいる。また、WMO全球大気監視計画（GAW：Global Atmosphere Watch）では次期実施計画の策定を進めており、全球でより精密な吸収・放出量を算出する統合温室効果ガス情報システム（IG³IS）の構築が計画されている。関係者はGAW計画に積極的に参加してほしい。

⑩坪井一寛（気象研）他：気象庁における温室効果ガスの定常観測と今後の展開

気象庁はGAW計画のもと、西部北太平洋域でCO₂等のGHG濃度の定常観測を実施している。地上観測（綾里・与那国島・南鳥島）のみならず、近年は、防衛省の輸送機（神奈川県綾瀬市～南鳥島）を用いて、上空の観測を実施するとともに、レーザー分光法導入による観測の高精度化にも取り組んでいる。得られた観測データは、速やかにWDCGGに公開しているため、研究でご利用願いたい。また現在、気象庁は、南鳥島を中心に、国内の研究機関と観測プラットフォームを共有し、GHGの変動要因の解明に向けた共同観測を推進している。

⑪寺尾有希夫（環境研）他：アジア域への温室効果ガス観測の展開

国立環境研究所では20年以上にわたりGHG等の観測を、地上ステーション（波照間島・落石岬など）・定期船舶・民間航空機を用いて実施している。近年は観測空白域であるアジア地域において地上観測を展開している。フラスコサンプリング観測を、中国（貴陽）・インド（ナイニタール）・マレーシア（ダナンバレー）・バングラデシュ（コミラ）などで実施している。また、REDD+（Reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries^(注2)）の効果のMRV（測定・報告・検証）のために、西表島やマレーシア（ボルネオ島ならびにマレー半島）において、CO₂の連続観測を行い、森林によるCO₂吸収排出量の推定方法の開発を行っている。さらに、インドネシアのジャカルタ大都市圏において、GHGや大気汚染物質の連続観測を行う準備を進めている。

（注2）途上国における森林減少・森林劣化に由来する排出の抑制、並びに森林保全、持続可能な森林経営、森林炭素蓄積の増強。

⑫川村賢二（極地研）他：アイスコアからの空気抽

出・分析技術における最近の進展

南極のアイスコアの分析によって過去のCO₂濃度が報告され始めてから約30年が経過した。我が国でもアイスコアの空気抽出・分析技術が東北大学において開発され、過去のCO₂・CH₄・N₂Oの濃度や同位体に関する知見が得られてきた。今後の高分解能分析には一層の省試料化・高精度化が求められる。極地研の融解・分析装置では、試料量は15年前の1割程度となっている。また、レーザー分光測器と連続融解分析を組み合わせることで、CH₄濃度を準連続的に測定することも可能となってきた。この方法により詳細な変動履歴の復元が期待される。

⑬石井雅男（気象研）他：気象研究所・気象庁による海洋CO₂変動の長期観測

気象庁・気象研究所は、137°Eの観測定線では1982年以来、太平洋赤道域では1987年以来、大気・海洋のCO₂分圧（pCO₂）を長期間にわたって観測し、これらの観測データを用いて、西部太平洋におけるpCO₂の実態を明らかにしてきている。さらに、全炭酸濃度、pH、全アルカリ度など、測定対象を海洋表層水から海洋内部に拡張し、海洋CO₂変動や酸性化の実態と要因解明を統合的に行っている。さらに、レーザー分光法によるCO₂・CH₄の航走同時観測を行っている。これらの観測から、西部北太平洋におけるCO₂の増加トレンドなどについて、新たな知見が得られている。今後も観測を継続するとともに、新たな観測装置の開発を行う。

⑭中岡慎一郎（環境研）他：海洋表層CO₂観測と広域分布推定研究の動向

大気・海洋間のCO₂交換量の推定を行う上で、海洋CO₂の時空間分布を把握することは非常に重要であるが、その年々変動を伴う広域分布を把握することは困難であった。しかし、近年、全球CO₂分圧観測データセット（SOCAT：Surface Ocean Carbon dioxide ATlas）が整備されるとともに、ニューラルネットワーク技術を用いたpCO₂分布推定手法が開発された。この手法を用いて、水温・クロロフィル濃度時空間分布などとpCO₂データを関連付け、北太平洋pCO₂分布と変動を求めるとともに、SOCATデータと比較して推定誤差を評価した。各研究者によって種々の方法で得られた全球の推定結果を相互比較するSurface Ocean CO₂ Mapping Intercomparison計画が2014年に開始された。

⑮宮田 明（農環研）：陸域での温室効果気体のタワーフラックス観測の現状と展望

陸域生態系の炭素循環の解明を目的としたCO₂フラックスのタワー観測ネットワーク（FLUXNET）は世界規模に拡大し、アジアにおけるネットワーク（AsiaFlux）も拡大している。観測では、地表面のエネルギー収支のインバランスに関する課題が未解決であるが、渦相関法という同一の手法を用いた多地点での長期モニタリングで得られた観測データの解析は、陸域生態系モデルやリモートセンシング研究との連携によって、大陸規模での陸域生態系の炭素循環の解明に貢献している。他のGHG（CH₄・N₂O）についても、新たなガス分析計が開発され、フラックス観測が進展しつつある。

⑯吉田幸生（環境研）他：GOSAT TANSO-FTS SWIR^(注3)による温室効果ガスカラム平均濃度観測と今後の展望

GHG観測を主目的とする温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）は2009年1月23日に打ち上げられ、現在も観測を継続している。CO₂・CH₄の動態把握には、短波長赤外域のフーリエ分光スペクトルデータの解析が有効である。国立環境研究所では、CO₂・CH₄のカラム平均濃度の導出と検証を行っている。得られた結果では、精度はいずれも当初目標（CO₂：～4 ppm、CH₄：～35 ppb）を大きく上回っているが、バイアスの時間空間依存性が確認されるなど、課題も残っており、アルゴリズムのさらなる改善が必要である。次期計画であるGOSAT-2においては、さらなる技術改善が実施される予定である。

（注3）

TANSO：Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation

FTS：Fourier Transform Spectrometer

SWIR：Short Wavelength InfraRed

⑰齋藤尚子（千葉大 CEReS）他：GOSAT TANSO-FTS TIR^(注4)バンドから得られるCO₂およびCH₄の上空濃度データの有用性

GOSATの熱赤外スペクトルデータから導出されたCO₂の鉛直プロファイルと、CONTRAIL等の航空機観測データの比較を行った結果、上部対流圏および下部成層圏の観測結果は、航空機観測結果と良い一致を示しており、両者の差は概ね0.5%以内にとまっている。北半球中低緯度の夏季について

は、航空機データに対する負バイアスが大きく、中部対流圏ではバイアスが他の高度域より大きくなっている。CH₄については、HIPPO^(#5) (HIAPER Pole-to-Pole Observations) 観測の結果と比較を行った結果、中低緯度の海上ではよい一致を示していたが、北半球の高緯度では観測の情報量が乏しく一致はよくない。衛星観測で得られた全球の分布の妥当性については、現場観測やモデルデータとの比較による検証が不可欠である。

(注4) TIR: Thermal InfraRed

(注5) 米国の研究航空機 HIAPER を用いた大気観測キャンペーン。

- ⑱森野 勇 (環境研) 他: 地上設置高分解能フーリエ変換分光器を用いた温室効果気体観測ネットワーク TCCON (Total Carbon Column Observing Network)

炭素循環の理解や温室効果気体観測衛星データの検証のために、大気微量成分による吸収を受けた太陽直達光スペクトルを観測する、地上設置高分解能フーリエ変換分光計による全球観測ネットワーク (TCCON) の概要等について報告した。観測サイトは熱帯から極域・大陸・沿岸及び島嶼に20カ所以上設置されているが、アフリカ・南アメリカ・アジア (東アジアを除く) には設置されていない。国内では、つくば・佐賀・陸別に設置されている。観測波数域は3900~15500 cm⁻¹、分解能0.02 cm⁻¹、InGaAs・Si 検出器が使用されている。観測スペクトルの解析には共通の解析プログラムが使用されている。今後は解析プログラムのバージョンアップ、検定観測の高頻度化等が図られることによりデータの高精度化を目指すとともに、空白地点を埋め観測地点を増やすために新観測機器の開発が進んでいる。

- ⑲阿保 真 (首都大システムデザイン) 他: ライダーによる大気境界層内の CO₂濃度高度分布の連続観測

気候変動予測の不確実性低減のため、森林や都市部の局所的な CO₂吸排出量を精度よく把握する必要があり、大気中の CO₂濃度の高度分布を把握することが重要である。現状では、航空機による現場観測やタワーによるモニタリングがあるが、濃度変動の激しい大気境界層内の高度分布の動態を観測した例は少ない。このため、CO₂の鉛直濃度分布を高精度で測定するための差分吸収ライダーを開発し、高度2~7 kmの濃度の鉛直分布の測定に成功し

た。また、大気境界層内の CO₂高度分布の動態を把握するために、小型差分吸収ライダーを開発した。送信ビームはスキャンが可能で、大気境界層内の CO₂濃度の鉛直および近距離の水平分布を連続して観測することが可能である。この装置を使用して夏季及び冬季における観測を実施した。今後測定事例を増やすことにより、モデルとの比較等を行う。

- ⑳小田知宏 (USRA/NASA GSCF) 他: 人為起源二酸化炭素排出から見る炭素循環研究

近年利用可能になった各種プラットフォームから取得される空間的・時間的に密なデータを用いたより詳細な炭素収支解析に向け、モデルはより高次元かつ高精度で炭素循環プロセスを再現することが求められる。人為起源 CO₂排出量データは、インバース計算等の炭素収支解析の境界条件として用いられることから、高解像度の解析においても大きなバイアスを生じさせることのないよう、排出量の時空間的変動の適切な表現が求められる。同時に、排出データの高精度化に伴い増大すると考えられる不確実性の評価は特に重要な課題である。近年では、排出量の場に付随する不確実性を直接評価できる排出モデルや、排出データの相互比較を通じた不確実性評価の研究が行われている。さらには、インベントリ法により定量化・報告される排出量の検証の必要性を受けて、人為起源排出量自体をターゲットとするインバース計算の検討・開発が行われている。

- ㉑丹羽洋介 (気象研) 他: NICAM-TM 4D-Var を用いた CO₂フラックス推定における観測データインパクト評価

大気中の CO₂濃度観測では、従来からのフラスコサンプリングに加えて、レーザー分光計による連続観測、航空機を用いた高頻度観測、地上 FTS や衛星観測等、多種多様な観測が実施されている。これらの観測データから CO₂フラックス情報を抽出するために、4次元変分法 (4D-Var) によるインバースシステムを開発した。双子実験によるシステム評価を行うとともに、新たにフラックス解析誤差の導出手法を確立し、その解析誤差を用いた観測データのインパクト評価を行った。

- ㉒林田佐智子 (奈良女子大理) 他: 衛星と現地観測による大気メタンデータの活用~南アジアにおける新展開~

グローバルな CH₄の発生領域の特定や発生量推

定の改善を図るために、GOSAT 衛星データのみならず、相補的に現地観測を実施し、それらの結果を総合的に活用して、南アジアからの CH₄ 放出の実態把握と定量化を目指している。本プロジェクトでは、現地観測については、大気サンプリングや連続観測、フラックス観測を計画している。北インドのナイニतालとソーニーパット、バングラデシュのコミラで大気採取を行っており、南インドで水田からの CH₄ フラックス観測を開始予定である。これらの観測データと、大気輸送モデルを用いたインバース解析によって南インドからのメタン放出量推定の改善を目指している。

3. まとめ

GHG に関する主に観測や測定に関する話題を中心に、多様な課題について講演が行われた。気候変動の要因を把握し、将来の影響を予測するため、GHG の観測は広い分野で重要度を増している。分野を越えた情報共有と協力により、GHG の信頼性を高め、観測データの有効活用を推進することが重要である。なお、上記講演⑦に述べた OCCCO の「温室効果ガスの標準化に関する WG)」では、iceGGO 活動を取りまとめた報告書を作成することを計画している。