



富士山特別地域気象観測所（標高3776m）でCO₂濃度を自動観測しています

2017年7月号 [Vol.28 No.4] 通巻第319号

富士山頂での大気中CO₂濃度の長期観測—アジア域の炭素循環の変化を見出すために—

地球環境研究センター 炭素循環研究室 高度技能専門員 野村渉平

「いぶき」（GOSAT）から見た、地球全体の大気中二酸化炭素濃度の変動の様子

地球環境研究センター フェロー 横田達也

COSP情報交換グループ支援と最適化に関する研究集会参加報告

地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室 主任研究員 小倉知夫

土地利用に関わるネガティブエミッション技術（LUNETs） 食料安全保障など持続可能な開発目標（SDGs）への示唆—GCP/MaGNETワークショップ報告—

地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室 主席研究員 山形与志樹
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 伊藤昭彦

四日市公害と環境未来館開館2周年記念 江守正多氏講演「地球温暖化と私たちの未来」

四日市公害と環境未来館 館長 生川貴司

国立環境研究所一般公開「春の環境講座」を開催しました [1] パネル・展示 1：JAL（日本航空）とコラボした大気観測プロジェクト「CONTRAIL」

地球環境研究センター 大気・海洋モニタリング推進室長 町田敏暢

国立環境研究所一般公開「春の環境講座」を開催しました [2] パネル・展示 2：永久凍土からメタン！？ 巨大永久凍土が解けている

国立環境研究所 地球環境研究センター 横畠徳太
国立環境研究所 地球環境研究センター 伊藤昭彦
国立環境研究所 地球環境研究センター 高田久美子
海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野 斉藤和之

国立環境研究所一般公開「春の環境講座」を開催しました [3] 体験イベント：自転車de発電

地球環境研究センター 係員 金田秀斗

2050年までに温室効果ガスをどう減らす？－春の環境講座で環境サイエンスカフェを開催しました－

社会対話・協働推進オフィス 科学コミュニケーター 岩崎茜

富士山頂での大気中CO₂濃度の長期観測

—アジア域の炭素循環の変化を見出すために—

地球環境研究センター 炭素循環研究室 高度技能専門員 野村渉平

国立環境研究所地球環境研究センターは、2009年に富士山頂にある富士山特別地域気象観測所（以下、測候所 写真1）に大気中の二酸化炭素（CO₂）濃度を測定する機器を設置し、観測を始めました。本報では私たちが行っている富士山頂でのCO₂濃度観測について、そしてその観測で明らかとなったことをご紹介します。



写真1 富士山特別地域気象観測所（標高：3776m）

1. 富士山頂の大気の特徴

私たちは毎年夏（7-8月）に富士山頂にある測候所に設置したCO₂濃度測定システムのメンテナンスを行っています。図1 (a) はCO₂濃度測定システムの大気取り込み口が設置された測候所西側から見た富士山南西部の展望です。測候所は、富士山頂の西の縁に位置する剣ヶ峰（標高：3776m）に建てられており、常に横方向から強い風（平均で12m/s）を受けています。山頂の大気は冷たく（地上より約22°C低い）澄んでおり、都市や植生が分布する平野の大気とは別のものであると感じます。

富士山頂の大気中CO₂濃度の観測は、私たちが2009年に開始する以前、東北大学と気象研究所がそれぞれ1980-1981年と2002-2004年に行いました。それらの結果から、富士山頂の大気は、年間を通して関東や東海地域などの近傍の都市や植生の呼吸からのCO₂放出および植生の光合成によるCO₂吸収の影響を受けていない大気であり、東アジア中緯度帯における平均的な濃度であることが示唆されました。このような環境は日本国内では他にはありません。

東アジアの中緯度帯は、人為的に排出されるCO₂量が世界で最も多い地域の一つで、全球の炭素循環に強い影響を与えている地域でもあります。しかし、この地域は人口密度が高く経済活動が盛んで、それらによるCO₂排出の影響を強く受けるため、現在、長期間CO₂濃度の観測が行われている代表的な地点は、図1 (b) で示されたように高緯度や低緯度地域の離島や岬です。しかしながら、東アジア域の中緯度帯においてCO₂濃度を観測することは、当地域が全球の炭素循環に与える影響の解明に資することから、私たちは富士山頂での大気中CO₂濃度の観測を実施しました。

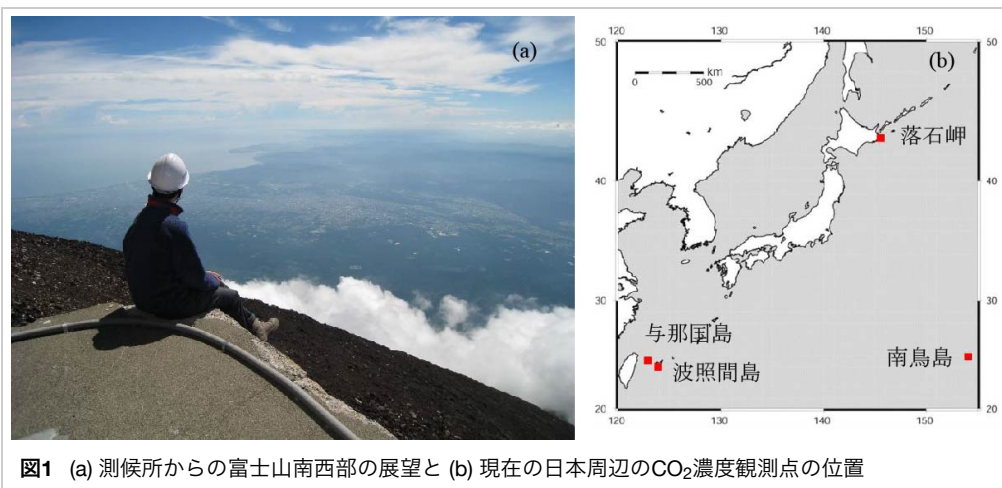


図1 (a) 測候所からの富士山南西部の展望と (b) 現在の日本周辺のCO₂濃度観測点の位置

2. 富士山頂でCO₂濃度を観測する

現在の測候所は、管理者が常駐する7-8月しか電気が供給されません。かつては通年にわたり管理者が常駐していましたが、現在は測候所自体、その期間のみ開所されます。さらに管理者がいない期間は空調設備が稼働しないため、冬期の室温は、-30°C程度まで低下します。

したがって、10カ月間の電気供給とメンテナンスなしで、かつ-30°Cの環境下でも安定的に精度良くCO₂濃度の測定が行える手法がここでは求められます。私たちがこれまで行ってきたCO₂濃度の観測方法とは異なる手法を開発する必要があり、また本観測を長期間継続させるために維持管理にかかる作業量を最小限にする必要があります。そこで私たちは特別なCO₂濃度測定システムの製作と長期運用体制の構築を行いました。

具体的にはCO₂濃度測定システムの電源100個の鉛蓄電池を測候所に運び入れ、測候所に電力が供給される7-8月の期間にそれらを全て満充電し、その蓄電された電気で1年間CO₂濃度測定が可能なシステムを製作しました(図2(a))。本システムに用いた機器の部材は全て省電力のものを選定し、本システムの起動時間は消費電力を抑えるため毎日3時間(21-24時)としました。さらに、本システムのCO₂濃度計測部で発生した熱は逃がさないように計測部を断熱材で3重に覆いました。測定結果は、衛星通信を利用して、毎日CO₂濃度の測定が終了した直後に研究所に送られるようにしました。

また富士山頂は日本でもっとも高度が高く酸素が薄い場所です。7-8月にメンテナンスを行う際は高山病特有の頭痛と吐き気が発症します。これを軽減し、低酸素濃度の作業環境下でのミスを回避するため、メンテナンス作業時間は極力短縮できるように努めました。例えば、100個の蓄電池の充電を自動化させ、スイッチ一つで充電と給電を切り替えるようにしました。また予めポンプ・電磁弁・CO₂検出部等が内蔵されたCO₂濃度計測部を2台用意し、1台を測候所に設置し、もう1台を研究所に保管する体制をとりました。夏期のメンテナンス期間に、研究所で計測部内の各部材の動作確認済みのCO₂濃度計測部を測候所に運び、測候所に設置され1年間稼働したCO₂濃度計測部とまるごと交換しました(図2(b))。これにより計測部に内蔵された各部材の動作確認を測候所で行うことを省き、測候所での滞在時間を約24時間に短縮しました。

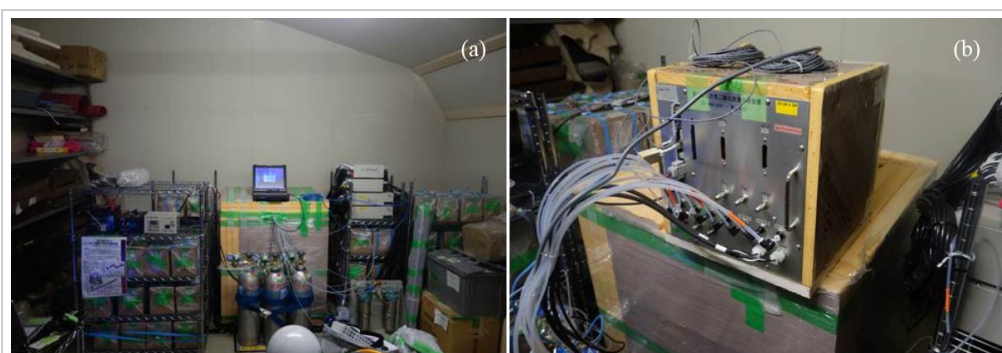


図2 (a) 蓄電池100個を含むCO₂濃度測定システムおよび (b) 毎夏交換するCO₂濃度計測部

3. 富士山頂の大気中CO₂濃度が示すこと

(1) 東アジア域はCO₂の放出源が強い

図3 (a) に2009年7月から2017年4月の富士山頂のCO₂濃度と北半球中緯度の平均的な値を示すハワイのマウナロア観測所（標高：3396m）のCO₂濃度を示しました。

富士山頂のCO₂濃度はマウナロアより夏期では2-10ppm低く、冬期では2-12ppm高くなりました。これは富士山頂の大気中CO₂濃度が、夏期はシベリアや中国大陸に分布する植生の光合成によるCO₂吸収、冬期は中国大陸で植生および都市からのCO₂放出の影響を強く受けているためです。富士山頂のCO₂濃度の増加率（1年間に増加するCO₂濃度）の変動はマウナロアの変動と一致していました。これは富士山頂の大気が、マウナロアの大気と同様に地域のベースラインの大気であるためです。また富士山頂の増加率の変動幅がマウナロアより大きい要因は、富士山がマウナロアよりアジア大陸にあるCO₂の吸収源と放出源に相対的に地理的に近いためであり、それらの吸収源と放出源が全球の大気中CO₂濃度の増加率に影響を与えている可能性が示唆されました。

図3 (b) に富士山頂とマウナロアの季節変動を省いたCO₂濃度の移動平均値とその両者の差を示しました。富士山のCO₂濃度の移動平均値は、マウナロアより1-2ppm高く推移していました。これは富士山頂の大気が、マウナロアに比べて東アジアから排出されるCO₂をより含んでいるためだと考えられます。

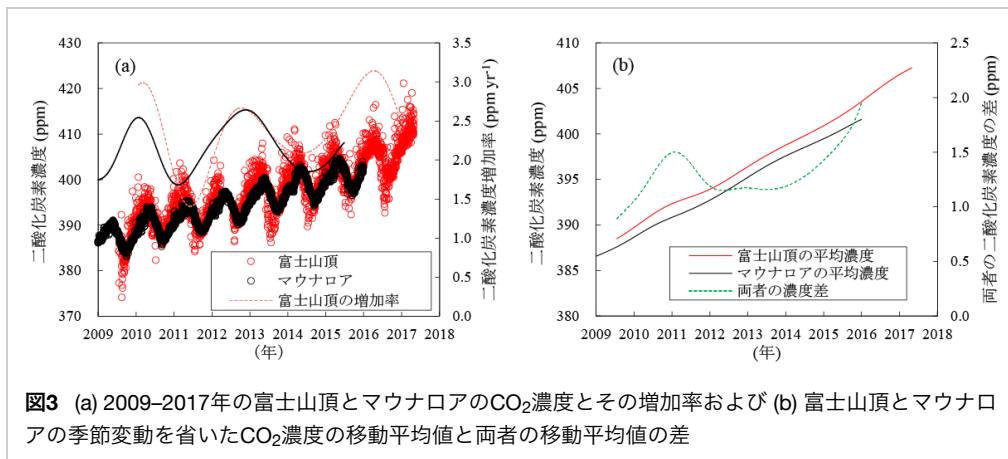


図3 (a) 2009-2017年の富士山頂とマウナロアのCO₂濃度とその増加率および (b) 富士山頂とマウナロアの季節変動を省いたCO₂濃度の移動平均値と両者の移動平均値の差

(2) 富士山頂は地上でありながら上空の大気を捉えられる地点

図4 (a) に2009年から2017年の富士山頂のCO₂濃度と航空機観測（民間旅客機にCO₂計を搭載し、飛行過程で大気中CO₂濃度の連続観測を行うCONTRAILプロジェクト）により関東から近畿の範囲において富士山頂と同標高で測定された大気中CO₂濃度を示し、図4 (b) に富士山頂と航空機観測のCO₂濃度の関係性を図示しました。

両者の濃度は、季節に関わらず常にほぼ一致していました。また両者の差は、 -0.02ppm ととても小さい値を示しました。両者の差の標準偏差が 2.14ppm であった要因は、両者のCO₂濃度の測定時刻（富士山頂：夜間のみ、航空機観測：夕方から夜間）および測定場所が若干異なったことによると考えられます。以上の比較結果から、富士山頂は年間を通して、地上でありながら上空の大気を捉えられる場所であることが明らかとなりました。

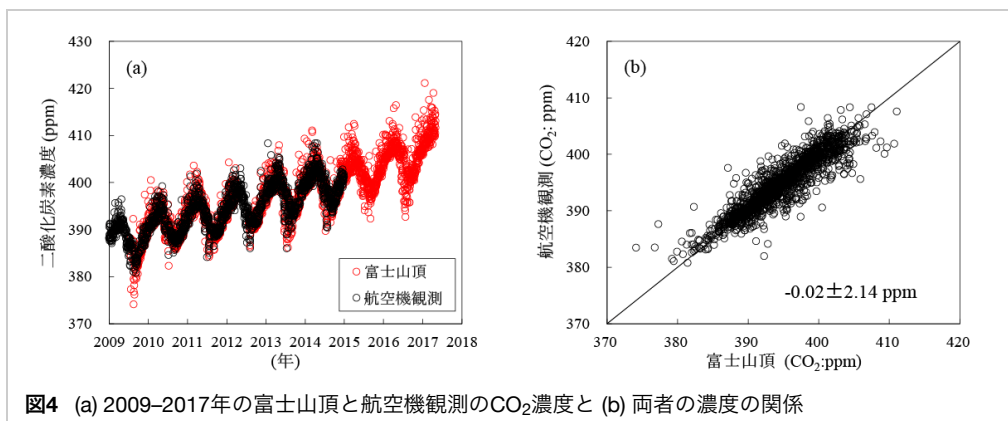


図4 (a) 2009-2017年の富士山頂と航空機観測のCO₂濃度と (b) 両者の濃度の関係

4. おわりに

私たちが観測している富士山頂の大気中CO₂濃度は、年間を通して山体周辺のCO₂吸収および放出の影響をほとんど受けていないこと、東アジア域の広範囲のCO₂の吸収と放出を反映していること、さらに北半球中緯度の平均CO₂濃度を示すマウナロアのデータとの長期的な比較から、東アジア域の炭素循環の変移が検証できることを明らかにしました。今年度から、富士山頂での観測強化を目的にCO₂以外の温室効果ガスの濃度を調べるべく、現在、山頂に設置しているCO₂濃度測定システムに毎月1回の山頂大気の採取を自動で行うシステムを加え、そのシステムにより採取された大気中のメタン (CH₄) や一酸化二窒素 (N₂O) の濃度を調査する予定です。そして価値あるデータを取得できる富士山頂での観測を長期間継続できる仕組みをさらに構築していきたいと考えております。

「いぶき」(GOSAT) から見た、地球全体の大気中二酸化炭素濃度の変動の様子

地球環境研究センター フェロー 横田達也

1. はじめに

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT、2009年1月打上成功)は、定常運用期間の5年間を過ぎ、9年目に入った現在(2017年6月)も二酸化炭素やメタン濃度を観測し続けています。「いぶき」は全球の指定点(56,000箇所)を観測しながら、3日周期で同一の観測点に戻ります。しかし、温室効果ガスの濃度を実際に測定できるのは、観測地点に雲がなく、入力信号条件が良い場所の地点のみで、全観測点の2~3%のデータ数にとどまっています。温室効果ガス濃度は、太陽光が地表面で反射して「いぶき」の搭載センサに戻る光を用いて測定します。その光は人の目には見えない近赤外または短波長赤外と呼ばれる電磁波です。この電磁波を利用した衛星センサは、地表面から大気上端(高度70km)までの二酸化炭素の平均的な濃度(これを「カラム平均濃度」と呼び、 XCO_2 と表します)を測定できる特長を有しています。

2. 衛星観測データの特徴と有用性

地球温暖化の科学的・政策的な議論がなされるときに、我々が知りたい情報は、地球全体の大気中の温室効果ガス濃度です。地球温暖化が進行している地表面付近を含む下部対流圏大気中の濃度が、炭素循環研究や地球温暖化の将来予測研究に必要な情報となります。なかでも、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)や毎年の気候変動枠組条約締約国会議(UNFCCCのCOP)で、地球温暖化の現状や将来予測、さらには地球全体の平均気温上昇の限度目標や温室効果ガスの上限濃度の設定目標が議論される際には、地球全体の大気における年平均気温や温室効果ガスの年平均濃度の現状に関する情報が必要です。なぜなら、温室効果ガス濃度や気温は、地域や時期(季節)によって比較的綺麗な周期的な変動を呈するため、上がったと思ったら下がってしまうなど、そのような値だけでは長期的な視点に立っての地球温暖化の状況の議論と判断を行いにくく、地球全体の様相を知るためには、これらの一時的な時間(季節)変化や局所的な特徴を取り除いた、たとえば年平均としての値が必要となるのです。

地上のタワーまたは海上における空気の直接採取法で得られるデータは、観測点の標高から上百数十m程度までの地球表面付近の濃度です。航空機を用いても、限られた地点(空港)や航路に沿っての高度十数km程度(※民間航空機の巡航高度は約10km)までしか測定できません。これまでは、これらの観測データから地球全体の気温や大気中の温室効果ガス濃度を推定し、議論してきました。衛星観測では、各観測点において高度方向に積算して平均をとった上記の「カラム平均濃度」を直接「観測データ」として取得できます。この点が衛星による温室効果ガス観測の強みです。

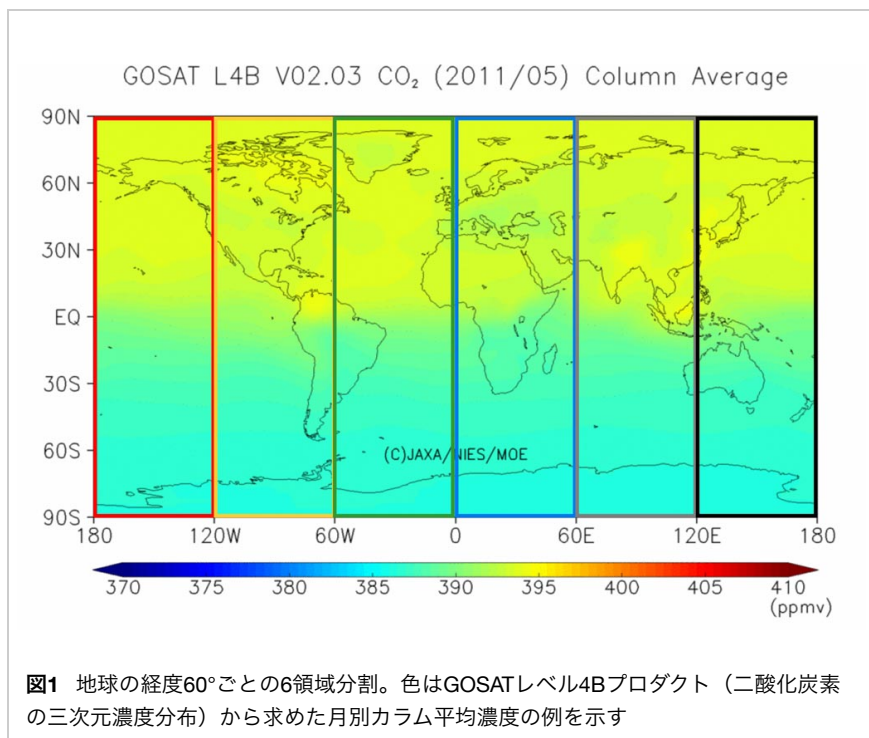
しかし、残念ながら「いぶき」による衛星観測では、その原理上、雲がかかっている場所の濃度は測れませんし、直径約10kmの観測視野内に少しでも雲が混入した地点や、太陽高度の低い高緯度の地点でも正しい濃度算出ができません。このため、観測したデータのうちの約3%程度の地点のデータのみが濃度プロダクトとして公開されています。雨季や乾季がはっきりと分かれているような地域は、濃度が算出される時期に偏りが生じてしまいます。砂漠などの乾燥地域は年間を通じて多くの濃度データが取得されますが、インドネシアやコンゴ、ブラジルのアマゾン流域のような赤道付近は常に雲に覆われていて衛星では測定しにくく、海上観測の多くの場所は光の反射が弱くて測定できません。高緯度地域は太陽高度の制約からなかなか安定して濃度が算出できません。つまり、衛星観測といえども万能ではなく、観測データ数が十分な地域は限られています。

3. 衛星観測データからの全大気濃度の推定方法

地球全体の二酸化炭素濃度については、米国大気海洋庁（NOAA）より月変化の報告がなされています（<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>）。これは地球表面付近の測定局によるデータの集計結果です。「いぶき」の観測データは地球表面付近ではなく「カラム平均濃度」を表していますので、NOAAのデータと「いぶき」のデータの相関関係から、双方の観測点を補うことによって、また観測に基づいて全大気中の二酸化炭素濃度をより精緻に推定できれば、地球全体の温室効果ガス濃度の増減推定の精度の向上が期待できます。とはいえ、先に示したように衛星による濃度の観測データが得られる地域には偏りがあります。そのようなカラム平均濃度の観測データから地球の全大気中の平均濃度を算出するには、過去の観測情報やそれに基づくモデル計算による全球の濃度分布の情報から、対象とする月の最も確実と思われる平均濃度を算出する工夫が必要です。その方法について簡単にご説明します。詳しくはGOSATプロジェクトのウェブサイト（<http://www.gosat.nies.go.jp/>）の月別二酸化炭素平均濃度のページにあるPDF文書『「いぶき」の観測データに基づく全大気中の月別二酸化炭素濃度算出方法について』をご覧ください。

「いぶき」のデータを利用した月別二酸化炭素の全大気平均濃度は以下のような手順にしたがって算出しています。

(1) 過去の知見に基づく濃度分布を用意：二酸化炭素の濃度は、高度方向や緯度・経度方向にも変化します。GOSATプロジェクトでは、「いぶき」や地上観測のデータに基づいて各地域の月別吸収排出量を推定し、その結果と気象データに基づいて6時間おきの三次元（空間分解能は緯度 $2.5^{\circ} \times$ 経度 $2.5^{\circ} \times$ 高度17層）の濃度分布を地球全体にわたって推定するための大気輸送モデルを有しています。この輸送モデル計算値は観測値によって常に調整されています。計算を始める前にまず、地球を経度方向に 60° ごとに6分割します（図1）。そして、その領域ごとに過去の月別の二酸化炭素カラム平均濃度の緯度分布の平均値を求めます。二酸化炭素濃度は年々上昇するため、濃度が安定している南極の緯度帯（南緯 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）における各年月の二酸化炭素濃度値との差の緯度分布を求めます。これを2009年6月から2012年5月までの3年分計算し、月ごとに3年間の緯度分布の平均値を求めて用意しておきます（図2）。



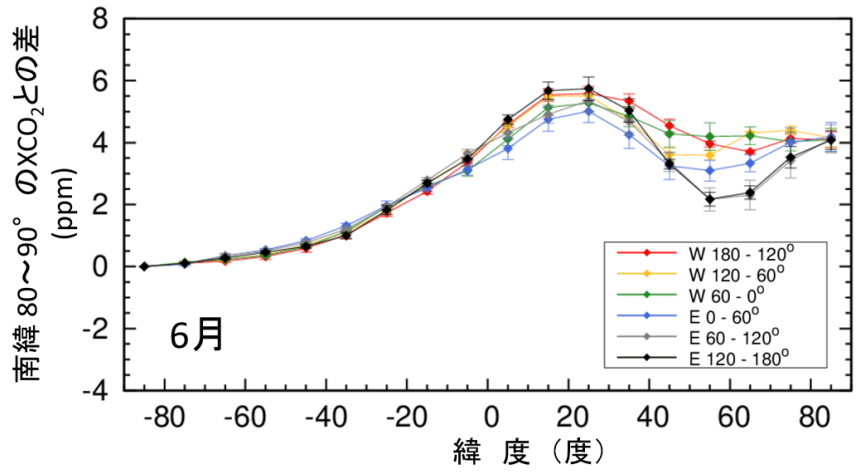


図2 6つの経度領域ごとに求めた南緯80°~90°のXCO₂濃度との差の2009年6月~2012年5月の3年間の月別緯度分布(10°ごと)の平均値。各点の縦棒は3年間の標準偏差を示す。緯度は正が北緯、負が南緯。図は6月の経度領域別の緯度分布の例

(2) 「いぶき」の観測値の濃度分布の算出: 「いぶき」の二酸化炭素カラム平均濃度には、負のバイアスがあることが知られています。そのバイアスはこれまでの検証の結果に基づいて補正します。ただし、バイアスは装置の特性の変化(データのバージョン)によっても観測時期によっても変わるため、それらに対応して補正を施します。また、海上の「いぶき」の観測値は観測緯度帯に限られ、それらの検証の手段が少ないことと、陸域の観測データとの間にバイアスのギャップがあるため、陸上の観測値のみを用いることにします。(1)の経度方向の6分割領域ごとに、緯度刻みで10°ごとに「いぶき」の陸上の観測値がある緯度帯のみについて、月別にカラム平均濃度の平均値を求めます(図3の○)。

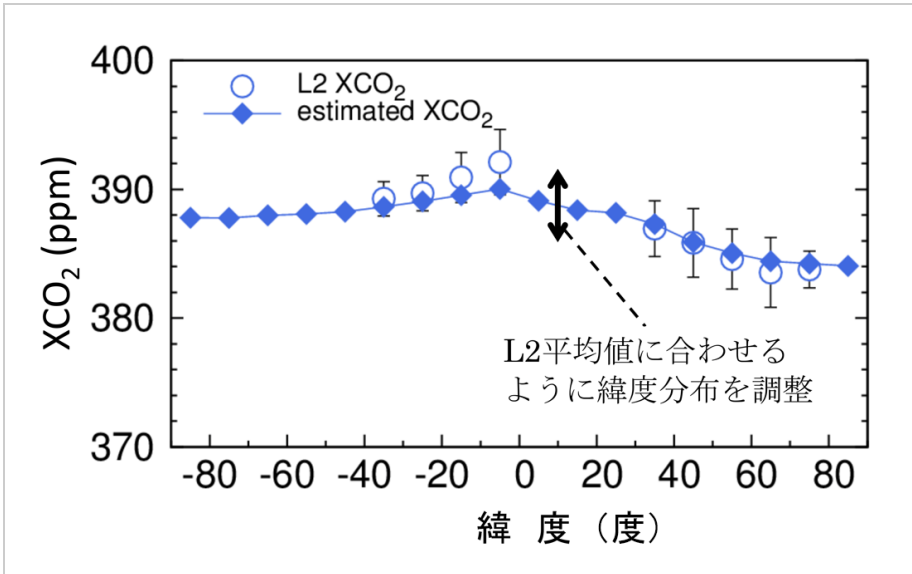


図3 「いぶき」の陸上のバイアス補正済みL2平均値(○)による、最小二乗法に基づく濃度差の緯度分布(◆)値の調整。図は一つの領域の緯度分布の例

(3) 「いぶき」の観測値による(1)の濃度分布の調整: 過去の観測データによって調整された大気輸送モデルによる計算結果である(1)の6領域における月別の南緯80°~90°における濃度との差の緯度分布(図3の◆)を、観測値に基づく(2)(図3の○、これをL2平均値と呼びます)に最もうまく適合するように、最小二乗法で6つの領域を合わせて調整(南緯80°~90°における濃度を嵩上げまたは嵩下げ)します(図3の↑)。

(4) 全大気 推定平均濃度の計算: 地球は球状になっていますので、(3)で調整された濃度の緯度分布を緯度帯ごとの面積の重み(図4)で平均化し、さらに6つの経度領域で平均化します。このようにして求められた値を二酸化炭素の「月別全大気平均濃度」としています。



図4 全大気の月別平均濃度を求める際の、地球が球状であることによる緯度帯ごとの面積に基づく積分の加重。経度6領域ごとに緯度方向の加重平均を求めて6経度領域を平均し、全大気月別平均濃度を求める

以上が手順です。この結果を年月にしたがって時系列グラフに表すと、図5の赤●のようになります。月別の平均濃度は、北半球の夏に低く冬に高いといった季節変動を示します。そして、全体的に濃度が徐々に上がっています。経年的な濃度の上昇量（推定経年平均濃度、経年トレンド）と調和関数によるモデル式を用いてこの季節変動を取り除き、推定経年平均濃度を示したのが図5の黒●です。推定経年平均濃度は、年月によって増加量に差が見られるものの、結果として必ず毎月増加しています。その年増加量は、かつては1ppm台や2ppm台の前半でしたが、2015年12月以降は、2.9ppmや3ppm台に変わってきています。これが大気輸送モデルに基づく濃度の緯度分布と「いぶき」の観測値に基づいて推定された、地球の全大気平均の二酸化炭素濃度の変化の様子です。この年増加量は、上記の(3)に示したように、専ら「いぶき」の観測値によって決まっています。

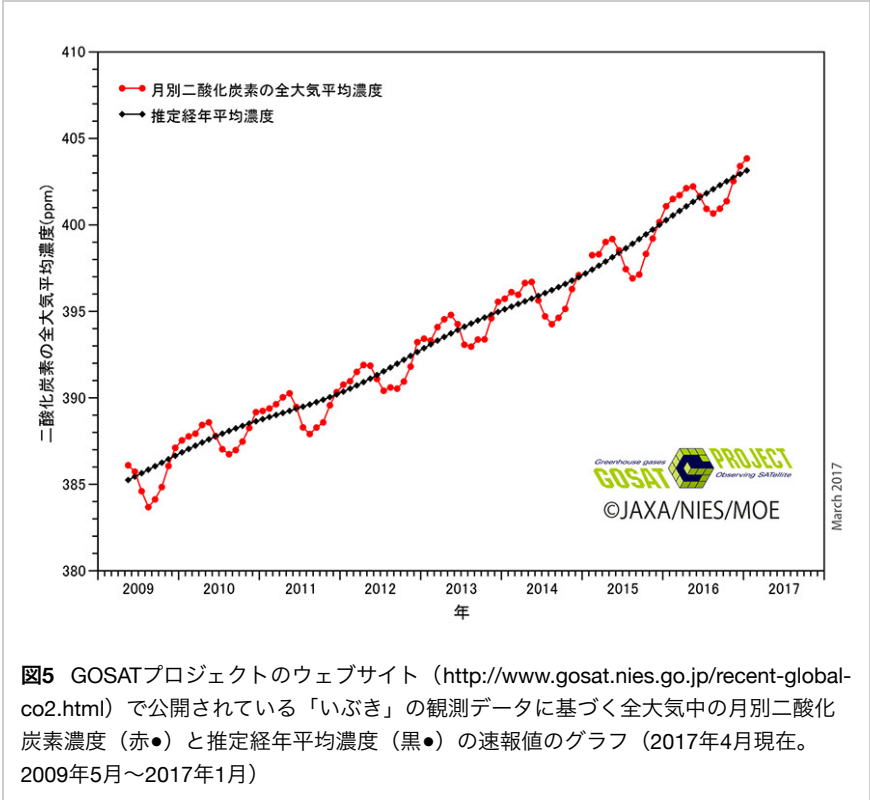


図5 GOSATプロジェクトのウェブサイト (<http://www.gosat.nies.go.jp/recent-global-co2.html>) で公開されている「いぶき」の観測データに基づく全大気中の月別二酸化炭素濃度（赤●）と推定経年平均濃度（黒●）の速報値のグラフ（2017年4月現在。2009年5月～2017年1月）

4. 衛星観測データからの全大気濃度から読み取れること

月別全大気平均濃度は、季節変化の影響を受けて、毎年5月頃に過去最大の濃度になっても、北半球の夏にかけて濃度が減少します。パリ協定などで、地球温暖化を抑制するために、地球の平均気温を一定のレベルまでに抑えようと国際的に努力する目標が掲げられていますが、産業革命前の気温からの全球の年平均気温を2°C未満に抑えるためには、大気中の二酸化炭素濃度を430ppm程度に抑える必要があるとされています。重要なのは、月平均値ではなく推定経年平均濃度の値が430ppmに達するかどうかという点です。「いぶき」の観測値に基づく2016年5月までの暫定的な解析によると、推定経年平均濃度は2016年2月に初めて400ppmを超え、400.2ppmを記録しました。400ppmという数値自体に科学的に特別な意味があるわけではありませんが、人類の歴史において長年280ppmから300ppm台であった地球大気平均濃度が400ppm台に突入し、気温上昇を抑えるための目標値である430ppmまでに残り30ppmの許容量を切ったという警鐘の意味で重要だと考えられます。もしも年増加量が3ppmという値がこの先も継続したとすると、今から9年弱で全大気の推定経年平均濃度は430ppmに達してしまいます。

衛星観測や地上・航空機・船舶による観測データは、地球全体のありのままの状況の把握と、それに基づく確実性の高い将来予測と対策に欠かせないものです。もちろん観測値には観測誤差が含まれますし、そのバイアスを補正することにも誤差はつきものです。更に現象のモデル化に伴う近似誤差や、限られたデータから全体の推定値を算出する手法にもそのデータの代表性に関する前提条件に伴う誤差なども推定値に影響を及ぼします。これまでの簡便な誤差解析に基づく、「いぶき」の観測データからの二酸化炭素の月別全大気平均濃度には数ppm程度の誤差が含まれていると予想されます。推定経年平均濃度の誤差は、統計学的には推定がより難しく、過去の値ほど誤差が小さいことがわかっています。観測から12ヶ月未満の推定経年平均濃度は、今後の観測によって値が大きく変わるので推定値の曖昧さは大きく、また、何年も前の推定経年平均濃度であっても、全体の季節変動を数式モデルに当てはめて推定するために、僅かながらもその推定値が変化します。推定経年平均濃度を求める時点で測定されていない未来の値によってその値が変わるわけですから、推定経年平均濃度の誤差推定は、難しい課題といえます。正確な誤差推定には、今後の精密な検討が必要ですが、それでも全大気の推定経年平均濃度が現時点で400ppmを超えているという点は、ほぼ間違いありません。ここでの推定結果（月別平均濃度の絶対値）は、この7年9ヶ月間について、地上観測データに基づくNOAAからの月別グローバル二酸化炭素濃度の公表値に比べて1~2ppm低い値になっていますが、変動の傾向（推定経年平均濃度の月別年増加量）は、差の平均が-0.1ppm、差の標準偏差が0.3ppmでよく整合しています。

5. おわりに

2018年度に打上が予定されているGOSAT-2や、各国の温室効果ガスの観測衛星、さらには、地上測定局・航空機・船舶等は、地球診断の眼と、より確実な国際施策を合意するうえで重要な役割を担っているものといえます。

なお、「いぶき」の観測データに基づく全大気濃度の推定手法は、国立環境研究所地球環境研究センターの向井人史、三枝信子、松永恒雄、町田敏暢、野田響、齊藤誠、吉田幸生、森野勇、曾継業、横田による検討結果に基づくものです。また、濃度算出は衛星観測センター広報チームのメンバーが行い、結果の速報値はウェブサイト（<http://www.gosat.nies.go.jp/recent-global-co2.html>）に掲載し、随時更新しています。

COSP情報交換グループ支援と最適化に関する研究集会参加報告

地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室 主任研究員 小倉知夫

1. はじめに

2月27-28日にピエール・マリー・キュリー（パリ第6）大学で開催された「COSP情報交換グループ支援と最適化に関する研究集会」に参加しました。COSPとは“CFMIP Observation Simulator Package”というソフトウェアの略称です。このソフトウェアは、気候モデルで計算された雲の分布を仮に人工衛星や地上観測ステーションから遠隔計測した場合に、どのような観測データが得られるかを推定するものです。COSPの開発は雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト（Cloud Feedback Model Inter-comparison Project, CFMIP）で推進されているため、COSPの名称の冒頭には上記プロジェクト名（CFMIP）が付いています。



写真 研究集会が行われたピエール・マリー・キュリー（パリ第6）大学

何故こうしたソフトウェアが必要とされているのか、背景を説明します。気候の将来予測は全球気候モデルを用いた数値シミュレーションにより実施されます。将来予測の結果に対して信頼性を高めるには、全球気候モデルの性能を評価し、もし性能が不十分であればモデルを改良する必要があります。性能を評価する際に重視される指標の一つが、「現在観測される雲の特徴をモデルによるシミュレーション結果がどれだけ良く再現できるか」です。つまりモデルによる雲の再現性が重視されるのですが、その理由としては、温暖化シミュレーションにおける雲の変化が気候予測の結果を大きく左右する、ということが挙げられます。

しかし、雲の観測データとモデルによるシミュレーション結果を比較する際には、観測データの性質に注意する必要があります。まず、雲の観測データは時間と空間に偏りを持って分布します。即ちサンプリングが一様ではありません。また、雲の影響を検出するセンサーは機器ごとに異なる特徴を持っており、全ての雲を検出できる訳ではありません。さらに、センサーで検出された信号から雲のあり方を診断する方法（アルゴリズム）にも特徴があります。このように、雲の観測データはサンプリングやセンサー特性、アルゴリズムの特徴を反映したものです。そのため、モデル出力データの雲と観測データの雲を比較した時に違いが見えたとしても、それが直ちにモデルの欠点（モデルの雲と現実の雲の違い）を示すとは限りません。仮にモデルの雲が現実の雲と完璧に同じだったとしても、それをデータとして表現する際のサンプリング等に違いがあれば、モデル出力データと観測データの間には違いが見えてしまいます。

こうした問題に対処するために開発されたソフトウェアが観測シミュレータです。観測シミュレータは、気候モデルで計算された雲の分布を入力データとして、観測と同様のサンプリング、センサー感度で情報を抽出し、観測と同様のアルゴリズムで雲の特徴（面積、高さ、光学的厚さ等）を診断して出力します。気候モデルで計算された雲分布は、観測シミュレータで後処理することにより観測データと比較しやすいものとなります。その結果、気候モデルの欠点を把握できる見込みが高まります。

観測シミュレータは、これまでに複数の雲の衛星データに対応するものが開発されてきました。それらの中から一部をまとめ、さらに全球気候モデルに適用するための機能を整備したソフトウェアがCOSPです。2017年2月現在、COSPに含まれる観測シミュレータはISCCP、MODIS、MISR、PARASOL、CALIPSO、CloudSat等の衛星データに対応しています。

さて、各国の気候モデル研究グループでは、次期IPCC報告の作成に向けた将来気候予測シミュレーションを第6次結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）の中で実施しつつあります。そして、CMIP6に参加する研究グループは、使用する気候モデルにCOSPを実装して出力を公開するように依頼されています。こうした背景を踏まえ、今回の研究集会ではCOSPの開発関係者に加えて、様々な気候モデル研究グループからCOSPを気候モデルに実装する実務担当者が参加しました。参加した気候モデル研究グループは、日本、米国、欧州からの6グループ（EC-EARTH、GFDL、IPSL、MIROC、MPI、UM）、総勢21名で、作業の進捗や技術的な問題点について報告と議論が行われました。

なお、COSPの開発と利用は様々な国の研究機関で分担して進められています。そのため、普段は離れた場所で活動するCOSP関係者が集まることで情報交換を促進することが今回の研究集会で意図されています。また、COSPは単体のプログラムとして使用することもありますが、気候モデルの中に組み込んで使用することも一般的です。そのため、気候シミュレーションを実施する妨げとならないように計算コストを低減すること（ソフトウェアの最適化）が重要課題です。研究集会の名称に「情報交換グループ支援と最適化」とあるのは、以上の背景を反映しています。こうした研究集会の開催はCOSP関係者として初めての試みです。

2. 研究集会における発表と議論

研究集会では3つの課題について発表と議論が行われました。第一に気候モデルへのCOSP実装、第二に今後のCOSP開発、第三に新たな観測シミュレータの開発および観測データの整備です。以下、順番に内容をご紹介します。

(1) 気候モデルへのCOSP実装

まず、集会に参加した6つの気候モデル研究グループからCOSPが無事に実装されて動作している旨の報告があり、次いで、実装にあたって直面した問題点について議論が行われました。多くの報告で共通していたのは、COSP（特にCloudSatシミュレータ）の計算コストが高いという認識です。例えばCOSPの実装により気候モデルMIROCの実行時間は80%以上増加しました。これらの報告を受けて、CloudSatシミュレータの最適化を引き続き実施することが提案されました。また、気候モデルへのCOSPの実装方法についてこれまでグループ間での情報共有が不十分だったとの指摘がなされました。これを受けて、COSPの利用説明書に気候モデルへの実装方法を追記することが提案されました。

注目を集めたのは、気候モデルで計算された雲の鉛直方向の重なり具合についてどのような仮定を置くか、という問題です。Jean-Louis Dufresne（IPSL）は、気候モデルもCOSPも雲の重なり具合について比較的簡便な仮定を置いているが、近年の研究の進展を踏まえ、より複雑な仮定を採用できるように改良すべきと提案しました。

気候モデルの水平解像度よりも小さい雲の不均一性についても議論が行われました。Alejandro Bodas-Salcedo（英国気象局）は、英国気象局の気候モデルの放射過程においてはモデルの水平解像度よりも小さい空間スケールで雲が不均一である効果を考慮していると述べ、そのような雲の取り扱いと整合するようにCOSPを変更する必要があると報告しました。

(2) 今後のCOSP開発

今後のCOSP開発に関連して、次世代版COSP（ver. 2.0）の開発状況についてDustin Swales（ESRL）より報告が行

われました。彼はCOSP ver.2.0を開発する狙いを二つ挙げ、第一に気候モデルへのCOSP実装を容易にすること、第二に、気候モデルの水平解像度より小さい雲の取り扱いを利用者が柔軟に変更できるようにすることであると説明しました。開発に当たってはCOSPに含まれるソースコード全ての規格が見直され、Fortran 2003に統一されました。コーディングはほぼ終了し、動作確認のため二つの気候モデル（NCAR CESM、EC-EARTH）に実装作業中とのことでした。

次いで、COSPの開発体制の参考とするため、英国気象局におけるソフトウェア開発について Harry Shepherd（英国気象局）が紹介しました。彼は、あらゆるソフトウェア開発においてバグ混入の危険があり、その事が計算機および人的資源の無駄遣い、ひいては研究論文の取り下げに至る可能性があるとして指摘し、そうしたリスクを管理する手法がソフトウェア工学の分野で開発されていることを紹介しました。また、英国気象局で実施されている対策として、ソフトウェアのバージョン管理、コーディング規約の制定、開発内容の文書化、コードの動作試験、第三者によるコードの内容点検について説明しました。

発表の終了後、COSPの開発体制について現状の課題を踏まえた改善策が話し合われました。まず、COSP開発は様々なグループで分担して実施されるため、開発者が統一して守るべき作業手順が必要との意見が示され、そうした作業手順の案が提示されました。また、簡潔なコーディング規約が必要という点でも意見が一致し、幾つかの案が示されました。

(3) 新たな観測シミュレータの開発および観測データの整備

Po-Lun Ma（PNNL）は、CALIPSO衛星搭載ライダーによるエアロゾル観測を対象としたシミュレータを開発し、COSPの一部として気候モデルへ試験的に実装した結果を報告しました。また、彼はシミュレータ出力と比較するための衛星データも整備しました。その結果、エアロゾルが雲に影響を及ぼして放射を変化させる効果について、観測データとモデル出力データの違いを従来より正確に把握できることを示しました。

Marjolaine Chiriaco（LATMOS）は、地上観測ステーションのライダーによる雲の観測を対象としたシミュレータを開発し、モデルに実装した結果を報告しました。そして、シミュレータの出力をSIRTA観測所から得られた観測データと比較し、モデルによる下層雲の再現成績を評価した結果を紹介しました。開発されたシミュレータは公開準備が完了しているとのことでした。なお、SIRTA観測所では観測データを単一のnetCDFファイルに整備して公開しています（<http://sirta.ipsl.fr/reobs.html>）。

Helene Chepfer（UPMC）は、EarthCARE衛星に搭載予定であるATLIDライダーのシミュレータを開発し、COSPの一部として気候モデルに実装した結果を報告しました。このシミュレータはCOSP ver.2.0の一部として公開の準備が完了しています。また、EarthCARE衛星の打ち上げ後はシミュレータ出力と比較するための衛星データを整備、公開する予定とのことでした。

Alejandro Bodas-Salcedo（英国気象局）は、人工衛星によるGPS電波掩蔽観測に対応するシミュレータをCOSPへ試験的に実装した結果を紹介しました。GPS電波掩蔽観測とは、GPS衛星から発信された電波を低軌道衛星で受信する際、地球大気をかすめて到来した電波の屈折特性から大気の大気温度、水蒸気量等の鉛直分布を推定する手法です。これまでに気象予測の分野で広く利用されてきた観測データですが、今後はデータが蓄積されるにつれて長期トレンドの検出など気候研究への応用が有望であることを示しました。

発表終了後の議論においては、今後開発される観測シミュレータのうちこういったものがCOSPに正式に実装されるかが話題となりました。そして、COSPに実装されるための必要事項として、開発を始める前にCOSPのプロジェクト運営委員会に相談すること、また、開発者は作成したプログラムの維持管理および利用支援に責任を持つことが確認されました。さらに、シミュレータの開発者はシミュレータの出力と比較可能な観測データも併せて整備するように推奨されました。

研究集会を終えるにあたり、多くの参加者から今回の集会が有益であったとの意見が述べられ、今後も2年に1回程度の頻度で開催することが提案されました。また、気候モデル研究グループに対しては、今後CMIP6でどのような種類のシミュレーションを実施し、COSPの出力変数の中からどれを公開する予定か、明らかにするように要望が出されました。

3. 所感

筆者は気候モデルMIROCにおけるCOSP実装の担当者として研究集会に参加しました。そこでは、他の気候モデルグループにおける実装担当者やCOSP開発グループの構成員と共にCOSP実装の技術的な詳細について検討する貴重な機会が得られました。また、ソフトウェア開発においてバグ混入のリスクをどのように管理するかという問題は、COSPだけではなく気候モデルの開発にも当てはまる話です。COSP開発グループが採用する作業手順からは学ぶことが多いように感じました。加えて、新しい観測シミュレータの開発状況について情報を得られた事も有益でした。今後は、CMIP6の枠組みで気候モデルを用いたシミュレーションを実施し、COSPの出力データを公開することになります。その際は、本研究集会で得られた知見を生かしてモデルの性能評価が適切に実施されるよう努めたいと思います。

略語一覧

- ISCCP: International Satellite Cloud Climatology Project
- MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- MISR: Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
- PARASOL: Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar
- CALIPSO: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
- CMIP: Coupled Model Inter-comparison Project
- GFDL: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
- IPSL: Institut Pierre Simon Laplace
- MIROC: Model for Interdisciplinary Research On Climate
- MPI: Max Planck Institute
- UM: Unified Model (英国気象局を中心に開発、運用されている大気モデル名称)
- ESRL: Earth System Research Laboratory
- NCAR: National Center for Atmospheric Research
- CESM: Community Earth System Model
- PNNL: Pacific Northwest National Laboratory
- LATMOS: Laboratoire Atmospheres, Milieux, Observations Spatiales
- SIRTA: Site Instrumental de Recherche par Teledetection Atmospherique (パリ近郊に設置された観測所名称)
- UPMC: Universite Pierre et Marie Curie
- EarthCARE: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer
- ATLID: Atmospheric Lidar
- GPS: Global Positioning System

土地利用に関わるネガティブエミッション技術（LUNETs） 食料安全保障など持続可能な開発目標（SDGs）への示唆

—GCP/MaGNETワークショップ報告—

地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室 主席研究員 山形与志樹
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 伊藤昭彦

1. はじめに

2016年11月に発効したパリ協定では、将来の温度上昇を産業革命前と比較して2°Cより十分低く、できるだけ1.5°C未満に抑える努力を追求する目標が定められている。しかし、それを実現するための具体的な対応方針は決まっておらず、科学、技術、政策の様々な側面について検討が進められている。

上記の目標を達成するためには、人為的な温室効果ガス排出の大幅削減が不可欠なのは当然として、さらに踏み込んだ対策が求められている。つまり、これまでも上昇し、今後も上昇を続けると考えられてきた大気中の温室効果ガス濃度を今世紀中に低下させる取り組みが必要になる。温室効果ガス濃度の変化と温度変化の間には応答のタイムラグ（時差）があることや、地球の炭素循環からのフィードバックがあるため、単に排出量をゼロにしても温度上昇をすぐには止められないからである。大気中の温室効果ガス濃度上昇を頭打ちさせて低下に導く一連の技術は、負の放出を指す「ネガティブエミッション技術（Negative Emissions Technologies: NETs）」と呼ばれている（加藤悦史「地球環境豆知識 [27] ネガティブエミッション技術」地球環境研究センターニュース2014年4月号）。その具体的な方法として様々なものが検討されているが、実現可能性やコスト面から、陸地の諸機能を活用し適正に管理することで二酸化炭素（CO₂）の吸収量を増大させる方策が考えられている。例えば、植林地を増やすことで光合成によるCO₂固定を促す方法、バイオ燃料を増産して化石燃料の代替とし、さらにエネルギー生産過程で出るCO₂を回収して貯留することで正味の吸収を達成する方法（Bio-Energy with Carbon Capture and Storage: BECCS）などがある。このような方法は、自然の営みを活用するものではあるが、大きな問題も残されている。それは、植物を栽培するための広大な土地が必要になる、ということである。地球上にはまだ広い土地が残されているように思えるが、植物を十分に成長させられる土地はそう多くない。なぜなら、そのような土地の多くはすでに人が住んで農業や牧畜に利用しているからである（残りは沙漠や寒冷な荒原などで利用に不向き）。もし農業をやめてCO₂を回収するための植林地やバイオ燃料栽培地にしてしまうと、その分の農業生産が減少して極端な場合には食料不足に陥るかもしれない。同様の問題は、農業だけでなく社会の様々な面で起こり得るが、そのような副次的影響については十分な検討が行われていない。特に、国連が定めた「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs^[注]）」に掲げられた諸目標と協調しつつネガティブエミッションをいかに達成するかを、科学的に検討することは喫緊の課題である。

2. GCP/MaGNETワークショップ

グローバルカーボンプロジェクト（GCP）つくば国際オフィスでは、ネガティブエミッション技術の適正管理に関する諸問題を検討するためのManaging Global Negative Emission Technologies（MaGNET）イニシアティブを推進している。2017年3月2～3日、GCP/MaGNETは国際応用システム分析研究所（International Institute for Applied Systems Analysis: IIASA）と共同で、土地利用とネガティブエミッション技術（Land Use related Negative Emission Technologies: LUNETs）をテーマとする国際ワークショップをウィーン（オーストリア）のIIASAで開催した。会場となった建物の外観、ワークショップでの発表と議論、リフレッシュとともに自由な意見交換の場ともなった昼食の様子については写真1～3をご覧ください。なお、前日（3月1日）には、環境研究総合推進費S-10課題「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究」による成果紹介を中心としたプレワークショップも開催された。



写真1 会場となったIIASAの玄関口。往時のハプスブルク時代を偲ばせるような重厚な建物である



写真2 ワークショップの様子。コンビーナの一人であるSabine Fuss博士による趣旨説明。会場にはIIASAの研究者も自由にオブザーバ参加していた



写真3 IIASA食堂での昼食の様子。ヨーロッパ的な雰囲気の中で東の間の気分転換を
図りつつも、活発な議論は止むことがなかった

今回のGCP/MaGNETワークショップは、2013年に東京で開催されたワークショップ（山形与志樹ほか「ネガティブエミッション技術による気候変動リスク管理の課題」地球環境研究センターニュース2014年4月号）、2015年に札幌で開催されたワークショップ（SHARIFI Ayyoobほか「2°C目標の達成に向けて」地球環境研究センターニュース2015年11月号）での議論を引き継ぎ発展させるものとして位置づけられている。

このワークショップの目的は

1. 脱炭素化シナリオにおけるLUNETs実施の役割と土地利用に関する示唆をレビューする
2. 統合評価モデル（Integrated Assessment Models: IAMs）において土地利用と食料安全保障とのリンクをどのように表現しているかをレビューし、LUNETsに関する結論を得るための示唆をまとめる
3. 食料安全保障とそれに関する他のSDGsの達成を促すLUNETs実施にむけたロードマップを作成する

ことであった。

SDGsのうちLUNETsに関わりの深い目標として食料安全保障（SDG2）と気候変動の緩和（SDG13）が挙げられるが、他にも貧困の撲滅（SDG1）、教育の普及（SDG4）、水質の改善（SDG6）、エネルギー供給の改善（SDG7）、持続可能な経済成長と雇用（SDG8）、不平等の解消（SDG10）、持続可能な消費パターン（SDG12）、持続可能な陸域生態系（SDG15）、にも重要な貢献があると考えられる。

ワークショップの冒頭では、IIASA副所長でGCPの共同議長でもあるNebosja Nakicenovic博士より、正味で人間社会の温室効果ガス収支をゼロからマイナスに導くための技術的、政策的な課題に関する総括的な基調講演が行われた。続いてSabine Fuss博士（Mercator Research Institute on Global and Climate Change・ドイツ）により、GCPで行われてきたMaGNETの活動と最近の成果論文に関する紹介が行われた。Joeri Rogelj博士（IIASA）は、1.5°C目標の達成が土地にどのような負荷をかけるかについて、2050年にゼロエミッションを達成しその後ネガティブエミッションに移行する1.9W m⁻²安定化シナリオに基づいて検討した結果を紹介した。Petr Havlik博士（IIASA）は、1.5°C目標を追求することで生じる食料安全保障への功罪に関する発表を行った（正影響には、バイオ燃料の増産に伴って食料価格が上昇し、食事の量が抑えられ、肥満などの成人病が減って健康度が向上する可能性などがある）。

今回のワークショップは統合評価モデル（IAMs）グループによる研究を集めたセッションが設けられた点が特徴的であった。LUNETsは気候学・生態学・農業などの既存の理学的分野だけでなく社会経済的要素を広く取り入れた研究が不可欠である。IIASAのStefan Frank博士は、GLOBIOM/MESSAGEモデルを用いて、土地利用による緩和の影響が特に顕れやすいホットスポットや、メタンなどCO₂以外の温室効果ガスによる緩和ポテンシャルに関する評価結果を示した。Laurent Drouet博士（FEEM・イタリア）は、GLOBIOMとソフトカップリング（個々のモデルで計算した後に出力データを交換し、それを用いて再度計算を行う方法）されたWITCHモデルを用いて、LUNETsを評価する試みを紹介した。Alexander Popp博士（PIK・ドイツ）は、農業モデルであるMAgPIEにBECESを導入する試みを紹介

したほか、気候予測に用いられている地球システムモデルへの示唆（土地利用に伴う地表反射率の変化など）にも言及した。オランダ環境評価庁（PBL）のDetlef Van Vuuren博士は、IMAGE/LPJmLモデルを用いてBECCSを含めたNETsの実効性を評価した予備的な結果を示した。国立環境研究所（以下、国環研）の長谷川知子博士（IIASAで長期派遣研修中）は、AIM/CGEモデルを用いてバイオ燃料による緩和と食料安全保障のトレードオフに関する分析結果を示し、飢餓人口が増加する可能性とその対策などを示した。Justin Baker博士（RTI International・アメリカ）はFASOM-GHGモデルを用いて、バイオマス発電と食料安全保障に関する分析例を示した。

続いてのセッションでは、IAMs以外の各種モデルによる研究発表が行われた。英国ハドレーセンターのAndy Whiltshire博士は、陸域のJULES（Joint UK Land Environment Simulator）モデルを組み込んだHadGEM2-ESモデルを用いて、植林による地表エネルギー収支の変化を考慮した緩和効果の評価結果を示した。国環研の山形（筆者）は、シンプルなBECCSシナリオを設定して農業、水資源、生態系に与える影響をセクター別のモデルを用いて評価する試みを紹介した。エネルギー総合工学研究所の加藤悦史博士は、統合評価モデルの1つであるGRAPE（Global Relationship Assessment to Protect the Environment）を用いて、BECCSの実効性をコスト面を考慮して評価した結果を示した。Vera Heck博士（PIK）は、プラネタリーバウンダリー（J. Rockström博士らにより提唱された持続可能な地球の限界）で挙げられている諸項目について、LPJmL（Lund-Potsdam-Jena model）モデルによる影響評価例を示した。IIASAでの研究を主導しているMichael Obersteiner博士は、気候リスクマネジメントの観点からBECCSが必要になる局面と技術開発に関する発表を行った。Jean-Francois Soussana博士（INRA・フランス）は、ネット中継での発表であったが、COP21で提案された土壌への炭素固定に関する4/1000イニシアティブを紹介した。

第2日には、前日に続いて個別の研究発表と、テーマ別に分かれたグループディスカッションが行われた。ここでは(1) ネガティブエミッション技術、(2) モデルとシナリオ、(3) ガバナンス、について密度の高い議論が行われ、その成果が全体会で報告された。国環研の伊藤（筆者）が参加したモデル・シナリオグループでは、経済モデル、統合評価モデル、地球システムモデル、植生動態モデルなどの種類別に、ネガティブエミッション関係要素の導入状況や問題点、今後の研究開発の必要性について意見が交わされた。

3. おわりに

GCP/MaGNETによるワークショップも回を重ね、研究の必要性に関する共通認識が育まれて、関係する分野が広がるとともに、より具体的で詳細な議論が行われるようになってきた。目的に掲げられたシナリオやモデル研究に関する現状レビューが行われ、今後のロードマップ作成や政策提言に向けた活発な意見交換が行われた。一方で、経済分野からの参加者は依然として少なく、それがガバナンスに関する議論を深める上で障害になっているという意見も出された。2017年秋にはスウェーデン・ルンドでガバナンス関係のカンファレンス（Earth System Governance）が開催されることを契機としてこの分野からの参加者を増やすべきという提案もあった。ワークショップの終了前には、成果を論文として発表するためのアイデアも出され、当面の優先課題をまとめたレビューや、LUNETsを統合的に評価するためのモデル開発に関するペーパーの構想などが提案された。

本ワークショップでは、LUNETsに関する世界の主要グループ、特に統合評価モデルを用いた最新の研究成果が紹介されていた。また、パリ協定に加え、IPCCの1.5°C目標特別報告書と第6次評価報告書を見据えた時期に開催された点も重要であり、これら報告書にインプットすべく論文執筆の提案が出されたこともワークショップの意義を深めていた。実際に、まず今回のワークショップで議論された内容を論文としてまとめることが検討されており、今後も同様なワークショップを開催してさらに政策貢献につながるイニシアティブへと展開していく予定である。

脚注

- 2015年9月の国連サミットで採択された持続可能な開発のための2030アジェンダのなかに盛り込まれている。貧困を撲滅し、持続可能な世界を実現するための17のゴール、169のターゲットからなり、発展途上国のみならず、先進国自身が取り組む。

参考：

<http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

http://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/15775/

四日市公害と環境未来館開館2周年記念 江守正多氏講演「地球温暖化と私たちの未来」

四日市公害と環境未来館 館長 生川貴司

1. はじめに

2017年3月20日に、当館の開館2周年を記念して、国立環境研究所地球環境研究センター気候変動リスク評価研究室長の江守正多氏から「地球温暖化と私たちの未来」と題したご講演をいただきました。

この講演は、3月18日に開催した四日市公害^[注]の語り部による講演とあわせ、開館2周年記念事業の一環として企画させていただいたものです。

江守室長からは、地球温暖化の影響と私たちが取りうる対策についてお話しいただき、市民をはじめ環境活動団体や行政関係者、学生など80名を超える方々に参加いただきました。



写真1 講演会場内の様子（聴覚障がい者への情報保障として手話通訳と要約筆記を準備しました）

2. 四日市公害と環境未来館について

当館は、四日市公害の歴史と教訓を次世代に伝えるとともに、環境問題を未来志向で考えるための施設として2015年3月、市立博物館・プラネタリウムに併設する形で開館しました。開館以来、小中学生をはじめ国内外から13万人を超える方々にご来館いただいています。

館内では四日市の古代からの歴史を展示し、その中で公害が発生した時代背景や被害の状況、その後の官民一体となって公害を乗り越えてきたことを一連のストーリーとして展示しています。

また、四日市公害の体験を語り継ぐ語り部や展示室の解説員による説明、50名を超える方々の証言映像を見ていた

だくことで、当時を知らない世代にも理解していただけるような展示や解説に努めています。

さらに、宇宙から見た地球という視点も持つプラネタリウムも一緒にご覧いただくことで、地球規模で未来の環境を考えていただくことができるのも特徴のひとつです。



写真2 館内を疑似体験できるバーチャルツアーサイト（英語、中国語、韓国語対応） http://www.cit.yokkaichi.mie.jp/yokkaichikougai-kankyoumiraikan/vt/miraikan_jp.html

3. 記念講演「地球温暖化と私たちの未来」

江守室長の講演では、地球温暖化の現状と、私達が今後も温室効果ガスの排出を続けた場合の海面上昇や食糧不足、生態系の損失などが起こるリスクについて解説していただきました。また、地球温暖化により深刻な被害を受けるのは、途上国や弱い立場の人々であり、さらには将来世代にも影響が及ぶ問題であるという点にも言及されました。

後半では、世界のCO₂排出量削減の必要性和、我々自身がこれからの社会をどのように選んでいくかについて触れられました。そして我々に、今どのようなことを考え、周りに何を伝えていかなくてはいけないのかと問いかけられ、これからも地球温暖化問題に興味を持ち続けてほしいと締めくくられました。

講演後、参加者からは、「地球温暖化対策には社会の大転換が必要との指摘に、分煙を例に出された説明が、私たちの未来に期待を込めた非常にわかりやすいお話だった。」との感想をいただきました。

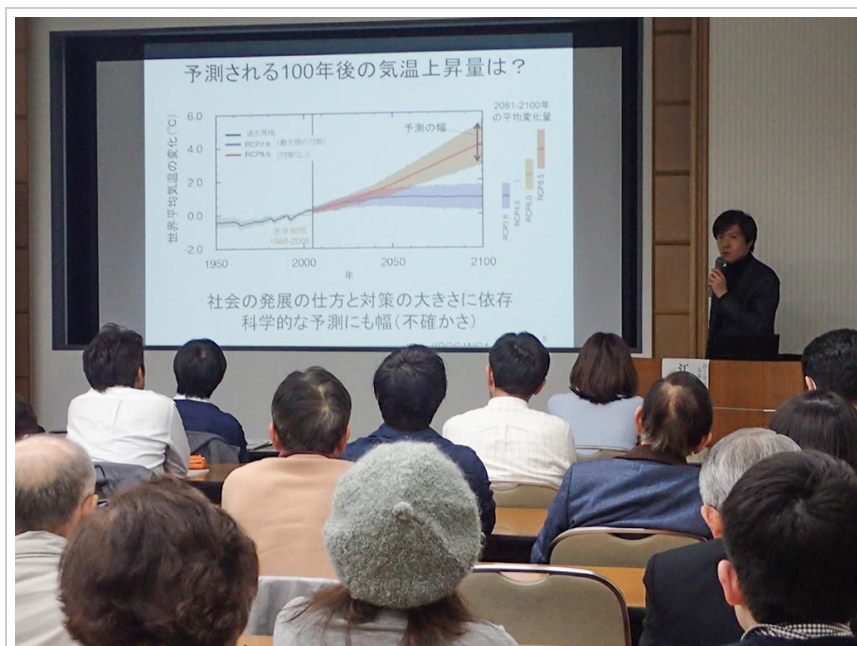


写真3 江守室長の講演の様子（地球温暖化の現状と将来のリスク、CO₂排出削減の必要性についてわかりやすく解説されました）

4. おわりに

今回の講演では、参加された方々が、地球温暖化という現在進行形の課題について、自分のこととして関心を持っていただくきっかけになったと考えています。

当館は、四日市公害の教訓を生かすこと、さらには地球温暖化をはじめとした環境問題を多くの方々に伝え、考えていただくことで、未来に豊かな環境を引き継いでいくという使命を担っており、今年度は、地球温暖化等について、より身近な問題として考えてもらえるような映像コンテンツを追加する予定です。

最後になりましたが、ご講演いただきました江守室長はじめ関係者の皆様に深く感謝申し上げますとともに、国立環境研究所地球環境研究センターの一層の発展をお祈りいたします。

脚注

- わが国は、戦後復興から高度経済成長を成し遂げる過程で、さまざまな公害問題に直面した。特に四日市市では、国の政策のもと、1960年代に石油化学コンビナートが本格的に稼働すると、大気汚染を原因とする呼吸器系疾患の急激な増加、四日市港地先海域でとれる魚が油くさいなどの四日市公害と言われる深刻な公害問題が発生した。（平成27年度第1号四日市公害と環境未来館年報より）

国立環境研究所一般公開「春の環境講座」を開催しました

1 パネル・展示 1：JAL（日本航空）とコラボした大気観測プロジェクト「CONTRAIL」

地球環境研究センター 大気・海洋モニタリング推進室長 町田敏暢

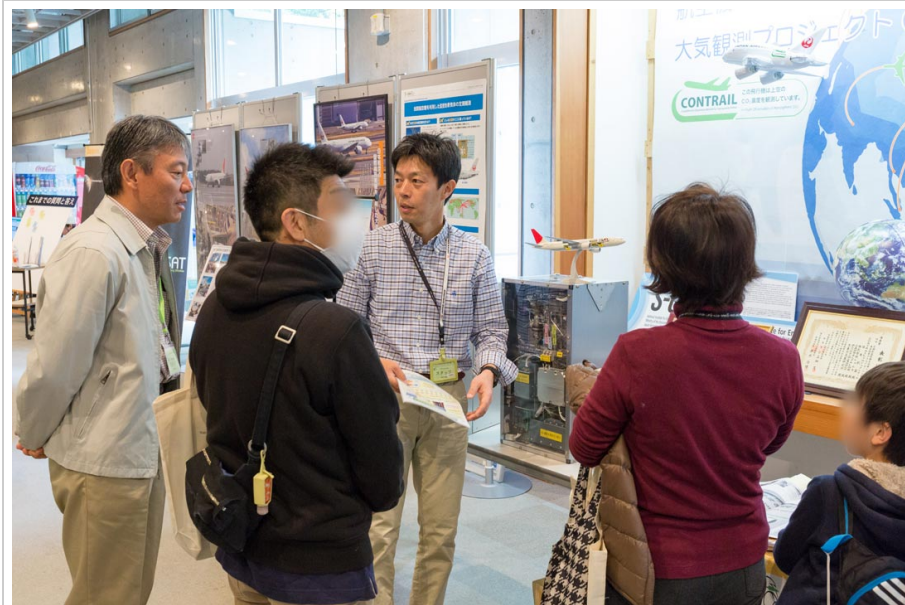
2017年4月22日（土）に、科学技術週間に伴う国立環境研究所一般公開として「春の環境講座」を開催しました。当日は、時折小雨がぱらつくあいにくのお天気にもかかわらず、576名もの方々にお越しいただきました。

地球環境研究センターは、地球温暖化研究棟1階を公開し、「ココが知りたい地球温暖化の適応策」と題したパネルディスカッションを行うとともに、地球環境観測の展示・紹介、発電量表示システムを備えた自転車発電体験を行いました。地球温暖化研究棟での公開内容についてご報告します。



「CONTRAIL」は民間航空機を利用した全球規模の温室効果ガス観測プロジェクトで、定常的に大気中の二酸化炭素濃度を連続観測する世界で最初の取り組みです。地球環境研究センターでは春と夏の一般公開の際にCONTRAILで使っている観測装置の展示と共に研究成果を定期的に紹介してきました。今回は通常の展示に加えて、地球温暖化研究棟入口付近に大型のスクリーンを設置し、CONTRAILの観測装置の1つである二酸化炭素濃度連続測定装置（CME）を航空機に設置する際のドキュメント映像を早送りで紹介するビデオを放映し続けました。このビデオは、装置を搭載して運航している日本航空（JAL）の整備本部の社員が撮影したもので、JALのFacebookに掲載されているものを、許可をいただいた上で放映したものです。これまでの公開でも模型や観測装置を見せながら搭載の様子を説明してきましたが、実際の映像の説得力は想像以上に高く、訪れた皆さんも「こんなところに積んであるんですか」と具体的なイメージとして受け止められたようでした。また、今回の公開ではJALコーポレートブランド推進部の江藤仁樹さんに参加していただき、展示の説明にご協力いただきました。これまでは専ら「研究成果」として研究者目線で

のCONTRAILの説明が多かったと思いますが、「民間会社としての環境分野の社会貢献」という目線で説明していただいたことにより、CONTRAILをより身近な取り組みとして理解していただけたと感じます。一般公開で1日ご協力いただいた江藤さんは、「今後も、観測そのものに加えて、社会への成果の発信の面でも国立環境研究所とさらに協働を進めたい」と話されていました。実は、今回のJALとのコラボは「夏の大公開に向けた助走」との位置づけになっています。7月22日（土）の夏の大公開ではJALの現役パイロットに国立環境研究所まで来ていただき、パイロットが見てきた世界の環境変動、パイロットだからできる環境保全への取り組みについてお話しいただく予定です。パイロットの生の声を聞いてみたい方は、是非お越しください。今後もCONTRAILはより良い観測を展開できるようJALの協力をいただきながら発展していく所存です。



町田（中央）「こういう説明でいいですね、江藤さん」、江藤（左端）「はい、効率よく観測ができるよう工夫しています」と、共同で来場者に説明をしているところ

国立環境研究所一般公開「春の環境講座」を開催しました

2 パネル・展示2：永久凍土からメタン！？ 巨大永久凍土が解けている

国立環境研究所 地球環境研究センター 横島徳太

国立環境研究所 地球環境研究センター 伊藤昭彦

国立環境研究所 地球環境研究センター 高田久美子

海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野 斉藤和之

2017年4月22日（土）に、科学技術週間に伴う国立環境研究所一般公開として「春の環境講座」を開催しました。当日は、時折小雨がばらつくあいにくのお天気にもかかわらず、576名もの方々にお越しいただきました。

地球環境研究センターは、地球温暖化研究棟1階を公開し、「ココが知りたい地球温暖化の適応策」と題したパネルディスカッションを行うとともに、地球環境観測の展示・紹介、発電量表示システムを備えた自転車発電体験を行いました。地球温暖化研究棟での公開内容についてご報告します。

緯度や標高の高い寒冷な地域では、一年を通して地面の中の氷が解けない「永久凍土」が広く分布しています。永久凍土は氷河時代からずっと凍りついているため、メタンや二酸化炭素などの温室効果ガスや有機物が、たくさん含まれています。近年、地球温暖化によって、非常に巨大な氷塊を含む永久凍土（「エドマ層」と呼ばれます）が、次々に解けていることが観測されています。そこで環境研究総合推進費課題（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」（<http://www.jamstec.go.jp/iccp/j/pfch4/>）では、アラスカやシベリアのエドマ層の大規模融解の現状と将来予測を行う研究を実施しています。私たちは国立環境研究所の科学技術週間に伴う一般公開「春の環境講座」で、研究プロジェクトの概要とこれまでの成果を、現地での写真や映像を交えて紹介しました。また「実際に測ってみよう」と題して、現場の観測で使われる土壌水分計などを使って、来場者に観測の体験を楽しんでいただきました。展示には小学校低学年から中高生、シニアな方まで多くの方が訪れ、たくさんのご質問やさまざまなご意見をいただき、対応した私たちにとっても非常にいい経験になりました。この場を借りて、お礼申し上げます。

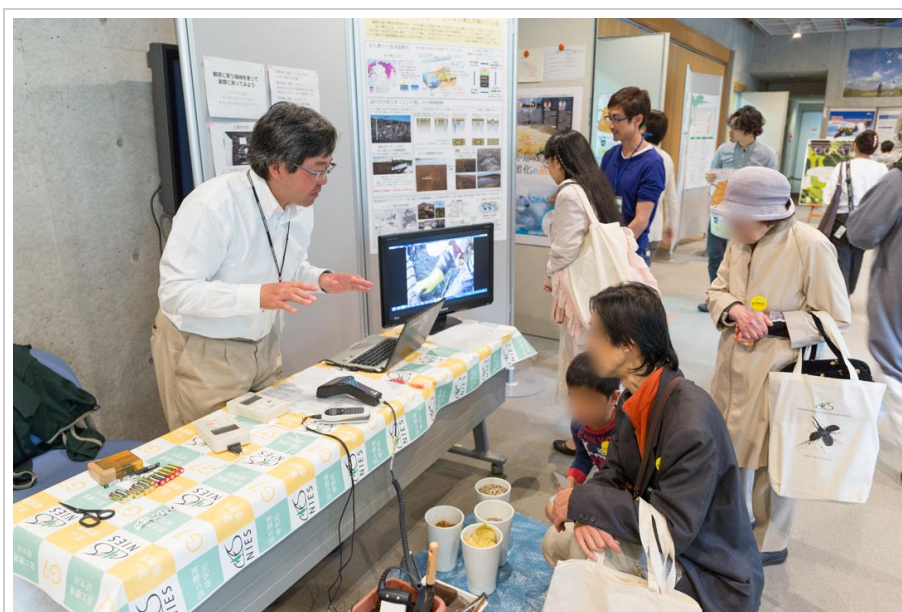


写真1 展示では、土に水をやり、土壌水分計で土の中の水分の割合を測定するなど、観測の体験を楽しんでいただきました。現地での映像を交え、研究内容についてお話をさせていただきました

解けている巨大永久凍土

エドマ層の写真を図1に示します。研究者の大きさから、いかに巨大な凍土であるかがわかります。エドマ層の存在は以前から知られていましたが、近年、急激に解けていることが注目されています。凍土の融解の様子を示したのが図2です。多角形土と呼ばれる網目状の地形では、網目の部分の地下に地下水が存在しています。その氷が融解すると体積を失って陥没し、網目の線に沿って水がたまり、湖や池ができます（サーモカルスト湖）。



図1 エドマ層の写真。図2の写真「アラスカ北部の川岸に現れた崖」を、近くから見たところ

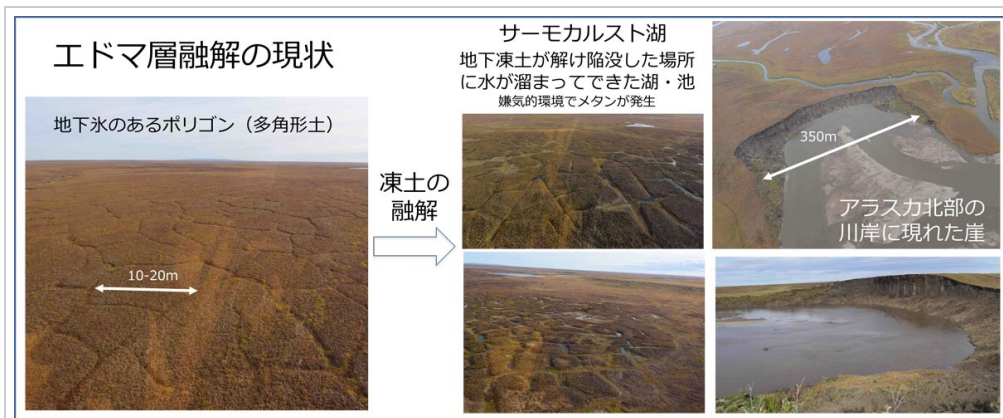


図2 エドマ層融解の現状。ポリゴン（多角形土）と呼ばれる網目状の地形では、網目の部分の地下に地下水が存在しています。その氷が融解すると体積を失って陥没し、網目の線に沿って水がたまり、「サーモカルスト湖」ができます

温室効果ガス放出の現状評価と予測

私たちの研究プロジェクトでは、国内外の研究機関が協力して、エドマ層の融解が地球環境に与える影響について調べています。アラスカやシベリアで測量調査などを行うことで、地盤沈下の進行速度と凍土の融解速度を推定します（アラスカ大学・海洋研究開発機構）。また、現地でも凍土中の氷を採取して日本に持ち帰り、凍土中の温室効果ガス濃度や有機物の量などの測定を行っています（北見工業大学）。さらに、これらの情報を利用して、エドマ層の生成と温暖化に伴う融解を予測するモデルの構築や、凍土の融解によって放出される温室効果ガス量の推定を行っています（海洋研究開発機構・国立環境研究所）。現地での様子や最新の成果などは、ウェブサイト <http://www.jamstec.go.jp/icc/pfch4/> にありますので、興味を持っていただいた方は、ぜひご覧ください。

* 図中の写真は、大野浩氏（北見工業大学）、岩花剛氏（アラスカ大学）からも提供していただきました。

国立環境研究所一般公開「春の環境講座」を開催しました

3 体験イベント：自転車de発電

地球環境研究センター 係員 金田秀斗

2017年4月22日（土）に、科学技術週間に伴う国立環境研究所一般公開として「春の環境講座」を開催しました。当日は、時折小雨がぱらつくあいにくのお天気にもかかわらず、576名もの方々にお越しいただきました。

地球環境研究センターは、地球温暖化研究棟1階を公開し、「ココが知りたい地球温暖化の適応策」と題したパネルディスカッションを行うとともに、地球環境観測の展示・紹介、発電量表示システムを備えた自転車発電体験を行いました。地球温暖化研究棟での公開内容についてご報告します。

すでにおなじみのこの企画は、自転車をこぐ力を電気エネルギーに変え、いろいろな電化製品を動かしてみるというものです。大人用と子供用の自転車を用意し、参加者には消費電力の異なる白熱電球・LED電球をつけた場合に必要な力が違うことを体験いただきました。また、年齢（小・中・高・一般）と性別でクラス分けした参加者の発電量ランキングを出すという大人気の企画を毎年、楽しみにしている方もおられました。普段何気なく使っている電力も自転車発電にて自分で発電するとなると、そのエネルギーをつくるのがいかに大変なものであるかが実感できます。



写真1 自転車de発電の風景。子供から大人までたくさんの方々が自転車を漕いでLED電球・蛍光灯・白熱電球と一個ずつ点灯していき、自分の力で電力を発電していただきました

2050年までに温室効果ガスをどう減らす？

—春の環境講座で環境サイエンスカフェを開催しました—

社会対話・協働推進オフィス 科学コミュニケーター 岩崎茜

1. はじめに

「2050年までに温室効果ガスの排出量を80%削減。」国が掲げているこの目標、どうすれば達成できると思いますか？ 目指すべき未来の低炭素社会について、研究者と参加者とが共に考え、語り合う環境サイエンスカフェ（以下、サイエンスカフェ）が国立環境研究所（以下、国環研）で開かれました（写真1）。



写真1 のべ約50人が参加し、お菓子や飲み物を取りながら意見を聞き合った

サイエンスカフェは毎年科学技術週間に国環研で開く春の環境講座の一企画で、社会対話・協働推進オフィス（以下、対話オフィス）が社会環境システム研究センター（以下、社会センター）と共同で実施しました。

カフェは2回開催し、1回目の講師を社会センターの高倉潤也特別研究員、2回目を同センターの亀山康子副センター長が務めました。

温室効果ガスを減らすために省エネの推進や再生可能エネルギーの導入など具体的な対策が取り組まれています。低炭素化を進めていくためには、技術的な解決だけではなく、社会全体がどのような未来を望むのか、その思いや覚悟も問われます。この課題に対して社会の様々な立場からの率直な反応を聞き合うことができれば。これがサイエンスカフェのねらいの一つでした。

各回の様子と、参加者から頂いた様々な意見をいくつかご紹介します。

2. 対策費用は負担？ 投資？

1回目は約30人が参加しました。冒頭、2050年までに80%削減という国の目標をそもそも知っていたかという質問に対して、会場で手が挙がったのは1/4程度でした。あまり認識されていないことが分かったものの、小学生時代に

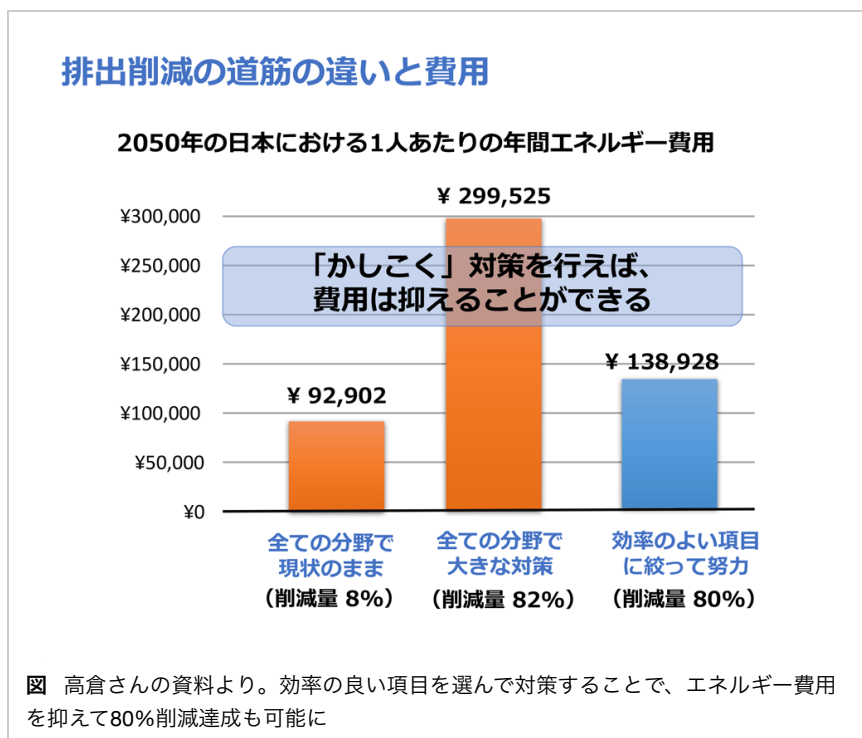
「塾の学習」で知ったという中学生がいたことに周りの大人が感心していました。

議論に入る前に、講師の高倉さんから話題提供がありました（写真2）。



写真2 温暖化対策がもたらすプラスにも注目して話した高倉さん

80%削減のためにがむしゃらに対策するのではなく、家庭や運輸、エネルギーなどそれぞれの部門で細かく項目を選んで賢く対策を行うことで、費用を抑え効率的に削減することが可能だとデータを使って示しました（図1）。



また、温暖化対策のための費用は、本来なら払いたくない「負担」として捉えられがちだが、対策をすることで得られる利益もあると説明。たとえば車の自動運転は燃費の向上だけでなく、交通事故を減らす効果も期待できます。こう考えれば、対策の費用は、単に温室効果ガスを減らすのではなく、社会をより良くするための「投資」と評価することもできると話しました。

3. 楽で環境にやさしい対策のためには？

意見交換では、参加者から次のような声がありました。

「省エネをすれば温暖化を防げるというのは事実だろうが、魅力的に感じない。我慢しよう、コンセントをまめに抜こうとか、生きていく中で面倒なことが増えてくる。細かいことまで気にすると未来の人生が楽しくない。それよりも、たとえば燃料電池など新しい技術を導入するから苦労なくて済みますよ、というような話の方に惹かれる。」

対策がガマンや負担にならないようにしたい、という人は多いだろうと高倉さんも認めていました。そして、例として家庭のエネルギー使用量を管理するHEMS（ホームエネルギー管理システム）を挙げ、センサーを使って自動的に電気を消すなどの技術を導入すれば、面倒なことをしなくても省エネになると、具体策を提示しました。

その後は家庭部門の話が続きました。その中で、断熱などに優れた高機能の家をつくるのが大切で、そのための補助金を出してほしいという提案もありました。高倉さんも同意した上で、エネルギー効率の良い家をつくる技術だけでなく、補助金を出すという制度やルール作りも併せて考えていく必要があると、社会の仕組みを考える視点も示しました。

4. 長期的な社会づくりと、より短期的な具体策と

2回目は約20人の参加者があり、中には1回目に参加した人たちの姿もありました。講師の亀山さんは、高倉さんとは違う切り口から話題提供を行いました（写真3）。



写真3 未来の社会をつくる、という広い視野から低炭素化の話始めた亀山さん

低炭素化のためには、2050年に向けてどのような社会を作っていくのか広い視野で考えていくことも必要です。たとえば、地域社会のスケールで考えると、公共交通機関をより便利に利用できるような人々が集まって住み、徒歩圏内に学校や職場、店舗などを集中させる街づくりが挙げられます。地域全体でエネルギー消費量を抑えるとともに、隣近所で声を掛け合えるコミュニティの形成も同時に行われます。「低炭素社会は高齢者に優しい社会」とも考えられ、寄り集まって住むことで、温暖化対策にもなり、人々のつながり合う安心できる社会の実現も果たされると考えられています。

そうした長期的な社会づくりを目指しつつ、より短期的な視野で今からできる対策を具体的に考えていくことも必要です。亀山さんは、CO₂削減効果を数値で見ることのできるツールである「2050低炭素ナビ^[注]」を紹介しつつ、どんな対策を考えるべきか参加者に聞きました（写真4）。



太陽光発電の効率がより良くなるなどイノベーションに期待を寄せる声がある一方で、森林を切ってまで太陽光パネルを設置する必要があるのか疑問も上がりました。森林がなくなること、CO₂吸収源が失われてしまうからです。亀山さんによれば、木は成長しきってしまうとそれ以上CO₂を吸収しない為、切って新しい木を植えるのでなければ、太陽光パネルに置き換えることは温暖化対策としては意味があると説明。しかしながら、森林には土砂崩れを防ぐなどの役割もある為、さまざまな価値を考えたときに判断することが難しくなるとジレンマも示し、方向性はみんなでも話し合っ決めていく必要があると強調しました。

5. まとめ：どんな取り組みが大切？

終了後、参加者の皆さんに、2050年までに80%削減という目標を達成するためにどんなことが大切だと思うか、意見を書いてもらいました。その中からいくつかをご紹介します。

- 太陽光や風力発電の効率化、低コスト化。
- 温室効果ガスを固めて宇宙に捨てる技術。
- 技術革新は必要であるが、人々の暮らし方に対する考え方を変えていくことも重要である。
- 自動車を使わないことや地産地消を進めることは健康にも良い、という人々の意識の変化。
- 便利で環境にやさしい技術の推進とそのための制度や価値観づくり。
- 緩やかな規制、良いインセンティブ。

技術の発展のほか、人々の考えや価値観が変化することを求める声も多数あります。人々を動かすためには、ガマンや節約を強いるだけではなく、取り組むことで「良くなる」側面にも目を向ける必要があります。温暖化対策が、社会をより発展させ、人々の心を豊かに楽しくするものにもならないか。その視点が新しいイノベーションをもたらすのかもしれない。

また、太陽光パネルと森林の問題のように、温暖化対策がどっちをとるかのトレードオフに陥ることもあります。どの方向を選択していくかは専門家だけが決めるのではなく、社会で話し合っ決めていくことが大切です。意見を聞き合う場として国環研のサイエンスカフェが有効に働くよう、対話オフィスは今後も継続してこうしたイベントを行っていきます。

脚注

- 2050低炭素ナビ：どんな温暖化対策をどの程度行えば温室効果ガスをどのくらい減らすことができるのか、数値で効果を知ることのできるツール。以下から体験できる。
<http://www.2050-low-carbon-navi.jp/pathways/>