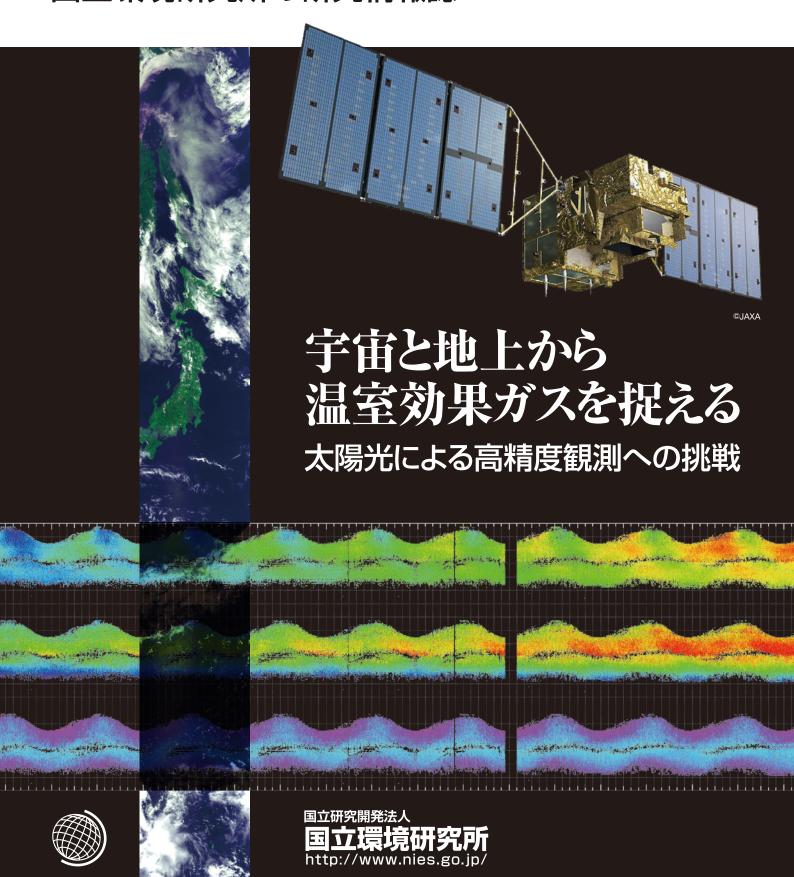
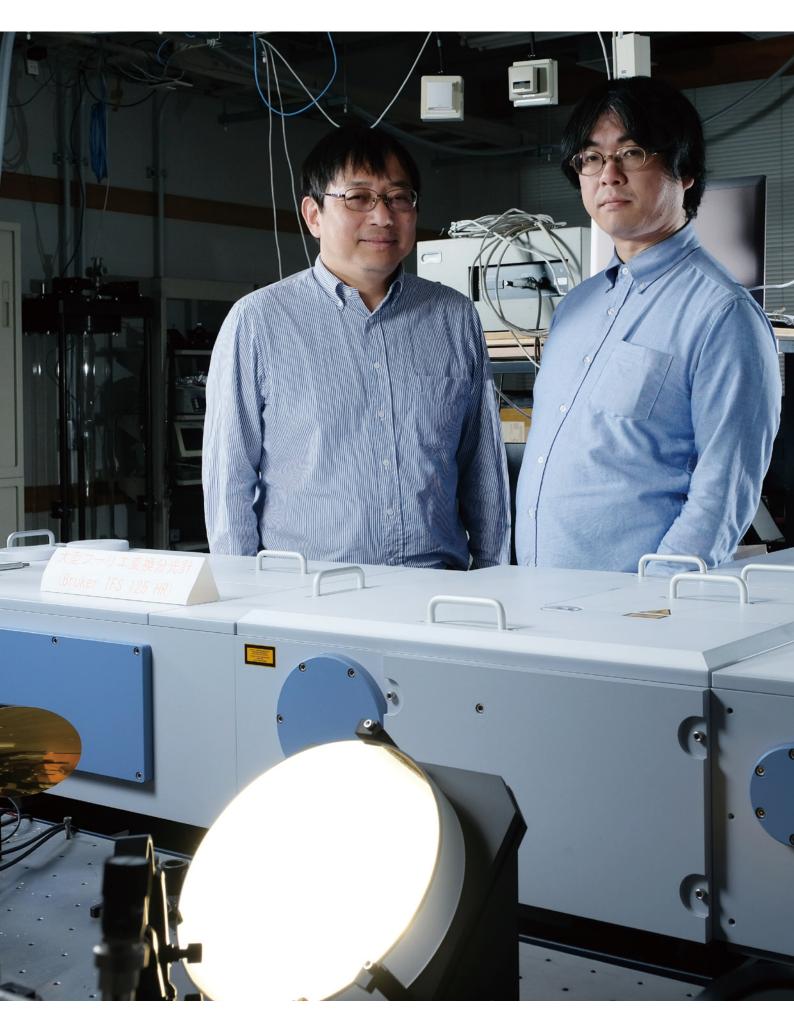
NIES RESEARCH BOOKLET



15 15 No.69 June 2

国立環境研究所の研究情報誌









温室効果ガスの観測は、採取した大気の直接測定により行われてきました。直接測定は高精度な反面、全球を網羅することは困難でした。その後、物質が吸収する光の波長ごとの特性を利用して、離れた場所から物質の特徴を把握する「分光リモートセンシング」技術の進展により、直接測定に迫る精度で全球規模の観測が実現しました。この方法では人工衛星に観測装置を搭載し、地球大気を通過する太陽光を観測します。

国立環境研究所は、宇宙航空研究開発機構、環境省と、人工衛星分光リモートセンシングによる温室効果ガス観測プロジェクトを進めています。2009年に打ち上げられた日本の人工衛星「いぶき」は、9年を経た現在も観測を続けており、温室効果ガス観測を主目的とする人工衛星の現役としては最長期間の記録を誇っています。温室効果ガス観測の高精度化により「いぶき」の研究利用が進み、後継機である「いぶき2号」の打ち上げも迫っています。

このプロジェクトでは、私たちは人工衛星が観測した 太陽光スペクトルから温室効果ガス濃度やその排出量 の分布を推定する高次処理と推定結果の検証を担当し ています。温室効果ガス濃度の推定には、誤差要因に 対応できる高度な解析手法の開発が必要でした。また、 「いぶき」の開発と同時期に、太陽光スペクトルから温 室効果ガス濃度を推定する地上観測網ができたことは、 データの精度の検証に、重要な役割を果たしました。

本号では、分光リモートセンシングによる温室効果ガスの観測について紹介します。

CONTENTS

宇宙と地上から温室効果ガスを捉える

太陽光による高精度観測への挑戦

- Interview 研究者に聞く宇宙から温室効果ガスを観測する ----- p4 ~ 9
- 研究をめぐって分光リモートセンシングによる温室効果ガスの観測 ················· p12 ~ 13

表紙:「いぶき」(右上)とその観測データの一例

nterview 研究者に聞く

宇宙から温室効果ガスを観測する

いぶき(GOSAT: Greenhouse gases Observing SATellite)は、2009年に打ち上げられた世界で初めての本格的な温室効果ガス観測衛星です。GOSATプロジェクトでは、この人工衛星を用いて、地球温暖化の原因とされている二酸化炭素やメタンガスを分光リモートセンシングという方法で宇宙から観測しています。地球環境研究センター主任研究員の森野勇さんと、同じく主任研究員の吉田幸生さんは、このプロジェクトで活躍しています。

リモートセンシングで地球を観測する

Q:研究を始めたきっかけは何ですか。

森野:子供のころは、夜空が好きな天文少年でした。 大学では物理学を専攻しましたが、大学院では、実験 室で分光法を用いて星間空間に存在する新しい分子を 見つけようと研究しました。分光学とは、物質が放 出または吸収する光のスペクトル(光の波長ごとの強 度の分布)を測定し、物質の構造や組成・物理状態を 研究する学問で、大気のリモートセンシング(遠隔地 から観測する技術)にも盛んに利用されている分野で す。国立環境研究所に採用後、大気分光学の研究を開 始し、GOSATプロジェクトに携わるようになりまし た。

吉田: 私も天文に興味がありましたが、宇宙のような 広大なものではなく、眼に見えるスケールの身近なも のを扱いたくて大学では地球物理学を専攻しました。 主に雲による光の反射や吸収特性について研究し、雲 のリモートセンシングも手掛けました。国立環境研究 所にポスドク (博士研究員) で採用されたことをきっ かけに、リモートセンシングの対象が雲から大気成分 へと変わりました。

Q:プロジェクトはどのように始まったのですか。

森野:現在、地球上の多くの地点で温室効果ガスの濃度が観測されています。地上観測だけでなく航空機、タワー、船など様々なプラットフォームが利用されていますが、それでも地球をくまなく素早く観測することはできません。その問題を解決すべく、人工衛星により、太陽の光を温室効果ガスが吸収する性質を使って調べるプロジェクトがスタートしました。

具体的には、「いぶき」という人工衛星に搭載したセンサを用いて、太陽光の地表面からの散乱光を観測することによって温室効果ガスの濃度を調べます。いぶきの観測する散乱光は、太陽光のうち大気中の水蒸気などの分子や微粒子によって散乱した後に地表で反射し、衛星に到達する光です。二酸化炭素やメタンな

コラム フーリエ変換分光計 (FTS)

フーリエ変換分光計 (FTS) は、干渉計を用いて光の干渉 波形を測定し、それをフーリエ変換 (数学的理論) により波 長ごとの光の強度分布 (スペクトル) を測定する分光装置の ことを言います。1970年代から化学物質の種類の確認 (物質の同定)、試料中の存在量の測定、物質の構造を明らかにするために、これらの吸収、反射、散乱のスペクトル等の測定に使用され始めました。ほぼ同時期に、大気測定への利用が始まり、現在では大いに活用されています。

分光装置としての中心部分は干渉計です。FTSで最も使用されているマイケルソン干渉計のイメージを図1に示します。固定鏡と移動鏡で反射される光の経路の差である光路差を、移動鏡を一定の速度で動かすことにより、光が干渉を起こします。半透鏡から移動鏡の距離は、固定鏡から半透鏡の距離より短いところから数十倍まで移動します。最長移動距離は波長分解能が高いほど長くなります。図2に様々な光のスペクトルと干渉計からの強度信号の関

係(干渉波形)を示します。(a)のように光源が単色光(一つの波長)の場合は、干渉光は光路差ゼロで強度が極大となり、光の波長の半分のところで強度が極小になり、さらに波長の整数倍で極大となります。つまり光路差に対して周期的な三角関数(cos関数)となります。(b)のように2色の単色光(二つの波長)の場合は、干渉光はそれぞれの周期的な2つの三角関数の重ね合わせになります。(c)のように白色光(強度が一様な波長の光)の場合は、光路差ゼロで干渉光が最も強くなり、光路差が大きくなるにつれて波打ちながら減少していきます。光のスペクトルの種類によって特徴的な干渉光が測定できることが分かります。干渉光を測定し、フーリエ変換により、光のスペクトルを得ることができます。

FTSは、ノイズが小さい干渉光を測定できます。また、さらに高い波長分解能で広い波長範囲を一度に測定できる利点があります。



地球環境研究センター 主任研究員 吉田 幸生(よしだ ゆきお)

地球環境研究センター 主任研究員 森野 勇 (もりの いさむ)

どの温室効果ガスは、特定の波長の光を吸収する性質があるので、散乱光の観測スペクトルから温室効果ガス濃度などを求めることができるのです。

Q:いぶきはどうやって温室効果ガスを測定しているのですか。

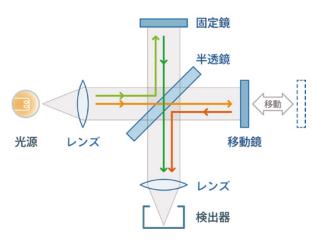
吉田:いぶきは地球の周りを高度666kmの軌道で回っています。約100分で地球を一周しながら、ひとつのセンサで地球のほぼ全表面にわたって温室効果ガスを測定することができます。地上や航空機での観測に比べて圧倒的に数多くの地点(3日間で全球の日照域の約30,000地点を観測、雲等により解析対象から除外されそのうち700~1,300地点程度の温室効果ガス濃度が得られる)のデータを取得することができるので、世界各地の温室効果ガスの濃度を把握することができるのです。

森野:いぶきに搭載されている、温室効果ガスを観測 するセンサは、二酸化炭素やメタンが吸収する波長域 の光を観測するようになっています。太陽光が地球の 大気を通って地表面で反射され、再び大気を通って衛星まで到達した際に、光が強く吸収されているほど、 大気中に含まれる温室効果ガスの量が多いことがわかります。

特定の波長の光を分けるには、プリズムなどを使う方法もありますが、いぶきの目指す高い波長分解能で広範囲を測定しようとすると装置が巨大になってしまいます。そこで、いぶきのセンサでは、フーリエ変換分光計(FTS、コラム1参照)を使っているのが特徴です。計算機の進歩とともに注目されるようになり、実験室での分光測定とほぼ同時に大気観測でも使われるようになりました。

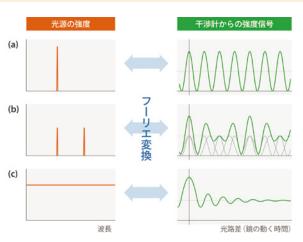
Q:いぶきは国立環境研究所で開発したのですか。

吉田:いいえ。いぶきは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、環境省、国立環境研究所で共同開発した衛星です。測定データを用いて温室効果ガスの濃度を推定する計算処理は、私たち国立環境研究所が担当しています。



■図1 マイケルソン干渉計(イメージ)

光源からの光はレンズにより平行光になります。そして半透鏡により光は2つに分割されます。一方は固定鏡、もう一方は移動鏡に進み、それぞれ反射して再び半透鏡により合成されて干渉光となります。そして、レンズで集光され検出器で電気信号に変換され、さらにデジタル信号に変換されます。



■図2 光源スペクトルと干渉計からの干渉光の関係

- (a) 光源スペクトルが単色光の場合
- (b) 光源スペクトルが2色の単色光の場合
- (c) 光源スペクトルが白色光の場合

世界初の観測が始まる

Q:プロジェクトではどんな研究をしていますか。

森野:私は所内の研究事業実施組織である衛星観測セ ンターに所属し、いぶきで観測した温室効果ガス濃度 の検証に関わる業務や研究を担当しています。

吉田: 私はFTS短波長赤外バンドのデータを解析す るためのアルゴリズムの開発や改良を担当していま す。他にも地上系管理チームとして、観測データの受 信や処理、解析結果の配信などを行う計算機などの調 達や保守などの業務も担当しています。

Q:検証とはどんなことをするのですか。

森野:いぶきの観測データから推定した温室効果ガ ス濃度の値が、どの程度正しいかを確認する必要が あります。国立環境研究所では、地上の観測ステー ションや航空機など様々な方法で温室効果ガスを観 測しています。これらのデータや地上設置のFTSに よる観測網である全量炭素カラム観測ネットワーク (TCCON、コラム4参照)のデータを用いて、いぶき の観測データから推定した温室効果ガス濃度値の精度 を評価します。

Q:このプロジェクトが始まったきっかけは何です。 か。

森野: 1997年の京都議定書で温室効果ガス排出量の 削減目標が決まったことです。世界各国が温室効果ガ ス排出量の削減対策を進めるには、まず将来の気候変 化と影響を正確に予測し、合理的な削減目標を設定し なければなりません。また、各国の温室効果ガスの排 出量や削減効果を評価することが重要です。そこで、

温室効果ガスを観測することが必要になったのです。

Q:いぶきはいつ打ち上げられたのですか。

吉田:京都議定書採択後、研究や開発期間を経て、 2009年1月23日に打ち上げられました。それまで 温室効果ガスの高精度観測を目的とした人工衛星はあ りませんでしたから、本当にうまくいくのだろうかと みんな不安でした。打ち上げ後、JAXAによる衛星の 初期機能確認が始まりました。打ち上げから2週間ぐ らいでセンサの機能確認が始まり、初データが取得で きました。その日は休日でしたが、データを確認して ほしいとのことだったので、研究室に待機してデー 夕を待っていました。観測スペクトルには二酸化炭素 やメタンによる吸収構造がきれいに見えていたのです が、観測地点付近の大気場の情報をもとにシミュレー ションしたスペクトルと比較してみると、吸収の深さ に大きなズレがありました。自然界の濃度変動で説明 できないほどのズレだったため、データ処理の過程に 何らかのミスがある可能性(これらは多大な努力の結 果、解決されました)がありました。

高精度化をめざす

Q: 観測が軌道に乗ったのはいつごろからですか。

吉田:4月に入って衛星の初期機能確認が完了し、後 半から定常的な観測が始まりました。5月末に二酸化 炭素やメタンの濃度の初期解析結果を出すことができ ましたが、安定したデータ処理の準備にさらに1ヶ月 程度を要しました。データは随時更新しており、一般 にも公開しています。北半球では、夏になると光合成 が盛んになって、森林地帯の二酸化炭素の濃度が低く

コラムの カラム量とカラム平均濃度

いぶきは、太陽光が地表面で反射して衛星に到達した光を測定します。 温室効果ガスの吸収によって光が減衰している様子を調べることで温室 効果ガスの量を求めるため、いぶきが測定する温室効果ガスの量は地上 から大気上端までの総量になります。気体の総量を単位面積当たりの地 上から大気上端までの柱(カラム)の中にある気体分子の数で表した数 値を、カラム量と呼びます(図3)。

カラム量は地表面の標高や気圧が変わると変化するため、カラム平均 濃度に変換して標高や気圧の影響を取り除いています。カラム平均濃度 は、乾燥空気のカラム量に含まれる温室効果ガスのカラム量の割合で表 されます。乾燥空気とは空気中に平均0.5%ほど存在する水蒸気を差し 引いたもので、窒素(78.1%)・酸素(20.9%)・アルゴン(0.9%)・3 酸化炭素(0.04%)・その他(0.003%)で構成されます。乾燥空気の力 ラム量は、地上では気圧を測れば求めることができます。宇宙からは酸 素の吸収による光の減衰を測定し、乾燥空気に含まれる酸素の割合がほ とんど変化しないことを利用して地表面気圧を推定し、乾燥空気のカラ ム量を求めています。



■図3 カラム量のイメージ

■図4 2012 年 5 月 19 日にいぶきが日本 上空を通過した際に観測されたデータ

(左)「いぶき」に搭載された雲・エアロソルセンサ (CAI: Cloud and Aerosol Imager) の各波長帯 (バンド) の画像。白色に近いほど光の強度が強いことを表し、雲・エアロゾル・気体分子による散乱や地表面による反射が強いことを表す。赤色でFTSの観測点 (実際のFTS 視野サイズ (~直径 10km) に対応) を示す。「いぶき」は北から南へ通過し、FTSはポインティング機構により観測点を衛星直下の前後左右に動かしながら、赤線で繋いだ順に観測を行った。(右) つくば市周辺 (左図矢印) でFTSにより観測されたスペクトル。Band 3の5,100~5,200 cm⁻¹ 付近の水蒸気の強い吸収を利用して、高い雲を検出する。

なることが地上観測で示されていま したが、衛星からもそのシグナルを とらえることができました。

Q:解析の精度はどうでしたか。 森野:解析結果を検証してみると、 誤差が4%ほどありました。分光リ

モートセンシングのデータは大きい場合10%ぐらい 誤差があるのが普通なので、分光リモートセンシング の精度としては悪くありません。でも、このプロジェクトでは最初から誤差を1%以下にするのが目標でしたので、達成するためにアルゴリズムの改良が続きました。そのために吉田さんがかなり苦労しましたね。 **吉田**:精度を向上させるために、手を替え品を替え、色々なことをやってみました。しばらくして専用のス

2012/05/19 TANSO-FTS BAND 1 TANSO-CAI BAND 1 TANSO-CAI BAND 2 RADIANCE [A.U.] 0.1 0.0 0.0 0.0 (0.38 µm) (0.68 µm) 40 38 0.0 [deg.] 13100 13200 WAVENUMBER [cm⁻¹] 36 TANSO-FTS BAND 2 RADIANCE [A.U.] 0.0 <u>5800</u> 6200 6400 6000 134 138 136 138 142 136 140 140 LONGITUDE [deg.] LONGITUDE [deg.] WAVENUMBER [cm⁻¹] TANSO-FTS BAND 3 TANSO-CAI BAND 3 TANSO-CAI BAND 4 2.0 RADIANCE [A.U.] $(0.87 \mu m)$ (1.62 µm) 40 1.5 1.0 0.5 38 0.0 4800 5100 5200 5000 LATITUDE [deg. WAVENUMBER [cm⁻¹] 36 TANSO-FTS BAND 4 **∑** 350 TEMP. 300 34 250 BRIGHT. 200 32 134 150 800 1000 1200 1400 1600 1800 136 138 140 136 138 140 142 LONGITUDE [deg.] LONGITUDE [deg.] WAVENUMBER [cm-1]

パコンが使えるようになると色々な検討が短期間でできるようになり、だいぶ目標に近づくことができました。誤差を減らすなど、解析法の改良は今でも続いています。

いぶきの長期運用を実現

Q:検証はどのように進めてきましたか。

森野:吉田さんが計算した結果が正しいかどうかを確

コラムの いぶきの観測手法について

いぶきは大気中の温室効果ガスの吸収による光の減衰を測定しています。この減衰の度合いは、温室効果ガスのカラム量だけでなく、太陽光が差し込む方向や衛星が観測する方向によって光がたどる大気中の道程が変化することでも変わります。加えて、大気中には雲やエアロゾルなどの、地表面を覆い隠したり、光の進む方向を変えたりする妨害物質が多く存在しています。

このような妨害物質の影響を適切に取り除き、温室効果 ガスのカラム量を精度よく推定するための手法はいまのと ころ確立していません。そのため、世界中の研究者が精力 的に手法を研究しています。国立環境研究所では、以下の ような手法を用いています。

カラム量を観測するためには、まずはFTSの視野内に 雲が含まれるデータを除外します。一方、エアロゾルはど こにでも存在するため、雲のようにエアロゾルのない場所 を探すことはできません。エアロゾルといっても色々な種 類があり、地域によって卓越する種類や存在高度も違えば、種類や粒子の大きさの違いによって光を散乱する特性も変わります。エアロゾルの影響を低減するには、できる限り現実に近いエアロゾル情報を用いることが近道になります。そこで、FTSの観測点にどんな種類のエアロゾルが存在していたかについては、エアロゾル輸送モデルの計算結果を利用し、どれだけの量のエアロゾルが存在していたかについては温室効果ガスのカラム量と同時に推定する、というアプローチを取っています。しかしながら、モデルによる計算結果や同時推定結果が必ずしも現実に近いとは限りません。

現実とのズレに起因する温室効果ガスのカラム量の誤差はエアロゾルの量が多いほど顕著になることから、同時推定されたエアロゾルの量がある閾値(いきち)を超えた場合には、推定された温室効果ガスのカラム量の正しさは保証されないものとして解析結果を棄却しています。

認するのが私たち検証担当者の役割です。そのためには基準となる精度の高いデータが必要です。人工衛星のデータを検証してはじめてそのデータが研究に使えるようになります。いぶきは地球の周りを回っているので、世界中のデータが必要です。しかも、いぶきが観測した同じ時刻、同じ場所の地上データを集めてこなければなりません。海外のデータは、世界中の観測機関に交渉して提供してもらいます。

Q: データを集めるのは苦労がありましたか。

森野:はじめのころは、GOSATプロジェクトがあま り知られていなかったので、大変でした。知らない人 からいきなりお願いされれば誰でもビックリしますよ ね。お互いに研究で競争している部分もありますから、 まずはプロジェクトの意義を説明することから始めま した。またTCCONという、2004年に始まった全球 規模の観測網に国立環境研究所(つくば市)の観測地 点を加えようとしましたが、当時はバックグラウンド (人的影響が無い条件)の温室効果ガス濃度の観測を 目指していたので、すぐには入れませんでした。ちょ うどそのころ、アメリカも温室効果ガス観測衛星を計 画していたことから、いぶきの意義も認められ、交渉 が進むようになりました。苦労はありましたが、今で は世界中の機関と協力して、研究できるようになりま した。普通に実験室で研究していたら、こんな世界中 の研究者とコミュニケーションをとりながら研究する 経験はできなかっただろうと思います。

Q:いぶきは順調に運用されましたか。

吉田: 定常的な観測が始まってすぐにセンサにトラブルがあり、最初の1年程度はセンサの安定性をこまめ



■図5 TCCONの観測網(出典: https://tccondata.org)
●は運用中の地点、■は設置予定の地点、▲は運用が終了した地点

に確認しながらの運用でした。観測モードを変えることでセンサの安定性が向上することがわかり、なんとか5年間は安定して運用することができました。ところが、5年間の定常運用期間が終わったと思ったら太陽電池パドル(表紙を参照、衛星の本体の両端に延びている太陽電池が搭載されているもの)のひとつが回らなくなってしまいました。

Q: どうやってトラブルを解決したのですか。

森野: もう片方の太陽電池パドルを使って解決しました。いぶきは衛星の両側に太陽電池パドルを持っていますが、片方でも十分な電力が確保できます。じつはいぶきは重大な故障が発生しても、基本機能が残るように重要な装備を二重につけているのです。ひとつの

コラムの全量炭素カラム観測ネットワーク (Total Carbon Column Observing Network: TCCON)

太陽の直達光が大気の層を通ってくる間に、光が大気中の温室効果ガスなどに吸収を受けていることを利用し、その光の吸収量を測定することによって大気中濃度を推定しています。その光の吸収量を調べるときに、FTSを使用します。日本のいぶきや米国のOCO-2、中国のTanSat等の人工衛星による温室効果ガス観測の「検証標準」となっているのが、全量炭素カラム観測ネットワーク(TCCON)です。

TCCONは、2004年に米国ウィスコンシン州Park Fallsに最初のFTSが設置されて観測が開始されてから、現在計25地点が運用中です(図5)。観測地点は、北米、ヨーロッパ、アジア、オセアニア、大西洋およびインド洋島嶼(とうしょ)を網羅していますが、南米、アフリカ、シベリアは空白地点になっています。今後、この空白地域を埋めるように観測地点が設置されることが期待されています。

TCCONの特徴は、共通の装置と条件で観測し、共通の解析手法を用いて温室効果ガスデータを推定していること、そのデータは航空機観測による高度分布データを用いて校正され、高精度なデータとして一般に公開されている点です(*1)。

衛星観測による温室効果ガスデータの精度がますます向上しているために、今後はTCCONのさらなる高精度化や観測地点を増やすことが必要になります。さらに現在、TCCONで用いられている高価なFTSに代わり、机に載る可搬型FTSを用いた観測網の構築が計画されており、観測装置間の個体差(取得できる温室効果ガスデータの値が観測装置によってばらつくこと)をなくすように工夫されています。日本では、いぶき2号の検証活動の一環として、あまり観測例のない熱帯地域のフィリピン BurgosにTCCON観測地点を設置し、2017年3月から運用を開始しています。

* 1 https://tccon-wiki.caltech.edu/



部品がこわれても、もう一方の部品で補えるように なっています。

吉田:定常運用が終了した2014年から翌年にかけても次々に異常が出ました。検出器を冷却する冷凍機が停止するトラブルもありました。このときはなかなかトラブルの原因が特定できず、宇宙放射線による一時的な誤作動の可能性が高いという結論になり、再起動したら問題なく動き始めました。何度もこれで終わりかと思いましたが、なんとか現在まで観測が続いています。

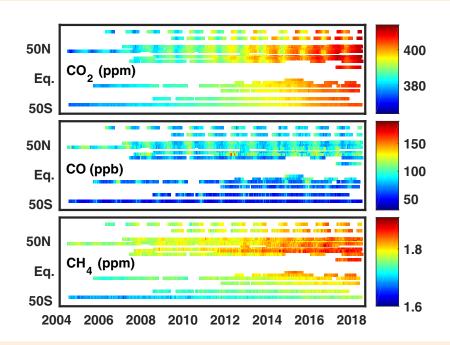
いぶき2号へ

Q:これまでを振り返ってみるといかがですか。

森野:ひとつの人工衛星でこんなに長く観測が続くと は思いませんでした。その間には色々なことがあり ましたが、この9年間で、衛星観測によって精度の高 いデータが出せることを実証できたのは良かったと思 います。いぶきのあと、アメリカ、中国、ヨーロッパ でも同じような衛星が打ち上げられていますが、私た ちの実績は他の国の衛星による観測に貢献していま す。また、地上における観測網もどんどん広がり、特 にアジアの地上観測データの拡充に貢献することがで きました。TCCONでは、東南アジア初の観測地点 としてフィリピンにいぶき2号の検証活動の一環とし て観測装置などが設置され、国立環境研究所と現地な どの関係機関の協力により、観測が始まっています。 2017年には世界で初めて、いぶきの観測データを 使って、地球全体のメタン濃度の変動を示すことがで きました。メタン濃度は北半球では冬に高く、夏に低 いという季節変動をしながら年々上昇していることが 明らかになりました。

吉田:2018年度には、いぶき2号の打ち上げが計画されています。これまでの経験を踏まえてより精度を向上させたいと思っています。加えてさらなる後継機も検討されているので、これまでのノウハウをいかして、測定をよりよいものにしたいと思います。

森野: こうした成果は多くの人との協力があったからこそです。海外との協力体制も時間をかけ、研究者と交流を深めたおかげで築けたものです。こうした協力体制も次の世代に引き継いでいかなければならないと思っています。地球温暖化の問題の解決に貢献するよう、これからも色々なことをやっていきたいです。



■図6 TCCONで取得された二酸化炭素・一酸化炭素・メタンのカラム平均濃度。縦軸は緯度、横軸は観測年、色がついているところがそれぞれの緯度と年に観測が行われた地点。右の色はそれぞれのカラム平均濃度。単位は二酸化炭素とメタンは ppm(100万分の1)、一酸化炭素は ppb(10億分の1)。(https://tccon-wiki.caltech.edu/)北半球の一酸化炭素カラム平均濃度は南半球より濃度が高く、季節変動がハッキリしています。メタンカラム平均濃度は赤道域や北半球の濃度が高く季節変動しながら増加していることが分かります。



分光リモートセンシングによる 温室効果ガス観測の高精度化への挑戦

いぶきで得られた初期データの解析結果は、高精度な地上データと比較すると、4%ほど値がズレていました。 分光リモートセンシングのデータは大きい場合 10%ぐらい誤差があるのが普通なので、分光リモートセンシング の精度としては悪くありません。しかし、科学的利用のためには高精度化が必要です。これがさらなる苦難と挑戦 の始まりでした。

いぶきの初期データの解析結果

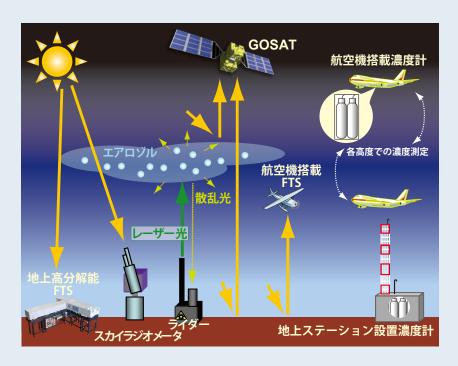
いぶきの観測スペクトルの最初の解析は、初期校正検証観測運用期間中に、環境研究総合推進費課題B-2「温室効果ガス観測衛星データの解析手法高度化と利用に関する研究」(2004~2006年度)の研究成果をもとにした解析アルゴリズムを用いて実施されました。この最初の推定結果には、二酸化炭素カラム平均濃度(二酸化炭素カラム量と乾燥空気カラム量の比、XCO2)に15ppm(ppm=100万分の1)程度の負の系統的なズレ(バイアス)が見られました。

実観測データに対応した各種パラメータの調整や、解析アルゴリズム中の不具合修正などを行い、2010年2月にいぶきの温室効果ガス濃度データが一般に公開されました(バージョン0)。さらに、アルゴリズムの改良および参照値改訂と検証を繰り返すことにより、サハラ砂漠周辺など、エアロゾルの影響が大きいと思われる地域において見られた、明らかに異常値である温室効果ガス濃度データの数は急激に減少しまし

た。検証結果により、XCO2の場合9ppm程度の負のバイアスと4ppm程度の誤差(ばらつき)になりました。この結果、プロジェクトとしての目標を達成することができました。そして、バージョン1として2010年8月に一般公開されました。しかしこの精度は、2ppm程度のXCO2の経年変化が有意に検出できない精度であり、インバースモデル解析による温室効果ガス収支(フラックス)を含む科学的利用に活用されるには不十分であったため、さらに精度を上げる必要がありました。

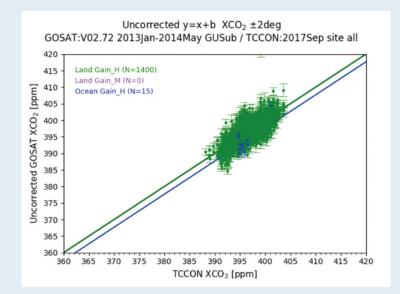
高精度化への挑戦

いぶき観測データの解析から得られた温室効果ガス 濃度のさらなる高精度化を目的として、環境研究総合 推進費課題2A-1102「『いぶき』観測データ解析によ り得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研 究」(2011~2013年度)を開始しました。具体的に は、長期間の検証データを取得し、それらを用いた



■図7 重点検証観測の概念図

重点検証観測には、TCCONに準拠した観測を行う地上設置高分解能FTSに加えてライダーや放射計を設置し、いぶきと同時観測を行いました。地上設置高分解能FTSでいぶきと同じ温室効果ガス濃度を取得し、ライダーや放射計により巻雲(大気上空の高いところに存在する薄い雲)・エアロゾル(大気中の微粒子)光学特性を取得しました。



継続的な検証を行ってXCO₂などの季節変動や経年変動について評価し、また地上設置高分解能FTSによる観測と同時に地上のライダー(Light Detection and Ranging:レーザー光を大気に照射し、戻ってきた光を観測する)や放射計を用いて巻雲・エアロゾル光学特性を取得し、いぶきの温室効果ガス濃度データとの相関解析などを行いました。並行して感度解析により解析アルゴリズムの改良と初期値・参照値の改訂の検討を行いました。これらの結果を解析アルゴリズムの改良と初期値・参照値の改訂などに反映させ、いぶき観測データの解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化を行うものでした。目標として、二酸化炭素の場合2ppm程度のバイアス、2ppmの誤差と、本課題開始時の半減を目標にしました。

高精度化成功!

バージョン1からのアルゴリズム改良項目として、エアロゾル高度分布の扱いの変更、TANSO (Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation) -FTSバンド1輝度オフセット項を導入しました。初期値・参照値の改良項目として、太陽照度データベース、エアロゾル光学特性、分光パラメータ、TANSO-FTS感度劣化特性を改訂しました。

並行して、図7に示すように、重点検証観測として、地上に設置した高分解能FTS・ライダー・放射計(地上に届く日射を観測する)の3つの機器による観測を行い、巻雲やエアロゾルの光学的特性について推定しました。つくばで得られたこれらの地上観測の結果と、「いぶき」の温室効果ガス濃度データとの比較を行いました。バージョン1による解析アルゴリズムを用いて推定したつくばのいぶきデータは、TCCONデータに対してXCO₂の−10.99±3.83ppm(バイアス±誤差)と負のバイアスとなりました。このとき、地

■図8 TCCON データを用いた検証結果

縦軸「いぶき」による XCO_2 、横軸TCCONによる XCO_2 。「いぶき」データはバージョン2 (Ver.02.72) で、各TCCON地点を中心に緯度経度±2度の正方形内のいぶきデータと一致したデータを使用しました。比較の期間は2013年1月~2014年5月です。陸域の「いぶき」データはバイアスがほとんどゼロで、海域は-2 ppm程度で、海陸ともに2ppm程度の誤差です。

表面から層厚2kmのエアロゾル層を仮定し、 エアロゾルの光学的厚さのみを同時推定して いました。また、事前に雲が含まれる事例は 除外しているため対象には雲は存在しないと

仮定し、加えて誤差の大きい太陽照度データベースを 用いているなど、バイアスが大きくなる要因が残って いました。これらが検証結果にどのように影響してい るか調査するために、いぶきデータとTCCONデー タのバイアスとライダーおよび放射計データとの関係 を確認した結果、有意な相関があることが分かりまし た。つまりライダーによる巻雲やエアロゾルの高度 分布や放射計による観測結果を用いることで、バイ アスが改善する可能性が示唆されたのです。しかし ながら、いぶきは全球観測を行うため、定点観測で あるライダーおよび放射計データをすべてのいぶき データに活用することはできません。そこで、大気中 のエアロゾルの分布を計算するエアロゾル輸送モデ ル SPRINTARSの計算結果を利用しました。さらに、 より誤差の小さい太陽照度データベースを用いた結 果、XCO₂で+0.17±1.49ppmとバイアスがほとん どなくなる結果を得ることができました。この結果を もとに解析アルゴリズムが改善されて、バージョン2 として公開されました。

現在公開されているいぶきデータはバージョン2 (バージョン02.72)です。TCCONデータを用いた検証結果を図8に示します。このデータが数値モデルを利用して計算された温室効果ガス排出量の推定、都市や森林火災などによって発生した二酸化炭素やメタンがどのように輸送されるかに関しての研究に利用されるようになりました。

本内容は、環境研究総合推進費課題2A-1102「『いぶき』観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究」の成果の一部をまとめたもので、国立環境研究所を中心とする研究チームの奮闘を書いたものです。いぶきデータの高精度化は、国内外の研究者と協力し、また時には競争して、実現できました。

研究をめぐって

分光リモートセンシングによる 温室効果ガスの観測

分光リモートセンシングを用いた人工衛星と地上設置 FTS 観測網により、温室効果ガスの高精度な全球規模の観測が実現しました。日本のいぶきによる GOSAT プロジェクトの成功と TCCON の拡充により、温室効果ガスの分光リモートセンシングはますます発展しています。ここでは国内外の状況を紹介します。

世界では

日本のいぶきは、2009年1月23日に打ち上げ成 功後9年以上が経った現在も観測を継続し、これまで 8年分以上の温室効果ガス濃度データ(カラム平均濃 度データ、コラム2参照)が蓄積・公開されています。 欧州宇宙機関 (ESA) が2002~2012年に運用した Envisatに搭載されたSCIAMACHYによる2002年 3月以降の10年間のデータと合わせると、約20年に 及ぶ人工衛星による温室効果ガス濃度データを得るこ とができました。人工衛星データの精度を明らかに するためにはより精度の高い地上観測データによる検 証が必須で、地上設置の全球観測網であるTCCON による検証データが非常に重要な役割を果たしまし た。TCCONデータがなければ、衛星観測による温 室効果ガス濃度データの精度保証は達成できなかった でしょう。日本以外にも、米国のACOSチーム、オ ランダSRONとドイツKITによるチーム、ドイツの Bremen大学、イギリスのLeicester大学、韓国の延 世大学、中国のTanSatチームなどがいぶきによる観 測データを解析し、温室効果ガス濃度データを推定し ています。

いぶきの打ち上げ以後、米国のOCO-2 (2014年)

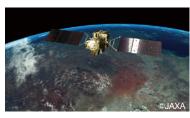
打ち上げ)、カナダの民間企業のGHGSat-D (2016年打ち上げ)、中国のTanSat (2016年打ち上げ)、FY-3D (2017年打ち上げ)、GF-5 (2018年打ち上げ)、欧州のTROPOMI / Sentinel-5P (2017年打ち上げ)と、今では7機の人工衛星で観測しています。さらに今後は、米国が国際宇宙ステーション(ISS)に観測装置OCO-3の搭載を計画しているほか、新たな人工衛星としてフランスが二酸化炭素を観測するMicroCarbを単独で、メタンを測定するMERLINをドイツと共同で開発を進めています。さらに最近では、静止衛星に観測装置を搭載する米国のGeoCARB計画も始まりました。国内外の温室効果ガス観測衛星を表1にまとめました。

このように人工衛星による温室効果ガスの分光リモートセンシングが目白押しとなっており、それに伴いこれら温室効果ガス濃度データの質を評価する地上観測データはますます重要になってきています。TCCONはますます拡充され現在25地点で運用中です(コラム4、図5参照)。図10につくばの観測地点の様子を示しました。現在、TCCONは米国、ドイツ、オーストラリア、ニュージーランド、日本、フランス、ベルギー、カナダ、韓国などの多くの国の大学や研究

機関により自主的に運営されており、最近では、フィリピン、カナダで運用が開始されました。さらに中国、イギリス、米国において、新規TCCON地点としての運用開始へ向けた準備が進められています。検証解析の精度をさらに上げるために、観測の空白地点

■表 1 温室効果ガスカラム平均濃度観測衛星一覧表 灰色:運用終了 赤色:運用中 青色:開発中 緑色:検討中

観測装置名/衛星名	国/機関名	運用期間(年)	観測する温室効果ガス
SCIAMACHY/ENVISAT	(ESA)	2002 - 2012	二酸化炭素、メタン
TANSO-FTS/GOSAT	日本	2009 -	二酸化炭素、メタン
OCO-2	米国	2014 -	二酸化炭素
GHGSat-D/CLAIRE	GHGSat (カナダ)	2016 -	二酸化炭素、メタン
CAS/TanSat	中国	2016 -	二酸化炭素
TROPOMI/Sentinel-5P	ESA	2017 -	メタン
GAS/FY-3D	中国	2017 -	二酸化炭素、メタン
GMI/GF-5	中国	2018 -	二酸化炭素、メタン
TANSO-FTS-2/GOSAT-2	日本	2018 -	二酸化炭素、メタン
OCO-3	米国	2019-	二酸化炭素
MicroCarb	フランス	2020 -	二酸化炭素
MERLIN	フランス、ドイツ	2021 -	メタン
GeoCARB	米国	2022 -	二酸化炭素、メタン
GOSAT-3	日本	2022 -	未定



■図9 GOSAT-2(愛称「いぶき2号」)

を埋めるべくさらなるTCCON観測地点の設置が期待されていますが、容易ではないため、経費が抑えられて移動が容易な机に載る可搬型FTSを用いた新たな観測網COCCONがTCCONに関わる科学者から提案され、世界中の大学や研究機関などにより20台以上の可搬型FTSを用いてその立ち上げに向けた準備が進められています。この可搬性の利点を活かしつつ人工衛星の観測装置の地上校正検証キャンペーン観測やTCCONとの相互比較、大都市、発電所、牧場、火山における温室効果ガス検出の研究が行われています。また、レーザーへテロダイン放射計などの小型の観測装置の開発も進んでいます。

人工衛星や地上装置による観測は国際的なコミュニ ティが形成され、互いに競争・協力しつつ活発な交流 が行われています。

日本では

いぶきの成功を受け、後継機であるいぶき2号がGOSATプロジェクトと同様にJAXA、環境省、国立環境研究所による共同プロジェクトとして推進され、2018年度の打ち上げを目指して準備が進められています(図9)。いぶきと同様にFTSやCAI(雲・エアロソルセンサ)が搭載されますが、いぶきで得られた知見に基づく改良が施されており、また新たに一酸化炭素、PM_{2.5}、ブラックカーボンが観測項目に加わります。いぶきによる観測データの解析は国立環境研究所以外には、千葉大学や東京大学、JAXAが熱赤外領域の観測スペクトルから温室効果ガス濃度の推定を行っています。

JAXAと佐賀大学は協力して佐賀のTCCON観測地点を運用しています。また、JAXAはCOCCONに用いる可搬型FTSを用いて、米国のカリフォルニア工科大学ジェット推進研究所や国立環境研究所と協力してキャンペーン観測を行っています。他にも名古屋大学、東京大学などが共同で、光スペクトルアナライザー(OSA)やファブリーペロー干渉計を用いた小型の観測装置により、国内外で地上から観測した温室効果ガスデータをいぶきなどの衛星観測データと比較するといった研究が行われています。

国立環境研究所では

国立環境研究所では、いぶきによる短波長赤外領域の観測スペクトルから二酸化炭素、メタン、水蒸気のカラム平均濃度を推定し、TCCONデータを用いた検証を行っています。さらに地上植生の光合成能力の指標となる太陽光誘起植物蛍光の推定も始めていま





■図10 TCCON観測地点の様子(つくばの国立環境研究所) 左:太陽光を観測室に導くための太陽追尾装置が設置されたドーム。 右:太陽光を観測するFTS。

す。いぶきデータを用いた二酸化炭素やメタンの都市 大気、森林火災など、また、相関規模の輸送による変 動などの様々な現象検出や大気輸送モデルのインバー ジョン解析による地域フラックスの推定なども行って います。いぶき2号では、二酸化炭素、メタン、水蒸気、 太陽光誘起植物蛍光に加えて一酸化炭素の推定と検証 を行う予定で、処理と検証の準備を進めています。さ らに、いぶき2号の後続機の検討をJAXAと環境省と 共同で始めています。

国立環境研究所は国内機関として最初にTCCONに加わり、つくば(茨城県)と陸別(北海道)のTCCON観測地点を運用しています。さらにいぶき2号の検証活動の一環として、オーストラリアのWollongong大学、フィリピンの地熱・風力・太陽光発電会社と協力して、2017年3月にフィリピンルソン島北部のBurgosにある風力発電所の変電所に観測装置を設置し、観測を開始しました。なお、この一部は環境省からの受託事業により行われています。このTCCONデータはすでに、いぶきやOCO-2による観測データの検証に利用されています。さらにCOCCONに用いる可搬型FTSを用いて、JAXAやKITとのキャンペーン観測や、TCCONのFTSとの相互比較などを行っています。また、国内外の他の小型観測装置の相互比較の場も提供しています。

国立環境研究所は分光リモートセンシングによる温室効果ガスの観測に関する研究を行う機関として、世界的に見ても重要な研究機関の一つとなり、アジア地域のハブとして重要な役割を果たしており、よりいっそう発展することが期待されています。

(略語解説)

(哈語牌成)
ACOS: Atmospheric CO₂ Observations from Space
COCCON: Collaborative Carbon Column Observing Network
Envisat: Environmental Satellite
FY-3D: Feng-Yun 3D
GHGSat-D: Greenhouse Gas Satellite - Demonstrator
KIT: Karlsruhe Institute of Technology
MERLIN: MEthane Remote Sensing Lldar MissioN
OCO-2: Orbiting Carbon Observatory-2
SCIAMACHY: SCanning Imaging Absorption spectroMeter for

Atmospheric CHartographY SRON: Netherlands Institute for Space Research TROPOMI: TROPOspheric Monitoring Instrument

国立環境研究所における 「温室効果ガスの分光リモートセンシングに関する研究」 のあゆみ

国立環境研究所では、運営費交付金及び外部資金により GOSAT プロジェクトと関連する研究が推進されています。 ここでは、その中から、温室効果ガスの分光リモートセンシングに関するものについて、そのあゆみを紹介します。

年度	課題名
2003~2008	分光法を用いた遠隔計測に関する研究
2004~2006	温室効果ガス観測衛星データの解析手法高度化とその利用に関する研究*1
2006~2010	GOSAT データ定常処理運用システム開発・運用*2
2006~2015	地球温暖化研究プログラム (一部) *4
2008~2018	温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)データ検証業務*3
2009~2013	分光法を用いた大気計測に関する基盤的研究
2011~2013	「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究*1
2011~2015	GOSAT データ定常処理運用システムの運用・維持改訂*2
2014~2018	分光法を用いた大気観測に関する基盤的研究
2015~2017	衛星観測温室効果ガスデータの検証・補正手法の高度化に関する研究*5
2016~2020	衛星観測に関する研究事業*2
2016~2020	低炭素研究プログラム (一部) *4

^{*1} 環境省 地球環境研究総合推進費、*2 事業予算(運営費交付金)、*3 環境省 請負及び受託、

本号で紹介した研究は、以下の機関、スタッフにより実施されました(所属は当時、敬称略、順不同)。

〈研究担当者〉

国立研究開発法人国立環境研究所:森野勇、吉田幸生、青木忠生、網代正孝、荒木光典、石澤みさ、井上元、井上誠、内野修、江口菜穂、太田芳文、大山博史、押尾晴樹、小熊宏之、Oshchepkov Sergey、亀井秋秀、河添史絵、菊地信弘、菊地信行、齊藤龍、佐伯田鶴、田中智章、Dupuy Eric、Desbiens Raphaël、Tran Thi Ngoc Trieu、中前久美、開和生、Bril Andrey、堀晃浩、Maksyutov Shamil、町田敏暢、松永恒雄、宮本祐樹、向井人史、横田達也、渡辺宏、中根英昭

国土交通省気象庁気象研究所: 永井智広、酒井哲、内山明博、山崎明宏

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構:川上修司、塩見慶

国立大学法人名古屋大学: 長濱智生

国立大学法人東京大学大気海洋研究所: 今須良一、岩崎千沙

California Institute of Technology (米国): Roehl Coleen M.、Wennberg Paul O.

Finnish Meteorological Institute (フィンランド): Heikkinen Pauli、Kivi Rigel

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (米国): Kurucz Robert

Karlsruhe Institute of Technology (ドイツ) : Blumenstock Thomas、Hase Frank、Kiel Matthäus、Rettinger Markus、 Sussman Ralf

Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, Université Paris Est Créteil et Université Paris Diderot (フランス): Tran Ha

Los Alamos National Laboratory (米国): Dubey Manvendra K.

Max Planck Institute for Biogeochemistry (ドイツ): Arnold Sabrina G.、Feist Dietrich G.

NASA Ames Research Center (米国): Iraci Laura

NASA Jet Propulsion Laboratory (米国): Toon Geoffrey C.

National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd (ニュージーランド): Pollard Dave F.、Robinson John

National Institute of Meteorological Research (韓国): GOO Tae-Young

Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (ベルギー): de Maziére Martine、Sha Mahesh K.

University of Bremen (ドイツ): Notholt Justus、Petri Christof、Warneke Thorsten

Université Pierre-et-Marie-Curie (フランス): Té Yao

University of Wollongong (オーストラリア): Deutscher Nicholas M.、Griffith David W. T.、Velazco Voltaire A.

University of Toronto (カナダ): Strong Kimberly、Mendonca Joseph、Wunch Debra

^{*4} 課題解決型研究プログラム、*5 日本学術振興会科学研究費助成事業

● 過 去 の 環 境 儀 か ら ●

これまでの環境儀から、温室効果ガス観測に関するものを紹介します。

No.62 地球環境 100 年モニタリング―波照間と落石岬での大気質監視

産業革命以降、化石燃料の使用や森林の破壊などによって、二酸化炭素だけでなく、メタンや亜酸化窒素、フロン類、オゾンなどの温室効果ガスの濃度が上昇しています。地球の温暖化を監視するため、大気中の温室効果ガス濃度を世界各地で観測する必要があります。地球環境研究センターでは、1995年から日本の南端(沖縄県波照間島)や北東端(北海道落石岬)で長期観測をしています。本号では、この温室効果ガスの長期モニタリングについて紹介しています。

No.51 旅客機を使って大気を測る 一国際線で世界をカバー

現在、日本航空(JAL)が運航する 8 機の国際線定期旅客便を使って大気中の二酸化炭素(CO_2) 濃度の全球的な観測が実施されています。このように民間の旅客機で CO_2 濃度を常時測定する計画は世界で初めてであり、地球上の CO_2 の循環を理解する上で貴重なデータが毎日のように得られています。本号では、国立環境研究所が気象研究所などと共同で行っている、国際線定期旅客便を使った温室効果ガスの観測プロジェクト(CONTRAIL プロジェクト)の取組みを中心に紹介しています。

No.41 宇宙から地球の息吹を探る 一炭素循環の解明を目指して

環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構は、共同で衛星 GOSAT (愛称「いぶき」)を打ち上げ、二酸化炭素など大気中の温室効果ガスを宇宙から観測しています。本号では、国立環境研究所が GOSAT プロジェクトにどのように貢献してきたかを紹介しています。

No.10 オゾン層変動の機構解明 一宇宙から探る 地球の大気を探る

宇宙から地球環境を観測するため、1996年に日本独自の地球観測プラットフォーム技術衛星 (ADEOS) が打ち上げられ、「みどり」と命名されました。国立環境研究所では、北極や南極付近の成層圏を対象とした「衛星観測プロジェクト」に参加し、ADEOS に搭載する改良型大気周縁赤外分光計 ILAS の開発を行うとともに、成層圏オゾン層の変動の研究に取り組んできました。本号では、衛星観測によるオゾン層の研究から得られたオゾン層の破壊についての最新の知見を紹介しています。

環境機 No.69 —国立環境研究所の研究情報誌—

2018年6月29日発行

編 集 国立環境研究所編集分科会

(担当 WG:横畠徳太、森野勇、吉田幸生、岡寺智大、藤井実、岩崎一弘、広兼克憲)

発 行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒 305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

問合せ先 国立環境研究所情報企画室 pub@nies.go.jp 編集協力 有限会社サイテック・コミュニケーションズ

印刷製本 株式会社イセブ

無断転載を禁じます

環 境 儀 既 刊 紹 の 介

No.23 2007年 1月	地球規模の海洋汚染ー観測と実態	No.46 2012年10月	ナノ粒子・ナノマテリアルの生体への影響―分子サイズにまで小さくなった超微小粒子と生体との反応
No.24	21世紀の廃棄物最終処分場一高規格最終処分システムの研究	No.47	化学物質の形から毒性を予測する一計算化学に
2007年 4月		2013年 1月	よるアプローチ
No.25	環境知覚研究の勧め一好ましい環境をめざして	No.48	環境スペシメンバンキングー環境の今を封じ込め
2007年 7月		2013年 4月	未来に伝えるバトンリレー
No.26 2007年10月	成層圏オゾン層の行方一 3 次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	No.49 2013年 7月	東日本大震災一環境研究者はいかに取り組むか
No.27	アレルギー性疾患への環境化学物質の影響	No.50	環境多媒体モデル―大気・水・土壌をめぐる有害
2008年 1月		2013年10月	化学物質の可視化
No.28	森の息づかいを測る一森林生態系の CO ₂ フラックス観測研究	No.51	旅客機を使って大気を測る一国際線で世界をカ
2008年 4月		2014年 1月	バー
No.29	ライダーネットワークの展開―東アジア地域のエ	No.52	アオコの有毒物質を探る―構造解析と分析法の
2008年 7月	アロゾルの挙動解明を目指して	2014年 4月	開発
No.30	河川生態系への人為的影響に関する評価―より	No.53	サンゴ礁の過去・現在・未来一環境変化との関わりから保全へ
2008年10月	よい流域環境を未来に残す	2014年 6月	
No.31	有害廃棄物の処理―アスベスト、PCB 処理の一	No.54	環境と人々の健康との関わりを探る一環境疫学
2009年 1月	翼を担う分析研究	2014年 9月	
No.32	熱中症の原因を探る一救急搬送データから見る	No.55	未来につながる都市であるために一資源とエネ
2009年 4月	その実態と将来予測	2014年12月	ルギーを有効利用するしくみ
No.33	越境大気汚染の日本への影響―光化学オキシダント増加の謎	No.56	大気環境中の化学物質の健康リスク評価―実験
2009年 7月		2015年 3月	研究を環境行政につなげる
No.34	セイリング型洋上風力発電システム構想―海を旅	No.57	使用済み電気製品の国際資源循環一日本とアジアで目指す E-waste の適正管理
2010年 3月	するウィンドファーム	2015年 6月	
No.35	環境負荷を低減する産業・生活排水の処理システム	No.58	被災地の環境再生をめざして一放射性物質による
2010年 1月	〜低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化〜	2015年 9月	環境汚染からの回復研究
No.36	日本低炭素社会シナリオ研究― 2050 年温室効	No.59	未来に続く健康を守るために一環境化学物質の
2010年 4月	果ガス 70%削減への道筋	2015年12月	継世代影響とエビジェネティクス
No.37	科学の目で見る生物多様性一空の目とミクロの目	No.60	災害からの復興が未来の環境創造につながるまちづく
2010年 7月		2016年 3月	りを目指して一福島発の社会システムイノベーション
No.38	バイオアッセイによって環境をはかる一持続可能	No.61	「適応」で拓く新時代!一気候変動による影響に備える
2010年10月	な生態系を目指して	2016年 6月	
No.39	「シリカ欠損仮説」と海域生態系の変質―フェリー	No.62	地球環境 100 年モニタリング一波照間と落石岬での大気質監視
2011年 1月	を利用してそれらの因果関係を探る	2016年 9月	
No.40	VOC と地球環境一大気中揮発性有機化合物の	No.63	「世界の屋根」から地球温暖化を探る一青海・
2011年 3月	実態解明を目指して	2016年12月	チベット草原の炭素収支
No.41 2011年 7月	宇宙から地球の息吹を探る一炭素循環の解明を目指して	No.64 2017年 3月	PM _{2.5} の観測とシミュレーション一天気予報のように信頼できる予測を目指して
No.42	環境研究 for Asia/in Asia/with Asia 一持続可能なアジアに向けて	No.65	化学物質の正確なヒト健康への影響評価を目指
2011年 10月		2017年 6月	して一新しい発達神経毒性試験法の開発
No.43	藻類の系統保存―微細藻類と絶滅が危惧される	No.66	土壌は温暖化を加速するのか?—アジアの森林
2012年 1月	藻類	2017年 9月	土壌が握る膨大な炭素の将来
No.44 2012年 4月	試験管内生命で環境汚染を視る一環境毒性の in vitro バイオアッセイ	No.67 2017年 12月	遺伝子から植物のストレスにせまる―オゾンに対する植物の応答機構の解明
No.45	干潟の生き物のはたらきを探る一浅海域の環境	No.68	スモッグの正体を追いかける一 VOC からエアロ
2012年 7月	変動が生物に及ぼす影響	2018年 3月	ゾルまで

●環境儀のバックナンバーは、国立環境研究所のホームページでご覧になれます。 http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html

「環境儀」



地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、「環境 儀』という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、わ れわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、 それを明確に指し示すしるべとしたいという意図が込められていま す。『環境儀』に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研 究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月 合志 陽一 (環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字 N.I.E.Sで構成されています。N=波(大気と水)、 |=木(生命)、ESで構成される○で地球(世界)を表現しています。ロゴマーク全体が風を切って左側に進もうとする動きは、研究所の躍動性・ 進歩・向上・発展を表現しています。

