



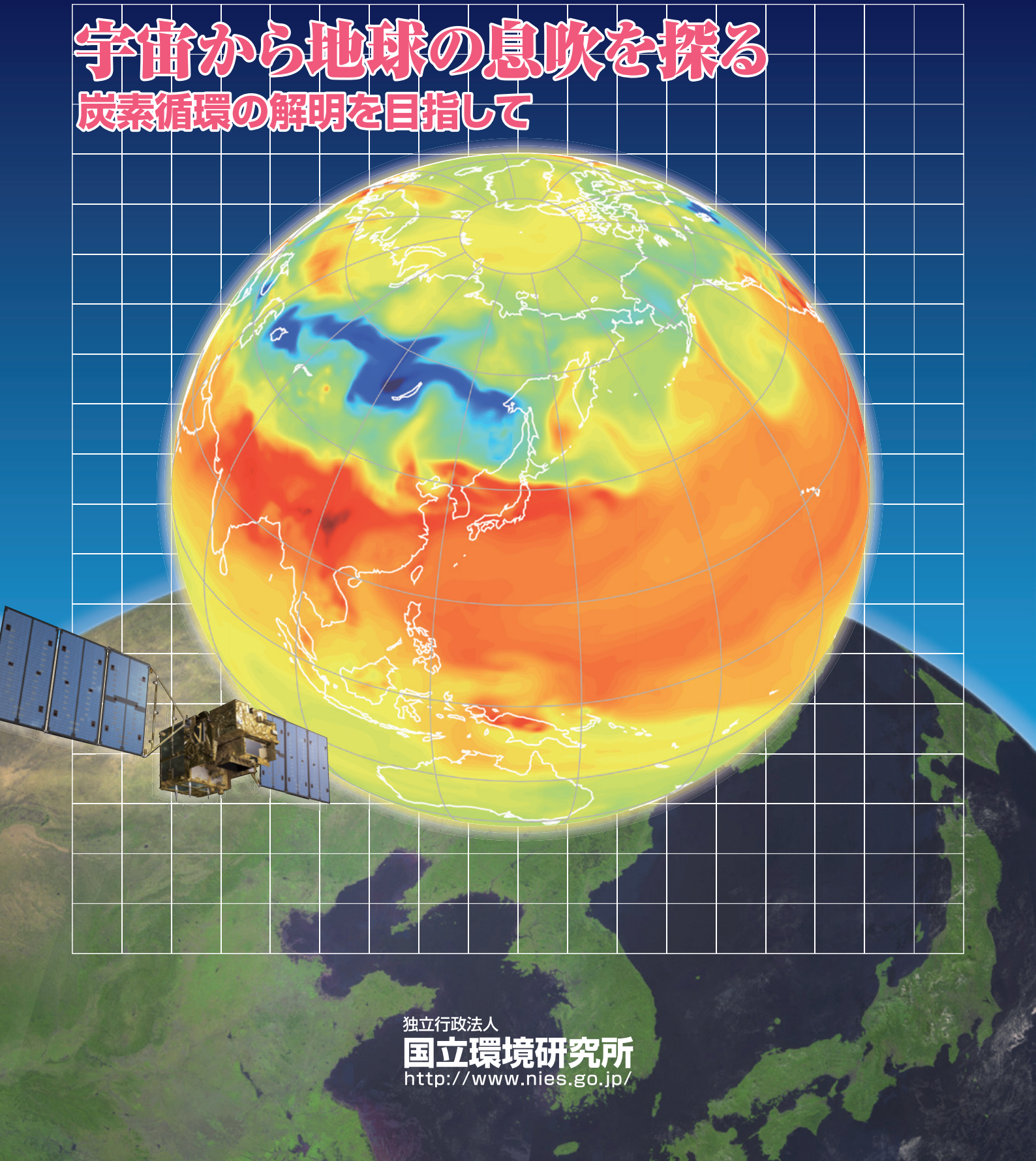
NIES RESEARCH BOOKLET

環境儀

No. 41 JULY 2011

国立環境研究所の研究情報誌


宇宙から地球の息吹を探る
炭素循環の解明を目指して



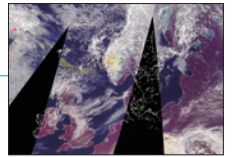
独立行政法人

国立環境研究所

<http://www.nies.go.jp/>

A photograph of two middle-aged men in business suits standing in front of a large globe. The man on the left has grey hair and glasses, wearing a dark pinstriped suit and a patterned tie. The man on the right has dark hair and glasses, wearing a light grey suit and a blue tie, with his arms crossed. The globe behind them shows a grid of green and blue squares over a map of the world.

われわれのミッションは、大気科学や炭素循環の研究に役立ててもら
温室効果ガスに関する質の高いデータを国内外の研究者の方々に
提供するとともに、自らも活用して研究を進めることです。



GOSATプロジェクトとは、環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の三者が共同して、人工衛星を使って宇宙から地球上の主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの濃度を5年以上にわたって観測するという壮大な計画です。

GOSATはGreenhouse gases Observing SATellite（温室効果ガス観測技術衛星）の略で、愛称は「いぶき」です。2009年1月23日にJAXA種子島宇宙センターから打ち上げられ、約100分かけて地球を一周し、3日間で地球全体を観測して、収集したデータを地球上に送っています。人工衛星を使った温室効果ガスのデータ収集を目指したミッションは、欧州やアメリカでも計画されていますが、衛星はまだ打ち上げられていません。したがって、現時点ではGOSATが温室効果ガスを主目的として観測している世界でただ1つの人工衛星です。

GOSATが送り続ける膨大なデータを国立環境研究所とJAXAが協力して解析し地球上の二酸化炭素やメタンのカラム平均濃度などのプロダクトを公表しています。また、GOSATデータを利用した地球上の二酸化炭素の月別吸収・排出量分布がまさに出されようとしています。今号では、このプロジェクトを担当されているGOSATプロジェクトリーダーの横田達也さんと、GOSATプロジェクトサブリーダーのシャミル・マクシュートフさんにお話をうかがいました。

C O N T E N T S



宇宙から地球の息吹を探る
炭素循環の解明を目指して

- Interview
研究者に聞く!!..... p4 ~ 9
- Summary
二酸化炭素の全球の吸収・排出量を地域ごとに推定するための研究..... p10 ~ 11
- 研究をめぐって
衛星からの
温室効果ガスの観測 p12 ~ 13
- 「国立環境研究所 GOSAT プロジェクト」に関する
研究と事業のあゆみ p14

●本研究に関する成果の一部は以下のURLで紹介されています。

<http://www.gosat.nies.go.jp/>

<http://www.cger.nies.go.jp/climate/pj2.html>

<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/wise/j/J06B0002000.htm>

●表紙：

中央は衛星と地上観測データを用いて求めた二酸化炭素濃度の全球分布の例。下方背景にある地図画像は、「雲・エアロソルセンサ」データによるアジア域の雲無し（レベル3）画像

えるように、

Interview 研究者に聞く!!

2009年1月に温室効果ガスを測定する観測技術衛星「GOSAT」が打ち上げられました。「GOSAT」は打ち上げ後、すでに2年以上になり、順調に温室効果ガスの観測データを送り続けています。このプロジェクトに携わっておられる国立環境研究所GOSATプロジェクトリーダー横田達也さんと、サブリーダーのシャミル・マクシュートフさんにお話をうかがいました。



横田達也 / 地球環境研究センター GOSATプロジェクトリーダー

地球上の温室効果ガスを 宇宙から計測

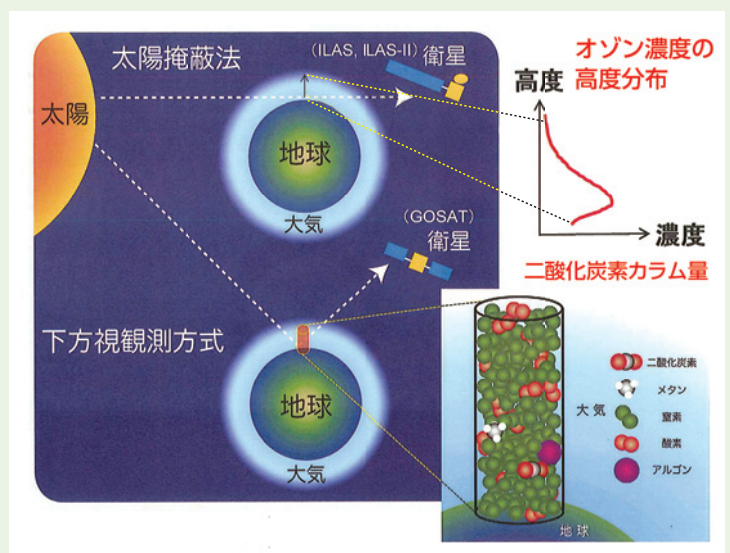
1: 環境省、国立環境研究所、JAXAの三者の協力関係が功を奏す

Q: 最初に、お二方のこれまでの研究歴からお話をうかがいたいと思います。

横田: 私はこの3月31日で環境研究所に30年間いることとなります。大学院の頃からリモートセンシングを専門にしており、最近の20年以上は人工衛星のデータ処理に関与し、このGOSATのプロジェクトが3回目の衛星観測プロジェクトにあたります。最初の2つは、当時の地球環境問題であったオゾン層の破壊を監視するための日本で初めての衛星センサILASとILAS-IIです。残念ながらいずれも計画では3年動くはずのものが8カ月で止まってしまいました。今回のGOSATは3度目の正直というか、打ち上がってから2年以上、今も元気に動いています。

また、これらの衛星のデータ処理手法には共通する点があります。非線形最小二乗法といって、大気の衛星観測プロセスを計算機の中に高精度にシミュレーションして、測ったデータの状況に合わせて解くという手法を用いるのですが、違いは信号の強さにあります。オゾン層を測るセンサは大気をかすめて届く太陽の直達光を測るので非常に信号が強いのですが、GOSATは地球からはね返って来る光を受けるので弱い。ですからノイズとの戦いという意味では、今のGOSATは、届く光の信号が弱いため難しさがあります。また、オゾン観測センサでは気体の成層圏での高度分布を出せるのですが、GOSATでは「カラム量」(地表面付近の濃度を含む地球表面から大気の上端までの気体の積算量)しか測れません。それから、オゾン層観測センサのデータ処理手法は、欧米の既存センサを手本にできたのですが、このGOSATプロジェクトは世界とも横並

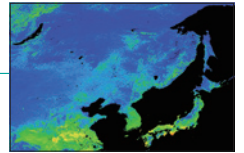
日本のオゾン層観測センサILASとILAS-IIでは、太陽を光源として、大気をかすめる方向に観測をしました。これを「太陽掩蔽法(たいようえんぺいほう)」と呼びます。これによってオゾン濃度の高度分布が得られます。一方GOSATでは、「下方視観測方式」により、地球表面で反射された太陽光を測ります。これにより、地表面に近い対流圏にある温室効果ガス濃度に感度があります。ただし、使用する波長帯の関係から、求められるのは「カラム量」(地表面から大気の上端までの仮想的な空気柱(カラム)の中にある分子量)です。



■図1 衛星による大気の観測方式(ILASとGOSAT)の比較



シャミル・マクシュートフ / 地球環境研究センター GOSATプロジェクト サブリーダー



びで協力し競争しているものですから、研究は最先端、最前線でしたので難しさがありました。

マクシュートフ: 私が環境研に来たのは20年前でした。その時は大気化学シミュレーションモデルを研究する目的で、オゾンや大気汚染物質が対象でしたが、環境研や環境省では温室効果ガス研究にフォーカスを移そうという動きの中で、我々もそれに力を入れるようになりました。初めは地上モニタリングやシベリアでの航空機観測を行い、そのデータの解析とモデルのシミュレーションがメインの仕事でした。取得したデータからどのように地表面でガスの吸収や排出がなされるかを推定するモデルです。モデル開発を進めながら、データも蓄積され、推定がうまく行くようになったのは大体10年前です。私は2000年から5年ほど一時的に環境研の外に出て、JAMSTECとNASDAの共同プロジェクト「フロンティア」に参加しました。そこに東北大学の中澤先生をリーダーとする温室効果ガスグループができ、そのグループの中で、濃度の観測データから吸収・排出量を推定するという研究を進めました。その研究との繋がりから実際にGOSATで同様のモデルを開発する必要が出てきて、私はまた環境研に戻りました。

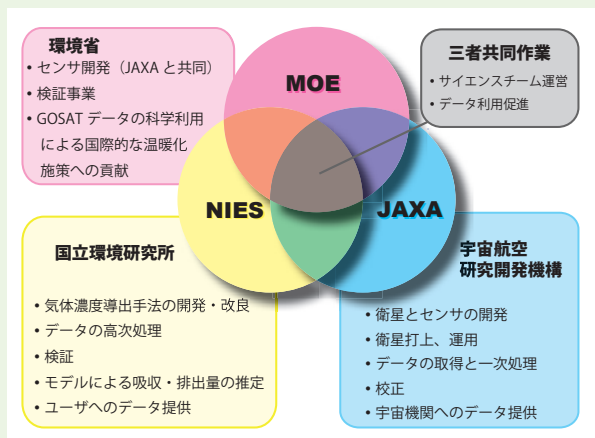
横田: 補足をさせていただくと、このGOSATプロジェクトは環境省・JAXA・私どもの三者の共同プロジェクトですが、従来の衛星とは違って気体の濃度データを出すことだけが目的ではない。そのデータを吸収・排出量の推定モデルに利用することも目的の1つです。そのアウトプットを環境研から出すために、所定の手続きの後にマクシュートフさんにフロンティアから環境研に来ていただいたという経緯があります。

Q: 三者の枠組みについて、どこがどんな役割で仕事を進めているかお話しください。

横田: これまでJAXAが衛星を打ち上げ、ユーザーがデータを使うという構造だったのですが、宇宙開発委員会からの要請もあって、データの利用機関にもセンサの設計の段階から入り、三者が一緒になってスタートしました。JAXAは人工衛星、センサ、それからデータの一次処理をします。我々はそのデータを頂いて、二酸化炭素(CO₂)やメタンの濃度情報にコンピュータで変える。これがプロジェクトの1番目の目的です。さらにその衛星観測データと地上で測ったデータとを併せて、モデル解析担当のマクシュートフさん達のグループがCO₂の吸収と排出に関する精度の高い情報を出す。これが2番目の目的ですね。環境省は、サイエンス面での成果を通じて、国際施策の場におけるプレゼンスや日本の温暖化対策に関する姿勢を示すことになる。ところで、このような衛星観測プロジェクトに日本政府の環境省が分担者として入っているというのは、国際的には非常に珍しいことなのです。プロジェクトの発足時点で、京都議定書の第1約束期間である2008年から2012年に合わせた観測を目指しました。実際には当初目標から半年ほど遅れて2009年1月に打ち上がりました。この遅れも、私が経験したプロジェクトの中では非常に短いです。京都議定書の第1約束期間を目指してJAXAも懸命に準備を進めてくださり、当初目標と同一年度内に打ち上がりました。

Q: そうするとセンサの設計とか、どんなスペックじゃないといけないとか、環境研の貢献は大きいと思いますが、実際にどのように貢献されたのでしょうか。

横田: プロジェクトの立ち上げ段階では、センサをまずどのような波長範囲で、どのように測ろうかということにシミュレーションを用いて検討しました。これは住明正先生(東大)を中心とするGOSATプロジェクトの開始に関する検討委員会のワーキンググループ作業として実施したことです。それから、メーカーがセンサの製作に入り、そのデータ確認会や検討会の場に私どもやサイエンスチームの研究者もオブザーバとして参加させていただき、いろんな質問や指摘を出すことがで



■図2 GOSATプロジェクトを推進する三者の役割

GOSATプロジェクトは、環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構の三者により、それぞれ図に示されるような役割分担をもって相互の協力のもとに推進されています。

きました。センサの開発・製作というのは、コストと時間と性能とのバランスの中で進められますから、ユーザーとして譲歩できる点とどうしても性能を確保してほしい点について意見を出し、実際に考慮していただいたこともあります。例えば、雲やエアロゾル観測のためのセンサの仕様決定には、サイエンスチームの有識者からの声が生かされました。研究者にとっても事前にセンサの特徴（良い点、不十分な点）について把握できる利点があります。このように、利用側の研究者と開発側のJAXAやセンサ製作者が要所で確認をしながらセンサの製作を実現できたこと、これも非常に良かった点だと思います。

Q: 三者のプロジェクトであるという点でご苦労されたことはないですか。

横田: 科学者、研究者はセンサの性能は良ければ良いほどいいんです。でも作る側は時間の制約、お金の制約、それから技術力の制約などがあって、最低限の性能が満たされればそこでセンサの製作を完了し、性能試験を打ち切りたいと要望されます。そのあたりで関係者間の調整が大変でした。宇宙に行った後では装置の特性はわからなくなるから、いろんな性能試験を実施しておいてほしいと要望したのですが、JAXAや環境省は、打ち上げ期日を守るかどうかにも主眼があるわけですね。そうすると、試験も必要最小限にして打ち上げようとする。我々の要望を知っているセンサメーカーやJAXAの現場の担当者の方々は、種子島でも試験を続けてくださっていたようです。

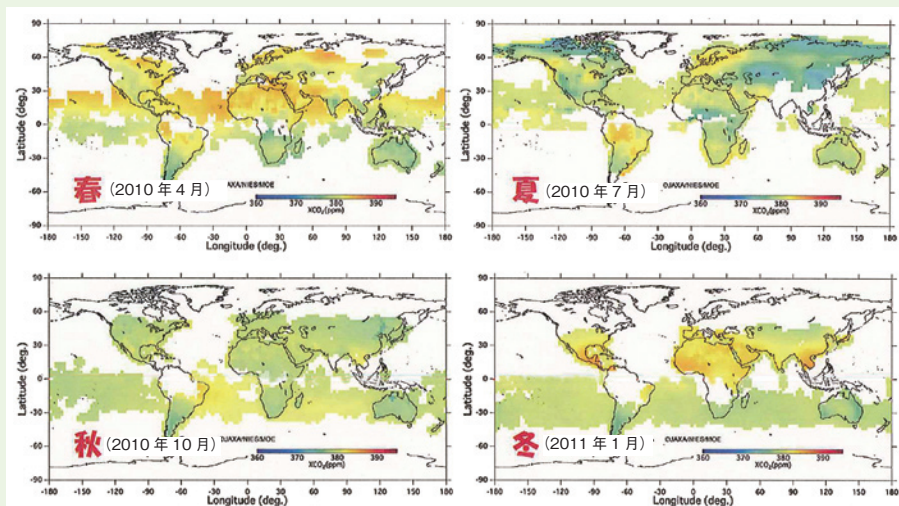
2: CO₂の吸収・排出量分布や地球上のCO₂の三次元分布を推定



2009年1月23日 GOSAT打ち上げ

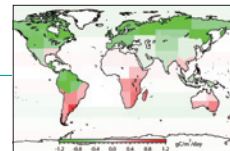
Q: 打ち上げから現在まで、どんな経過を辿り、今のへんまで来たかという、全般的なことをお話しください。

横田: まず、観測し解析した濃度データの公表時期には、打ち上げ前から目標が置かれていました。打ち上がって1年後には測定したCO₂、メタンの濃度を公表する、これは今まで地上では地球をくまなく測られていなかったもので、それらのデータを提供するためです。公表までに1年をいただいたのですが、実際は手法の調整には不十分でした。我々の処理で濃度データがきちんと出されるには、JAXAの作成する輝度スペクトルがしっかりしていないとうまくいきません。これを校正（キャリブレーション）というのですが、初期校正は打ち上げ3カ月後の4月に完了したものの、その後も精密な校正作業が進められました。つまり、スペクトルデータや装置の特性を表す関数が少しずつ変化する。ですから我々の処理手法もなかなか定まらない。さらに処理してみてもはじめて手法の改良が必要な事象にぶつかる。一方で打ち上げ1年後にはデータを出さなくてはならない。地域によってはいくつか問題点は残っていましたが、グローバルにはこれまでのサイエ



■ 図3 CO₂カラム濃度の四季の変化

GOSATに搭載されている「温室効果ガス観測センサ」からは、晴天域のCO₂のカラム平均濃度（カラム中の乾燥空気に対するCO₂分子の体積比率）が観測されます。図は、月別に観測データの空間補間により求められたマップを四季で比較したものです。北半球の夏から秋の高緯度において、植物による光合成によって低濃度が観測されることがわかります。



©国立環境研究所

ンスの知見と整合しているような結果が得られましたので、2010年2月18日に初めてCO₂とメタンの全球の濃度データを公開しました。そこには、事前のシミュレーションで誤差が生じるかもしれないと予想されたように、サハラ砂漠の付近で高濃度のCO₂が目立ったのです。砂漠には主だったCO₂の発生源はありません。しかし、砂漠からの砂塵が空高くに舞い上がると、その砂塵で観測する光が多重散乱され、見かけ上たくさんのCO₂があるかのように推定されるのです。それにうまく対処する改良版の処理手法の完成には、もう3～4ヵ月かかりました。そして、改良版による処理結果を2010年8月に公開しました。現在はその版で公開を続けていますが、公開の約束期日を守ることとデータ質をより高めることとのバランスが難しい点です。

Q: そうすると今は、全地球表面についてそういった濃度分布がだんだんとわかってきているという状況ですか。

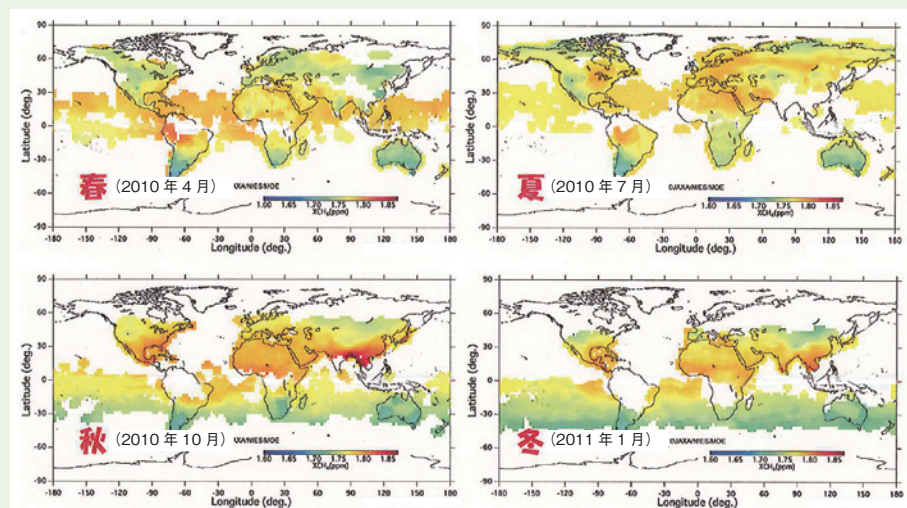
横田: 一応2年間程度のデータは蓄積してきているのですが、まだ2つ問題に直面しています。1つは衛星からのデータによる濃度の時間変化、地域変化はある程度出されているのですが、測定されたカラム濃度デー

タが地上で測った値よりも常に低めにしている点です。「負のバイアス」と呼んでいます、その原因を追求し、負のバイアスがなくなるように処理の手法を改良する必要があります。もう1つは、雲などの影響で濃度値を出せない領域が多くある点です。データのふるい分け（スクリーニング）の手法や処理手法を精密にしていくことによって、今まで出されていなかった領域についても場合によってはCO₂やメタン濃度を出せるようになるかもしれません。これらの点も改良していきたい。

Q: エルニーニョとかラニーニャの影響で、2年間といってもデータがかなり変化している可能性があると思うのですが、そのあたりはいかがでしょうか。

横田: GOSATは5年間の観測が目標ですが、衛星の軌道と姿勢制御は10年以上可能ですので、実際には5年以上測れると期待しています。打ち上がった2009年はエルニーニョの年でした。これは2010年の3月ぐらいいまで続き、その後ラニーニャに移っています。この間の濃度のコントラストは大きいはずですが、GOSATのデータでも、2009年と2010年でCO₂濃度が同じ月と比べて大きく増加しているのが見えています。また、メタンは世界的にはこれまで何年か横ばいでしたが、2007年ぐらいいからまた濃度が上がり始めたことが知られています。研究者達はその原因を追求していますので、「いぶき」のデータがその科学的な解釈のヒントを与えられれば良いな、と思っています。それにはもっとデータの質を高めなければなりません。今年度中には処理手法をさらに改良する計画で研究とプロジェクトを進めています。

Q: 温暖化施策への貢献という政策的な観点もありますので、結構苦勞されたところでしょうね。



■図4 メタンカラム濃度の四季の変化

「温室効果ガス観測センサ」からは、同様に晴天域のメタンのカラム平均濃度が観測されます。図は、メタンのマップを四季で比較したものです。メタンは排出源の多い北半球が年間を通して南半球よりも高濃度であることがわかります。

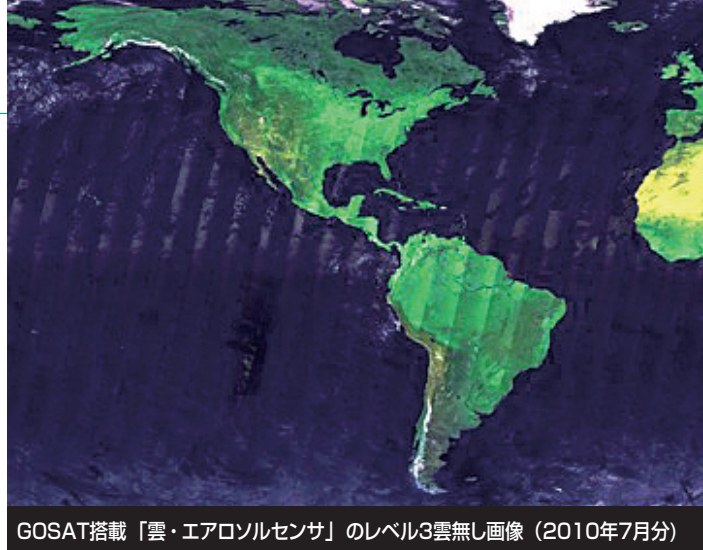
横田: そうですね。温暖化施策への貢献はできるかどうか、まだこれからのことですが、これらに関与できたというのは、我々研究者にとっては良かった面もありました。COP15(第15回気候変動枠組条約締約国会議)での展示などを通して、新興国やアフリカ、東南アジアの方々がどのような要望を持っているかという生の声を聞くことができました。ただ、CO₂やメタンはあまり測ってほしくないという国もあるようですね。つまり、我々の研究成果は必ずしも歓迎されない場合もあり、難しいテーマなのだなと思いました。

Q: GOSATのデータが出てきたところで、今そのデータを使って、どのようなことをされていますか。

マクシュートフ: 逆計算モデルを用いて、地域別のCO₂の吸収と排出に関するデータプロダクトを作成する作業を進めています。これには、いろいろな苦労もあります。例えば、今のGOSATのCO₂濃度データには負のバイアスもありますし、バラツキも大きいので、それを用いて吸収量を求めた結果には、衛星データの取り込み方によって、誤差が出ます。そのため、どの程度衛星データをふるい分けすれば良いかなどの調整が必要で、現在はそれを行っているところです。観測データだけに問題があるのではなく、我々の大気輸送モデルにも少し誤差があります。このような問題を解決しながら、我々のチームが研究と開発を頑張っているところです。

Q: 逆計算のためのモデルというのは、もともとマクシュートフさんが研究されていたものですか。それともこのGOSATのために新たに開発されたものですか。

マクシュートフ: 他の研究で開発されたモデルですが、GOSATのためにいろいろと改良しています。例えば、以前の研究では地上観測を対象としていたので成層圏での結果が間違っていたとしても大きい影響が



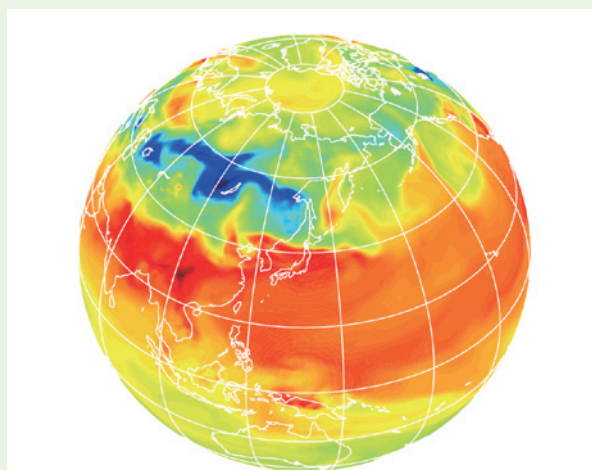
ありませんでした。今回は、カラム量を測っているので、成層圏のこともきちんと考慮しなくてはなりません。ところが成層圏の濃度変化はその下の対流圏よりも動きが遅れています。CO₂の場合、成層圏の濃度は対流圏濃度から5年ほど遅れています。対流圏では毎年2ppmくらい増えているので成層圏の方が約9ppm低くなります。そういう事実にはちゃんと調整しなければモデルが整合できない。メタンはもっと難しい。CO₂は9ppm程度低いのに対して、メタンは成層圏で半分の濃度になってしまう。今まで気にならなかったことが、モデルの世界では初めてぶつかる問題であるということがあります。

また、この3月に、我々の大気輸送モデルに最新の研究成果を取り入れることで、より微細な空間構造をシミュレーションできるようになりました。この手法を全球スケールで行ったのは、たぶん我々のグループが世界で初めてだと思います。

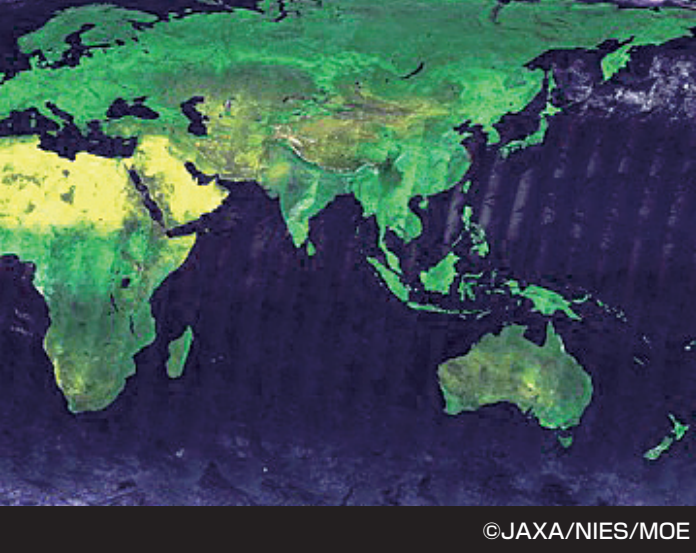
Q: どのくらい細かく見ることができるようになったのですか。

マクシュートフ: 例えば気象予報でしたら、日本だけであれば、もう1キロとか2キロの細かさで計算できるのですが、全球ではそれは難しい。普通の全球モデルでは250kmくらいの計算点の格子(グリッド)にな

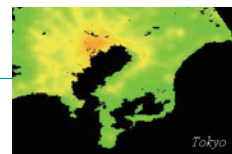
気象庁予報システムの風向・風速データを基に国立環境研究所の大気輸送モデルを用いてシミュレートした大気中のCO₂の全球分布(2008年7月の例)。CO₂濃度は、火力発電所や土壌からの放出、森林や海洋による吸収、風による輸送の総合結果として得られます。北半球の夏には、西ヨーロッパからの空気の流れに対して光合成が活発なシベリア域でのCO₂濃度は低くなっています。



■図5 大気輸送モデルを用いてシミュレートした大気中のCO₂の全球分布(2008年7月)



©JAXA/NIES/MOE



ていたのが、GOSATの観測データが入ることで正しくなる。これが皆が期待していた衛星観測の効果の1つだと思います。

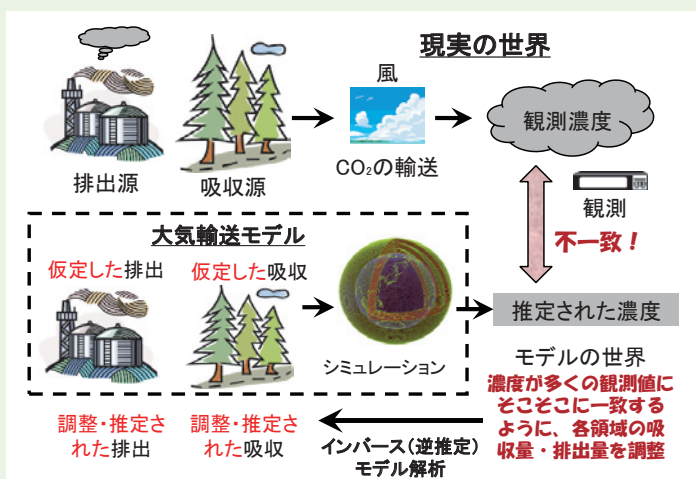
横田：GOSATはなかなか熱帯まで濃度データが出ていないのですが、熱帯とはいえ、いつも雲に覆われているわけではなく、乾季雨季がはっきりしていますので、晴れているところの観測データをきちんと解析すれば、少ないけれども得られるデータはある。これはとても貴重なデータになります。また、私見ですが、GOSATプロジェクトには2つの側面があると思います。1つは科学の側面、もう1つは環境教育、つまり啓発の側面です。地球上で、どのようにCO₂やメタン濃度が変化しているかを実際に測って、それを視覚的に「見える化」することによって、誰でも認識しやすくなる。実際の変化の状況が視覚的に把握できるようになる。つまり啓蒙啓発、環境教育に役に立つと言えます。GOSATは炭素循環や地球温暖化の将来予測への貢献を目指した衛星観測の第一歩です。ですから、まず地球でこれまで測られていない地域を測る。そのデータを用いて、マクシュートフさんのグループや世界のモデル解析グループが吸収・排出量の推定結果を出す。このように、GOSATのデータや今後の類似の衛星センサによるデータを取り入れて、精度が高められた地域別の吸収・排出量の結果が独立に出されれば、将来予測の精度が上がることになります。将来予測の精度が上がれば、政策決定者達は、どこのレベルで温室効果ガスの排出を規制するべきかなどの判断がしやすくなります。つまり、よりわかりやすいデータ、より確実なデータが、将来の温暖化の防止に繋がる判断の1つの材料として用いられる。GOSATがその第一歩になってもらえればと思っています。

Q：今後のご活躍を期待しています。

りますが、我々のモデルは0.5度から1度、およそ50kmから100kmの細かさをもっています。

Q：最後に、この研究が今の地球温暖化の問題に対してどんな形で貢献するかということについてお話しください。

マクシュートフ：この研究が生まれた原点には、国ごとの吸収量を知りたいという目的がありました。例えば森林管理のデータを使ってどの国がどれくらい吸収しているかを知るといった方法もあるし、森林の情報がたくさんあるので、どれくらいバイオマスを得たかということから計算して、国は今後、年に5億トン排出できるのか、あるいは年2億トン排出することができるなどといったことを推定できます。他には、タワー観測で、直接フラックスを計って、この国はこのくらい排出することができるということもできます。しかし問題はもととなっているデータの推定値にバラツキがあるということです。それをどう解決すればいいか。このような議論の際にGOSATのデータを取り入れれば、モデルは良くなるのではないかという話が10年前の論文に出ていました。例えば、大きな問題の1つに熱帯辺りにはあまり観測データがないため、そこでモデルがあいまいな部分はそのようなデータのない場所で全部調整してしまう。全体の吸収量を積算してみてもちょっと足りなかったら、観測データのないところで調整してしまいたいし



■図6 インバース(逆推定)モデル解析

大気輸送モデルは、現実の濃度変化の世界をコンピュータを使った数値計算によってシミュレーションするためのものです。その推定濃度が観測濃度に近くなるように地域的なCO₂の吸収と排出の量(フラックス)を調整することにより、地球上の広い領域でのフラックスがより正しく推定されます。観測できるのは「濃度」です。このように、総合的な結果として生じている濃度の観測値から、その要因であるフラックスを推定することを、「インバース(逆推定)モデル解析」とよびます。観測値を広い範囲で密に偏り無く、高頻度で取得できるほどフラックスの推定精度が上がります。

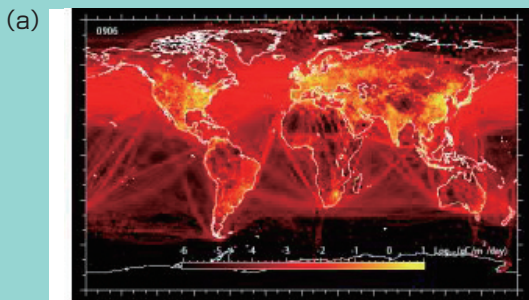
二酸化炭素の全球の吸収・排出量

国立環境研究所で行われている炭素循環に関する研究は、これまで航空機や船舶、地上観測設備を用いて得られた温室効果ガス観測データを利用して進められてきました。近年、観測データの質の向上や、人工衛星GOSATからのデータの蓄積にともない、コンピュータシミュレーションによりCO₂の全地球表面における吸収・排出量を地域ごとに分けて推定することが可能になってきました。

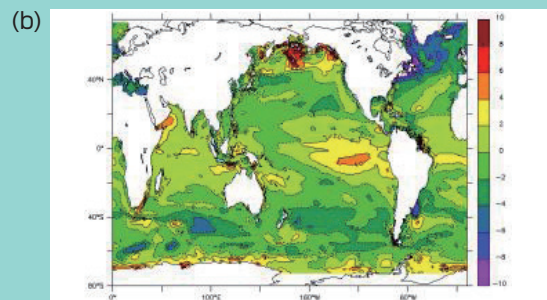
地域別の吸収・排出量をコンピュータシミュレーションにより推定する研究に関心が集まるようになった理由の1つに、陸上の植生によって貯蔵される炭素量の変動に対する知見の乏しさがあります。森林や農耕地に蓄えられる炭素量を広域にわたって求めるための地上測定システムの確立は非常に困難ですので、広大な地域における炭素量の変動は森林面積などの統計情報をもとに評価されています。当然、これらのデータの精度は限られたものですし、京都議定書に定められるような温室効果ガス排出量削減の国家的責務の議論に資するには、既存の調査データだけではまだまだ不十分です。そのため、京都議定書の採択を機に、国別では無理であるとしても、陸域植生と大気との間や、地球表面の大半を占める海洋と大気との間のCO₂の交換量を全球規模でより効率的に求める手段として、インバース（逆推定）モデル解析法が関心を集めることとなりました。この手法では、まず陸域植生や海洋の炭素循環モデルが予測する地表面のCO₂吸収・放出量のデータや化石燃料の消費による人為的排出量データを

もとに、大気輸送モデルを用いてCO₂濃度を全球にわたって計算し、次にこのシミュレーション濃度が地上に分布する測定点での観測濃度に最も近くなるように、全球濃度シミュレーションで使用した吸収・排出量データを調節（最適化）します。このように最適化された吸収・排出量データがインバースモデル解析によるCO₂の吸収・排出量の推定値となります。この手法によって、北米中緯度域やアフリカ乾燥域といったような全球の亜大陸規模の地域におけるCO₂の吸収・排出量が推定されるようになります。

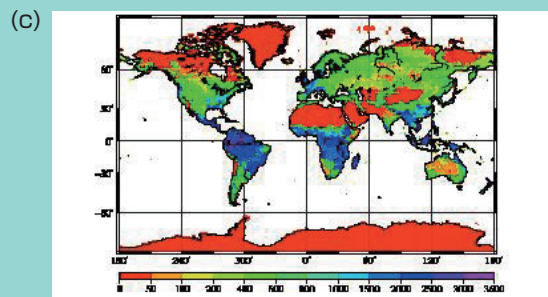
しかし、この手法に関わる研究者らは、これまで主に2つの問題を抱えてきました。1つは吸収・排出量の最適化に必要な測定データを提供する地上測定点の数の少なさと地理的な偏りです。地上測定点では大気試料のフラスコサンプリングや現場での連続測定によってCO₂濃度の観測が行われていますが、全球で100点余りの観測所のほとんどは米国やヨーロッパなどの先進国に集中していて、現在に至ってもアフリカ、アジア、南米などは地上測定の空白域となっています。このため、インバースモデル解析によって推定されるこれらの地域におけるCO₂の吸収・排出量には大きな不確実性が伴っていました。そこで各国の宇宙機関では、地上測定網の隙間を埋め、観測データ数の飛躍的な増加を図るために、人工衛星により温室効果ガスを観測するプロジェクトが発足し、2009年には日本のGOSATが打ち上げられました。GOSATによるCO₂の全球濃度分布データは、地上測定データと併せて用いられることにより、



(a) ODIAC：夜間の地球表面の光量と火力発電所のデータベースに基づく化石燃料の消費によるCO₂の人為的排出量データ

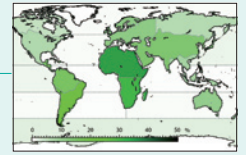


(b) 海洋炭素循環モデルシステムOTTMによって予測された大気-海洋間のCO₂吸収・放出量データ



(c) 陸域植生モデルVISITによる陸上の植生-大気間の吸収・放出量データ

- (a)化石燃料の消費によるCO₂の主な排出源は、火力発電所、自動車、一般家庭です。人口密集度は宇宙から観測される夜間の光量から推定されます。
- (b)海洋に接する大気中のCO₂は海水に溶解、海流によって運ばれます。概観として高緯度(低温)では吸収源となり、熱帯(高温)では海洋生物の活動の影響も受け排出源となっています。
- (c)陸上の植物は大気中のCO₂を吸収し、バイオマスを生産します。一方、落葉や倒木の土壌での分解はCO₂を排出します。陸域生態系でのバイオマスサイクルの速さは、植生のタイプと気候に依存しています。陸域植生モデルVISITは光合成やその他のプロセスを模擬し、陸上の植生-大気間の吸収・放出量を推定します。



を地域ごとに推定するための研究

インバースモデル解析による地域別吸収・排出量推定の精度向上に大きく貢献すると期待されています。

2つ目の問題は、大気輸送モデルによるCO₂濃度の全球シミュレーションの精度に関わる事柄です。大気輸送モデルによる大気中濃度の再現性の良し悪しは、大気中での物質輸送の計算法の妥当性と、計算に用いる地表面での吸収・排出量データの正しさに依存します。例えば国立環境研究所の大気輸送モデルでは、都市周辺での複雑な大気輸送のプロセスや、5、6年を要する成層圏での大気の混合プロセスを精度良く再現するために、大掛かりな改善が施されました。また、これら大気輸送プロセスに関する問題とは別に、CO₂濃度の全球シミュレーションの精度向上には、シミュレーションで使用される陸域植生や海洋のCO₂吸収・放出量のデータおよび人為的排出量データの精度の向上が重要です。これまでは年々の変動や、中には季節変化も考慮されていないデータが使用されていたため、全球の濃度シミュレーションには限界がありました。大気輸送モデルがCO₂の吸収・排出源の空間的分布(陸域の植生の広がりや人為的排出源などの地理的分布)と吸収・排出量の時間変化を適切に反映したものとなるように、陸域植生の炭素循環モデル、海洋の炭素循環モデル、人為起源排出量データのそれぞれを高精度化する必要がありました。

陸域植生の呼吸と光合成により、大気中のCO₂濃度は季節変化し、北半球では冬季と真夏の差が20 ppmを超える場所もあります。全球規模でのこの変動幅と変化の位相を陸域植生の炭素循環モデルで再現するために、国立環境研究所では高分解能陸域植生モデルVISITを開発し、さらにこのモデルが扱う植生活動に関する主要なパラメータを森林バイオマス量などの地上測定データをもとに最適化するシステムを構築し、

陸域植生による吸収・放出量のデータの精度の向上を図りました。

これまでは、海洋-大気間のCO₂の吸収・放出量データとして、船舶によるCO₂の観測データをもとに作成された気候学的なデータが国際的な研究者コミュニティで使用されていましたが、国立環境研究所では、海洋輸送・生物地球化学モデルシステムOTTMを開発し、海流の変動やエルニーニョ・サイクルによる影響などによって引き起こされる海洋-大気間の吸収・放出量の変化を準リアルタイムでシミュレーション計算をすることが可能となりました。

化石燃料の消費によるCO₂の人為的排出量の世界的な分布は、国別の年間合計値として公表されていますが、各国の領土における排出量の詳細な分布はほとんど公表されていません。このため、世界中の発電所のデータベースCARMAと、人間活動の規模の指標となる衛星観測による全球の高精度夜間光データから、月ごとの変化を考慮した人為的排出量データODIACを世界に先駆けて作成しました。

国立環境研究所GOSATプロジェクトでは、これらの高精度化された吸収・排出量データと、地上測定値にGOSATによるCO₂濃度の全球分布を加えたデータを用いて、64の垂大陸地域における月ごとの吸収・排出量を推定し、これをGOSATレベル4プロダクトとして研究者や一般利用者に提供することにしています。

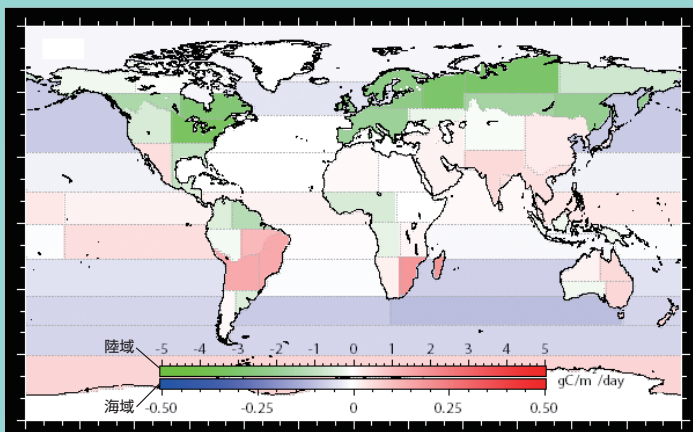
(略語解説)

VISIT : Vegetation Integrative Simulator for Trace Gases.(例 : <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFMGC23C0917I>)

OTTM : Ocean Tracer Transport Model.(<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2010/20101105/20101105.pdf>)

CARMA : Carbon Monitoring for Action. (<http://carma.org/>)

ODIAC : Open source Data Inventory of Anthropogenic CO₂ emission. (<http://www.atmos-chem-phys.org/11/543/2011/acp-11-543-2011.pdf>)

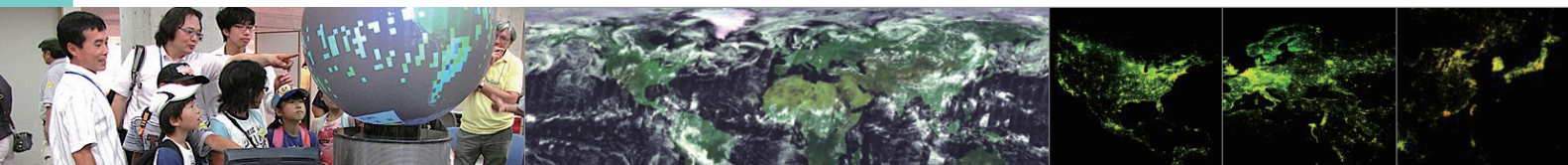


■図8 地上観測データとGOSATデータを用いて推定されるCO₂の地域別吸収・排出量の例(2009年7月の予備結果)。なお、陸域と海域では色による吸収・排出量の目盛りが異なることに注意を要する。北半球では光合成が活発なため、CO₂を吸収している

Summaryに示されるようなインバース(逆推定)モデル解析法により、地上観測データやGOSATの観測データを用いて、CO₂の全球の吸収・排出量が月別に推定されます。熱帯域やアフリカ、南米などは地上観測網の空白域ですが、GOSATの観測によって、これらの地域のCO₂濃度データが得られることにより、インバースモデル解析による地表面CO₂吸収・排出量の推定精度が向上します。

衛星からの温室

温室効果ガスの衛星観測データ処理手法の研究と、そのデータを利用した
ここでは、研究の動向や国内外の研究者・技術者グループとの連携（協力



■世界では

宇宙から温室効果ガス濃度の全球分布を測定したいという機運が高まったのは、1990年代後半から2000年にかけてです。1997年12月に締結された京都議定書で先進諸国の温室効果ガスの削減目標が定められたことを受け、世界の先進諸国が客観的なデータを取得するために温室効果ガスの全球分布を衛星から測りたいと考えました。欧州ではフランスの研究所を中心にして、CARBOSAT計画が2001年に欧州宇宙連合（ESA）に提案されましたが、内部の研究者グループによる綿密な検討の結果、科学的に十分な精度での測定は不可能との判断に至り、2003年5月に提案を取り下げました。米国では2001年頃に二酸化炭素観測衛星（OCO）計画が米国航空宇宙局（NASA）に提案されました。日本ではGOSATの計画が2002年に検討され、2003年から立ち上がったのです。日本が踏み切ったことを受けてか、米国ではOCO計画の優先度が上がり、衛星の開発計画が実現しました。その後は、2008年の打ち上げを目指して日米の競争が始まりました。宇宙機関どうしでは、どちらが先に打ち上げられるかという意識もあったようです。二転三転して、最終的に「いぶき」は2009年1月に、OCOは2009年2月に打ち上げられましたが、残念ながらOCOの打ち上げは失敗に終わり、日米両衛星での同時期の観測は実現しませんでした。

世界の研究者グループでは「宇宙からの温室効果ガス観測に関する国際ワークショップ（International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space: IWGGMS）を年に1回開催し、国際的な研究者や技術者の間での情報交換が始まりました。第1回は2004年に東京で、その後、米国2005年、日本2006年、フランス2007年、米国2008年、日本2010年、英国2011年と開催され、参加発表を行う研究者は100名を越えています。

温室効果ガス観測の衛星開発という点で日米から一

歩遅れた欧州は、Envisat衛星搭載のSCIAMACHY センサからCO₂やメタンの濃度分布の導出を試み成果を出しました。フランスを中心としたCARBOSATの計画は小型のMicroCarbに引き継がれ、新たな提案がなされています。また、ドイツを中心として、複数の衛星によるCarbonSat計画も進められています。いずれも2018年頃以降の打上を目指しています。

米国では、2013年2月までの打ち上げを目指して、OCO-2の開発を急いでいます。装置は完成し、本年夏にはその特性を測定するための熱真空試験を実施しています。

さらにその先の計画として、レーザ光を用いるライダーを衛星に搭載して温室効果ガスを測ろうという研究と開発が、世界の様々な機関で進められています。

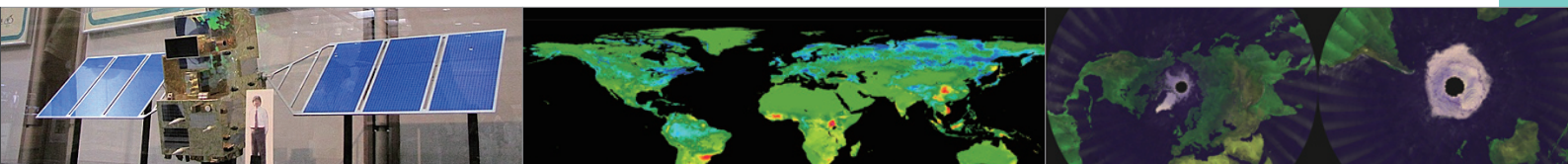
■日本では

2011年現在、「いぶき」は温室効果ガスの観測を主目的とした世界で唯一の衛星です。2009年6月から観測データを取り続けています。目標とする観測運用期間は5年ですから、少なくとも2014年までは観測データを取り続けるでしょう。これは、世界の研究者にとって貴重なデータです。プロジェクトを推進する環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構では、これまで3回にわたって世界に向けて研究公募を行い、100件以上の提案課題を採択しました。その目的は、このGOSATの貴重な観測データを世界の研究者に利用してもらい、校正・検証・手法改良の研究成果を通じてデータ質をより高め、より多くの科学研究利用の成果を得るためです。その課題代表者会議を2009年・東京、2010年・京都、2011年・英国エディンバラで開催しました。

また、地域別のCO₂吸収・排出量を推定するための大気輸送モデルの開発も、国立環境研究所だけでなく、気象庁、気象研究所、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、東北大学、東京大学・大気海洋研究所（AORI）、産業技術総合研究所など、日本の各機関で進められていま

効果ガスの観測

CO₂の吸収・排出量の推定研究は、世界最先端の研究の1つです。
と競争)、そしてGOSATプロジェクトの推進体制を簡単に紹介します。



す。GOSATプロジェクトでは、これらに關与する専門家の方々のご意見やご助言を受けてプロジェクトを進めています。

■国立環境研究所では

地球環境研究センターにおいて、研究と事業推進の二本柱でGOSATプロジェクトを進めています。2004年4月にGOSATチームはヴァーチャルチームとして発足しました。そこでは、地球環境研究総合推進費B-02課題を中心に、GOSATプロジェクトのための準備研究を進めました。GOSATチームは2006年度から正規の研究室となり、9月には地球環境研究センターに国環研GOSATプロジェクトオフィスが設置されました。プロジェクトオフィスの主要なミッションは、GOSATデータの定常処理運用システムの開発と運用ですが、さらに2007年度から検証チームが加わり、2008年度からはGOSATプロジェクトのWebサイトを開設・運用し、情報発

信を行っています。2009年1月のGOSATの打ち上げ成功とその後のデータプロダクト公開などを経て、2011年度からは、地球環境研究センターの衛星観測研究室、物質循環モデリング・解析研究室、国環研GOSATプロジェクトオフィスにおいて、観測データの定常処理運用、アルゴリズム開発・改訂、検証、モデル利用研究などを進めています。

なお、国環研GOSATプロジェクトに携わる研究者・技術者は、それぞれの分野で国内外の研究者・技術者コミュニティとの連携を図りながら研究と事業を進めています。例えば、データ処理手法の研究分野では、放射伝達の計算比較の国際グループを共同で推進し、大気輸送モデルの研究分野では、世界のTranscom3グループの一員としてデータサーバの管理や情報の交換を行っています。

今後もGOSATのデータや研究成果を世界に発信していきたいと、関係者一同プロジェクトに取り組んでいます。



第3回 GOSAT研究公募代表者会議 (2011.5.19-20 英国エディンバラ)

「国立環境研究所GOSATプロジェクト」に関する研究と事業のあゆみ

国立環境研究所では、研究開発と事業推進の両輪によって GOSAT プロジェクトを進めています。ここでは 2003 年度以降の研究と事業について、そのあゆみを紹介します。

課題名 衛星観測データを活用した温室効果ガス吸収・排出量の推定精度に関する予備的研究 (2003年度)*1

課題名 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 (2004-2006年度)*1

課題名 東アジアの温室効果ガス収支推定のための大気多成分観測データの診断モデル解析 (2006-2008年度)*2

課題名 衛星利用による二酸化炭素等の観測と全球炭素収支分布の推定 (2006-2010年度)*3

事業名 GOSATデータ定常処理運用システム開発・運用(2006-2010年度)*4

課題名 GOSAT/CAIを利用したエアロゾルと雲情報の抽出に関する研究(2006年度-)*4
【東京大学気候システム研究センター(現大気海洋研究所)、東海大学、近畿大学、千葉大学、山口大学、国立環境研究所による共同研究】

課題名 大量ジョブの効率的な処理方法に関する研究(2006年度-)*4
【東京大学情報基盤センターと国立環境研究所による共同研究】

事業名 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)データ検証業務(2008-2010年度)*5

課題名 Towards constructing a consistent dataset of atmospheric CO₂ concentrations from the new generation of satellite instruments to improve estimated of carbon sources and sinks (2008-2010年)*3
【英国Leicester大学,英国Edinburgh大学、国立環境研究所による共同研究】

課題名 Development and application of a software to estimate carbon dioxide and methane sources and sinks from the GOSAT observations, and initial validation of the GOSAT-FTS data products (2010-2011年)*3
【フランスLSCEと国立環境研究所による共同研究】

課題名 「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)*1

課題名 地球温暖化研究プログラム(一部)(2011-2015年度)*3

*1 環境省地球環境総合推進費、*2 環境省地球環境保全試験研究費(地球一括計上)、*3 重点プログラム予算、*4 事業予算(運営費交付金)、*5 環境省請負(国庫債務負担行為)

これらの研究・事業は以下のスタッフ組織によって実施されています(所属は当時、敬称略)

<研究・事業担当者>

地球環境研究センター……………青木忠生、荒木光典、井上元、井上誠、内野修、江口菜穂、太田芳文、大西領、小熊宏之、小田知宏、Sergey Oshchepkov、Nikolay Kadyrov、Claire Carouge、河添史絵、菊地信弘、菊地信行、金 憲淑、古山祐治、齊藤誠、齊藤龍、佐伯田鶴、笹野泰弘、高木宏志、田中智章、田中ゆき、Raphaël Desbiens、中塚由美子、中前久美、Manish Naja、Vinu Valsala、開和生、Andrey Bril、Dmitry Belikov、Anna Peregon、Shamil Maksyutov、町田敏暢、松永恒雄、宮本祐樹、森野勇、山野博哉、横田達也、横田康弘、吉田幸生、渡辺宏

大気圏環境研究領域……………日暮明子、中根英昭、中島英彰

<共同研究機関>

国土交通省気象庁気象研究所、京都大学、近畿大学、筑波大学、東海大学、東北大学、名古屋大学、山口大学、千葉大学環境リモートセンシング研究センター、東京大学気候システム研究センター(大気海洋研究所)、東京大学情報基盤センター、名古屋大学太陽地球環境研究所、独立行政法人宇宙航空研究開発機構、独立行政法人海洋研究開発機構、独立行政法人産業技術総合研究所、Laboratoire des Sciences du Climat et de l' Environnement (LSCE) (仏)、University of Edinburgh (英)、University of Leicester (英)

● 過去の環境儀から ●

これまでの環境儀から、地球温暖化に関連するものをいくつか紹介します。

No.20 地球環境保全に向けた国際合意をめざして

国際政治学や国際法学に基づく環境政策研究は、現実の国際社会における合意形成ときわめて密接な関係を持っています。本号では、「2013年以降の地球温暖化対策促進に向けた国際合意のための方法に関する研究プロジェクト」の「地球温暖化対策」における将来枠組みのあり方や具体的なオプション、国際交渉の場で議論される環境政策の比較分析研究などについてお伝えします。

No.19 最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」

スーパーコンピュータを用いて、地球全体の大気・海洋の変化を計算する「気候モデル」は、最新鋭の気候変化の予測手段として脚光を浴びる存在です。未来を予見する研究プロジェクトの動向をお伝えします。

No.10 オゾン層変動の機構解明 宇宙から探る 地球の大気を探る

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、ADEOSに搭載する改良型大気周縁赤外分光計（ILAS:Improved Limb Atmospheric Spectrometer）の開発段階から参加し、成層圏オゾン層の変動に関連した研究に取り組んでいます。本号では、「オゾン層とその機構解明」の最新の研究から得られた新しい知見を紹介します。

No.2 地球温暖化の影響と対策 AIM アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル

国立環境研究所では、地球温暖化の影響・対策研究に取り組んでいます。本号ではアジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル（AIM）を取り上げ、アジアと共に研究する姿を紹介いたします。

環境儀 No.41

—国立環境研究所の研究情報誌—

2011年7月31日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当 WG: 遠嶋康徳、横田達也、Shamil Maksyutov、増井利彦、
吉田幸生、森 保文、滝村朗)

発行 独立行政法人 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 (出版物の入手) 国立環境研究所情報企画室 029 (850) 2343

(出版物の内容) // 企画部広報室 029 (850) 2310

環境儀は国立環境研究所のホームページでもご覧になれます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

編集協力 財団法人日本宇宙フォーラム

〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-2-1 新大手町ビル 7階

無断転載を禁じます

リサイクル適性の表示：紙へリサイクル可

本冊子は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料「Aランク」のみを用いて作製しています。

「環境儀」既刊の紹介

No.1	環境中の「ホルモン様化学物質」の生殖・発生影響に関する研究	2001年 7月
No.2	地球温暖化の影響と対策— AIM: アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル	2001年 10月
No.3	干潟・浅海域—生物による水質浄化に関する研究	2002年 1月
No.4	熱帯林—持続可能な森林管理をめざして	2002年 4月
No.5	VOC—揮発性有機化合物による都市大気汚染	2002年 7月
No.6	海の呼吸—北太平洋海洋表層のCO ₂ 吸収に関する研究	2002年 10月
No.7	バイオ・エコエンジニアリング—開発途上国の水環境改善をめざして	2003年 1月
No.8	黄砂研究最前線—科学的観測手法で黄砂の流れを遡る	2003年 4月
No.9	湖沼のエコシステム—持続可能な利用と保全をめざして	2003年 7月
No.10	オゾン層変動の機構解明—宇宙から探る 地球の大気を探る	2003年 10月
No.11	持続可能な交通への道—環境負荷の少ない乗り物の普及をめざして	2004年 1月
No.12	東アジアの広域大気汚染—国境を越える酸性雨	2004年 4月
No.13	難分解性溶存有機物—湖沼環境研究の新展開	2004年 7月
No.14	マテリアルフロー分析—モノの流れから循環型社会・経済を考える	2004年 10月
No.15	干潟の生態系—その機能評価と類型化	2005年 1月
No.16	長江流域で検証する「流域圏環境管理」のあり方	2005年 4月
No.17	有機スズと生殖異常—海産巻貝に及ぼす内分泌かく乱化学物質の影響	2005年 7月
No.18	外来生物による生物多様性への影響を探る	2005年 10月
No.19	最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」	2006年 1月
No.20	地球環境保全に向けた国際合意をめざして—温暖化対策における社会科学的アプローチ	2006年 4月
No.21	中国の都市大気汚染と健康影響	2006年 7月
No.22	微小粒子の健康影響—アレルギーと循環機能	2006年 10月
No.23	地球規模の海洋汚染—観測と実態	2007年 1月
No.24	21世紀の廃棄物最終処分場—高規格最終処分システムの研究	2007年 4月
No.25	環境知覚研究の勧め—好ましい環境をめざして	2007年 7月
No.26	成層圏オゾン層の行方—3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	2007年 10月
No.27	アレルギー性疾患への環境化学物質の影響	2008年 1月
No.28	森の息づかいを測る—森林生態系のCO ₂ フラックス観測研究	2008年 4月
No.29	ライダーネットワークの展開—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して	2008年 7月
No.30	河川生態系への人為的影響に関する評価—よりよい流域環境を未来に残す	2008年 10月
No.31	有害廃棄物の処理—アスベスト、PCB処理の一翼を担う分析研究	2009年 1月
No.32	熱中症の原因を探る—救急搬送データから見るその実態と将来予測	2009年 4月
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	2009年 7月
No.34	セイリング型洋上風力発電システム構想—海を旅するウィンドファーム	2010年 3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—低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化—	2010年 1月
No.36	日本低炭素社会シナリオ研究—2050年温室効果ガス70%削減への道筋	2010年 4月
No.37	科学の目で見える生物多様性—空の目とミクロの目	2010年 7月
No.38	バイオアッセイによって環境をはかる—持続可能な生態系を目指して	2010年 10月
No.39	「シリカ欠損仮説」と海域生態系の変質—フェリーを利用してそれらの因果関係を探る	2011年 1月
No.40	VOCと地球環境—大気中揮発性有機化合物の実態解明を目指して	2011年 3月

「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べし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)、I=木(生命)、E=S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むようにする動きは、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。