

# フーリエ変換型赤外分光器による衛星からの温室効果ガス計測

今 須 良 一

## Satellite Measurement of Greenhouse Gases with Fourier Transform Spectrometer

Ryoichi IMASU

Fourier transform spectrometer (FTS) is a type of the spectrometer most popularly used as satellite sensors for measuring atmospheric gaseous components of the earth. This interpretive article describes the principle of this type of spectrometer, methods of atmospheric observation from satellite, and retrieval analysis method of the data. After presenting a historical review of the sensors, an example of observational data obtained by a satellite sensor which was recently launched for global measurement of greenhouse gases is introduced.

**Key words:** Fourier transform spectrometer (FTS), greenhouse gas, satellite measurement

成層圏オゾン層の破壊や温暖化といった地球規模での環境問題は、フロンや二酸化炭素など、人間活動に伴って大気中に大量に放出された物質が原因である。これらの物質が環境に与える影響を正確に把握するためには、その物質自体の大気中濃度と併せ、関連する光化学反応に関与する物質の濃度を同時に知ることがその第一歩となる。そのため的手段として人工衛星による観測は最も有力なものであり、紫外線からマイクロ波に至る幅広い種類の電磁波を用いた観測装置が利用されている。その中で、対流圏（地表から高度10数kmまでの範囲）における温室効果ガスの観測には、おもに赤外分光器が用いられており、その多くがフーリエ変換型赤外分光器である。以下、装置の原理、それを用いた大気観測手法、およびデータ解析手法について解説し、最新の観測事例を紹介する。

### 1. 分光器原理

フーリエ変換赤外型分光器（以下、フーリエ変換型分光器と略す）は、光の干渉効果を利用した分光器であり、フーリエ干渉型分光器ともよばれる。校正用装置や光導入

部を含む観測装置全体の概念図を図1に示す。分光器の干渉計部は、基本的に透過率50%のビームスプリッター、固定鏡、可動鏡の3つのパーツで構成される。測定対象となる光は、まずビームスプリッターに導入され、そこを透過して可動鏡に向かう光と、反射して固定鏡に向かう光とに分けられる。固定鏡で反射された光は再度ビームスプリッターに戻り、その半分が透過し、半分が反射されて装置外に出る。可動鏡についても同様である。このうち、固定鏡で反射されビームスプリッターを透過した光と、可動鏡で反射されビームスプリッターでも反射された光とは合成され、結像鏡で光検出部に導入される。このとき、2つの光が干渉を起こす。ビームスプリッターから可動鏡と固定鏡までの距離が同じ場合には、これらの光は強め合う。この状態から可動鏡を少し動かすと、2つの光の位相がわずかにずれ、その強度は弱まる。ある波長の光のみを考えた場合、その波長の半分の長さだけ可動鏡を移動した状態では位相がちょうど180度ずれるため、打ち消し合って信号はゼロになる。さらに可動鏡を動かし、ずれが1波長分の長さになると光は再び強め合う。可動鏡を連続的に動か

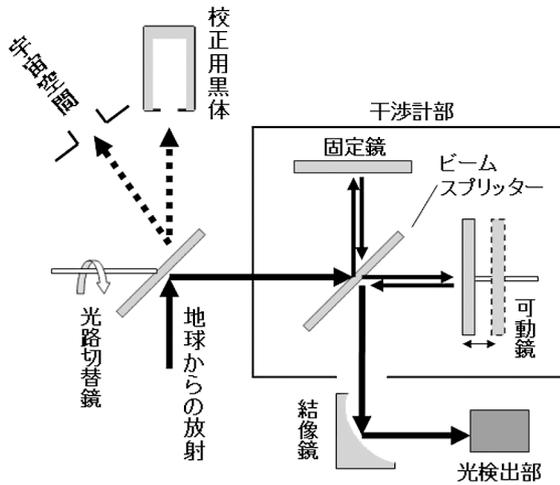


図1 フーリエ変換型分光器を用いた地球大気観測用装置全体の概念図。

した場合、ある波長の光のみを考えると、鏡の移動距離に対してサインカーブを描く強度変化が測定される。このサインカーブの周期は光の波長ごとに異なるため、それぞれの光の強弱の位置は異なり、これらをすべて合成して得られる受信信号は複雑な形となる。ただし、固定鏡と可動鏡までの距離が同じ（光路差ゼロの）位置においては、すべての波長の光の位相が揃っているため、最も強い信号となる（そのピークをセンターバーストともよぶ）。可動鏡移動に伴うこれら一連の操作で得られる信号はインターフェログラムとよばれ、それを生み出す光の作用がフーリエ変換と同等であることから、この装置をフーリエ変換型分光器とよぶ。

この分光器で直接得られる信号はインターフェログラムであるが、われわれが知りたいのは元の光の波長ごとの強度（スペクトル）である。それを得るには、数値化されたインターフェログラムに、知りたい波長の光を同じ位相で掛け、光路差軸上で積分すればよい。この操作を波長ごとに行うことでスペクトルが得られるが、その操作は数学的には逆フーリエ変換を行うことと同等である。

分光測定の場合にその性能を特徴づけるものとして、測定の波長分解能と波長範囲がある。フーリエ変換型の分光装置の場合、波長よりも波数を用いた表記が一般的であるため、ここでは波数（単位は  $\text{cm}^{-1}$ ）で表記する。まず、波数分解能であるが、それを規定しているものは可動鏡の最大移動距離（最大光路差）であり、一般的に分解能  $\Delta\nu$  は  $1/(\text{最大光路差})$  で表される。例えば、移動距離が  $1\text{ cm}$  で光路差が  $2.0\text{ cm}$  となる場合、 $\Delta\nu = 0.5\text{ cm}^{-1}$  となる。一方、波数範囲は、インターフェログラムを記録するときのサンプリング間隔により規定される。これは、ある波数の

波（光）の情報を記録するため最低限必要なサンプリング間隔が決まっており（サンプリング定理）、この間隔が短ければ短いほど、より高波数の波まで記録できるからである。

このようなフーリエ変換型分光器がプリズムやグレーティングといった他の分光方式と比べて有利とされる点は、光の利用効率にある。グレーティングなどを用いて分光された光を検出するには、分散された光の波長方向に検出器を移動しなければならないが、その間、測定されていない光は捕り逃すことになる。その点、フーリエ変換型分光器では、ビームスプリッターを通して入射光側に戻る光を除けば、原理的に入射光すべてが検出器上に集められるため、同じ測定時間で得られる信号の S/N 比を向上させることができる。また、利用目的に応じて波数分解能を変えたい場合、それが可動鏡の移動距離の変更のみで行える点は非常に便利であり、同時に広い波数範囲の測定ができる広帯域性も利点のひとつである。もっとも、最近では一次元や二次元のアレイ素子を用いて分散された光を同時に検出する技術が導入されてきたため、可動部のないグレーティング方式も見直されつつある。

## 2. 人工衛星からの大気観測

地球大気成分気体濃度を測定する場合、1) 電子状態の遷移に伴う紫外線の吸収を利用する方法、2) 分子の振動・回転に伴う赤外線吸収・射出を利用する方法、3) マイクロ波領域に現れる分子の純回転に伴う射出を測定する方法、の3つの方法がある。このうち、紫外線を用いる方法では、測定できる気体がオゾンや二酸化硫黄など一部の気体に限られる。また、太陽光を光源とするため、昼間の観測しか行えない。一方、マイクロ波を用いる観測では、陸面から放出されるマイクロ波の周波数依存性が不確定なため、データ解析がきわめて難しくなる。その点、赤外線を用いる方法では、昼夜、海陸を問わず観測が行え、限られた波数帯域の中にも非常に多くの気体分子の情報が含まれていることから、温室効果ガスの観測に最も適している。

このような赤外線を用いた大気観測の方法は、図2に示した4つの方法に分類することができる。まず①は、太陽を光源として大気を透かして見たときの赤外線の吸収量から気体の濃度を求める方法で、掩蔽観測とよばれる。この場合、大気自身から放出される赤外線に比べて、太陽からの赤外線のほうがはるかに強いので、その吸収量のみから気体濃度を求める解析が可能となる。ただし、観測を行えるのは光源となる太陽の方向のみであるため、衛星から

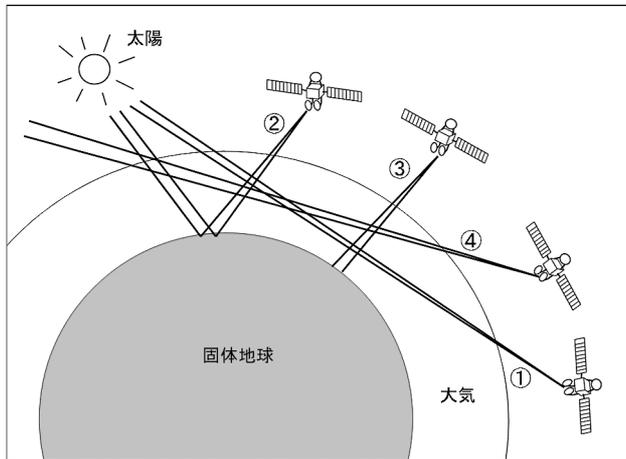


図2 衛星搭載センサーによる地球大気観測の概念図。

見た日の出、日没のときに透かして見ることでできる大気の部分だけである。②は、太陽を直接見るのではなく、地面や海面で散乱された赤外線を利用するため、場所の制約が緩和され、より広い範囲の観測が可能となる。ただし、太陽を直接見る場合と比べ赤外線強度が弱いので、測定精度の面で不利になる。しかし、波長 $3\mu\text{m}$ 付近までは大気自身から射出される赤外線は無視できることから、データ解析は①と同じで吸収のみを考慮すればよい。波長が $4\mu\text{m}$ よりも長くなると、太陽からの赤外線の散乱光よりも大気や地表などが射出する赤外線のほうが強くなるため、③のように地球に向けた任意の方向の観測が可能になる。この場合、地面や海面と大気との温度とがあまり変わらないことから、地面などからの赤外線が大気で吸収されて衛星まで到達する量と、大気自身から射出される量とを併せて考慮しなければならず、データ解析の方法は非常に複雑になる。これら②と③の方法は、一般に下方視観測とよばれる。地面からの影響を考慮しなくてもすむよう、④の方法では大気のみを横から透かして見る。この方法は大気の周縁観測とよばれる。一般に、①と④のように大気を横から透かして見る観測方法では、視野を絞ることで鉛直分解能を上げることができる。しかし、水平分解能は $300\sim 500\text{ km}$ と非常に粗くなる欠点がある。また、視野内に雲が入る確率が高くなり、大気下層の観測には向かない。そのため、これら2つの方法はおもに高度十数 $\text{km}$ から $50\text{ km}$ 付近の成層圏の観測に用いられる。一方、②と③の下方視観測では、視野を絞ることで水平方向の空間分解能を上げることができる。しかし、鉛直方向には情報が重なり、特に②の方法では通常は吸収気体の鉛直積分量(カラム量)しか得られない。ただし、③の方法では波長ごとの吸収強度の違いを利用して、気体の鉛直濃度分布を得ることができる。その解析方法については

次章で述べる。

### 3. データ解析

実験室で気体分析に用いるフーリエ変換型の分光器の場合、光源のみを測定したときの信号強度と試料気体を光路上に配置したときの信号強度の比から光の吸収量を求め、気体濃度を求めている。しかし、衛星観測では大気中の気体の有無を設定できないため、データ解析には特別な方法が必要となる。以下、データ解析の流れ、赤外線の絶対強度を求める校正手法、そして求められたスペクトルから大気中の気体濃度を求めるデータ解析手法について説明する。

#### 3.1 データ解析の流れ

図3に、観測データの解析のフロー図を示す。まず、数秒かけてある1地点についてインターフェログラムが電気信号として得られる。そのインターフェログラムについて、絶対校正の処理を経て地球大気放射(赤外線)のスペクトル強度が得られる。このスペクトルをもとに観測地点上空の気温や気体濃度の鉛直分布を求める。この解析の方法をリトリバル解析とよぶ。衛星はセンサーの向く方向を変えながら移動するため、その軌道に沿って観測データが次々と得られていく。それらすべての点についてリトリバル解析で得られた情報を合わせると、気体濃度などの三次元分布を得ることができる。最近では、集められた情報を単に合成するだけでなく、物質輸送に関する数値モデルを用いた計算結果と融合させることで、より尤もらしい分布データを得るという、いわゆるデータ同化手法が発達してきている。

#### 3.2 絶対校正

電気信号として得られる1つのインターフェログラムをもとに逆フーリエ変換によって得られるスペクトルは、相対値でしかない。これを放射輝度、あるいは等価黒体温度という絶対値にするためには、温度のわかっている最低2つのターゲットのスペクトルと比較する必要がある。ときに、その非線形性も補正するために3つのターゲットを用いる場合もある。人工衛星に搭載された分光器の場合、通常は常温付近の温度に設定された校正用黒体と、放射の放出がない宇宙空間の2つをターゲットとするのが一般的である。これらのターゲットは光路切り替えミラーで切り替えて観測される(図1参照)。この校正の段階の前処理として、フーリエ変換型分光器特有の処理が2つある。1つは位相補正とよばれる操作で、校正用黒体を観測した場合と地球を観測した場合とで、微妙に異なる光の位相を揃えるものである。もう1つはアポダイジングという操作である。通常、可動鏡の移動に沿ってインターフェログラムを

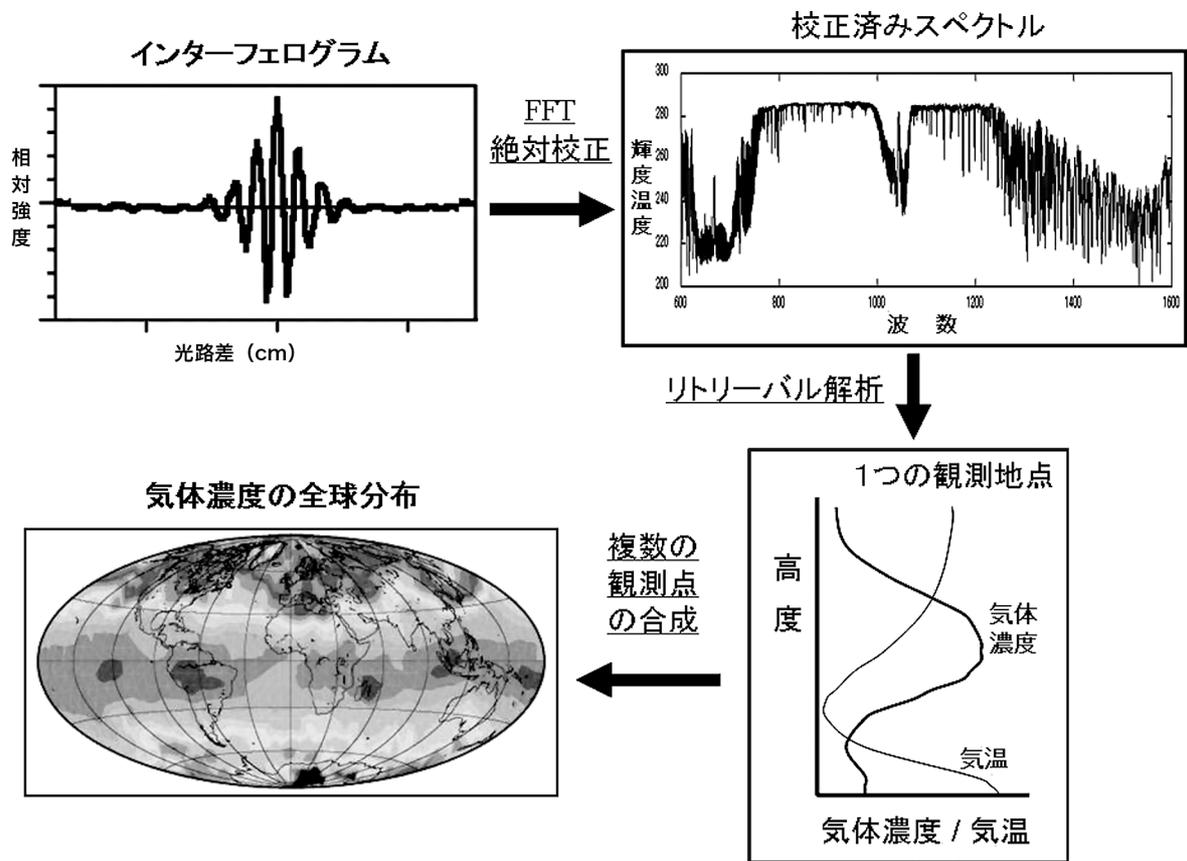


図3 観測データの解析フロー図。

測定した場合、その両端で測定がスパッと打ち切られるため、逆フーリエ変換したスペクトル空間で装置の分解能を規定する装置関数に振動を生じさせてしまう。そのため、余弦関数などのなめらかに変化する関数をインターフェログラムにかけ、装置関数の第2ピークを抑える方法がとられる。

### 3.3 リトリバル解析

衛星から観測される赤外線スペクトル強度は、地表面を含むさまざまな高度の大気からの影響の総和として得られる。その情報を解きほぐして気温や気体濃度の鉛直分布を求めるのが、リトリバル解析である。それでは、どのようにして視線方向の情報を解きほぐすのか。それには気体による赤外線の吸収の強さが波長によって異なることを利用する。吸収が強い場合には、衛星から見て大気の上層で吸収が飽和するため、大気下層の影響を受けない。つまり、大気上層からの情報のみが得られる。一方、吸収が弱い場合にはより深く、つまり下層大気まで見通すことができ、そこからの情報が得られることになる。フーリエ変換型分光器では非常に多くの波長のデータが得られるため、このような解析が可能となる。一般に等密度の大気を観測する場合、視線方向には指数関数的に透過率が減少する。

そのため、各深さから得られる情報も単調減少となる。しかし、衛星からの下方視観測の場合、地球大気の密度が下層に向かってほぼ指数関数的に増加していることから、この2つの効果の掛け算の結果として、情報の発信源がある深さ(高度)にピークをもつことになる。その深さは赤外線の吸収強度で決まるため、波長ごとに異なる高さにピークが現れる。実際の解析では、衛星から観測されるある波長の赤外線強度に、特定の高度の気温や気体濃度の変化がどのように影響するかという感度を事前に計算しておく。そしてそれらを行列表示し、ベクトル表示された観測スペクトルと組み合わせ、逆行列を解くような方法で気温や気体濃度の鉛直分布が解析される<sup>1,2)</sup>。

### 4. 衛星搭載装置の歴史

過去に打ち上げられた衛星搭載用フーリエ変換型分光器のリストを表1に示す。これには、今後の打ち上げがほぼ確定しているものも含めてある。世界で最初の地球大気観測用の同型分光器はIRIS (Infrared Interferometer Spectrometer) とよばれ、1970年に米国により打ち上げられた。これにより、地球から放射される連続した赤外線スペクトルが初めて測定された。しかし、短寿命であったため

表1 衛星搭載用フーリエ変換型分光器.

	搭載衛星 (国)	打ち上げ (予定)	観測手法	波数分解能 (Cm-1)	波数範囲 (バンド数) (Cm-1)	観測対象
IRIS	Nimbus3, 4 (米)	1970	下方視 (射)	8.0/5.0	180-2500	気温, H <sub>2</sub> O
ATMOS	Spase Shuttle (米)	1985-1993	太陽掩蔽	0.01	625-4800 (4)	O <sub>3</sub> 他 成層圏微量気体
IMG	ADEOS (日)	1996	下方視 (射)	0.05	714-3300 (3)	CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , 気温, H <sub>2</sub> O 他
MIPAS	ENVISAT (欧)	2002	周縁 (射)	0.025	685-2410 (6)	O <sub>3</sub> 他 成層圏微量気体
ACE	ACE (加)	2003	太陽掩蔽	Max. 0.028	750-4100 (4)	O <sub>3</sub> 他 成層圏微量気体
TES	Aura (米)	2004	下方視 (射), 周縁	0.05/0.025	650-3050 (4)	対流圏 O <sub>3</sub> 他
LASI	Metop-A (欧)	2007	下方視 (射)	0.25	645-2760 (3)	気温, H <sub>2</sub> O 他
TANSO-FTS	GOSAT	2009	下方視 (射, 散)	0.2	700-12900 (4)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
LASI	Metop-1, 3 (欧)	2012, 2016	下方視 (射)	0.25	645-2760 (3)	気温, H <sub>2</sub> O 他
CrIS	NPP (米)	2011	下方視 (射)	0.625-2.5	650-2550 (3)	気温, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> 他
	NPOESS (米)	2013	下方視 (射)	0.625-2.5	650-2550 (3)	気温, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> 他
MTG-IRS	静止 (欧)	2017	下方視 (射)	0.625	700-2175 (2)	気温, H <sub>2</sub> O 他
GIFTS	静止 (米)	未定	下方視 (射)	0.6	685-2250 (2)	気温, H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> 他 (128×128: 二次元アレイ)

射: 射出, 散: 散乱

に大気科学へ応用できるデータはほとんど得られず、極域や熱帯で得られた特徴的なスペクトルの図が教科書などに載せられた程度であった。その後、約 25 年間は同型の分光器は開発されなかった。しかし、成層圏オゾン層破壊の問題を機に、地球規模の環境問題が重要視されはじめた 1990 年代に入り、衛星による地球観測の必要性が認識されるようになった。その有力な手段としてフーリエ変換型分光器による大気観測が挙げられ、複数の計画が各国で立案されるようになった。その最初のセンサーは、1996 年に打ち上げられた日本の ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite) 衛星に搭載された通商産業省開発の IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse Gases) センサー<sup>3)</sup>である。その後、米国、欧州を中心に成層圏用と対流圏用の分光器が次々と打ち上げられ、多くの計画が現在も進行中である。その中であって欧州宇宙機関 (ESA) の IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) センサーについては、大気環境の計測だけでなく、気象業務への応用が重視され、気温と水蒸気の観測データがリアルタイムで気象予報に利用されている。このセンサーは、5 年ごとに 3 機打ち上げられ、15 年にわたる観測計画が確定している。

## 5. 観測事例

これまで打ち上げられてきたフーリエ変換型を含む赤外分光器の観測データから、地球温暖化の原因物質である二酸化炭素とメタン濃度についても一部解析が行われてきた。しかし、これまでの分光器はこれらの気体に特化した設計ではなく、本格的な観測のためには、専用の分光器の開発が必要とされてきた。そのため、米国航空宇宙局 (NASA) は、二酸化炭素に特化した OCO (Orbital Carbon

Observatory) という衛星の開発を開始した。日本においてもほぼ時を同じくして、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、環境省、国立環境研究所 (NIES) が共同プロジェクトとして温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) の開発を開始した。プロジェクトの主目的は、亜大陸規模での二酸化炭素の発生・吸収強度の推定誤差を半減させることにある。この衛星は 2009 年 1 月 23 日に打ち上げられ、「いぶき」と名付けられた。一方、OCO は翌 2 月の打ち上げに失敗したため、現在、二酸化炭素を専用に観測する衛星は GOSAT だけである。

GOSAT の主センサーは TANSO-FTS (Thermal And Near Infrared Sensor for Carbon Observation-FTS) とよばれるフーリエ変換型分光器であり、4 つのバンドの検出器を備えている。バンド 1 (0.758~0.775  $\mu\text{m}$ ) は O<sub>2</sub>-A バンドによる地表気圧の測定、バンド 2 (1.56~1.72  $\mu\text{m}$ ) は二酸化炭素とメタン、バンド 3 (1.92~2.08  $\mu\text{m}$ ) は二酸化炭素と水蒸気、そして熱赤外域にあるバンド 4 (5.56~14.3  $\mu\text{m}$ ) は、二酸化炭素とメタンの上空濃度のほか、気温、水蒸気の鉛直分布を測定する。主バンドであるバンド 2 による観測は、図 2 中の②にあたる下方視で、太陽からの散乱光を光源として、二酸化炭素などの鉛直平均濃度 (カラム濃度) を得る。一方、バンド 4 による観測は同図中の③の下方視であり、リトリーバル解析により気体濃度と気温の鉛直分布を得ることができる。ただし、二酸化炭素については大気下層で感度が弱く、おもに対流圏中層以上の濃度が解析される。

GOSAT は 2010 年 2 月までに初期検証作業が終了し、2010 年 2 月より二酸化炭素とメタンの濃度データ (レベル 2 データ) の一般配布が開始された。図 4 には、バンド 2 の解析から得られた二酸化炭素のカラム濃度の例を示す (国

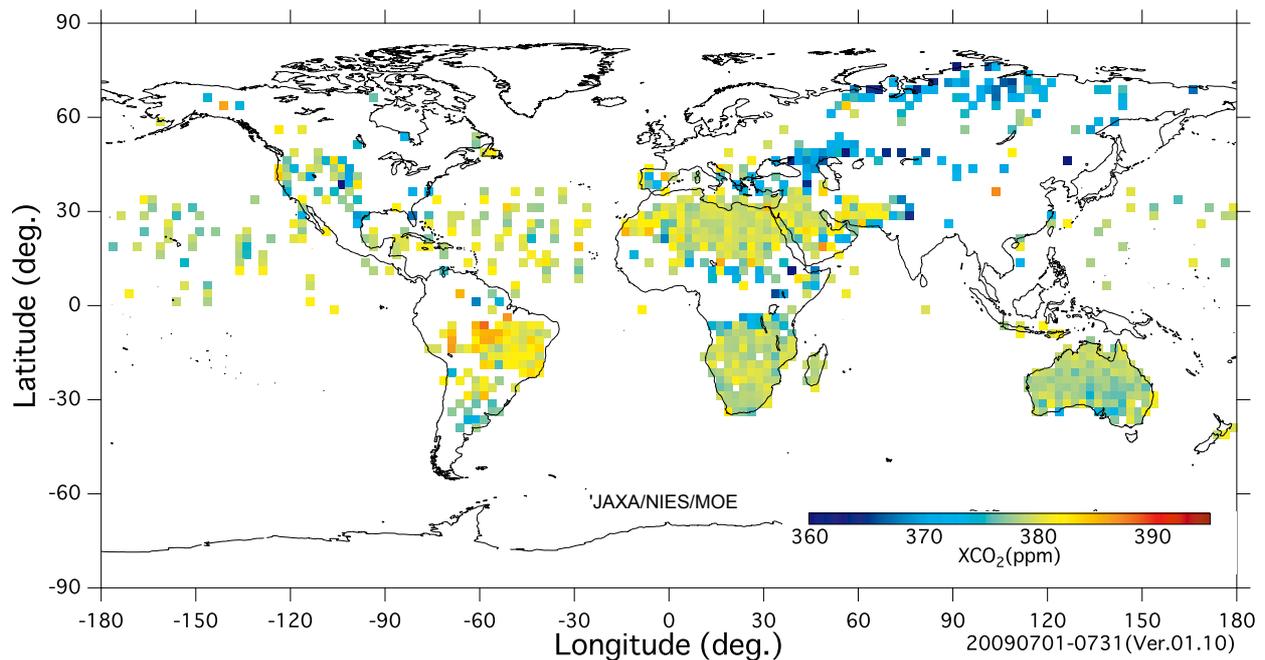


図4 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」の観測により得られた二酸化炭素の月別カラム平均濃度の2.5度メッシュ平均値分布。2009年7月の観測データ。国立環境研究所のGOSATプロジェクトのホームページ (<http://www.gosat.nies.go.jp>) より取得。

立環境研究所のGOSATプロジェクトのホームページ <http://www.gosat.nies.go.jp> より取得)。これは2009年7月のカラム平均濃度の2.5度メッシュ平均値分布である。データがない場所は、雲により観測ができなかったところである。月平均値であるにもかかわらず欠測域が多いが、これは現段階ではセンサー視野内に少しでも雲がある可能性のあるデータをすべて排除しているためである。今後、より多くのデータが利用できるよう、雲の判別方法の改良などが行われ、観測されたデータが最大限生かされるようになると努力がなされている。また、海上では衛星軌道に隣接した曲線上にのみデータが存在しているが、これは、バンド2の波長帯では太陽光の海面反射率が極端に低くS/N比が悪いため、鏡面反射点(サングリント)のみを向くようにセンサーを制御しているからである。今後、さらなる測

定精度の向上を図りつつ、蓄積されたデータを利用して、プロジェクトの主目的である二酸化炭素の発生源・吸収源強度の推定精度の向上が実現していくものと期待されている。

## 文 献

- 1) C. D. Rodgers: *Inverse Method for Atmospheric Sounding* (World Scientific Publishing, Singapore, 2000).
- 2) N. Saitoh, R. Imasu, Y. Ota and Y. Niwa: "CO<sub>2</sub> retrieval algorithm for the thermal infrared spectra of the greenhouse gases observing satellite: Potential of retrieving CO<sub>2</sub> vertical profile from high-resolution FTS sensor," *J. Geophys. Res.*, **114** (2009) D17305.
- 3) R. Imasu: "Meridional distribution feature of minor constituents as observed by IMG sensor aboard ADEOS satellite," *Adv. Space Res.*, **25** (2000) 959-962.

(2010年10月4日受理)