

衛星センサー SCIAMACHY による全球メタン観測について

有 山 悠 子*・衛 藤 聡 美*・野 口 克 行**・林 田 佐 智 子*

1. はじめに

メタン (CH₄) は、二酸化炭素 (CO₂) に次いで 2 番目に温暖化に寄与しているとされる温室効果気体である (IPCC 2007). 南極やグリーンランドのアイスコア、フィルン (氷床表層の通気層) から採集した過去の気体の分析の結果、現在のメタン濃度は産業革命前と比べて 2 倍以上高いことがわかっている (Etheridge *et al.* 1998). メタンのバックグラウンド濃度の季節変化や経年変動、南北の濃度勾配を明らかにするため、World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) による地表観測ネットワークが整備され、現在およそ 100 地点でメタン混合比の観測が行われており、データが蓄積されつつある。

メタンの発生源は、人為起源と自然起源に分けられる。人為起源の発生源としては、主に水田や家畜、廃棄物処理過程や化石燃料の採掘および輸送中の漏洩が知られており、自然起源の発生源としては、湿地などの嫌気的環境下でメタンが生成されることが知られている。しかし、定量的な理解にはいまだ不十分な点が多い。例えば推定方法によって発生量の値が大きく異なり、自然起源の発生量は 145~260 Tg CH₄/yr^{†1}、人為起源の発生量は 264~428 Tg CH₄/yr と幅が広い (IPCC 2007). 近年になって、これまではないと考えられてきた植物からのメタン放出の可能性が指摘された (Keppler *et al.* 2006). このように発生源に対する理解が不足している一因として、従来多くの地上観測ステーションは、内陸や都市部などの局所的発生源の影響を避けるために、主に海岸部や島などのバック

グラウンド濃度が観測可能な場所に設置されてきたことが挙げられる。さらに、およそ 8 割が北半球に設置されており、南半球や赤道域の観測は非常に限られているのが現状である。そのため、内陸・海洋を含む全球規模の観測ができる人工衛星に大きな期待が寄せられている。

対流圏のメタンを衛星から観測した初期のセンサとして、宇宙開発事業団 (現: 宇宙航空研究開発機構) により 1997 年に打ち上げられた Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS) 搭載の Interferometric Monitor for Greenhouse gases (IMG) センサ (Kobayashi *et al.* 1999 ; Clerbaux *et al.* 2003) が挙げられる。しかし、IMG センサは熱赤外波長域における観測センサであり、原理的に自由対流圏には感度があるが、発生源である地表面付近にはあまり感度がなかった。また、2002 年に打ち上げられた米国航空宇宙局 (NASA) の Aqua 衛星搭載の Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) センサでもメタンの観測が行われているが、同様に熱赤外波長域の観測センサであるため、地表面付近の感度が低く、発生源の解明には必ずしも適していないと考えられる。

一方、欧州宇宙機関により 2002 年に打ち上げられた Environmental Satellite (ENVISAT) 衛星搭載の SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography (SCIAMACHY) センサ (Bovensmann *et al.* 1999) は、近赤外波長域における観測センサである。太陽光の地表面反射を利用して大気層全体を透過する光路について観測するので、気柱量^{†2}の観測が可能である。メタンの発生源は地表に限られるので、近赤外域での観測は発生源の解析に

* 奈良女子大学理学部。

** 奈良女子大学理学部、ブレーメン大学滞在中。

—2008年9月8日受領—

—2009年5月21日受理—

^{†1} Tg CH₄/yr: メタン換算で 1 年あたりの発生量を示す。Tg は 10¹²g。

適している。Frankenbergらは、世界で初めて SCIAMACHY センサのスペクトル観測からメタン濃度を導出することに成功し、メタンの全球分布を明らかにした (Frankenberg *et al.* 2005 a, 2006)。本稿では、SCIAMACHY センサから導出されたメタンデータについて、その特徴や信頼性、及びモデルを用いた先行研究を解説する。また、我々が独自に行った地上観測データとの比較結果についても紹介し、今後このデータセットを利用するユーザーの一助になることを本稿の目的とする。

2. SCIAMACHY センサからのメタン導出

SCIAMACHY は、8つの分光チャンネルによって太陽スペクトルの紫外域、可視域、近赤外域の波長域 (240~2380 nm) を観測することができる。特徴は、これまで衛星であまり観測が行われてこなかった近赤外域の分光チャンネル (チャンネル6: 1000~1750 nm, チャンネル7: 1940~2040 nm, チャンネル8: 2265~2380 nm) を持つことであり、これによりメタンや二酸化炭素、一酸化二窒素の気柱量の観測が可能となった。高度約800 kmを周回し、太陽同期準回帰の極軌道をとって赤道地域を午前10時に通過する。SCIAMACHY にはいくつかの観測モードがあるが、ここで述べるメタンデータはすべて下方視観測の結果に基づいている。SCIAMACHY の瞬時視野の大きさは、30 km (南北) × 60~120 km (東西) である。下方視観測における swath 幅 (一度のスキャンで観測可能な幅) は960 km で、1日14周回の観測を行い、6日間で全球をカバーできる。

SCIAMACHY のスペクトルからメタンを導出したグループは、ハイデルベルグ大学 (ドイツ) のグループ (Frankenberg *et al.* 2005 b) とブレーメン大学 (ドイツ) のグループ (Buchwitz *et al.* 2005 a, b), Space Research Organization Netherlands (SRON; オランダ) のグループ (Gloude-mans *et al.* 2004, 2005) が挙げられる。それぞれ、独自のアルゴリズムを適用している。

一般に、観測スペクトルから微量気体の気柱量を求めるためには、まず吸収スペクトルから全吸収量を求め、光路に沿った気柱量 (斜め気柱量: slant column amount) を求める。この際の基本的な方法は、気体

種によって吸収係数の波長依存性が異なることを応用する Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) 法と呼ばれる方法である。大気分子による散乱 (レイリー散乱) やエアロゾルの散乱 (ミー散乱) の波長依存性は、気体の吸収スペクトルの波長依存性に比べて小さく、波長に対して緩やかに変化するため、そのような成分を多項式関数などを用いて取り除くことで、気体による吸収成分のみを取り出してターゲットとする気体の気柱量を求めることができる。

DOAS 法によって得られた斜め気柱量はそのままでは評価しにくい。鉛直気柱量に換算することが行われる。そのためには、光路長を表すエアマスファクターで斜め気柱量を割ればよい。幾何学的に決まるエアマスファクターは $\sec \theta_1 + \sec \theta_2$ (θ_1, θ_2 はそれぞれ太陽および衛星の位置を示す天頂角) と考えることができるが、実際には散乱による光路長の変化を考慮する必要がある。エアマスファクターの決定には、大気中の変動が少なく、平均混合比が正確に知られている酸素を用いることが多い。しかし、酸素の吸収量を測定する O₂-A バンドは可視域の760~780 nm であり、近赤外域におけるメタンの観測波長域とは離れているため、両者の光路が大きく異なってしまう。

そこで、吸収波長域がメタンに近い二酸化炭素の吸収帯を用いて光路の補正を行うことが考案されている。ハイデルベルグ大学のグループは、SCIAMACHY のチャンネル6のメタン吸収帯 (1630~1670 nm) からメタン気柱量を Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS 法とよばれるアルゴリズムで導出し、同チャンネルで同時に観測された二酸化炭素気柱量 (1563~1585 nm の吸収帯) でエアマスの補正を行っている。本稿で解説するのは主としてこのデータであり、以下、最初に報告された論文 Frankenberg *et al.* (2005 a, b) を指して、F2005データと記述することにする。実際のデータの扱いの詳細は第3節で述べる。

一方、ブレーメン大学のグループは、ハイデルベルグ大学と異なる導出アルゴリズムを用いている (Weighting Function Modified (WFM)-DOAS 法と呼ばれる)。公開データのバージョン0.4では、チャンネル8で観測されたメタン気柱量 (2265~2280 nm の吸収帯) を O₂-A バンド (760~780 nm) から求めた酸素気柱量で補正することが試みられた。しかし上記のように両者の観測波長域がかなり異なるため、光

¹² 気柱量: 地上から大気の上端までに存在する大気成分の全量。

路が同一でないことが大きな誤差要因となった。そのため次のバージョン0.41 (Buchwitz *et al.* 2005 b) では、チャンネル6で観測された二酸化炭素気柱量を用いてチャンネル8のメタン気柱量が補正された。しかしながらチャンネル8自体に分光器への霜付着という不具合があったため、最新版のバージョン0.5 (Buchwitz *et al.* 2006) ではチャンネル6のメタン気柱量を二酸化炭素気柱量で補正している。そのため、エアマスファクターの補正の観点からいうと、バージョン0.5ではハイデルベルグ大学と基本的に同じ手法を用いたことになる。2009年3月現在における最新データセットはバージョン1.0であり、地表面アルベドや地表面高度、測器の検定の取り扱いを改善し、吸収線データベースである HITRAN データベースを最新のものに更新して導出したデータである (Schneising *et al.* 2009)。

3. SCIAMACHY センサから得られたメタンデータの特徴

F2005データで Frankenberg らによって用いられた IMAP-DOAS 法は、基本的には上記で述べた DOAS 法である。吸収係数の気温、気圧依存性を考慮した上で、事前推定値 (a priori) としてのメタンの鉛直分布を仮定する。仮定したメタン混合比などの大気パラメータを放射伝達モデルに与えてフォワード計算¹³を行い、推定値としてのスペクトルデータを求めておく。観測で得られたスペクトルが、フォワード計算の結果と整合するように、最大事後確率推定法 (Rogers 2000) で反復計算を行い、最適解を求める (このような操作を逆推定、リトリバルと呼ぶ)。アルゴリズムの詳細は Frankenberg *et al.* (2005 b) に述べられている。このようにして導出されるメタンのリトリバル結果は、斜め気柱量として得られる。

メタンは、対流圏中では鉛直方向に比較的よく混ざっており、おおよそ等混合比であると期待できるため、メタン気柱量は大気気柱量にほぼ比例すると考えられる。そのため、衛星観測で得られたメタン気柱量には標高による違いが反映されるので、空間変動を解析するためには、メタン気柱量を大気気柱量で割り、平均混合比に変換すると扱いやすい。

前の章で述べたように、F2005データのエアマスの

補正には二酸化炭素の気柱量が用いられている。次式のように、同時に観測されたメタン斜め気柱量 ($S_{\text{meas}}(\text{CH}_4)$) を二酸化炭素斜め気柱量 ($S_{\text{meas}}(\text{CO}_2)$) で割ることで光路の補正を行い、推定値の二酸化炭素平均混合比 ($\text{VMR}(\text{CO}_2)$) をかけることでメタン平均混合比 ($\text{VMR}(\text{CH}_4)$) を得ることができる：

$$\text{VMR}(\text{CH}_4) = S_{\text{meas}}(\text{CH}_4) / S_{\text{meas}}(\text{CO}_2) \cdot \text{VMR}(\text{CO}_2) \quad (1)$$

留意すべき点は、この観測で得られているメタン濃度は、同時に観測された二酸化炭素濃度に対する相対的な値であるということである。そのため、二酸化炭素の変化が相対的に小さければメタンの変動幅を観測可能であるが、何らかの理由で二酸化炭素の変動幅が大きい場合、誤ってメタンの変動幅が大きくなるので注意しなければならない。ここで与える二酸化炭素平均混合比は、Frankenberg *et al.* (2005 a) では一定値 (370 ppm) としていたが、後に Frankenberg *et al.* (2006) ではモデルシミュレーションで得た二酸化炭素混合比を与え、Frankenberg *et al.* (2005 a) よりはるかに良い結果を得ている。

リトリバルされたメタンデータの誤差解析結果は Frankenberg *et al.* (2006) に記されている。それによると、DOAS フィッティングにおいて機器の S/N 比で決まる統計的精度 (precision error) から求められる $S_{\text{meas}}(\text{CH}_4) / S_{\text{meas}}(\text{CO}_2)$ 比の相対的精度は平均 1.8% (メタン混合比約 30 ppb に相当) とされている。また、メタンと二酸化炭素の観測波長帯がわずかに (80 nm) 離れているために、エアロゾルや雲、地表面アルベドの波長依存性の影響が大きい場合には、二酸化炭素による光路差補正が首尾よく機能しない可能性がある。エアロゾルによるメタン混合比の誤差は、サハラ砂漠のダストの例では 10 ppb 以下であり、雲や地表面アルベドの場合は、25% のアルベド変化に対して、 $S_{\text{meas}}(\text{CH}_4) / S_{\text{meas}}(\text{CO}_2)$ 比が 0.5 ~ 2% 程度変化する可能性があるとしてされている。

センサ視野内に雲が存在し、地表面付近を観測できていない可能性のあるデータは除外することが推奨されている。雲の存在の有無は、二酸化炭素気柱量を用いて判断する。二酸化炭素は大気中に比較的均質に存在するため、気柱量は標高の高い地形上ほど少ない傾向にあるが、その量が極端に少ない観測値は雲の存在によって雲の下の気層が観測できていないと判定する

¹³ フォワード計算：放射伝達モデルにメタンの量などの大気パラメータを与えて放射量を計算すること。

(Frankenberg *et al.* 2005 a).

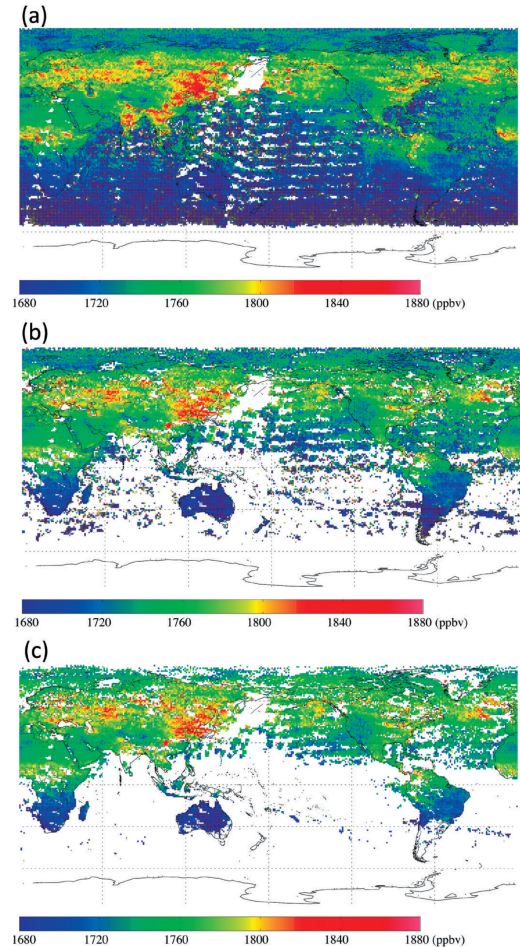
本稿で紹介したデータセットはオランダ気象庁 (Royal Dutch Meteorological Institute, KNMI) のホームページから入手できる。2009年3月現在、このホームページから入手可能な F2005データは、2003・2004年の2年間のバージョン1.1の swath データである。解析結果には、メタン気柱量とその誤差値に加え、データ質管理のためにエアマスファクターのスケールリングをするための二酸化炭素気柱量とその誤差値が含まれている。推奨されているデータ質管理は、両化学種の誤差値による判定と上述の雲の有無に関するものなどがある (補遺参照)。雲の判定には二酸化炭素気柱量とともに観測したピクセルの地表面高度の情報が必要であるので提供されている。

第1図 a は雲域を含むすべてのデータから得た月平均メタン混合比である。(1)式に従って、全球の二酸化炭素混合比を370 ppm と仮定して求めた。第1図 b は雲の存在により地表面付近が観測されていないと考えられるデータを除外した月平均メタン混合比である。雲量の多い海洋上で多くのデータが除外される上、内陸でも高い値を示すデータの一部分が除外される傾向にある。雲除去処理を行うと、データ量がわずかに10%程度になる。第1図 c は推奨されている全てのデータ質管理処理 (補遺参照) を行った結果である。

4. 地上観測値との比較・検証

SCIAMACHY で得られた微量気体データの系統的な検証は、Dils *et al.* (2006) に記されている。メタンだけでなく、一酸化炭素、二酸化炭素、一酸化二窒素の検証が行われ、第2節で紹介した3つのグループによって導出された衛星観測値と地上13地点のフーリエ変換赤外分光装置 (FTIR) による観測値を比較した結果が示された。これによると F2005データセットは、他のグループのデータと比べて良い結果が得られ、目標の精度 (1%) にほぼ到達している。ただし、南半球 (南極、ニュージーランド) のデータの比較では、明らかなバイアスが見られ、F2005データの方が FTIR 観測値より高い値となった。この原因は未解明であり、データの使用時に留意すべきであるとされている。

我々は、さらに独自に F2005データセットに対して、地上観測値との比較を行った。上に述べた通り、衛星から得られているのは、二酸化炭素気柱量とメタン気柱量 ($S_{\text{meas}}(\text{CH}_4)/S_{\text{meas}}(\text{CO}_2)$) の比であるの



第1図 2003年7月における F2005データのメタン平均混合比 (単位は ppbv: 体積比で 10^{-9}) の月平均値。(a) 雲域を含む全データの月平均値。(b) 雲処理を行った月平均値。(c) 全てのデータ質管理処理を行った月平均値。

で、この比の値を比較することに焦点をあてた。比較に用いた地上データセットは、WDCGG のホームページ (http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/jp/wdcgg_j.html) からダウンロードできる地上観測値に加えて、東北大学によって中国内陸の7地点で観測された地上観測値である (Zhang *et al.* 2008)。WDCGG は、世界気象機関 (WMO) の全球大気監視 (GAW) 計画の下に設立され、世界各地で測定された温室効果気体とそれに関連する気体のデータを収集、管理、提供している。ここでは、WDCGG のホームページで提供されているメタンデータのうち、衛星観測値と同じ

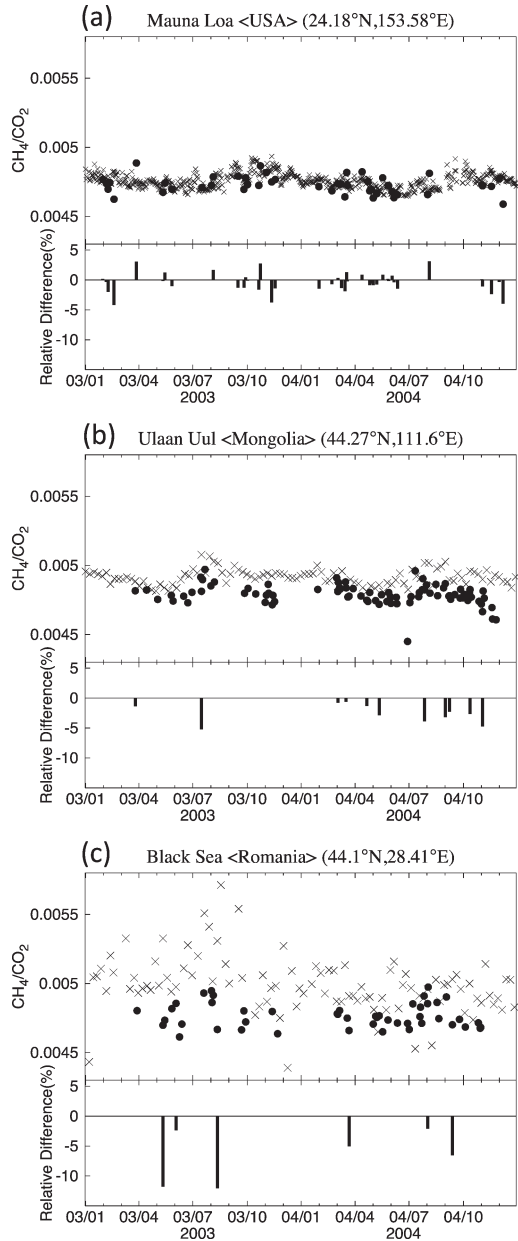
期間に観測していた54地点のデータを用いた。衛星観測値と同様に地上観測値も同地点・同日に観測したメタン混合比と二酸化炭素混合比の比を用いた。

WDCGG54地点、および中国内陸7地点の合計61地点の地上観測値とF2005データの時系列を比較した結果(第2図),F2005データは南半球や海洋上などのバックグラウンド地点で地上観測とよく一致することがわかった。代表的な例であるマウナロアを第2図aに示す。F2005データと地上観測値の差の平均は-0.5%(標準偏差:±1.5%)であった。その他の地点では、第2図b,cのように衛星観測値の方が地上観測値よりも低い傾向にあった。第2図bには季節変化の傾向は比較的一致しているものの、若干のバイアスが認められる例(モンゴル)を示した。F2005データと地上観測値の差の平均が-2.6%(±1.5%)であり、絶対値はほぼ一定の割合で地上観測値よりも低いものの、季節変化の傾向はよくとらえられているといえる。黒海(第2図c)は、地上観測値の日々の変動が大きい例である。衛星観測値では地上観測値の最小値に近い結果となっている。F2005データと地上観測値の差の平均は-6.7%(±4.4%)であり、バイアスとともに標準偏差も大きく、両者の差は不規則に変動している。このような日々変動の大きい地点では、地上観測と衛星観測の結果が一致しない事例もある。

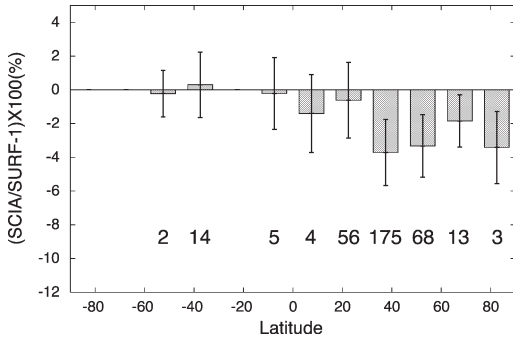
衛星観測と地上観測が同期しているサンプルは340個であった。その差を全て統計的にまとめた結果を第3図に示す。地上観測地点の緯度によって分類し、緯度15度毎に平均して示す。負の値は、衛星観測値の方が低かったことを示している。グラフ内の数値はサンプル数である。

第3図より、衛星観測値は、地上観測値よりも数%程度低いことがわかる。北半球の中・高緯度ではサンプル数が多く、衛星観測値が有意に(-4~-2%)低いことが示唆される。また北半球低緯度と南半球においては、両者の差は-1.5~0.5%程度とよく一致している。ただし、南半球は衛星観測と地上観測の同時観測のサンプル数が少ないことに留意する必要がある。

衛星観測値の方が低くなる原因は、メタンの高度分布にあると考えられる。メタンの発生源は地表面付近に存在するため、発生源の影響が強い場合には低高度で高濃度であるような高度分布が考えられる。また、メタンの消失源である水酸基ラジカル(OH)が何らかの原因により上空で高濃度である場合には、上空の



第2図 地上観測値の「CH₄混合比/CO₂混合比」とF2005データの「CH₄気柱量/CO₂気柱量」の時系列プロット(上部)と、同日に両観測が行われていた場合のF2005データと地上観測値の差(下部)。期間は2003~2004年。差は{(F2005/地上)-1}×100(%)として求めた。×:地上観測値、●:F2005データ。(a)マウナロア(米国)、(b)ウランウール(モンゴル)、(c)黒海沿岸(ルーマニア)。

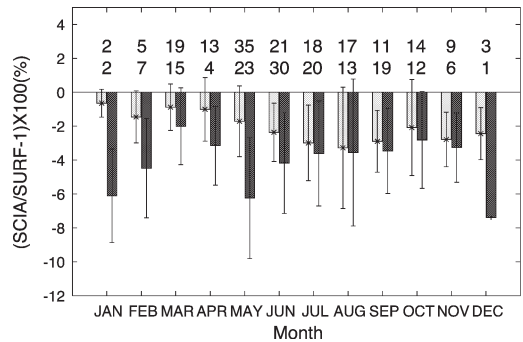


第3図 F2005データと地上観測値の差を地上観測地点の存在する緯度15度毎に分類・平均した値。バーは提供されている衛星の誤差値。棒グラフ下にデータのサンプル数を表記。横軸は緯度を表す。負値は南半球。

メタン濃度が減少し、相対的に地表濃度が高くなるという場合も考えられる (Spivakovsky *et al.* 2000)。メタンがこのような高度分布をもつ場合、衛星観測は気柱量平均値を与えるため平均化されて地上観測値より低い値となる傾向があると考えられる。北半球の中・高緯度は陸域が多く存在し人間活動も活発であり、発生源が多いと推定される地域である。そのため衛星観測値が地上観測値よりも低い値を示すという第3図の結果は、このようなメタンの高度分布を反映している可能性がある。一方、北半球低緯度や南半球は海洋が多く発生源が少ない地域であるので、対流圏内の濃度が比較的一様であるために衛星観測値と地上観測値がよく一致していると考えられる。

確認のため、周辺にメタン発生源があるかどうかによって地上観測地点を分類し、改めて衛星観測と比較することを試みた。観測地点が発生源付近にあるかどうかの判定は、移動平均(30日間)の標準偏差の平均値が閾値以上であれば、周辺に発生源が存在すると仮定した。本研究では、発生源から十分に離れていると考えられるバックグラウンド地点(マウナロア)での標準偏差の平均値がおよそ15 ppbvであったので、この値を閾値と設定した。このように地上観測地点を分類すると、発生源付近であると推定された地点は北半球中緯度に限られたため、北半球のみのデータを用いることにした。このような操作を経て、改めて衛星観測値との差を月毎に平均した結果を第4図に示す。

第4図を見ると、メタンの発生源周辺と推定された観測地点(図中の黒)では衛星観測値と地上観測値の



第4図 発生源の影響が小さい地点(灰)と影響が大きい地点(黒)での地上観測値と、F2005データの差の月毎の平均値。北半球のデータのみ。バーは標準偏差。棒グラフの上にデータのサンプル数を表記(上側が影響の小さい地点、下側が大きい地点に対応)。

差が大きくなり、逆にバックグラウンド地点と推定された地点(灰)では差が小さくなる傾向がある。第4図で示される通り、バックグラウンド地点よりも発生源周辺と推定された地点の方が、どの季節においても地上観測値と衛星観測値の差が大きくなる上、差のばらつきも大きくなることが分かった。また、差の季節変化を見ると、発生源周辺では明確な季節変化は見られないが、バックグラウンド地点では、冬に差が小さく、夏に差が大きくなる傾向がある。これは、メタン消失源であるOHが夏に上空で豊富になるため、上述したようにメタンの高度分布が非一様となって衛星観測値との差が大きくなる可能性があり、そうした季節性が日々の変動の小さい地点で捉えられていることが考えられる。

第3図で示す通り、北半球では観測誤差を上回る数%の差があるが、発生源の多い北半球中緯度ではメタンの高度分布が地表付近で大きな勾配を持つ可能性があるため、気柱量平均として導出されている衛星観測値が低い値を示す傾向があるのは妥当だと考えられる。

5. 衛星観測値とモデル結果との比較

これまで、衛星観測値とモデル結果との比較が行われている。Frankenberg *et al.* (2006) は、SCIAMACHYのメタンデータ(以下衛星データと記述)と大気輸送モデルによる結果を比較している。これによると、特に、中国の四川盆地や南米北部、中央

アフリカで衛星データがモデルの値を上回った。この結果は、現在のモデルで使用されているメタンのエミッションインベントリには含まれていない、新たなメタン発生源の存在を示唆する。

Bergamaschi *et al.* (2007) においても、衛星データとモデルのメタン濃度との比較を報告している。ここで、モデルで得られたメタン濃度とは、インバース手法¹⁴によって求められたメタン発生量をもとに、大気輸送モデルで計算された結果として求められたものである。インバース手法での拘束条件として、地上観測値と SCIAMACHY による衛星観測値とを与え、2種類のモデル結果を得ている。このモデルのメタン濃度と衛星データとの比較によって、現在考えられているメタン発生源と放出推定量の妥当性を検討することができる。

Bergamaschi *et al.* (2007) においても、地上観測値を拘束条件としたモデルのメタン濃度は、衛星データとの間にいくらかのバイアスがあるものの、海洋上やバックグラウンド地点での南北勾配は衛星データとよく一致している。主な違いは、メタン濃度の空間分布や季節変化が南米やアフリカの熱帯地域で大きく異なっていることである。また東南アジアの水田地域上空では、衛星データの値が減少している時期に、モデルのメタン濃度は高い値を示しており、現在のメタン放出推定量の改良が見込まれる。一方、バイアスを補正した衛星観測値を拘束条件とした場合、モデルのメタン濃度においても水田からの放出がより早い時期に終息する結果となり、衛星データとよく一致するようになった。また、熱帯地域に関しては、高い値を示す衛星データを説明するために、湿地とシロアリからの放出が多く見積もられている。しかし、このような見積もりは現実的ではない可能性がある。なぜなら、モデルでは植物からのメタンの発生など、最近になって示唆された新たな発生源が考慮されていないためである。これは、今後解決すべき課題である。

6. まとめ

世界で初めて衛星から対流圏メタンの時空間分布を導出した SCIAMACHY データ (Frankenberg *et al.*

2005 a, b) について、我々独自の比較解析結果もあわせて解説を行った。SCIAMACHY による観測値は地上観測値よりもやや低い傾向にあるが、これは衛星観測が全気柱平均量として求められていることを考慮すると、妥当であるという結果が得られた。今後、温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT (いぶき) などによるメタンの衛星観測データが得られるようになると、これまで不確定であった東南アジアの水田からのメタン放出量や、植物起源の放出量推定の改善に大きく貢献することが期待される。

参考文献

- Bergamaschi, P., C. Frankenberg, J. F. Meirink, M. Krol, F. Dentener, T. Wagner, U. Platt, J. O. Kaplan, S. Körner, M. Heimann, E. J. Dlugokencky and A. Goede, 2007: Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D02304, doi: 10.1029/2006JD007268.
- Bovensmann, H., J. P. Burrows, M. Buchwitz, J. Frerick, S. Noël, V. V. Rozanov, K. V. Chance and A. P. H. Goede, 1999: SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 127-150.
- Buchwitz, M., R. de Beek, J. P. Burrows, H. Bovensmann, T. Warneke, J. Notholt, J. F. Meirink, A. P. H. Goede, P. Bergamaschi, S. Körner, M. Heimann and A. Schulz, 2005 a: Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 941-962.
- Buchwitz, M., R. de Beek, S. Noël, J. P. Burrows, H. Bovensmann, H. Bremer, P. Bergamaschi, S. Körner and M. Heimann, 2005 b: Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: Year 2003 initial data set. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 3313-3329.
- Buchwitz, M., R. de Beek, S. Noël, J. P. Burrows, H. Bovensmann, O. Schneising, I. Khlystova, M. Bruns, H. Bremer, P. Bergamaschi, S. Körner and M. Heimann, 2006: Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: Version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 2727-2751.
- Clerbaux, C., J. Hadji-Lazaro, S. Turquety, G. Mégie and P.-F. Coheur, 2003: Trace gas measurements from infrared satellite for chemistry and climate

¹⁴ インバース手法: メタンなど微量成分の各発生源からの推定放出量をもとに、大気輸送モデルでその濃度分布を求め、実際の地上観測値や衛星観測値を拘束条件として、より確からしい発生量を推定する手法。

- applications. *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 1495-1508.
- Dils, B., M. De Mazière, J. F. Müller, T. Blumenstock, M. Buchwitz, R. de Beek, P. Demoulin, P. Duchatelet, H. Fast, C. Frankenberg, A. Gloudemans, D. Griffith, N. Jones, T. Kerzenmacher, I. Kramer, E. Mahieu, J. Mellqvist, R. L. Mittermeier, J. Notholt, C. P. Rinsland, H. Schrijver, D. Smale, A. Strandberg, A. G. Straume, W. Stremme, K. Strong, R. Sussmann, J. Taylor, M. van den Broek, V. Velasco, T. Wagner, T. Warneke, A. Wiacek and S. Wood, 2006 : Comparisons between SCIAMACHY and ground-based FTIR data for total columns of CO, CH₄, CO₂ and N₂O. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 1953-1976.
- Etheridge, D. M., L. P. Steele, R. J. Francey and R. L. Langenfelds, 1998 : Atmospheric methane between 1000 A.D. and present : Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability. *J. Geophys. Res.*, **103**, 15979-15993.
- Frankenberg, C., J. F. Meirink, M. van Weele, U. Platt and T. Wagner, 2005 a : Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*, **308**, 1010-1014, doi : 10.1126/science.1106644.
- Frankenberg, C., U. Platt and T. Wagner, 2005 b : Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases : Model studies for CH₄ and CO₂ retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard ENVISAT. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 9-22.
- Frankenberg, C., J. F. Meirink, P. Bergamaschi, A. P. H. Goede, M. Heimann, S. Körner, U. Platt, M. van Weele and T. Wagner, 2006 : Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT : Analysis of the years 2003 and 2004. *J. Geophys. Res.*, **111**, D07303, doi : 10.1029/2005JD006235.
- Gloudemans, A. M. S., H. Schrijver, A. G. Straume, I. Aben, A. N. Maurellis, M. Buchwitz, R. de Beek, C. Frankenberg, T. Wagner and J. F. Meirink, 2004 : CH₄ and CO total columns from SCIAMACHY : Comparisons with TM3 and MOPITT. *Proceedings ACVE2*, 3-7 May, Frascati, Italy, ESA Spec. Publ., SP-562.
- Gloudemans, A. M. S., H. Schrijver, Q. Kleipool, M. M. P. van den Broek, A. G. Straume, G. Lichtenberg, R. M. van Hees, I. Aben, and J. F. Meirink, 2005 : The impact of SCIAMACHY near-infrared instrument calibration on CH₄ and CO total columns. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 2369-2383.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007 : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* edited by S. Solomon *et al.*, Cambridge Univ. Press, 996 pp.
- Keppler, F., J. T. G. Hamilton, M. Braß and T. Röckmann, 2006 : Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, **439**, 187-191, doi : 10.1038/nature04420.
- Kobayashi, H., A. Shimota, K. Kondo, E. Okumura, Y. Kameda, H. Shimoda and T. Ogawa, 1999 : Development and evaluation of the interferometric monitor for greenhouse gases : A high-throughput Fourier-transform infrared radiometer for nadir Earth observation. *Appl. Opt.*, **38**, 6801-6807.
- Rodgers, C. D., 2000 : *Inverse Methods for Atmospheric Sounding : Theory and Practice.* World Scientific, 238 pp.
- Schneising, O., M. Buchwitz, J. P. Burrows, H. Bovensmann, P. Bergamaschi and W. Peters, 2009 : Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite—Part 2 : Methane. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 443-465.
- Spivakovsky, C. M., J. A. Logan, S. A. Montzka, Y. J. Balkanski, M. Foreman-Fowler, D. B. A. Jones, L. W. Horowitz, A. C. Fusco, C. A. M. Brenninkmeijer, M. J. Prather, S. C. Wofsy and M. B. McElroy, 2000 : Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH : Update and evaluation. *J. Geophys. Res.*, **105**, 8931-8980.
- Zhang, D., J. Tang, G. Shi, T. Nakazawa, S. Aoki, S. Sugawara, M. Wen, S. Morimoto, P. K. Patra, T. Hayasaka and T. Saeki, 2008 : Temporal and spatial variations of the atmospheric CO₂ concentration in China. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L03801, doi : 10.1029/2007GL032531.

補 遺 : F2005データの詳細

オランダ気象庁のホームページに SCIAMACHY による観測データを配布するサイトがあり (<http://www.knmi.nl/samenw/sciamachy/>)、プロダクトリストから「メタン」を選ぶと、F2005のデータセット (Frankenberg らによって導出されたデータ) やブレーメン大学のデータセット (Buchwitz らによって導出されたデータ) の公開データにたどり着く。データ要求フォーム (第 A1図) に必要事項を入力して送信すればデータの提供を受けられる (2009年3月現

all CH ₄ products								
product	made by	order	period	maturity ^{II}				val ^{III}
				AD	PSD	Av	C	
CH ₄ vertical column	IFE/IUP Bremen	go	Jan 2003 to Dec 2005	✓	✓	✓	✓	v0.5-validated v1.0-demonst
	MPI Mainz/IUP Heidelberg	go	Jan 2003 to Dec 2004	✓	✓	✓	✓	v1.1-validated
	SRON Utrecht	go	Jan 2003 to Dec 2004	✓	✓	✓	✓	

第 A1 図 ウェブサイトから入手できる SCIAMACHY データの一覧。

在)。

我々が入手したデータの期間は、2003年1月16日から2004年12月31日までである。配布されているデータセットには、観測時刻（2000年1月1日からの日数）、観測位置情報（ピクセルの中心と四隅の緯度経度）、太陽天頂角、視野天頂角、エアマスファクター、スキャン幅、地表アルベド、メタン気柱量、二酸化炭素気柱量、メタン気柱量誤差値、二酸化炭素気柱量誤差値、地上ピクセル高度などの情報が含まれている。

データ提供側から推奨されている主なデータ質管理

処理は以下の4項目である。

- メタン気柱量データの誤差値が 6×10^{17} molecules/cm²以下
- 二酸化炭素気柱量データの誤差値が 8×10^{19} molecules/cm²以下
- センサ直下からのスキャン角が10度以下
- スケールハイトを8.5 km と仮定して計算された標高0 m における二酸化炭素の気柱量が 7×10^{21} molecules/cm²以上

であること。

メタンと二酸化炭素の誤差値によって判別する品質管理処理では、主に海洋上のデータが取り除かれる。スキャンレンジによる判別では、全球データから一定の割合で取り除かれる。

なお、2009年3月現在、新しいバージョンのデータが Frankenberg 氏 (cfranken@iup.uni-heidelberg.de) により公開されており、興味のある読者は個別に連絡を取らきたい。

On Global Methane Observation from Space by SCIAMACHY

Yuko ARIYAMA*, Satomi ETOH*, Katsuyuki NOGUCHI*^{**,*} and Sachiko HAYASHIDA*

* Nara Women's University, Faculty of Science, Kitaoyahigashi-machi, Nara 630-8506 Japan.

** Now at Bremen University.

(Received 8 September 2008 ; Accepted 21 May 2009)
