

「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

1. はじめに

「いぶき」が宇宙からとらえた各地点の二酸化炭素濃度データは地球大気の上層から地表までの（カラム）濃度平均であり、通常の地上濃度観測値に比べより地球大気の平均濃度に近いものと考えられる。しかし、二酸化炭素カラム平均濃度（XCO₂）（L2プロダクトと呼ぶ）を算出するための短波長赤外（SWIR）帯の吸収スペクトルが得られるのは、太陽高度が高い昼間の、観測地点の視野内に雲が存在しない日照域の地点に限られる。そのため、季節によっても観測データが存在する地域（緯度帯）が変化する（図1）。

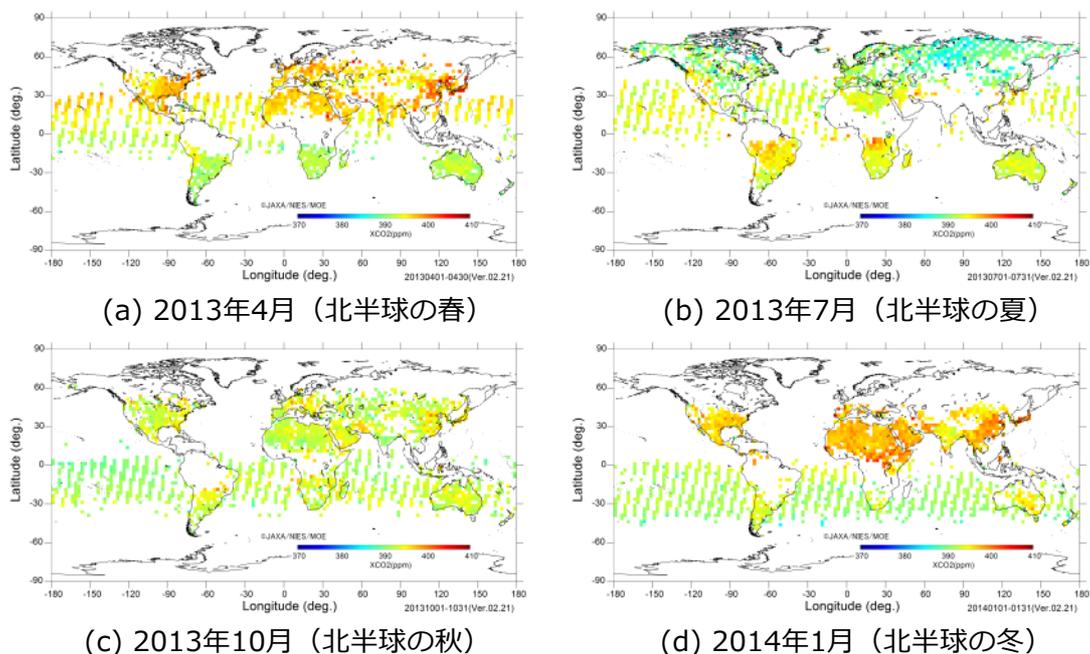


図1 「いぶき」の観測した二酸化炭素カラム平均濃度（L2プロダクト）の2.5度メッシュ月平均値分布の例。着色している地域に観測データが存在している。色は二酸化炭素濃度に対応し、水色→黄緑色→黄色→赤色の順に高濃度となることを示す。

ここでは、GOSATのL2プロダクトである二酸化炭素カラム平均濃度（XCO₂）を活用して、地球の大気全体の平均の濃度を推定する方法を検討した。

以下にその算出方法について解説する。

2. 二酸化炭素全大気平均濃度の推定方法

「いぶき」の観測データから算出されたXCO₂データ（SWIR L2）を用いて、XCO₂データが得られていない空白域も含め地球全体の大気平均濃度を求めるため、ここでは大気輸送モデルに基づく二酸化炭素濃度の三次元分布である「GOSAT レベル4B（L4B）プロダクト」の緯度分布を利用して空間補完を行い、全大気XCO₂の月別平均値を推定した。

2.1 「いぶき」観測濃度値（SWIR L2プロダクト）の検証と補正に使用したデータ

衛星観測データに基づいて推定されたXCO₂（SWIR L2プロダクト）の値のばらつきと絶対値のずれ（バイアス）を精度高く評価する（これを「検証」と呼ぶ）ために、地上から観測したカラム濃度観測（地上観測ネットワークTCCON^{注1}）の値との比較を行った。実際には「いぶき」の観測と同期した地上観測ネットワークTCCON観測値を用いてばらつきとバイアスを推定し、次にそのバイアス値を用いて「いぶき」のXCO₂データを補正した。バイアスは観測装置の特性変化、観測誤差、及びガス濃度解析手法に依存するため、SWIR L2プロダクトのバージョンによって異なる。本解析では、観測時期に応じて次の5バージョンのSWIR L2プロダクトを使用した；V02.21（2009年5月～2014年5月）、V02.31（2014年6月中旬～12月中旬）、V02.40（2015年2月～8月初旬）、V02.50（2015年8月初旬～9月中旬）、V02.60（2015年9月中旬～）。（「V**.**」は、プロダクトのバージョン番号を示す）。

V02.21プロダクトについては、地上観測ネットワークTCCONの観測データとの検証解析から、バイアスには若干の時間的変化があることが明らかになっており、下記の回帰式で表すことができる。

$$\text{バイアス} = -1.76 + 2.30 \times 10^{-3} \times t - 7.83 \times 10^{-7} \times t^2 \quad (\text{ppm}) \quad (1)$$

ここで t は「いぶき」打ち上げ日（2009年1月23日）からの経過日数（日）である。V02.21プロダクトに対して、(1)式より推定したバイアスで補正を行った。

V02.31プロダクトは、観測期間が半年と短いため時間的变化は考慮せず、TCCONデータとの検証解析に基づく -0.62 ppmをこの期間のバイアスと仮定して補正した。同様にV02.40プロダクトについても観測期間が半年と短いため時間的变化は考慮せず、TCCONデータと検証解析に基づく -1.35 ppmをこの期間のバイアスと仮定して補正した。V02.50とV02.60プロダクトについては、比較できる検証用データがまだ揃っていないことから、V02.21からV02.60の全てのプロダクトにおけるTCCONデータとの検証解析に基づく -0.52 ppmをこの期間のバイアスと仮定して補正した^{注2)}。

また、以下の理由により、使用する「いぶき」のXCO₂データを絞った。「いぶき」観測装置は、地球表面の太陽光の反射の強さに応じ、観測装置の増幅器（アンプ）の利得（ゲイン）を高（H）、中（M）、低（L）の三段階に切り替えて観測することができる。砂漠などの高い地表面反射の地点の観測にMゲインを、その他の陸上と海上の観測にHゲインを利用しており、SWIR L2プロダクトにはゲインと観測点により、陸上Hゲイン、陸上Mゲイン、海上Hゲインの三種類が存在する。これまでの研究から、同一時期・同一緯度帯であっても、三種のデータ間でバイアスはわずかに異なることが示唆されてきた。上記の検証用データのほとんどは陸上Hゲインに相当する観測点において取得されているため、上記のバイアスは陸上ゲインHのL2プロダクトでの信頼性が高い。そこで二酸化炭素の全大気平均濃度の推定には、「いぶき」のSWIR L2プロダクトのうち、陸上Hゲインのデータのみについてバイアス補正を行って以降の全大気平均濃度の算出に使用した。

（注1） Total Carbon Column Observing Network. 炭素カラム全量観測ネットワーク(<http://tccon.ornl.gov>)。 地上に設置した高波数分解能フーリエ変換型赤外分光計(FTS, Fourier transform infrared spectrometer)による全球観測網。この分光計を用いて太陽赤外光を地上で観測することで、地球大気中の二酸化炭素、メタン、一酸化炭素、一酸化二窒素や他の大気中微量成分の濃度データを得ることが出来る。「いぶき」等の衛星による温室効果ガス観測の精度確認には無くてはならないものとなっている。

（注2） 現時点では2015年2月以降の二酸化炭素全大気平均濃度の推定値は予備的な結果であり、今後の検証作業完了後にデータの更新を予定している。

2.2 XCO₂の月別・経度帯別の緯度分布のモデル推定

「いぶき」のL4Bプロダクトは二酸化炭素濃度の6時間ごとの三次元分布データ（緯度経度で2.5°ごと）であり、2009年6月から2012年5月までの期間についてバイアス補正済みのXCO₂濃度データ（SWIR L2プロダクト）および地上観測データに基づいて推定計算した二酸化炭素の月別地域別の吸収排出量から、大気輸送モデルを用いてシミュレーション計算されている。二酸化炭素の全大気平均濃度の推定にあたり、「いぶき」のSWIR L2プロダクトが存在しない領域も含めて全球すべての地域でのXCO₂を推定するために、月別・経度帯別にXCO₂の平均的な緯度分布をこのL4Bプロダクトから以下のように推定した。

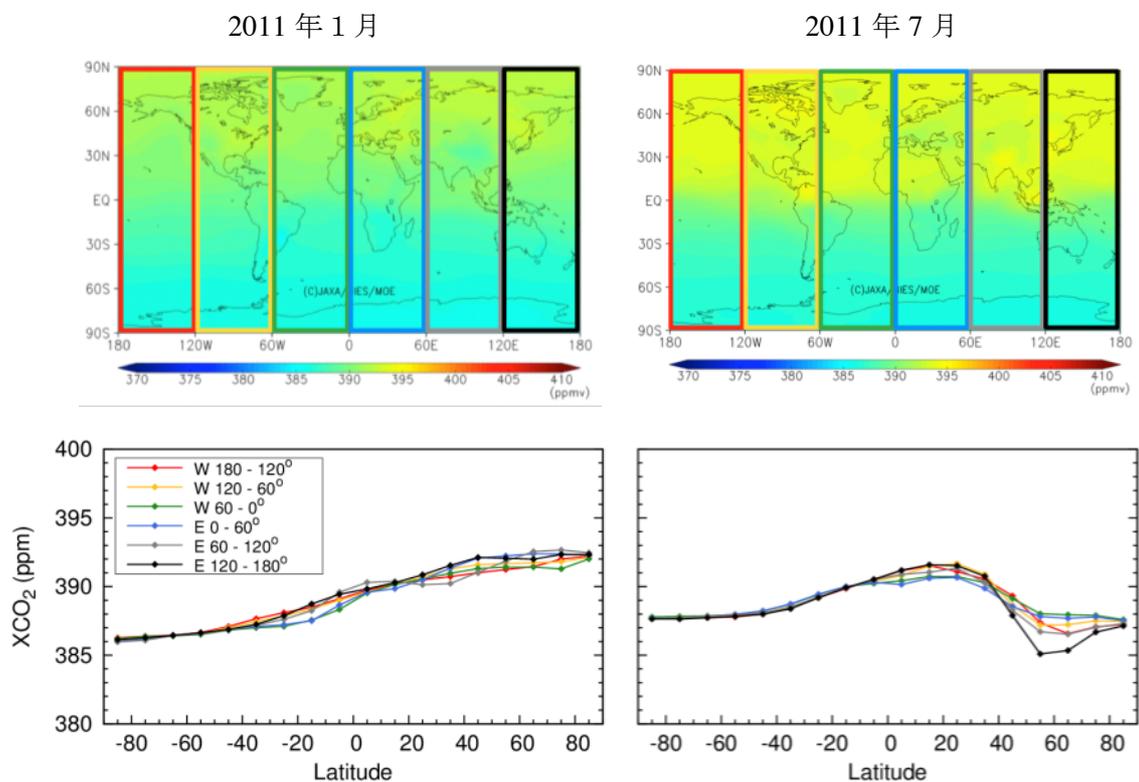


図2 GOSAT L4Bプロダクトから計算した2011年1月と7月におけるXCO₂平均値の分布（上図）と、各経度帯における緯度10°ごとのXCO₂平均値の緯度分布（下図）。上図の経度帯ごとの枠の色は下図の折れ線の色と対応する。

まず、L4Bプロダクトについて、全球の経度帯を60°ごとに6分割し、さらに緯度10°ごとに分けた範囲内のXCO₂平均値の月平均を計算した（図2）。次に、南緯80~90°（南極）は、異なる経度帯であっても地理的条件が近く、かつ二酸化炭素の放出源や吸収源の影響が少なくXCO₂の月平均値が比較的安定していることから、この場所のXCO₂

をXCO₂の緯度分布を求める際の基準値とし、各経度帯について緯度10°ごとに下記のように偏差Dを計算した。

$$D = (\text{各緯度帯におけるXCO}_2\text{平均値}) - (\text{南緯80} \sim \text{90}^\circ\text{におけるXCO}_2\text{平均値}) \quad (2)$$

2009年6月～2012年5月のすべての年の月についてDを計算して、1月から12月までの各月3年分のDの平均値 D_{mean} を求め、この値を月ごと・経度帯ごとのXCO₂の平均的な緯度分布とした(図3)。

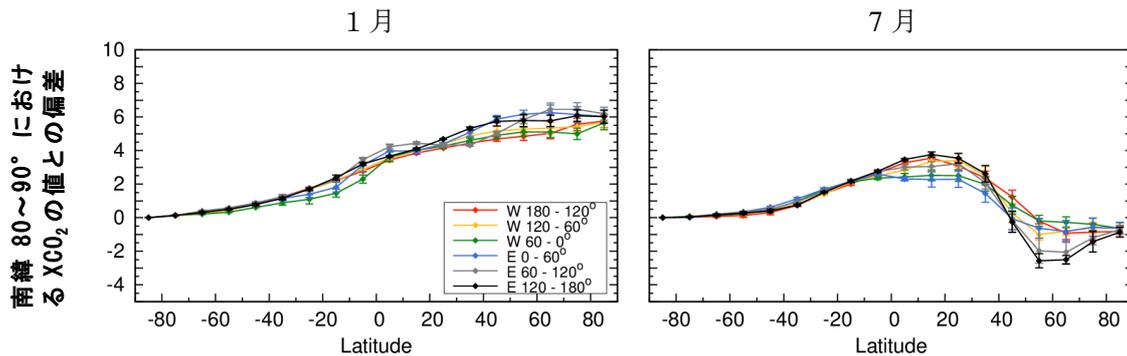


図3 各経度帯における月ごとのXCO₂の緯度分布平均値(1月と7月の例)。各緯度のXCO₂平均値を示す点における縦棒は、3年間のXCO₂の標準偏差を示す。

2.3 月別全球XCO₂の推定

2.1節でバイアス補正を行った「いぶき」のXCO₂観測値(L2値)について、2.2節と同様に経度60°ごとに分割した各経度帯について緯度10°ごとの範囲内で平均値を各年の月ごとに求めた。このとき、観測値の代表性を高めるために、各経度帯・緯度帯・年月におけるL2観測値が5個以上の場合についてのみ平均値を求めた。(以下、『「いぶき」XCO₂値』とはL2 XCO₂のバイアス補正済みのデータの平均値を意味する)。

これらのL2観測値には空白域があるので、2.2節で求めた各経度帯・各月における D_{mean} の緯度分布を用いて空白域を補完するために、L2観測値に次のように(3)式を当てはめ、最小二乗法により a の値を推定した。

$$(\text{経度}60^\circ \times \text{緯度}10^\circ\text{ごとの「いぶき」XCO}_2\text{値}) = a + D_{\text{mean}} \quad (3)$$

a は南緯80°～90°におけるXCO₂平均値にあたるため、 a の値はすべての経度帯について共通となる。このように推定した a と D_{mean} の和を経度60°×緯度10°ごとのXCO₂月平均値とした。「いぶき」XCO₂値と、緯度分布とを図4に示す。

以上のようにして各年の月ごとに経度帯別の緯度10度ごとのXCO₂を推定し、全球に

ついて地表面面積に応じた重み付け平均した値を、各年の月ごとのXCO₂全球平均値(地球大気全体の平均値)とした。重み付け平均の際の緯度10度ごとの「重み」は、各範囲の中央の緯度(例えば緯度-90~-80°の範囲なら-85°、緯度40~50°の範囲なら45°)の余弦、すなわち

$$\text{重み} = \cos(-85 + 10n)^\circ \quad (4)$$

とした。ここでnは0~17の整数を示す。

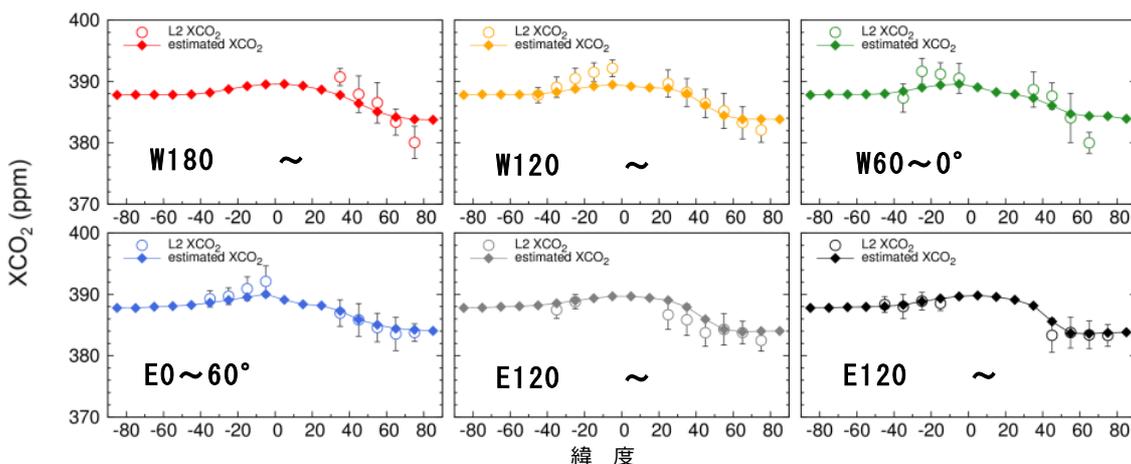


図4 2011年8月の6つの経度帯における、SWIR L2 XCO₂観測値(○)と、推定されたXCO₂(◆)の緯度帯分布

3. 二酸化炭素全大気平均濃度の推定経年平均濃度(経年トレンド)

二酸化炭素の全大気平均濃度は北半球の冬季から春季にかけて高く、夏季に低い季節変動を伴って年々上昇している。統計計算によって平均的な季節変動を求めて観測値から差し引いたものを「経年トレンド」とよぶ。ある月の経年トレンド濃度はその前後半年の1年間の平均値とほぼ同じ値を示す。

このようにして算出した二酸化炭素全大気平均濃度の経年トレンドは観測期間中に一定ではなく、増加率の大きい年と小さい年がある。図5の赤線は二酸化炭素全大気平均濃度の経年トレンドおよび年増加率を示しており、経年トレンドを微分したものが増加率に相当する。二酸化炭素全大気平均濃度は2011年に増加率が小さく、2012年末から2013年始めにかけて大きな増加率があったことがわかる。これに対して米国海洋大気庁が地上の観測網を利用して算出した地表の全球平均濃度[Ed Dlugokencky and Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)]の経年変動と

増加率が図5の青線である。両者の増加率は位相がやや違っているものの、全体的にはほぼ同様の変動を示している。地表の観測は、標準になるガスと比較することで非常に高い精度で実施されている。よって、両者の一致から、GOSATの観測センサも高い安定性を持って観測を行っていることが分かる。

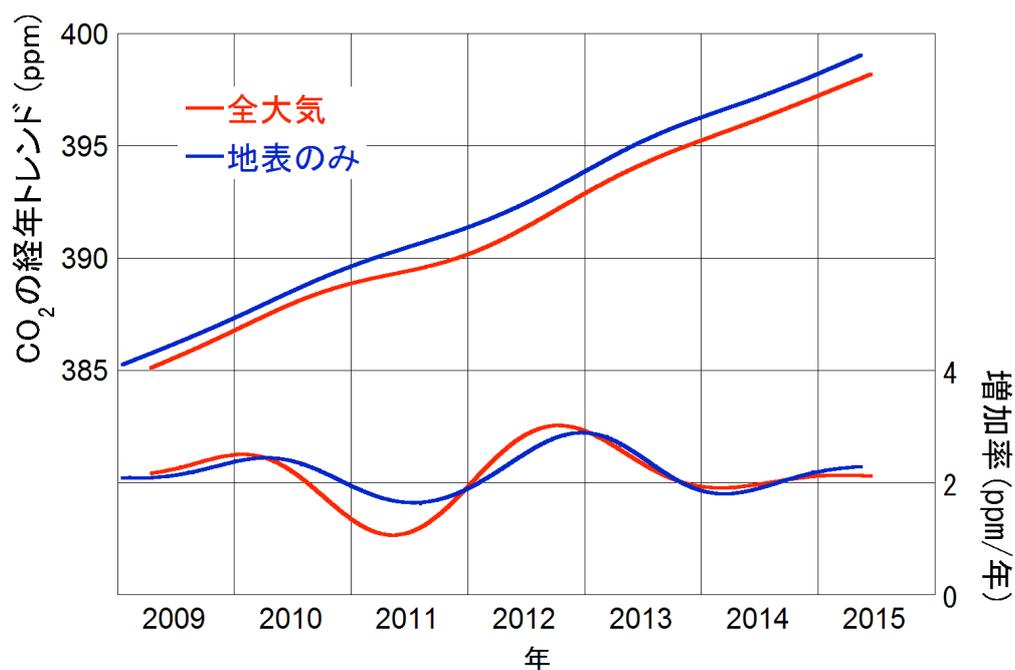


図5 二酸化炭素濃度の全大気平均（赤）と地表のみの全球平均（青）の経年トレンドと増加率

4. 二酸化炭素全大気平均濃度の特徴

図6に「いぶき」による月別二酸化炭素の全大気平均濃度と経年トレンドを示す。二酸化炭素全大気平均濃度は平成27年12月の時点で、月平均として初めて400 ppmを超えた。二酸化炭素全大気平均濃度の近年の増加率は2.0~2.5 ppm/年となっており、増加率がそのまま続き、これまでと同様の季節変動が継続した場合は、平成28年3月頃に経年トレンド濃度が400 ppmを超えた可能性がある。

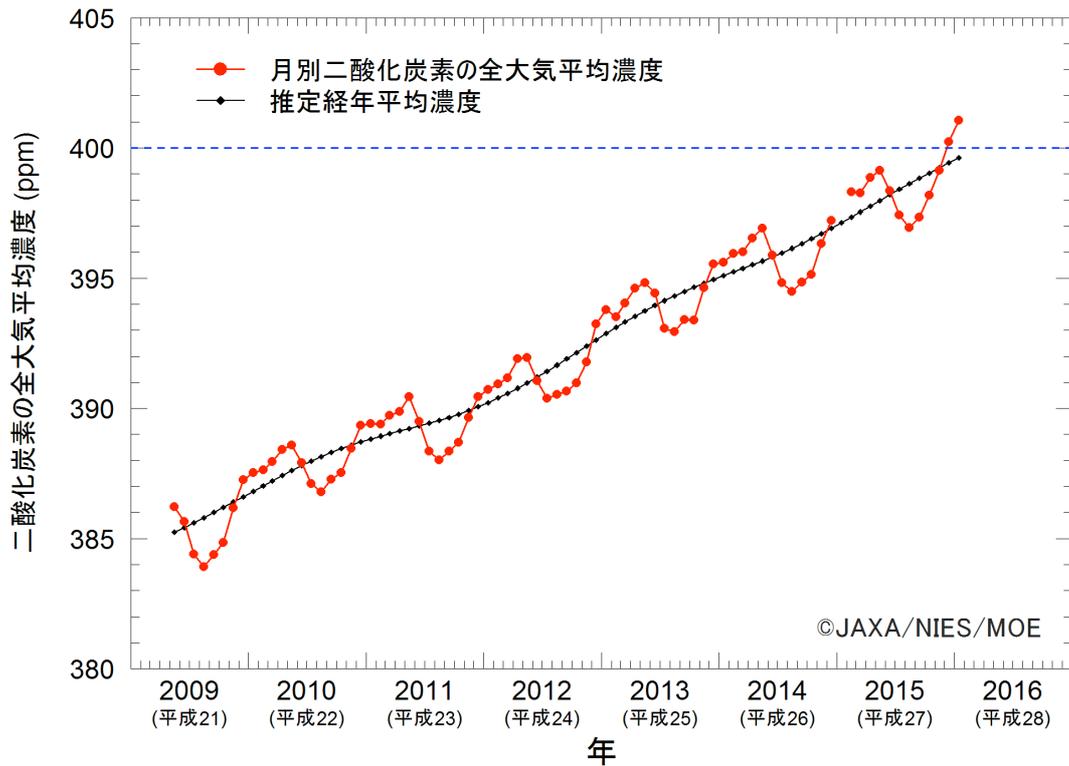


図6 「いぶき」による月別二酸化炭素の全大気平均濃度と経年トレンド。

(補足：第2版からの改訂事項)

- ・最新の検証解析の結果に基づき、2.1に示したV02.31~V02.60プロダクトのバイアス値を変更した。
- ・再解析の結果、V02.21プロダクトのバイアスの時間依存性を示す(1)式の係数が若干変化した。
- ・上記のバイアスの再評価結果に基づいて、全期間の二酸化炭素全大気平均濃度の再計算を行った。
- ・上記に伴い、3章として記述していた二酸化炭素全大気平均濃度推定値の誤差の記述について再検討を行うため、記述を省略した。
- ・「4. 二酸化炭素全大気平均濃度の特徴」における記述内容を平成28年5月に公表する結果に基づいて変更した。
- ・図6を平成28年5月に公表するグラフに差し替えた。

謝辞

「いぶき」観測データの濃度算出処理 (FTS L2処理) には、気象庁提供の気象予報数値データGPV (Grid Point Value) を利用している。また、「いぶき」観測濃度データの検証と補正にはTCCONデータ(<http://tcon.ornl.gov>)を用いた。ここにGOSATプロジェクトとして謝意を表す。なお、国立環境研究所の所有するTCCON観測地点つくばと陸別の運用は、GOSATプロジェクトの一環として実施されている。