

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18185

研究課題名（和文）衛星グローバル観測によるCO<sub>2</sub>炭素同位体比を指標とした炭素収支の定量的解明

研究課題名（英文）Quantitative analysis of global carbon cycle using stable carbon isotopic ratio derived from satellite measurement

研究代表者

佐藤 知紘（Sato, Tomohiro）

国立研究開発法人情報通信研究機構・テラヘルツ研究センター・主任研究員

研究者番号：60774627

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地球規模の温暖化を予測する上で、陸域・海洋・人間活動等のCO<sub>2</sub>排出や吸収の収支を理解することは重要であり、炭素同位体比はその強力な指標となる。

本研究では、CO<sub>2</sub>炭素同位体比のグローバルな振る舞いを理解するために、GOSAT衛星による長期観測データと温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）の地上観測データを用いて機械学習モデルを構築し、WDCGG観測と同等の数パーミルの精度でCO<sub>2</sub>炭素同位体比のグローバル分布を導出した。その結果、CO<sub>2</sub>の人為排出源が多く存在する北半球中緯度帯でCO<sub>2</sub>炭素同位体比が負に大きな値を取ることを示した。追検証は必要だが、衛星観測による同位体研究の更なる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CO<sub>2</sub>炭素同位体比観測は、これまでは質量分析計による地上観測や航空機観測が主流であった。これらは観測精度は十分だが、観測範囲が時空間的に制限されるという課題があり、地球全体をグローバルに観た包括的な理解は進んでいなかった。本研究は、GOSATの豊富な観測データと機械学習の導入により、CO<sub>2</sub>炭素同位体比のグローバル分布を初めて導出した。また、衛星による同位体観測の観点では、本研究は従来の水やオゾンのような10～100パーミル程度の大きな同位体濃縮ではなく、数パーミル程度の小さなCO<sub>2</sub>の同位体濃縮を導出した。本研究を先駆けとして、メタンや窒素化合物等の他の分子種へと発展していくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：In predicting global warming, it is important to understand the balance of CO<sub>2</sub> emissions and absorption from land, ocean, human activities, etc. Carbon isotope ratios are its powerful indicator.

To understand the global behavior of CO<sub>2</sub> carbon isotope ratios, we constructed a machine learning model using long-term observation data from the GOSAT satellite and ground observation data from the World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG). Global distribution of CO<sub>2</sub> carbon isotope ratios were derived with a precision of a few per mille, equivalent to WDCGG observations. As a result, we showed that CO<sub>2</sub> carbon isotope ratios take large negative values in the mid-latitudes of the Northern Hemisphere, where there are many anthropogenic CO<sub>2</sub> emission sources. Although further verification is necessary, it showed the further potential of isotope research using satellite observations.

研究分野：大気化学、衛星リモートセンシング、機械学習

キーワード：地球温暖化 衛星リモートセンシング 炭素同位体比 リトリーバル解析 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

近年、地球規模で進行する温暖化が問題となっている。大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 濃度は、陸域や海洋、人間活動等の排出源と吸収源による収支バランスで決定される。この中で人為起源による CO<sub>2</sub> 排出量は近年増加しており、経済新興国の中にはその見積りに 50%以上の不確実性が存在するものもある [Andres et al., 2012]。将来の地球温暖化を正確に予測するためには、CO<sub>2</sub> 排出源や吸収源の特定およびそれらのフラックスを定量的に見積ることが不可欠である [IPCC AR5, 2013]。そのために、CO<sub>2</sub>/CO 等の濃度比を用いる方法がある [Takegawa et al., 2004] が、炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ) はより直接的に排出源や吸収源による収支を定量化できる強力な指標である。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  値は次式で定義され、基準値には、一般にベレムナイト炭素安定同位体比 ( $1.12 \times 10^{-2}$ ) が用いられる [Craig, 1957]。

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = ({}^{13}\text{R}_{\text{観測}} / {}^{13}\text{R}_{\text{基準}} - 1) \times 1000 [\text{‰}], \quad {}^{13}\text{R} = [{}^{13}\text{CO}_2] / [{}^{12}\text{CO}_2]$$

現在の大气中の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の代表値は約 -8‰ とされており、これは陸域生物圏からの排出 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -25.7\text{‰}$ ) と吸収 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -26.0\text{‰}$ )、海洋からの排出 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -9.5\text{‰}$ ) と吸収 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -10.0\text{‰}$ )、化石燃料燃焼による排出 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -28.0\text{‰}$ ) 等のバランスで決定される [Shoemaker et al., 2010]。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値は地球全体として減少傾向 (-0.03‰/年) にあり、また、北半球中緯度帯では夏に  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値が増加するという季節変動 (変動幅 1‰程度) が報告されている [Nakazawa et al., 1997]。

このように、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の議論には少なくとも 1‰ の精度が要求されるため、これまでは質量分析計による地上観測や航空機観測が主流であった。しかし、これらは観測エリアや観測頻度が制限されること、および測器間のバイアスの影響の観点から、現状では  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  のグローバルな時空間代表性を担保することはできていない。同一測器による高空間充填率かつ高頻度な観測を行うためには、衛星リモートセンシング (リモセン) による  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  導出手法を確立する必要がある。しかし、 ${}^{12}\text{CO}_2$  と  ${}^{13}\text{CO}_2$  の両方を観測できる衛星リモセンの中で最も高感度なセンサの一つである GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) [Kuze et al., 2009] の観測データを用いた場合の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  導出精度は 30‰ と見積もられており [Reuter et al., 2012]、これまで衛星リモセンでは精度 1‰ の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の議論は不可能と考えられてきた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、GOSAT 観測データを用いた  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  導出精度を従来よりも 30 倍向上させ、従来は不可能とされていた衛星リモセンによる精度 1‰ の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  導出を実現し、時空間代表性が担保された  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  グローバル分布を世界で初めて導出することである。

GOSAT は高度約 666 km の太陽同期準回帰軌道を、回帰日数 3 日、観測地点ローカルタイム 13:00 で周回する人工衛星で、下方式赤外分光器 TANSO-FTS と画像イメージャー TANSO-CAI が搭載されている。観測緯度帯は 85°S~85°N、1 日の観測点数は約 16000 であり、高い時空間分解能による観測が可能である。

## 3. 研究の方法

本研究では、研究計画提案時に示した 3 つの方法で GOSAT の観測スペクトルからの  ${}^{12}\text{CO}_2$  と  ${}^{13}\text{CO}_2$  存在量の推定 (リトリバル) 方法を  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  導出に最適化し、一つひとつの観測の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  導出精度向上を図った。さらに、機械学習による解析を追加で実施し、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  グローバル分布を導出した。

## (1) リトリバル手法の最適化

本研究では、GOSAT 観測データからの  ${}^{12}\text{CO}_2$  量導出に実績があるリトリバルアルゴリズム RemoTeC [Butz et al., 2011] を基盤とし、これを拡張する形でリトリバル手法の最適化を行った。本アルゴリズムでは、衛星解析に広く用いられている最大事後確率推定法 (MAP 法) を使って存在量を推定する。MAP 法とは、求めたい存在量  $x$  がある先験値  $x_a$  である確率 (事前確率) が先見値の分散・共分散行列  $S_a$  で与えられた場合に、正規分布に従う分散・共分散行列  $S_y$  を持つ観測スペクトル  $y$  から、事後確率が最大となる存在量の解を求める手法 [Rodgers, 1976] である。解の推定は、次式で定義される  $\chi^2$  が最小となる  $x$  を求める。

$$\chi^2 = [y - F(x, b)]^T S_y^{-1} [y - F(x, b)] + (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a)$$

ここで、 $F$  は放射伝達モデル、 $b$  はそのパラメータであり、太陽光が地表面に反射されてセンサーに届くまでの太陽光の放射過程をシミュレーションするモデルである。

まずは、米国の Aura 衛星搭載 TES (Tropospheric Emission Spectrometer) による水の水素同位体比観測 [Worden et al., 2006] や国際宇宙ステーション搭載 SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) によるオゾンの酸素同位体比観測 [Sato et al., 2014] に倣い、先見値の最適化を実施した。本研究では Twomey-Tikhonov 法を導入し、 $x_a$  には、地球大気の  $\text{CO}_2$  炭素同位体比の代表値である  $x_a = -8\%$  とした [Shoemaker et al., 2010]。

また、リトリーバルの高度に対する感度の指標である Averaging kernel (AK) を用いて、リトリーバル解析に用いる波長範囲を最適化した。GOSAT の観測スペクトルでは、 $\text{CO}_2$  の吸収帯はバンド 2 (1.6  $\mu\text{m}$  帯) とバンド 3 (2.0  $\mu\text{m}$  帯) に存在する。図 1 に、各バンドを用いた場合の  $^{12}\text{CO}_2$ 、 $^{13}\text{CO}_2$  の AK を示す。バンド 2 の  $^{12}\text{CO}_2$  とバンド 3 の  $^{13}\text{CO}_2$  の AK が近い値を取ることから、本研究ではこれらを採用した。具体的には、 $^{12}\text{CO}_2$  は 6170~6277  $\text{cm}^{-1}$ 、 $^{13}\text{CO}_2$  は 4800~5040  $\text{cm}^{-1}$  の波長範囲を用いた。

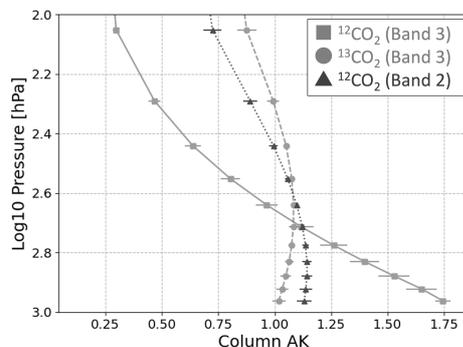


図 1: 波長帯による観測感度

## (2) 機械学習による $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 導出

上述のように最適化したリトリーバル手法を用いて、2009 年から 2014 年までの観測データを対象に  $^{12}\text{CO}_2$  と  $^{13}\text{CO}_2$  の存在量を導出し、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  を求めた。その結果を温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) [http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/] が提供する地上観測の結果と比較した。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値が冬に小さく、夏に大きくなる季節変動や、中緯度帯の方が  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値が小さくなるという傾向が確認できたものの、GOSAT 観測からの導出結果は WDCGG 観測よりもばらつきが数十倍と非常に大きいという課題があった。

そこで本研究では、GOSAT 観測から導出した  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  を用いて WDCGG の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値を予測する機械学習モデルを構築した。ランダムフォレスト回帰モデルを使用し、入力変数は GOSAT 観測から導出した  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 、太陽天頂角、衛星天頂角、気温、気圧の 5 つとし、正解値は WDCGG の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値とした。WDCGG の各観測値に対し、経度 5 度以内、緯度 2.5 度以内、時刻 24 時間以内の範囲で観測された GOSAT 観測の値を抽出し、データセットを作成した。これをランダムに 6:4 の割合で訓練データとテストデータに分割し、交差検証によってハイパーパラメータを調整した。これを 10 通りのデータ分割に対して実施し、最も精度が高かったハイパーパラメータを採用した。ここでは、Python (version 3.11.8) の機械学習解析用ライブラリである Scikit-Learn library (version 1.4.2) を使用した。

図 2 に、解析対象期間に連続して観測を実施していた 8 つの WDCGG の観測サイトに対する  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値の季節変動を示す。各パネルは、上段に GOSAT 観測による  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値、下段に WDCGG 観測および機械学習モデルで導出した  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値を示している。パネル (a) の北半球中緯度の観測サイト (THD, 124°W, 41°N) では、夏に  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  が極大値、冬に極小値を取る季節変動を示している。一般に、光合成によって排出される  $\text{CO}_2$  の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  は大きく、化石燃料など人為起源による  $\text{CO}_2$  の  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  は小さい値となる。夏は冬より光合成が活発に行われるため、観測された  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値の変動は、光合成の活発度と定性的に一致する。一方、絶対値に注目すると、GOSAT 観測では  $-20\%$  ~  $+20\%$  という大きな変動幅を持っていたが、機械学習による導出結果は  $-9$  ~  $-8\%$  程度の変動幅になり、WDCGG 観測の値と非常によく一致した。他の観測サイトでも、機械学習による導出結果と WDCGG 観測結果は非常によく一致していることが確認できた。

## 4. 研究成果

3. (2) で示した機械学習モデルを用いて GOSAT 観測から  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値を求め、グローバル分布を導出した (図 3)。ここでは、経度 30 度、緯度 15 度の範囲毎に求めた代表値を表示している。陸域のみのデータを使用し、各範囲でデータが 1000 点以下の場合には除外している。GOSAT 観測の時空間的不均一さを考慮し、本研究では各範囲のデータを Johnson SU 分布 [Johnson, 1949] で近似し、その平均値を代表値、標準偏差 ( $1\sigma$ ) を精度とした。Johnson SU 分布は、正規分布に左右非対称の歪みを取り入れた分布であり、経度 120°E~150°E、緯度 30°S~15°S の範囲の例では、正規分布で近似した場合のフィッティング誤差 (差の二乗和平方根) は 0.031、Johnson SU 分布では 0.022 であり、フィッティング誤差は約 0.7 倍減少している。

図 3 に示す  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  のグローバル分布では、北半球中緯度帯で約  $-8.5\%$  の小さな  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値を示し、赤道域から南半球中緯度帯では約  $-8.3\%$  の大きな値を示した。これは、化石燃料などの人為起源による  $\text{CO}_2$  排出量の傾向と定性的に一致する。一方、例えば米国では西側は  $-8.45\%$ 、東側は  $-8.58\%$  の値を示し、東側の方が  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値が小さい。このような地域毎の詳細な分析を実施するためには、 $\text{CO}_2$  排出インベントリや、一酸化炭素 (CO) や二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ ) のような、 $\text{CO}_2$  と

同時に排出されるが生物圏のプロセスの影響をあまり受けない物質の分布との比較、さらには化学輸送モデルによる解析等による更なる検証が必要である。

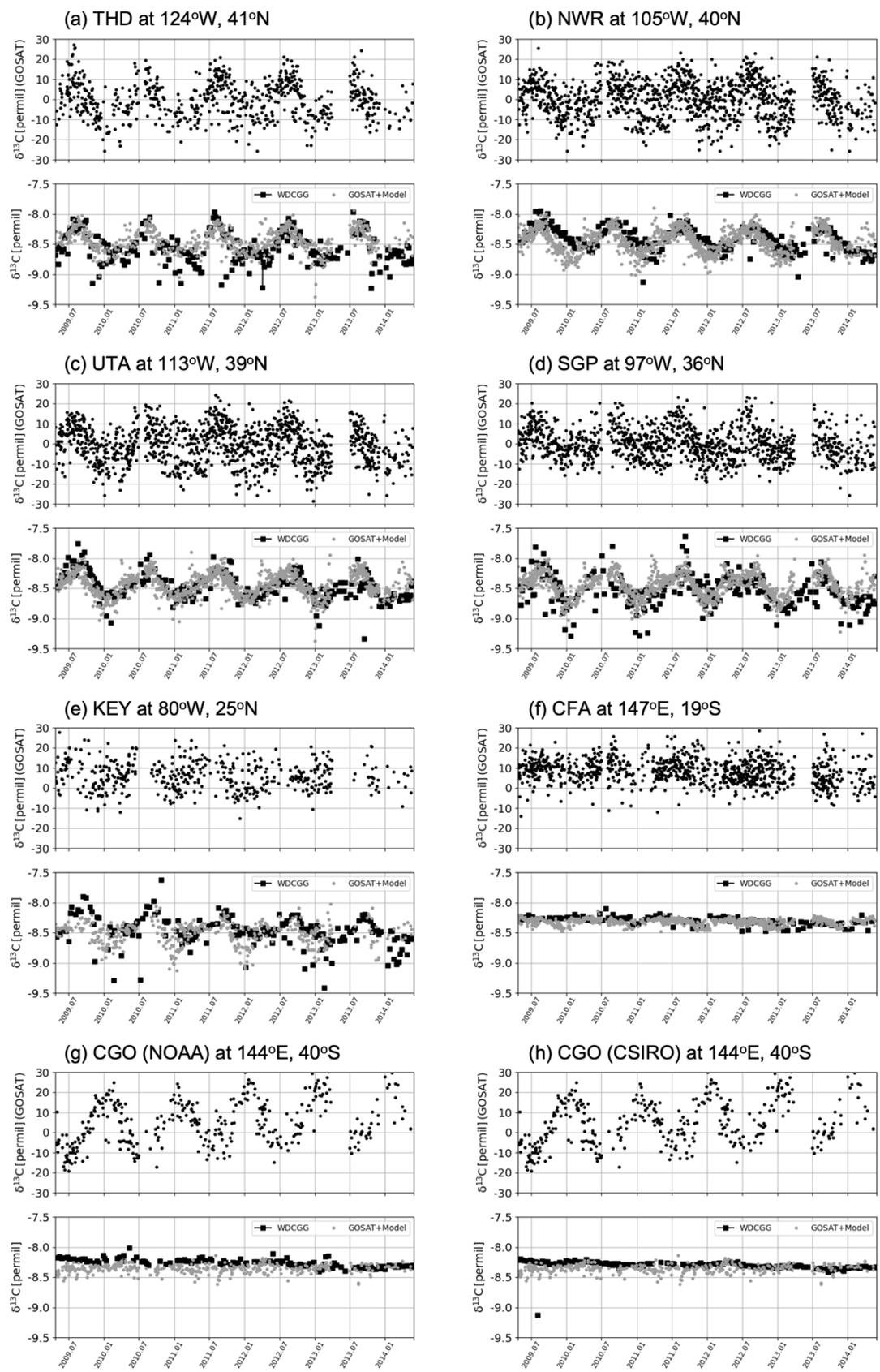


図 2: WDCGG の各観測サイトにおける  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の季節変動。上段: GOSAT 観測による  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値。下段: WDCGG 観測及び機械学習モデルで導出した  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  の値。

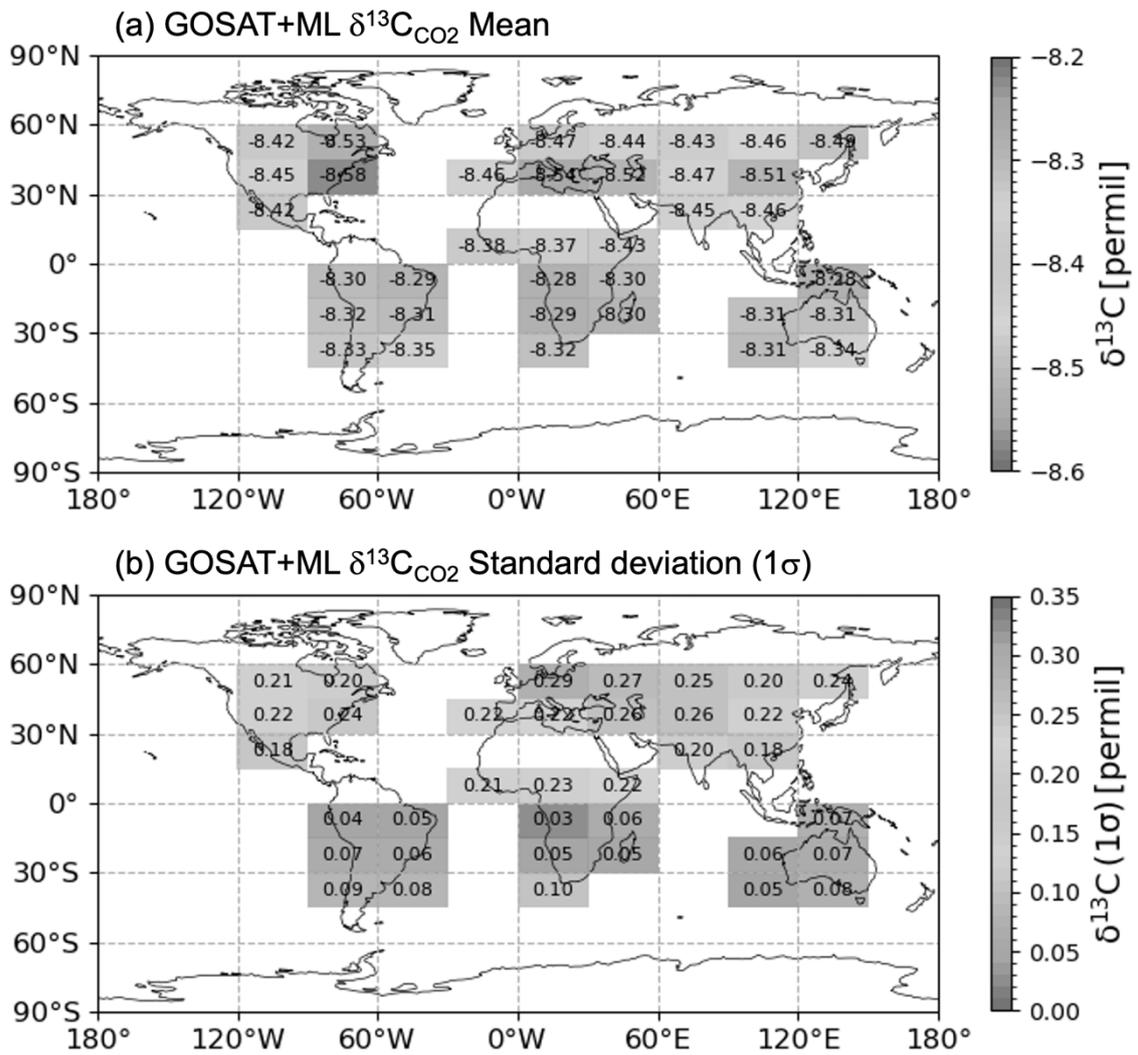


図 3: GOSAT 観測結果から機械学習モデルを用いて導出した $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ のグローバル分布.  
 (a) Johnson SU 分布の平均値. (b) Johnson SU 分布の標準偏差 ( $1\sigma$ ).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 T.O.Sato, N.Yoshida and Y.Kasai
2. 発表標題 Oxygen Isotopic Enrichments of Asymmetric Heavy Ozone Derived from the SMILES Observation
3. 学会等名 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.O.Sato, N.Yoshida and Y.Kasai
2. 発表標題 Diurnal variation of oxygen isotopic enrichments of asymmetric heavy ozone observed by SMILES
3. 学会等名 Limb Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------