

## 波照間島・与那国島における大気観測に基づく中国からの化石燃料起源 CO<sub>2</sub> 排出量の準リアルタイム推定手法

国立環境研究所 (NIES) と気象庁 (JMA) は、波照間島 (HAT、24.06°N、123.81°E) および与那国島 (YON、24.47°N、123.01°E) において CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の大気濃度の現場観測を 1990 年代半ばから実施しています。東アジアのモンスーンによって晩秋から早春にかけて高濃度の CO<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub> を含む空気塊が大陸からこれらの島にしばしば運ばれるため、観測される CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> には比較的大きな総観規模の変動 (数時間から数日程度の周期を持つ変動) が頻繁に見られます (図 1)。HAT と YON での大気観測におけるフットプリント領域 (観測が捕捉しているとされる地表付近のシグナルの範囲) の分析により、これらの濃度上昇は主に中国からの排出に由来することが明らかになっています。さらに、CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の時間的変動にはかなりの類似性が見られますが、このことは、東アジアにおいて両者の地上からの放出量 (フラックス) の分布が互いに類似していることを示唆しています。したがって、総観規模の変動に対する CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の変動比 ( $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  比) は、中国の CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 放出比を反映しているという単純な仮定を立てることができます。実際、過去の研究 (Tohjima et al., 2014; 2020; 2022) では、1 月から 3 月までの 3 か月間の  $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  比の月平均値が 2000 年から 2010 年にかけて徐々に増加していることを明らかにしましたが (図 2)、この期間は中国の経済活動が前例のない規模で増加した期間と一致します。さらに、2020 年 2 月に  $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  比の急激な減少が確認されましたが、この時、中国全土で実施された厳しいロックダウンにより、化石燃料由来の CO<sub>2</sub> (FFCO<sub>2</sub>) 排出量が大幅に減少したと推定されました。

1 月から 3 月にかけての  $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  比と中国における CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 放出比との関係を調べるために、大気輸送モデル (NICAM- TM, Niwa et al. 2011) および CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> のフラックスデータ一式を用いて HAT における大気中 CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の濃度変動を計算しました。その結果、 $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  比と FFCO<sub>2</sub> 排出量と CH<sub>4</sub> 放出量の比 (FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) の間に直線関係があることがわかりました (図 3)。したがって、この直線関係を使用することで、観測された  $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  比を中国における FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 比に変換することができます。次に、比較的安定した  $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  比が観察された 2011 年から 2019 年までの 9 年間に対して FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 比の変化率を計算します。FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 比の変化率は、生態系起源 CO<sub>2</sub> フラックスと CH<sub>4</sub> フラックスに年々変動がないと仮定することで、中国からの FFCO<sub>2</sub> 排出量の変化率と読み替えることができます。最後に、HAT と YON の推定変化率の加重平均として FFCO<sub>2</sub> 変化率の推定値とします。

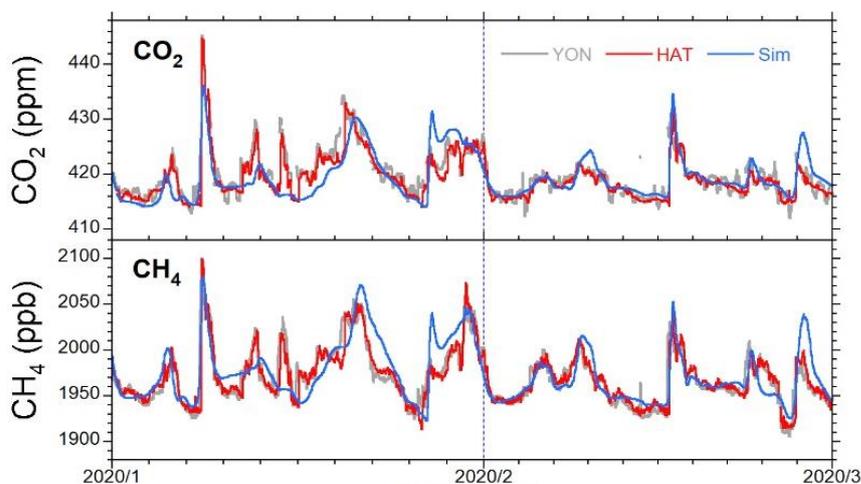


図1. (上) 大気中の  $\text{CO}_2$  と (下)  $\text{CH}_4$  のモル分率の1時間値の時系列。2020年1月から2月のYON (灰色線) とHAT (赤線) で得られたデータが示されている。青線は計算されたHATにおける $\text{CO}_2$  と $\text{CH}_4$ を示す。

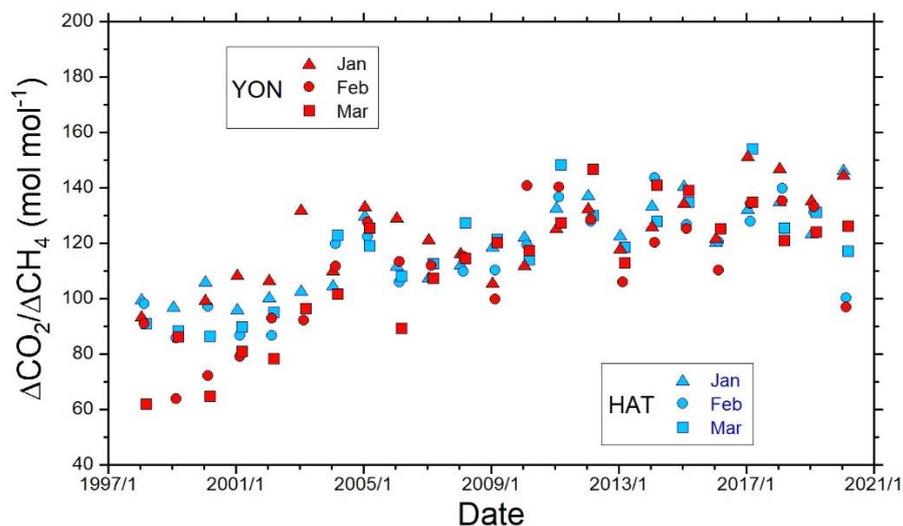


図2. YON (赤) とHAT (青) で観測された $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比の時間変化。各記号は月平均(三角:1月、丸:2月、四角:3月)を表している。 $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$ 比は、中国経済が前例のない成長を見せた2010年から2010年にかけて徐々に増加し、中国で全国的なロックダウンが実施された2020年2月に著しい減少を示した。

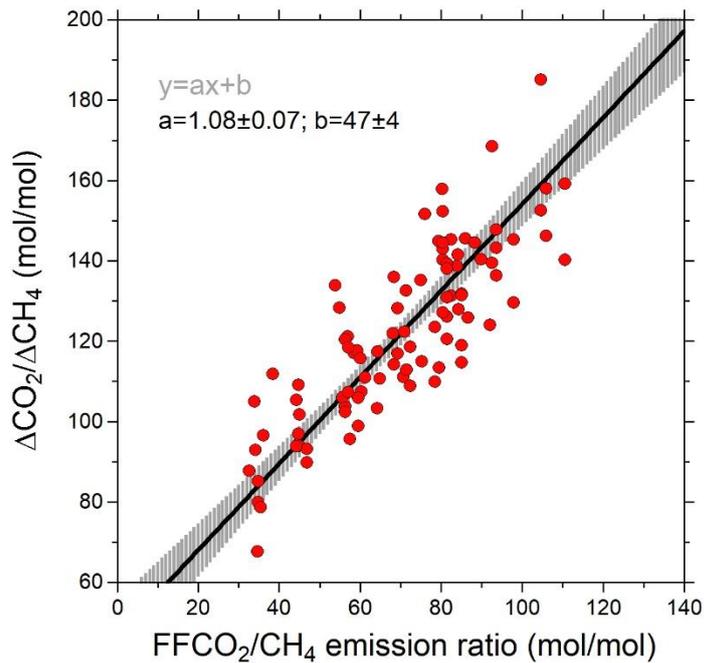


図 3. 中国の FFCO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 比と計算された ΔCO<sub>2</sub>/ΔCH<sub>4</sub> 比の散布図。赤線は回帰直線を表し、図中の「a」と「b」の値は、それぞれ傾きと y 切片を表す。灰色の縦棒は、回帰直線の不確かさ(1σ)を表す。

### 変動比の計算方法

ΔCO<sub>2</sub>/ΔCH<sub>4</sub> 変動比は、特定の時間窓内の 2 つの成分（ここでは CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub>）の連続した時系列の散布図の傾きとして計算されます。傾きは、Reduced Major Axis (RMA) 法によって計算され、標準偏差 (σ<sub>CO2</sub>) と相関係数 (R) も同時に計算されます。これらの計算は、時間窓を 1 時間ずつシフトすることにより、データセット全体に対して繰り返されます。次に、選択基準 (σ<sub>CO2</sub>>0.1ppm および R>0.7) を満たす傾きに対して、ΔCO<sub>2</sub>/ΔCH<sub>4</sub> 比の月平均または移動平均を計算します。相関分析の時間窓については、HAT では 24 時間が用いられ、YON では 84 時間というより長い時間が用いられました。これは、YON では局所的な生物圏起源の CO<sub>2</sub> 交換の影響が強く現れるため、この影響を抑制するためです (Tohjima et al., 2022)。

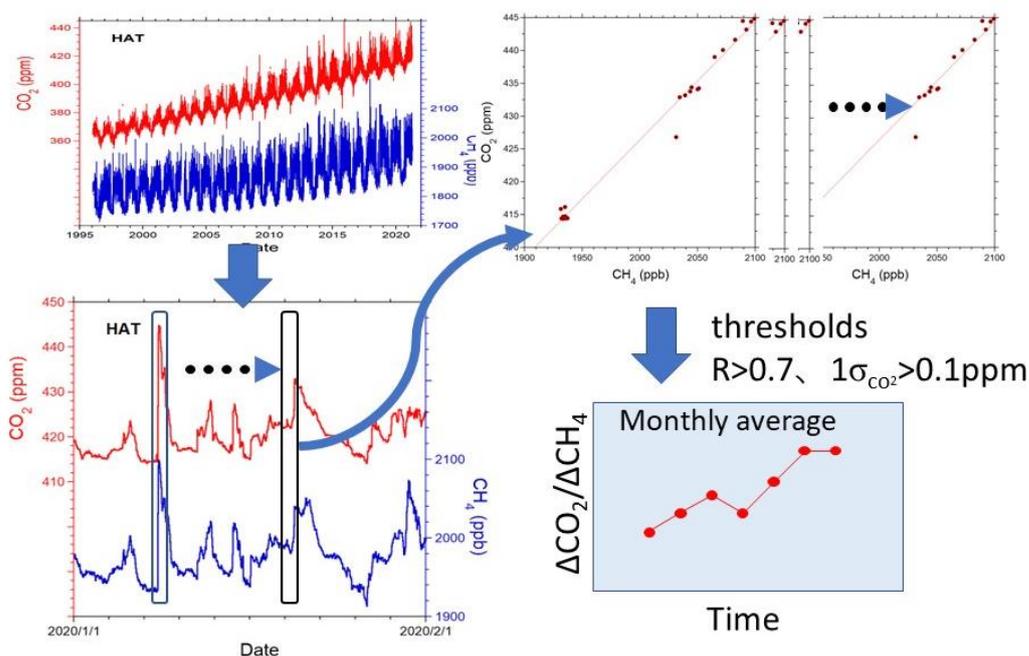


図 4.  $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{CH}_4$  変動比のデータ処理手順の概略図。

### 謝辞:

波照間島での現場観測は地球環境フォーラムと地球環境研究センターのスタッフ、および現地スタッフの継続的な協力の下実施されている。また、与那国島での長期観測も、気象庁の多くのスタッフの協力によって実施されている。この推定方法の開発は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF21S20800）、および、環境省地球環境保全等試験研究費（環 1451）による支援を受けて行った。NICAM-TM シミュレーションは、NIES スーパーコンピューターシステム（NEC SX-Aurora）を使用して実行された。

### 参考文献:

- Niwa Y, Tomita H, Satoh M, Imasu R (2011) A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport. *J Meteorol Soc Japan* 89: 255–268. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2011-306>
- Tohjima Y, Kubo M, Minejima C, Mukai H, Tanimoto H, Ganshin A, Maksyutov S, Katsumata K, Machida T, Kita K (2014) Temporal changes in the emissions of  $\text{CH}_4$  and CO from China estimated from  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  and  $\text{CO}/\text{CO}_2$  correlations observed at Hateruma Island. *Atmos Chem Phys* 14: 1663–1677. <https://doi.org/10.5194/acp-14-1663-2014>
- Tohjima Y, Patra PK, Niwa Y, Mukai H, Sasakawa M, Machida T (2020) Detection of fossil-fuel  $\text{CO}_2$  plummet in China due to COVID-19 by observation at Hateruma. *Sci Rep* 10: 18688. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75763-6>

Tohjima Y, Niwa Y, Tsuboi K, Saito K (2022) Did atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observation at Yonagunijima detect fossil-fuel CO<sub>2</sub> reduction due to COVID-19 lockdown? J Meteor Soc Japan 100(2): 437-444. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-021>