

首都圏における CO₂濃度観測によるCO₂排出量の逆推定

地球システム領域 大山 博史

首都圏におけるCO₂濃度観測によるCO₂排出量の逆推定



大山 博史（おおやま ひろふみ）

地球システム領域

衛星観測研究室/主幹研究員

専門：リモートセンシング、大気化学

高校生の頃の自分へ、環境問題を自分ごと化するためのアドバイス

二酸化炭素がどこからたくさん出ているか考えてみよう
排出を抑えるために自分にできることはあるかな？

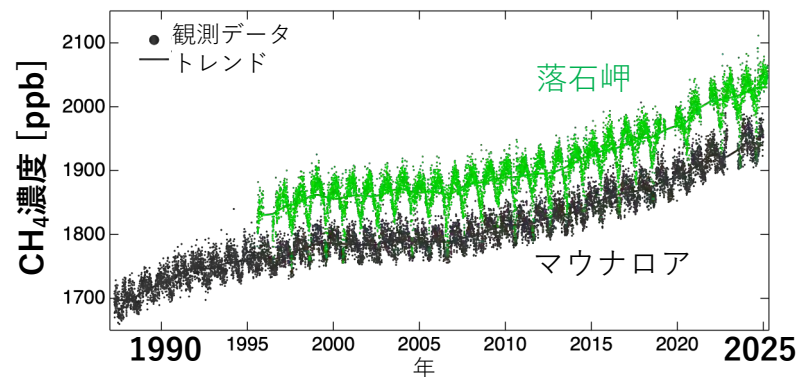
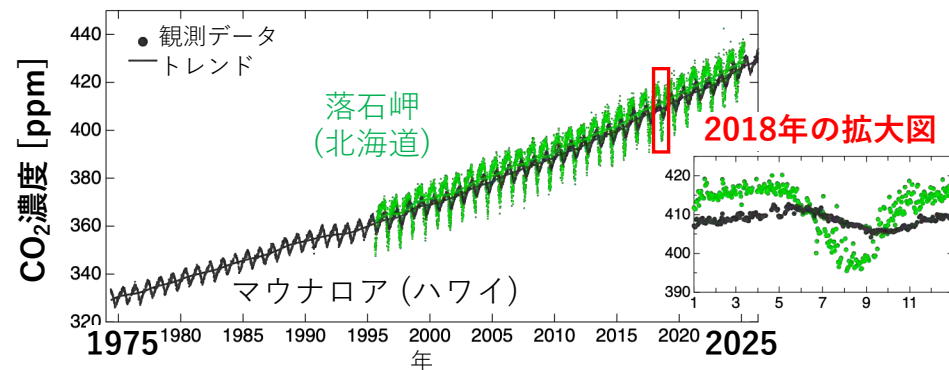
地球温暖化と温室効果ガス

温室効果ガスによる地球温暖化のメカニズム



CO₂とCH₄（メタン）の濃度の増加が、産業革命以前に対する1.3°Cの温度上昇の90% (CO₂: ~60%, CH₄: ~30%)以上を担っている

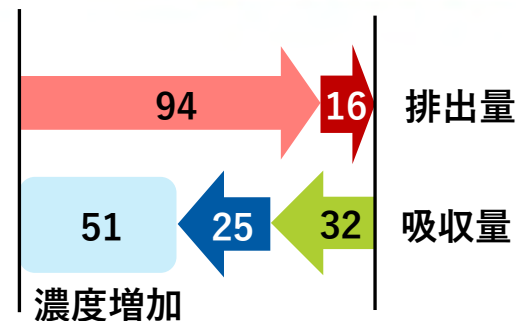
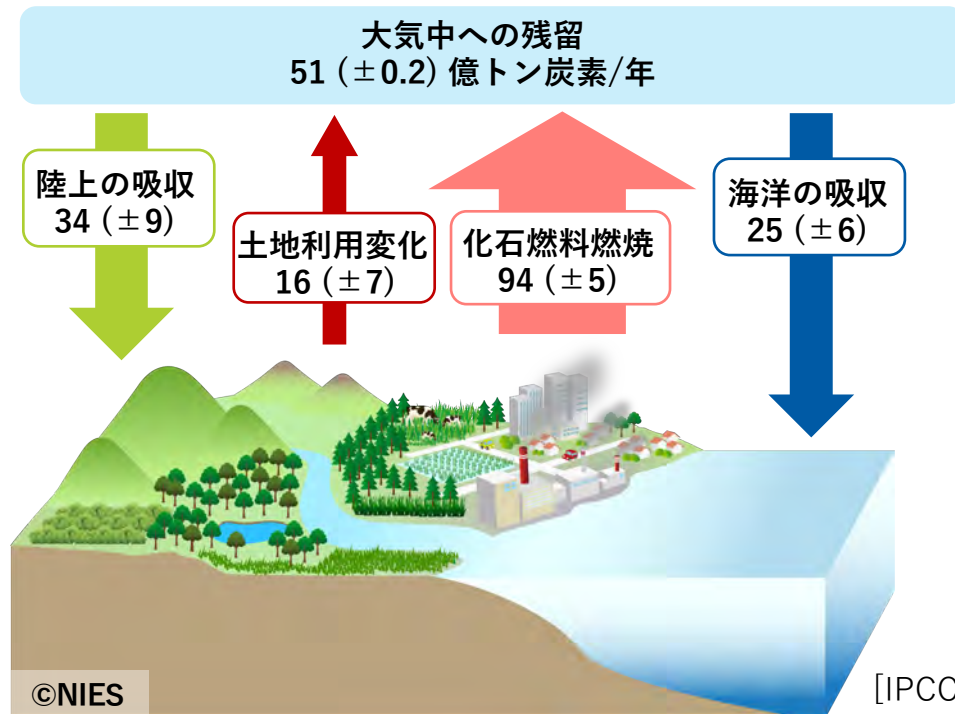
温室効果ガスの濃度



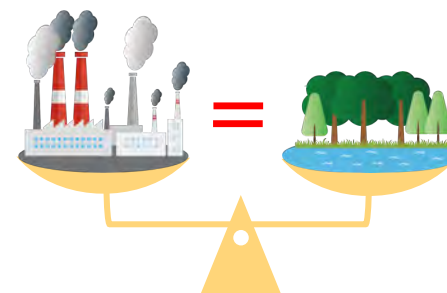
[出典: NOAA Global Monitoring Laboratory
国立環境研究所 地球環境研究センター]

二酸化炭素濃度増加の要因

2010～2019年の平均値 (単位: 億トン炭素/年)

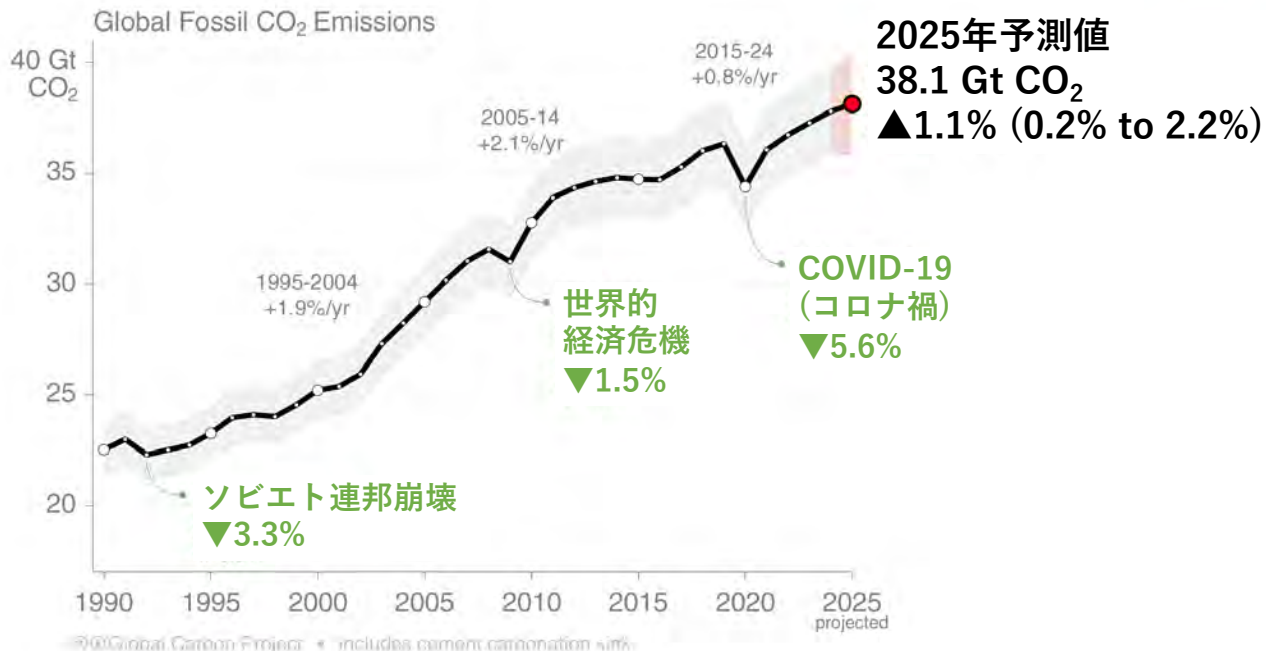


カーボンニュートラル
(排出量 = 吸収量)



世界の平均気温の上昇を産業革命前と比べて1.5°Cに抑えるためには (パリ協定の目標)、可能な限り早い温室効果ガス排出量の実質ゼロ (カーボンニュートラル) が必要

世界の化石燃料起源CO₂排出量の時間変化

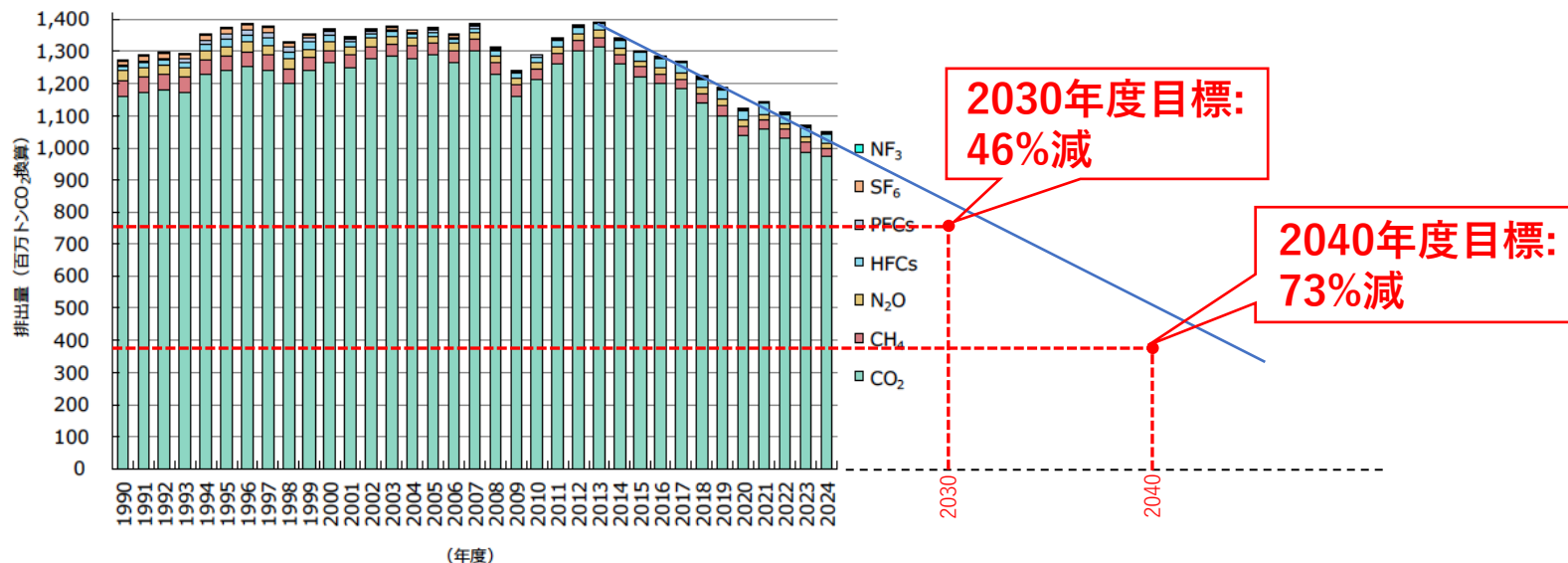


[出典: Global Carbon Project 2025]

- 経済危機やコロナ禍の時期を除くと、CO₂排出量は増加を続けている
- 2025年の排出量（予測値）は1990年に対して70%増加

日本の温室効果ガスの排出量は？

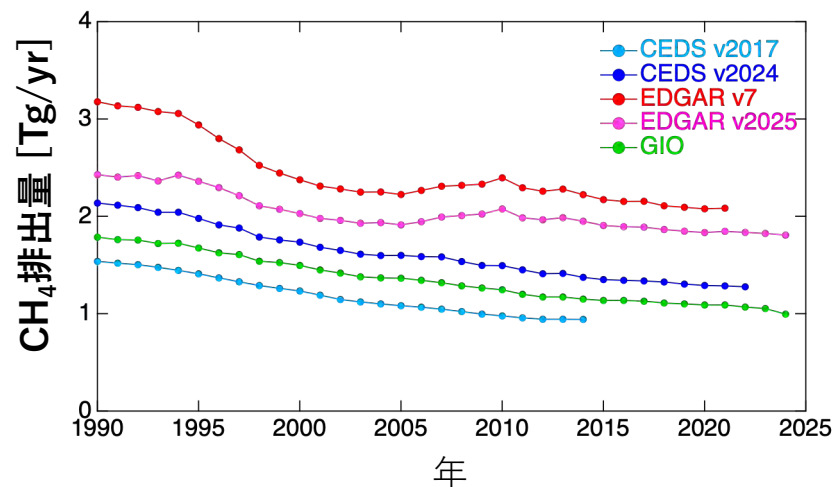
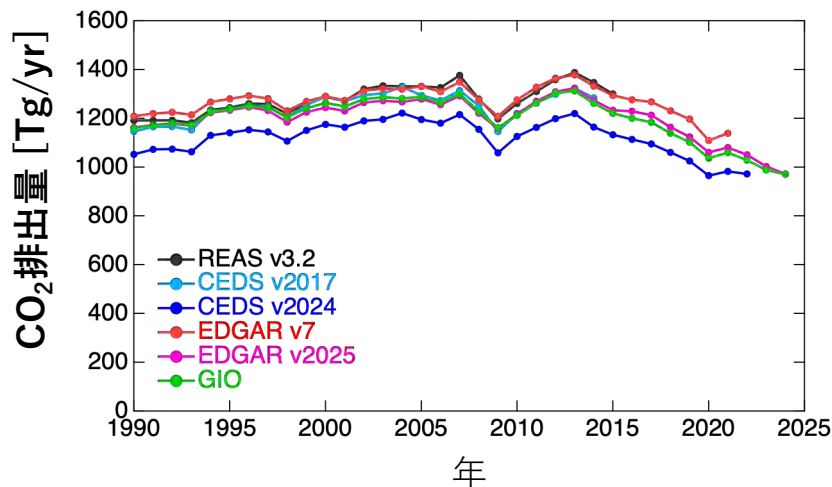
国立環境研究所（温室効果ガスインベントリオフィス: GIO）と環境省の報告値



[出典: 2024年度の我が国の温室効果ガス排出量及び吸収量（詳細）]

- 2013年以降、（特にCO₂の）排出量は減少傾向
（2024年度の排出量は、2023年度比で1.9%減少、2013年度比で28.7%減少）
- 長期的な排出量の傾向（青線）は、目標値より少し上回っている

世界の研究者が作成している排出量データベース間の比較



- 国の報告値 (GIO) に対する他のデータベースとの差の最大値は、CO₂で~7% (CEDS v2024)、CH₄で~78% (EDGAR v7)
- CH₄は排出源は多岐に渡り (農業、廃棄物、燃料等)、意図しない漏洩 (都市ガス、パイプライン) などがあるため、推定が難しい

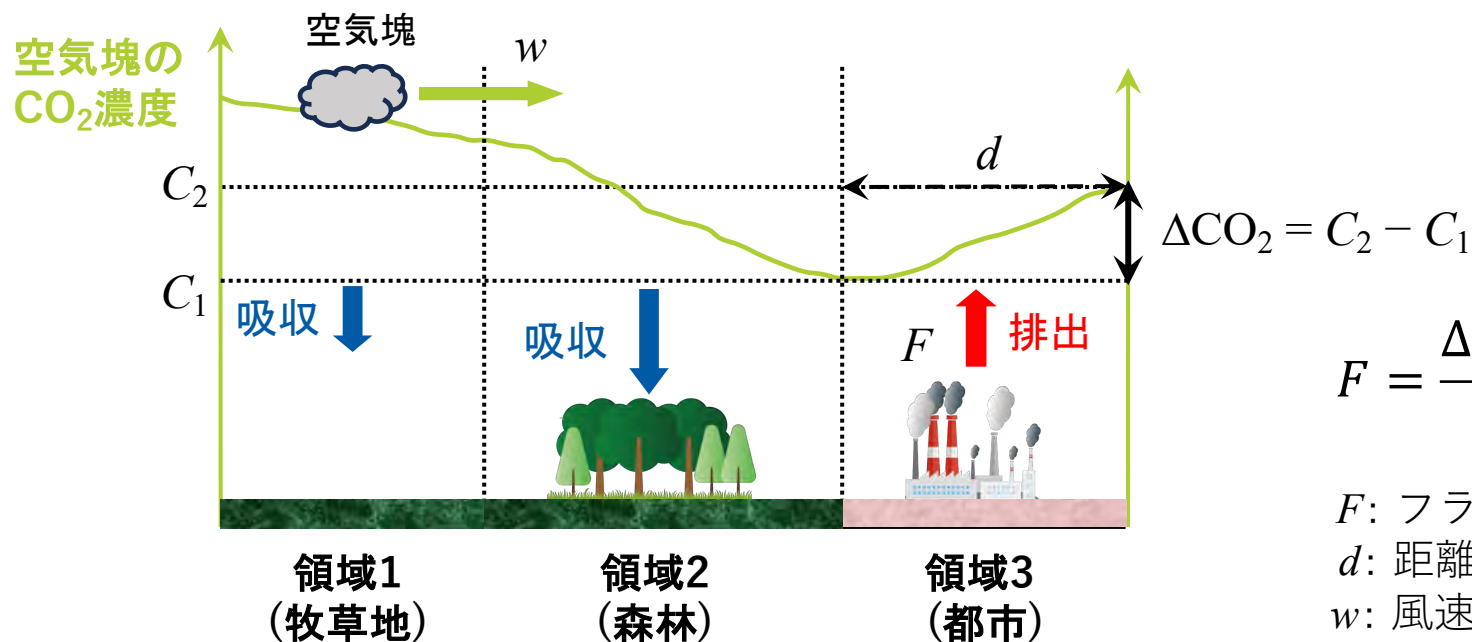
- 都市部は地球表面のわずか2%であるが、世界の人口の55%を占め、**温室効果ガス排出量の約70%以上**に関与している [IPCC, 2014]
- 排出量削減の主要なターゲットの一つ
- 削減対策の実効性を客観的に検証する方法が必要



夜間の明るい部分 (都市部)
= 人間活動が活発
≡ 温室効果ガスの排出量が多い

[出典: NASA's Goddard Space Flight Center]
(<https://svs.gsfc.nasa.gov/30517>)

CO₂の吸収・排出にともなう濃度変化の様子（1次元モデル）



$$F = \frac{\Delta\text{CO}_2 \times w}{d}$$

F : フラックス [ppm/s]

d : 距離 [m]

w : 風速 [m/s]

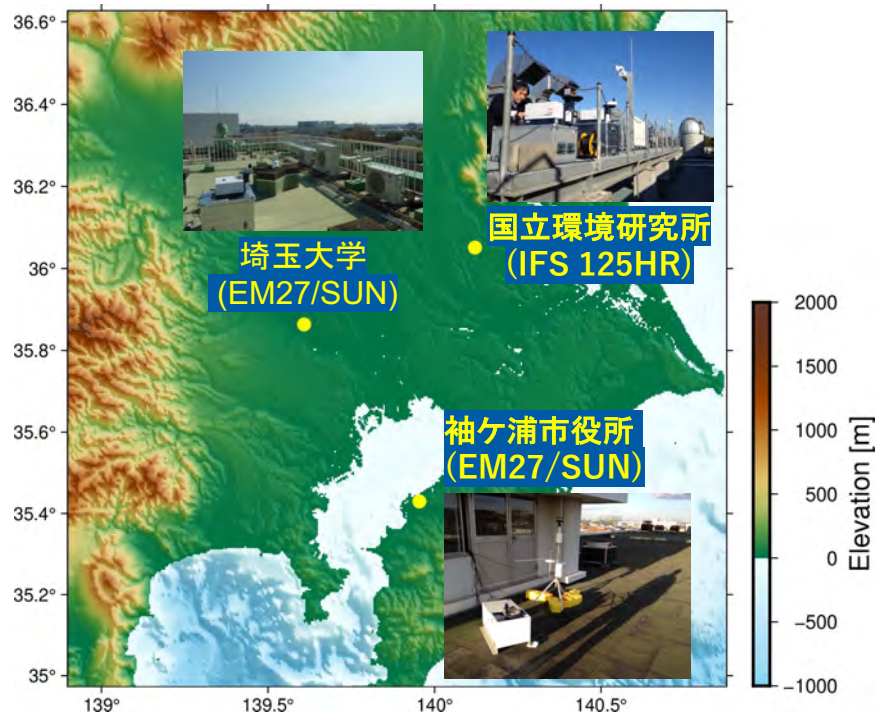
大気中のCO₂濃度の勾配



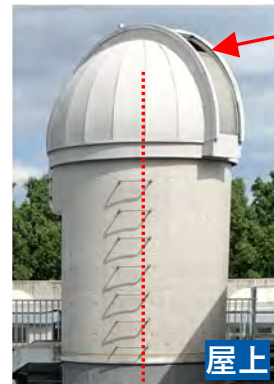
大気-地表間のCO₂フラックス
(どれだけ吸収/排出しているか)

首都圏における温室効果ガス濃度観測キャンペーン

キャンペーン期間中（2016年2-4月）
の観測地点



観測装置: フーリエ変換分光計



IFS 125HR



EM27/SUN



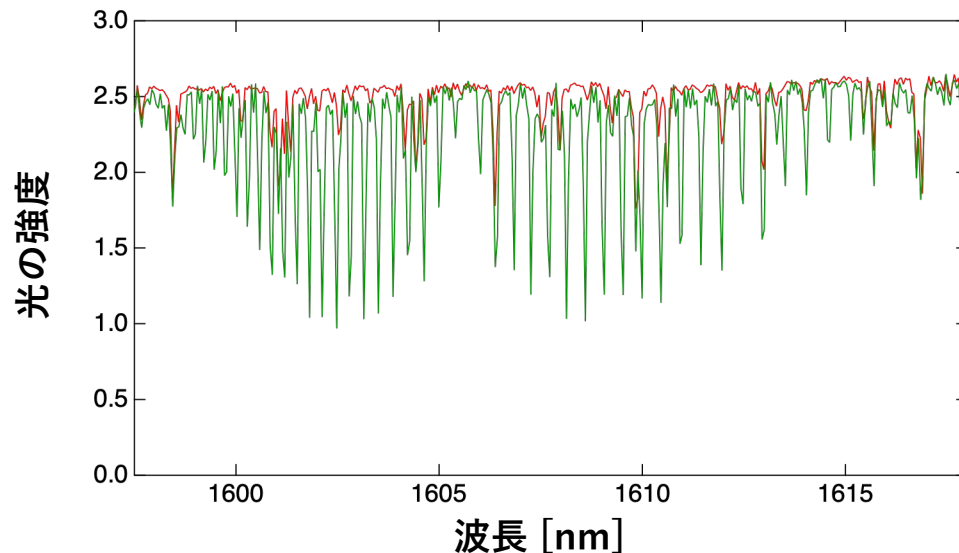
観測の計画と実施: 森野勇 (NIES)、Matthias M. Frey (KIT)、塩見慶 (JAXA)

太陽光を使った温室効果ガス濃度の測定方法



地上から大気上端までの平均的な濃度（カラム平均濃度）を測定

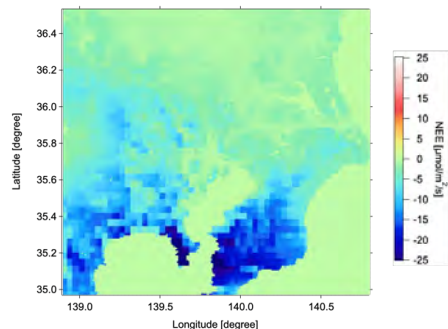
赤線: 大気圏外の太陽光スペクトル (フラウンホーファー線)
緑線: 地球大気を通過した太陽光スペクトル (CO_2 の吸収線)



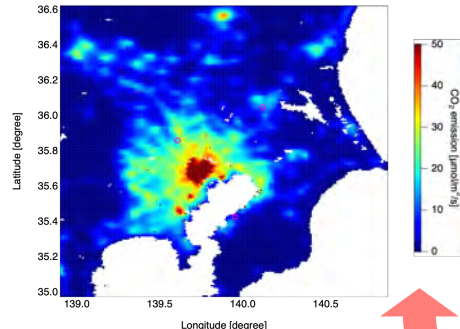
- CO_2 , CH_4 , H_2O などは特定の波長の光を吸収
- 吸収量は大気中にある分子の数に比例
- 各分子の吸収量から大気中にある分子数（カラム平均濃度）を推定できる

逆解析によるCO₂排出量推定方法

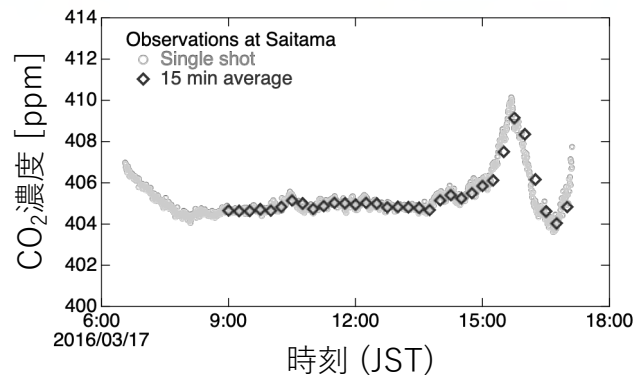
植物起源CO₂フラックス:
陸域生態系モデル (12 JST)



人為起源CO₂フラックス:
ODIAC2020b



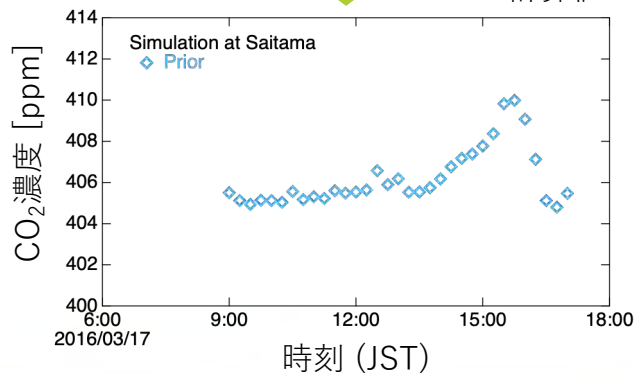
観測データ



最適化

比較

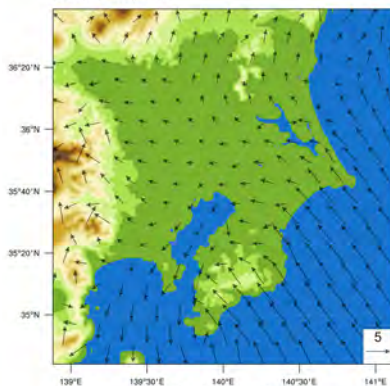
計算値



シミュレーション

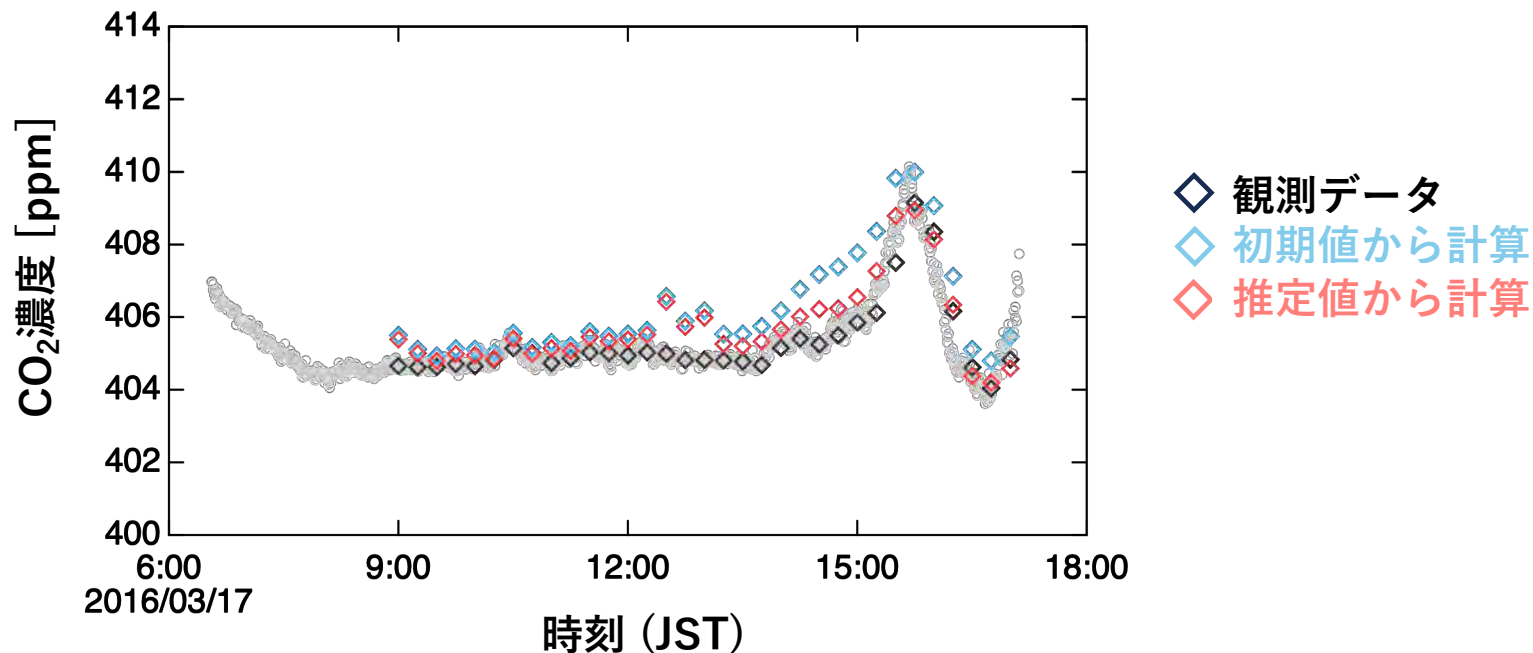
初期値

大気輸送
モデル



シミュレーションと観測されたCO₂濃度の比較

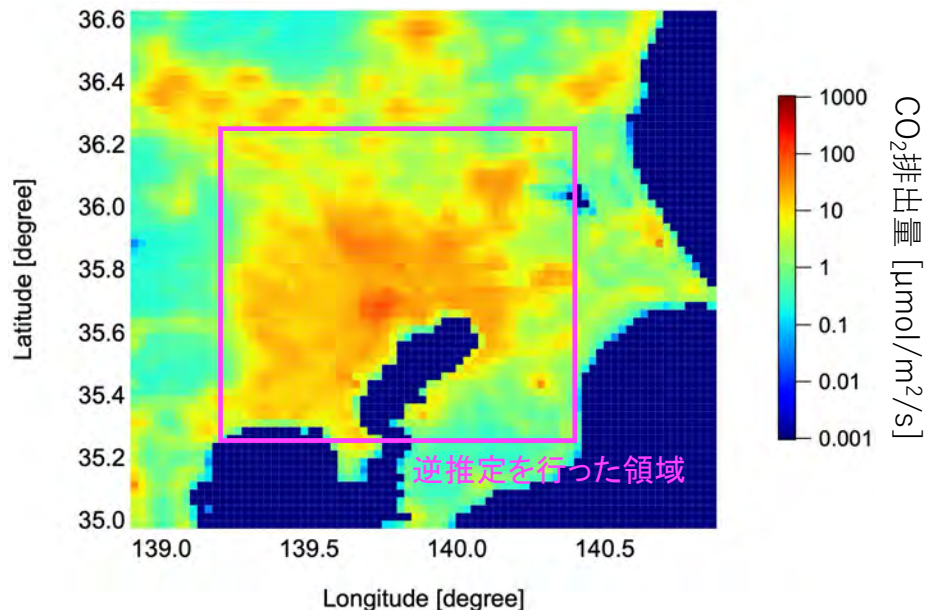
埼玉における3月17日の解析例（他の観測地点、観測日も同時に解析）



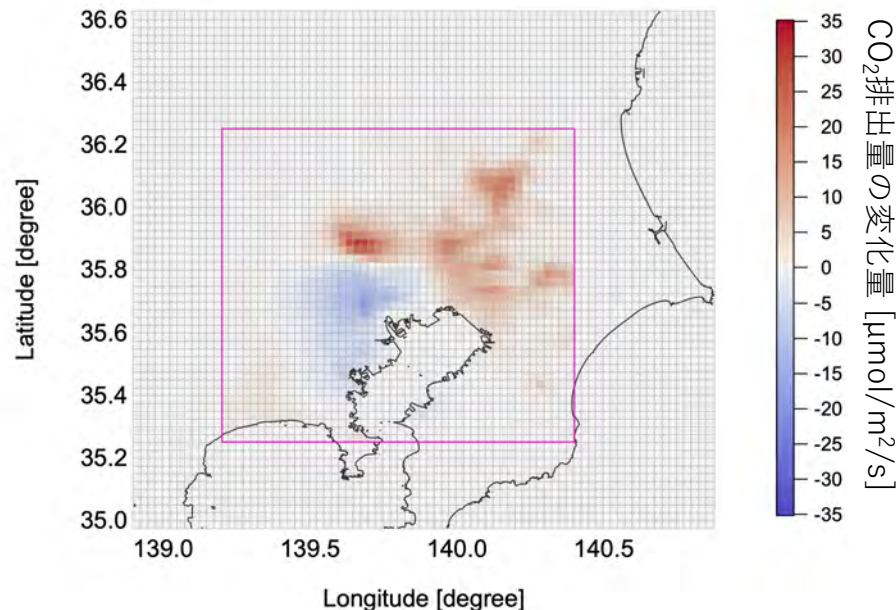
初期値の排出量からシミュレートした濃度と比べて、
推定した排出量からシミュレートした濃度は全体的に観測と良い一致

首都圏のCO₂排出量推定結果

キャンペーン期間の非点源CO₂排出量
フラックスの推定値 (3 km x 3 km毎)

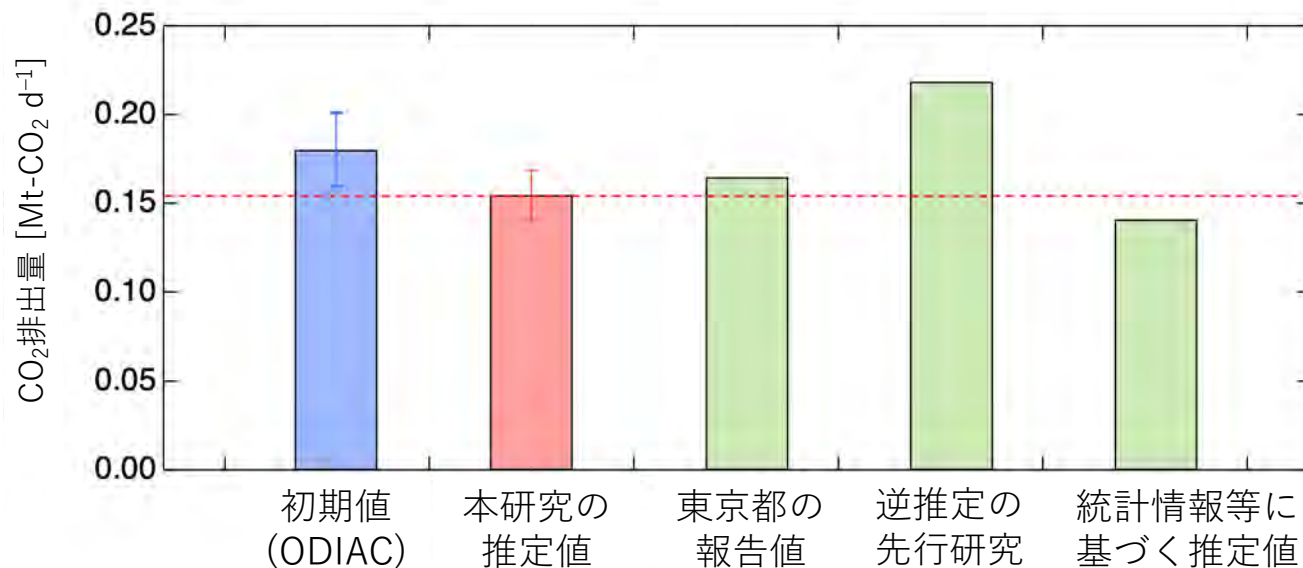


排出量フラックスの
推定値と初期値 (ODIAC) の差



- 初期値と比較して、東京都は下方修正、埼玉県、千葉県北部、及び茨城県南部では上方修正
- 排出量に関する独立な情報量の評価 → 都・県単位の推定が可能

東京都におけるCO₂排出量の評価



- 逆推定の結果と自治体（東京都）が報告した排出量の差は6%程度であり、逆推定の不確かさの範囲内で値と一致した
- 統計情報等から推定したインベントリデータは過小評価、初期値として使用した排出量データベースODIACは過大評価している可能性がある
- 今後の課題: 排出量の時間変化の評価及び他（国）の都市の排出量評価

人工衛星 (GOSATシリーズ) による温室効果ガス観測

Greenhouse gases Observing SATellite



開発

定常運用 (5年間)

後期利用運用

GOSAT



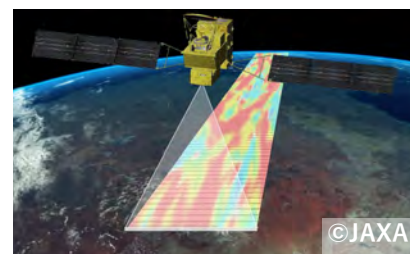
CO₂, CH₄

GOSAT-2



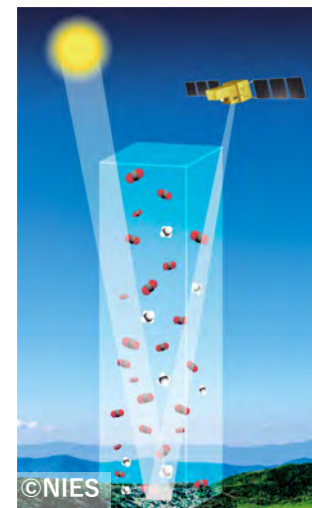
CO₂, CH₄, CO

GOSAT-GW



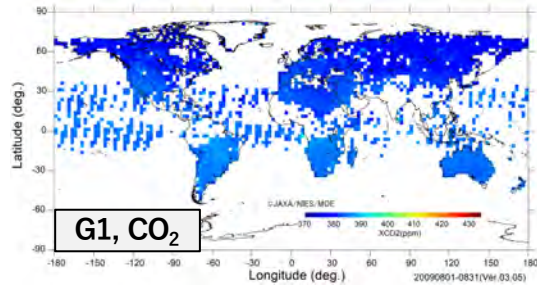
CO₂, CH₄, NO₂

- 温室効果ガスの全球分布を観測する日本の地球観測衛星
- 環境省、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、国立環境研究所の共同プロジェクト

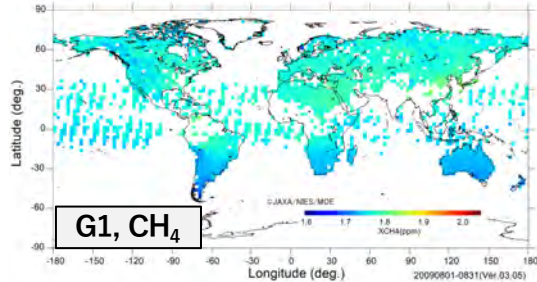


GOSATとGOSAT-2で観測された8月の全球濃度分布

2009

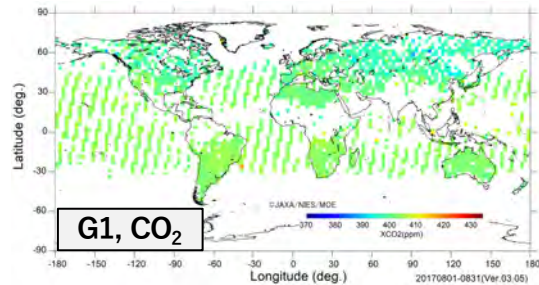


G1, CO₂

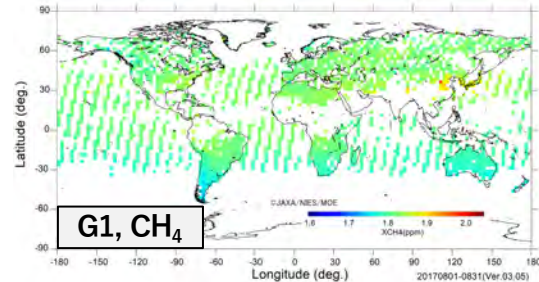


G1, CH₄

2017

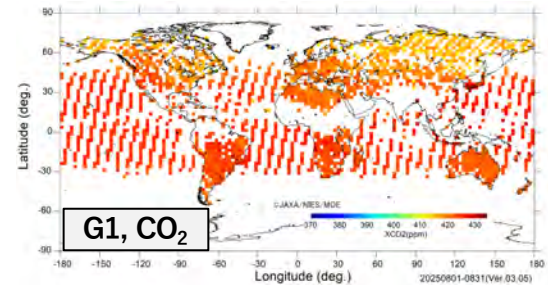


G1, CO₂

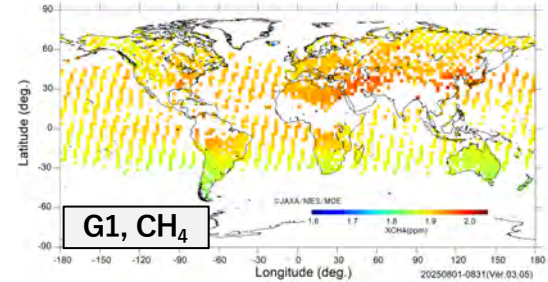


G1, CH₄

2025



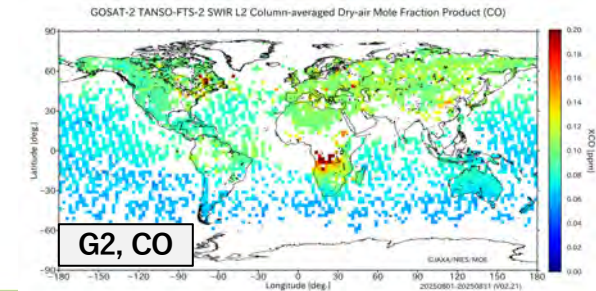
G1, CO₂



G1, CH₄

G1: GOSAT, G2: GOSAT-2

二酸化炭素とメタン濃度は
16年間でそれぞれ10%と8%程度増加 (地上観測と一致)
森林火災によって放出される一酸化炭素を検出

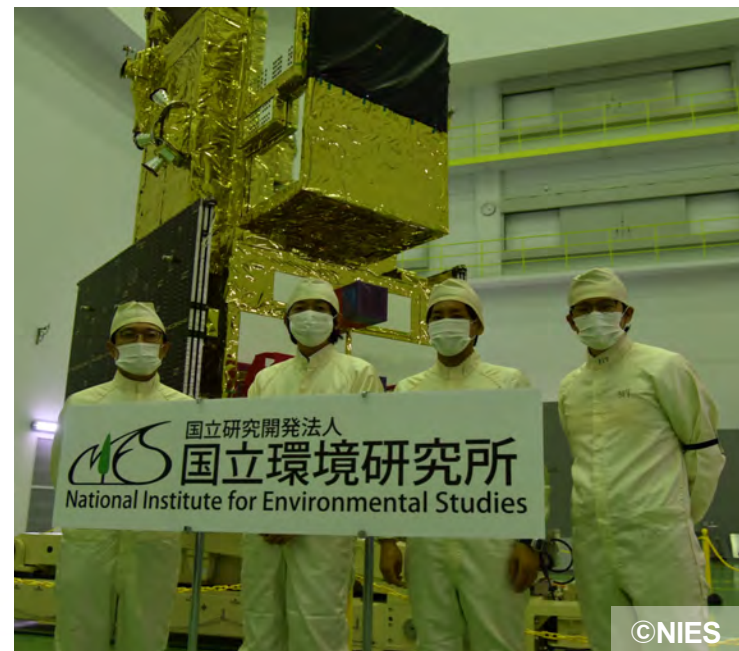


G2, CO

2025年6月29日 GOSAT-GW (3号機) の打上げ成功！

1. 地球規模で全大気平均の主要な温室効果ガスの濃度をモニタリング (監視) する (G1/G2:○)
2. 主要な温室効果ガスの人為起源排出量について国別インベントリ検証する (G1/G2:△)
3. 大都市や発電所といった大規模な排出源からの温室効果ガスの排出を検出する (G1/G2:×)

G1: GOSAT, G2: GOSAT-2

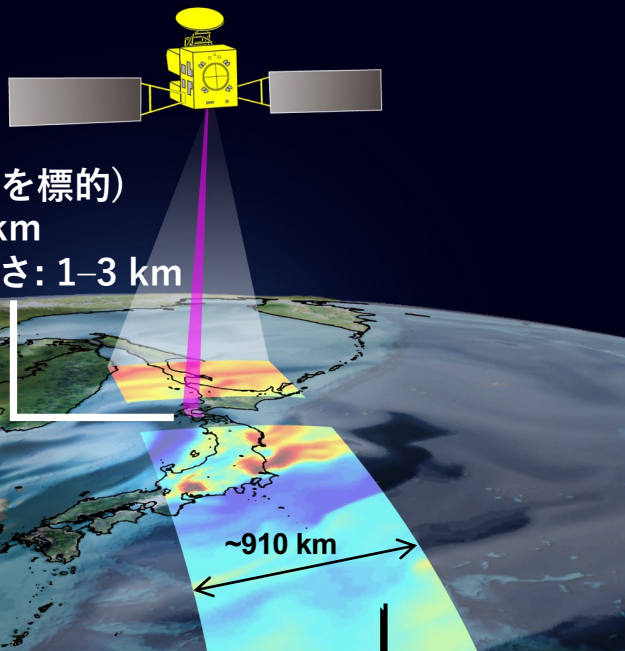


GOSAT-GW: 面観測 (+2つの観測モード)

精密観測モード (3日間で約100回)

大都市、発電所等を標的)

- 観測幅: ~90 km
- 観測点の大きさ: 1-3 km

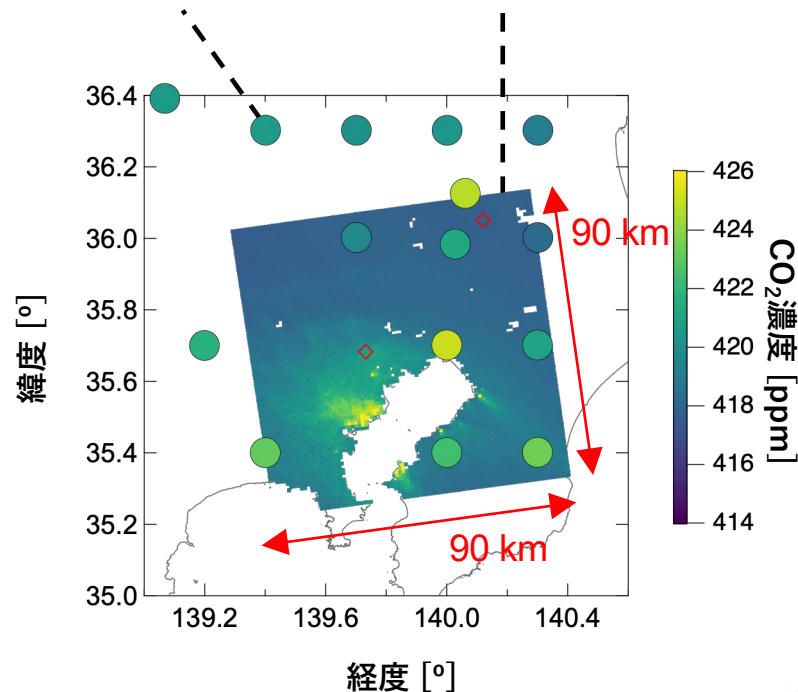


広域観測モード

- 観測幅: ~910 km
- 観測点の大きさ: ~10 km

GOSAT-2の実観測データ
(2022年2月25日)

GOSAT-GW精密観測の
シミュレーション (1 km x 1 km)



CO₂



- 現在の温室効果ガス排出量の削減ペースでは、2050年カーボンニュートラルの実現は難しい見込みです。
- 温室効果ガス排出量の大部分を占める都市部からの排出量を監視・評価するために、大気中の濃度観測データを使っています。
- 今後、GOSAT-GW衛星のデータを使って世界中の都市部における温室効果ガスの排出量推定を進める予定です。

- P1: マウナロアにおけるCO₂データ

Dr. Xin Lan, NOAA/GML (gml.noaa.gov/ccgg/trends/) and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/).

- P1: マウナロアにおけるCH₄データ

Lan, X., K.W. Thoning, and E.J. Dlugokencky: Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2026-05, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.

- P1: 落石岬におけるCO₂データ

寺尾、向井、笹川、町田、橋本、津田 (2014. 最終更新 2025/08)、落石岬における大気CO₂濃度の連続観測データセット、Ver. 1.3、国立環境研究所 地球環境研究センター、DOI:10.17595/20160901.002.

- P1: 落石岬におけるCH₄データ

遠嶋康徳、笹川基樹、津田憲次、町田敏暢 (2016)、落石岬における大気 CH₄濃度の連続観測データセット、Ver. 1.3、国立環境研究所 地球環境研究センター、DOI:10.17595/20160901.004.

- 2016年の首都圏における観測キャンペーンは、国立環境研究所の森野勇副センター長、カールスルーエ工科大学のMatthias M. Frey博士、及び宇宙航空研究開発機構の塩見慶主任研究開発員により計画及び実施された。
- GOSAT-GWの初期解析結果は、国立環境研究所の染谷有主任研究員、藤縄環主任研究員、及びHyunkwang Lim特別研究員により提供された。
- 本研究の一部は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20252003）により実施した。