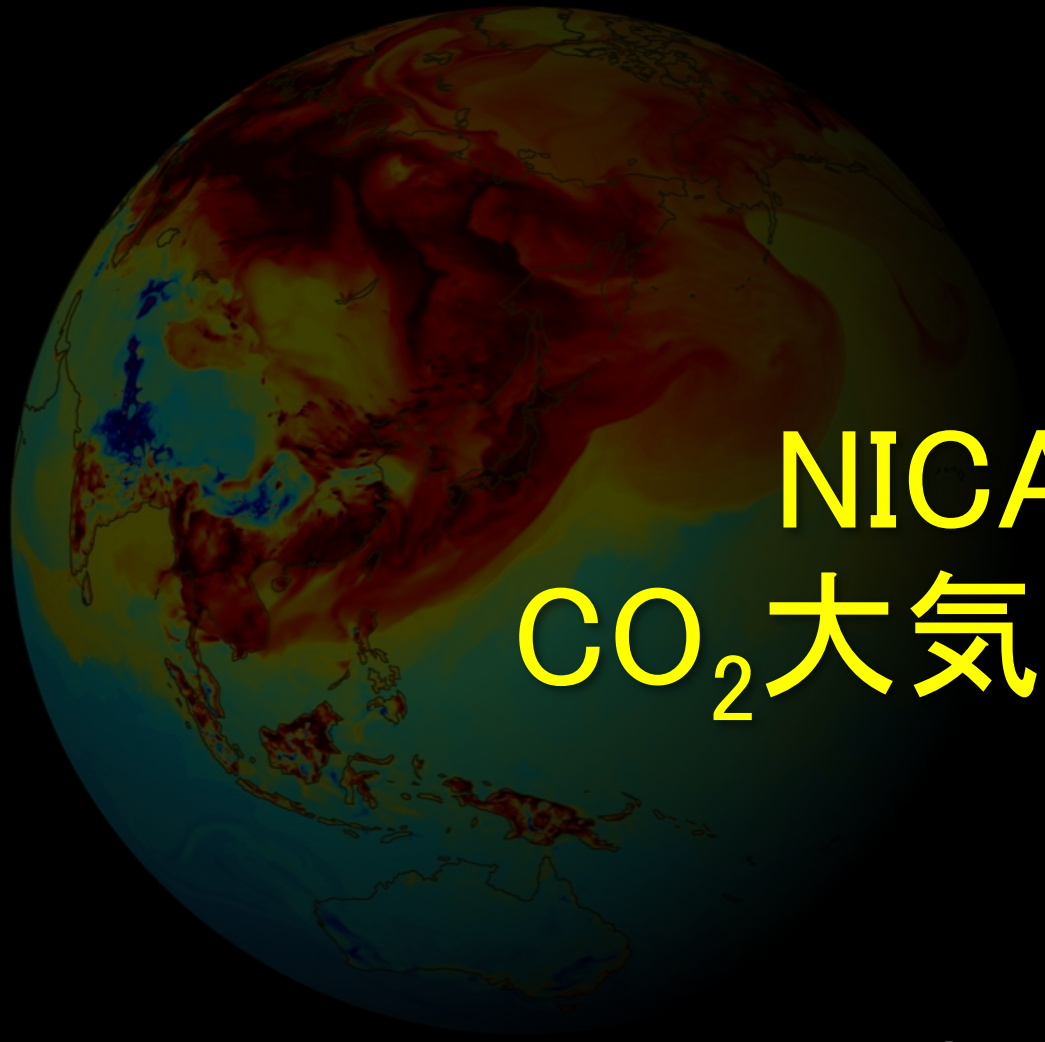


NICAMを用いた CO_2大気シミュレーション

国立環境研究所　地球システム領域
丹羽　洋介

Outline

- CO_2逆解析とNICAM
- ４次元変分法逆解析システムNISMON-CO_2を使った全球CO_2逆解析
- 高解像度シミュレーションを使ったCO_2放出量推定
- 今後の課題
- まとめ

CO_2の地表面フラックスを“トップダウン”（逆解析）で

大気輸送モデルとしてのNICAM

長寿命気体の大気輸送シミュレーションには

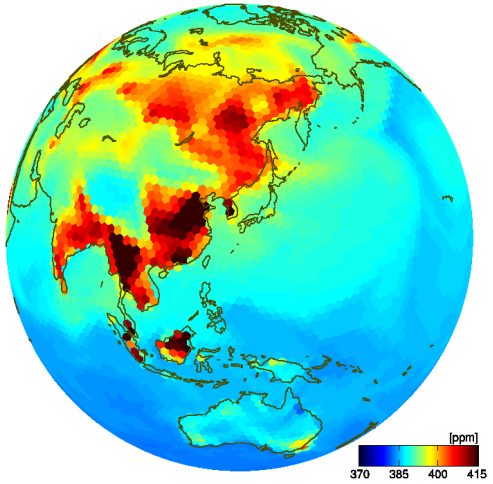
質量保存性 ← 有限体積法（flux form）により

ラグランジュ保存性 (dq/dt = 0) ← 物質の移流方程式と連続の式の整合性 Consistency With Continuity (CWC)により

の2つが成り立っている必要がある。

NICAMの力学コアは両者が成り立つ。

この性質に着目して大気輸送モデルとしてNICAMを使う（**NICAM-TM**: Niwa et al., JMSJ, 2011）

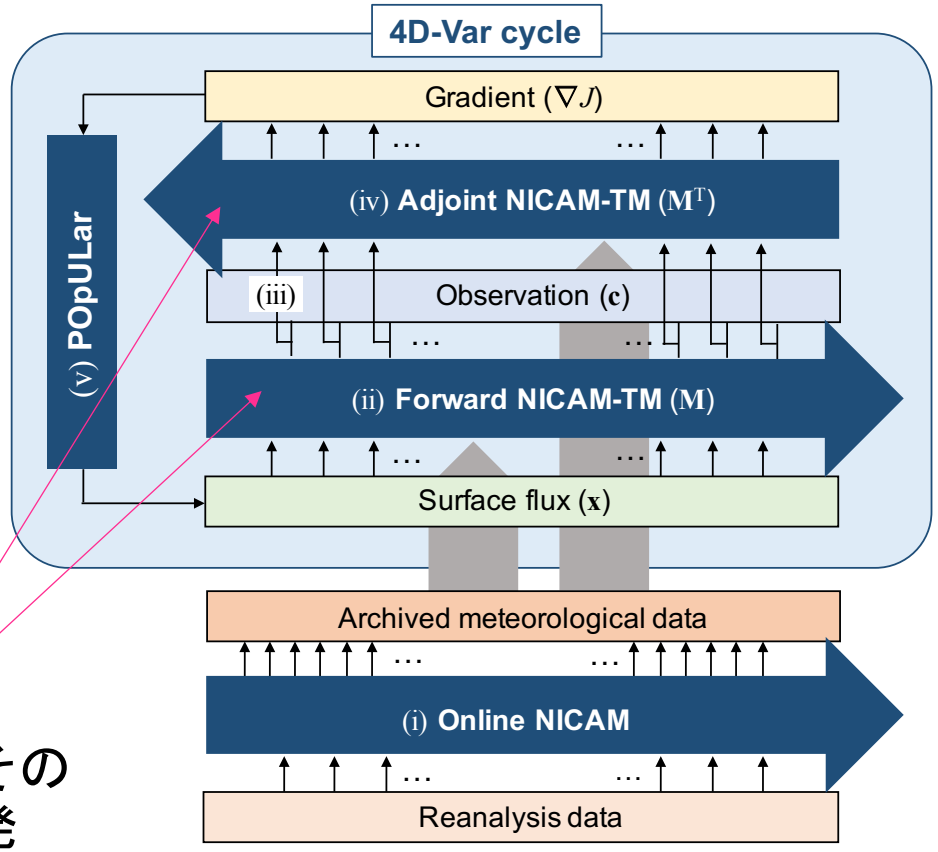


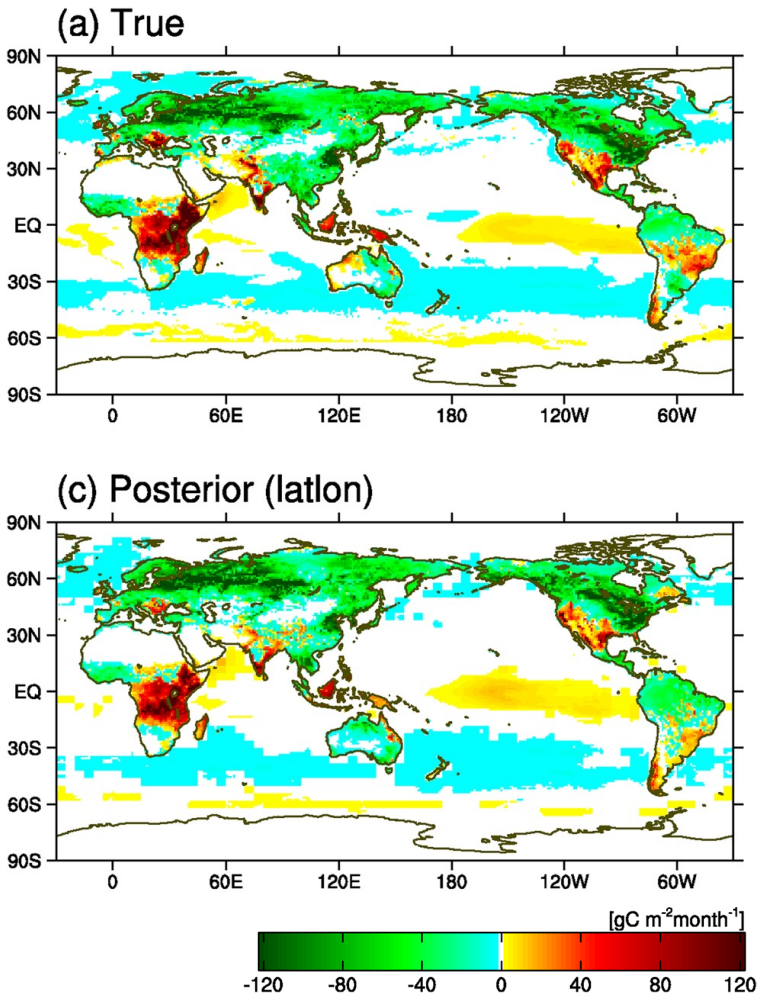
4次元変分法逆解析システム

NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO_2 (**NISMON-CO_2**)

４次元変分法を採用
行列を陽に扱わない
反復計算が必要
アジョイントモデルが必要

今後のアンサンブルデータ同化による逆推定結果を評価するカウンターパートとしても重要

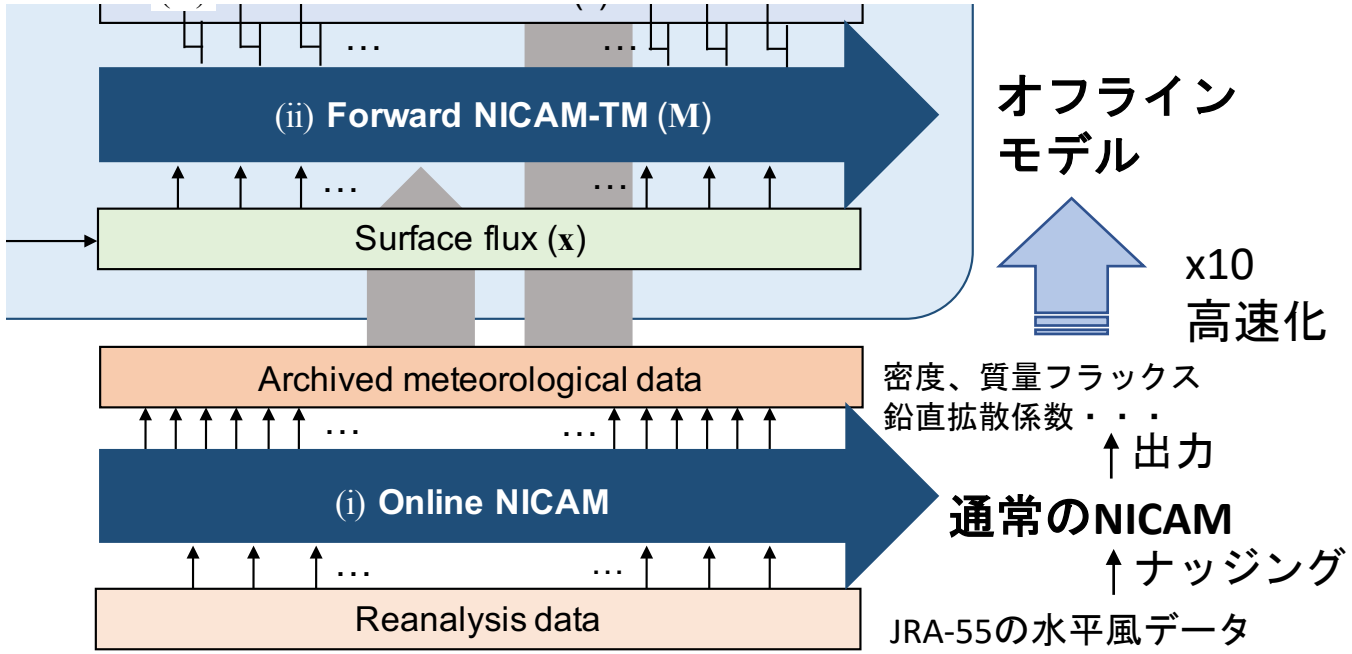


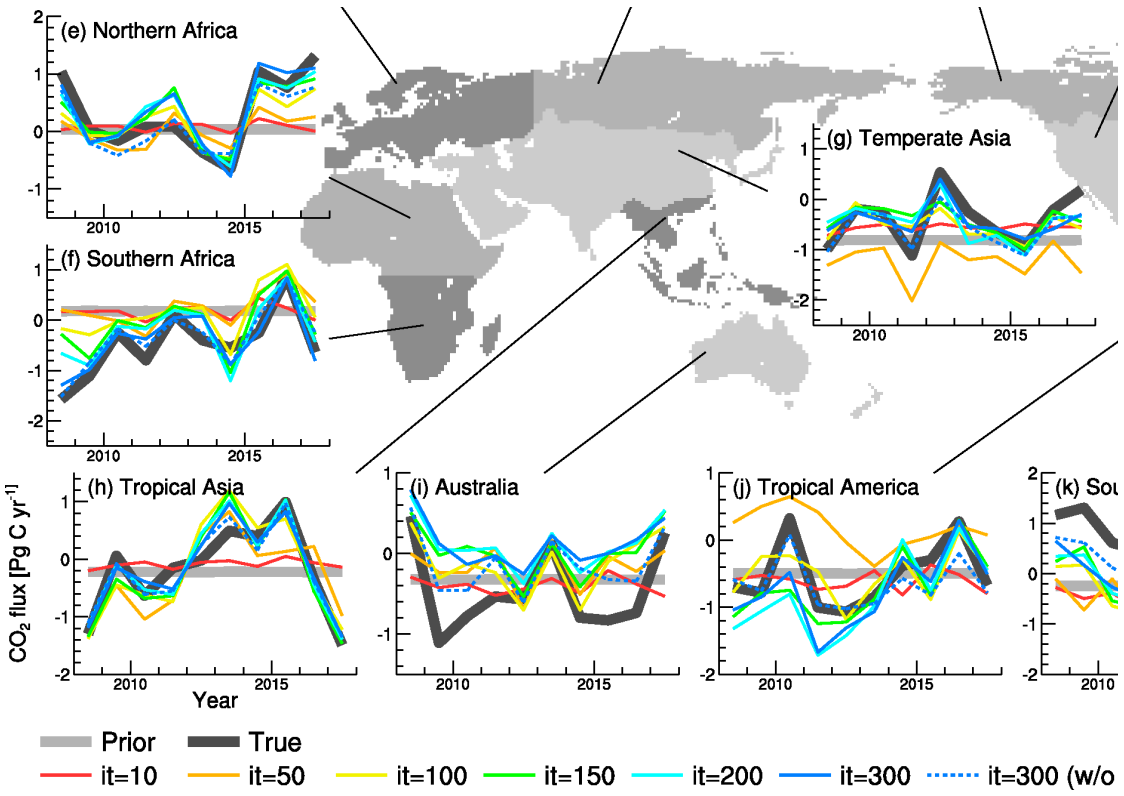


オフライン輸送モデルとそのアジョイントモデルの開発
（CWCは維持）

Niwa et al., GMD (2017a,b); Niwa et al., PEPS (2022)

低解像度であってもCO$_2$長期逆解析においてはトップクラスの解像度





低解像度(~223km)モデルでの利用

＋

”オフライン化”により気象計算を省略することで
大気輸送計算の計算効率を大幅に向上

⇒ ４次元変分法逆解析の莫大な計算量に耐えうる

収束するまで300回程度の反復計算が必要
11年間の解析だと、
11年 x 300 回 x 2 (forward, adjoint)
= 6,600年分の計算が必要！

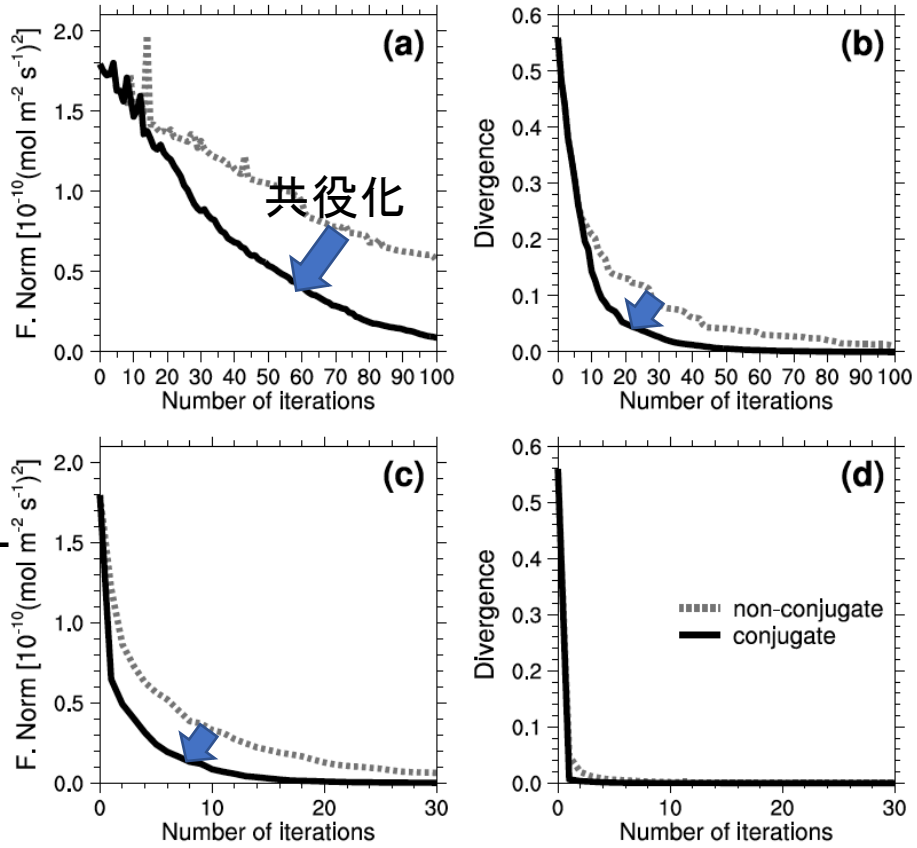
Niwa et al., GMD (2017a,b); Niwa et al., PEPS (2022)

変分法では容易ではない解析誤差の高精度導出アルゴリズムを開発

2つの異なる指標で推定誤差の減少をモニター

1メンバー

50メンバー



計算に必要なコア数は増えるが、
wall-clock timeを大幅に短縮できる

反復回数

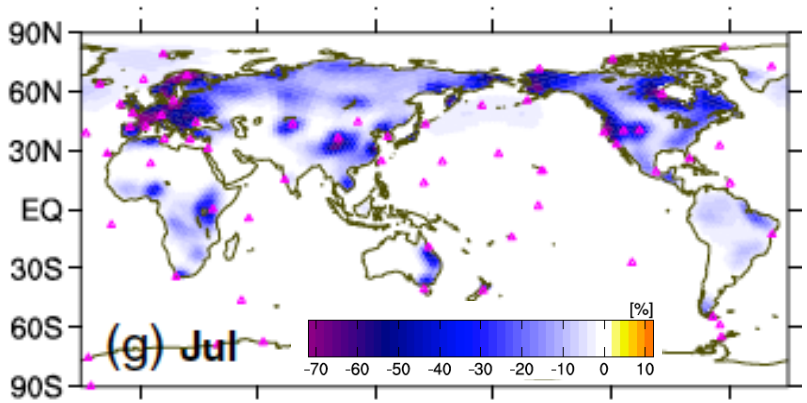
BFGS公式によるヘッセ行列の逆行列（＝解析誤差共分散行列）の近似

$$\mathbf{H}_k = (\mathbf{I} - \rho_k \mathbf{p}_k \mathbf{y}_k^{\mathrm{T}})\mathbf{H}_{k-1}(\mathbf{I} - \rho_k \mathbf{y}_k \mathbf{p}_k^{\mathrm{T}}) + \rho_k \mathbf{p}_k \mathbf{p}_k^{\mathrm{T}}$$

Hはy,pの順序には関係ない

⇒ 共役性を満たす(y, p)のペア数を増やしてやれば良い

- アンサンブル
- 異なるメンバー間での共役性を保つための直交化

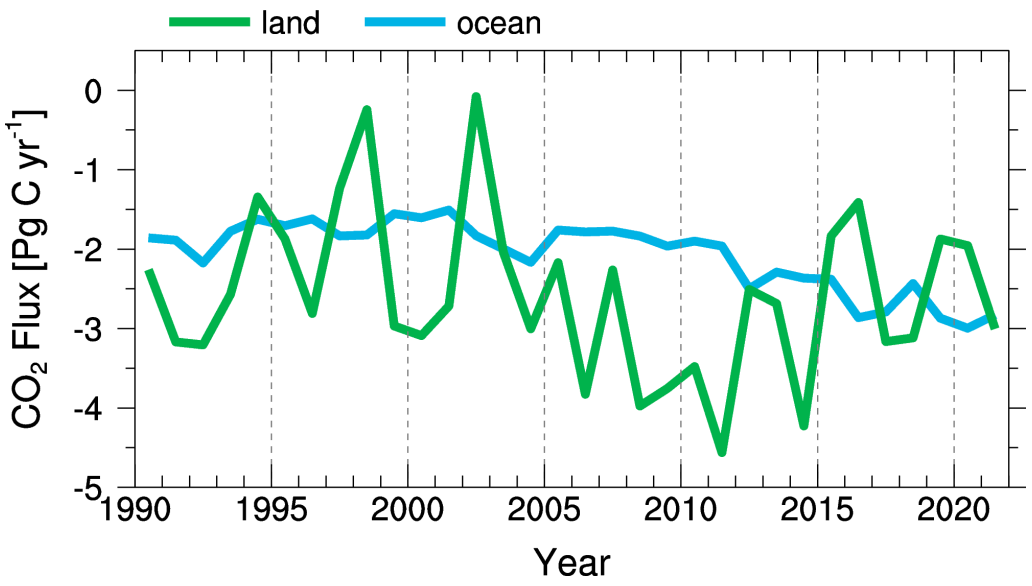


200メンバーで計算

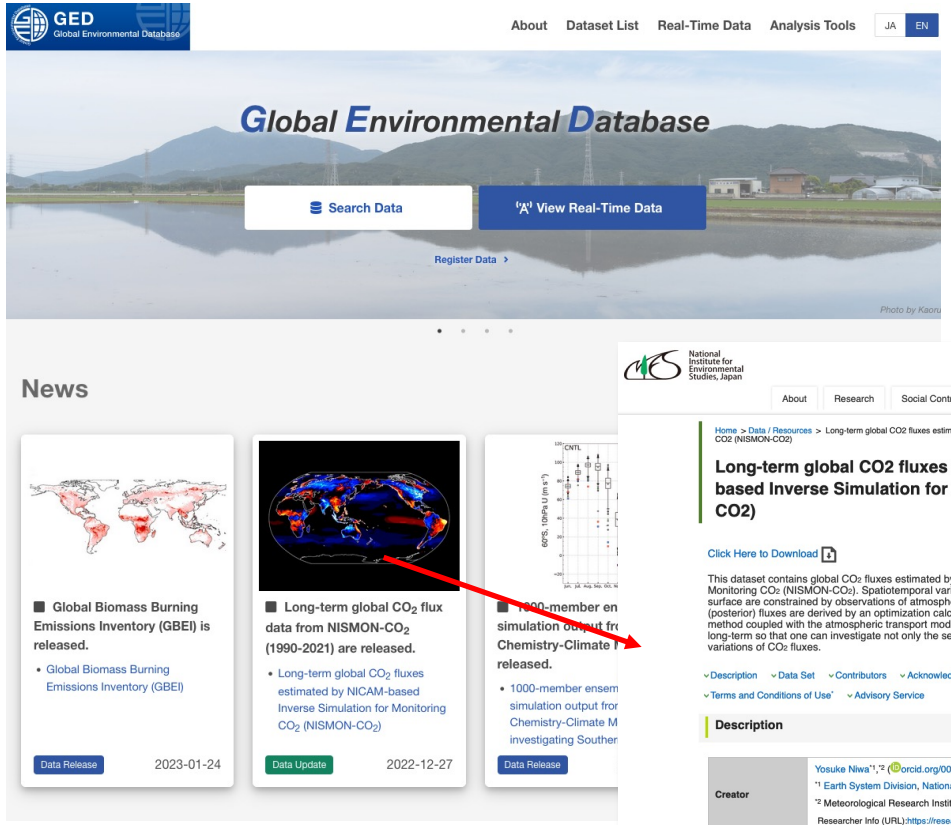
解析誤差から求めたフラックス誤差軽減率
（観測データのインパクト）

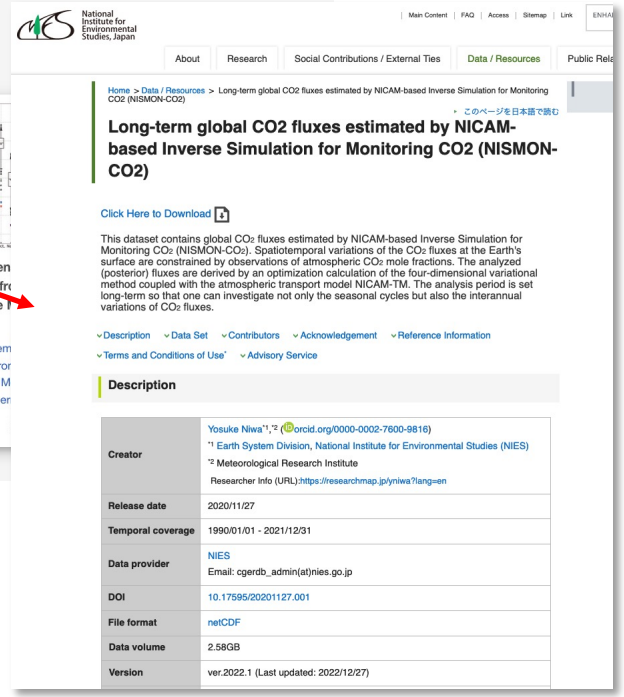
Niwa and Fujii, QJRMS (2020); 丹羽 & 藤井, 統計数理 (2022)

30年超の長期CO_2逆解析



1990-2021年のCO_2フラックス推定結果
全球の陸域と海洋





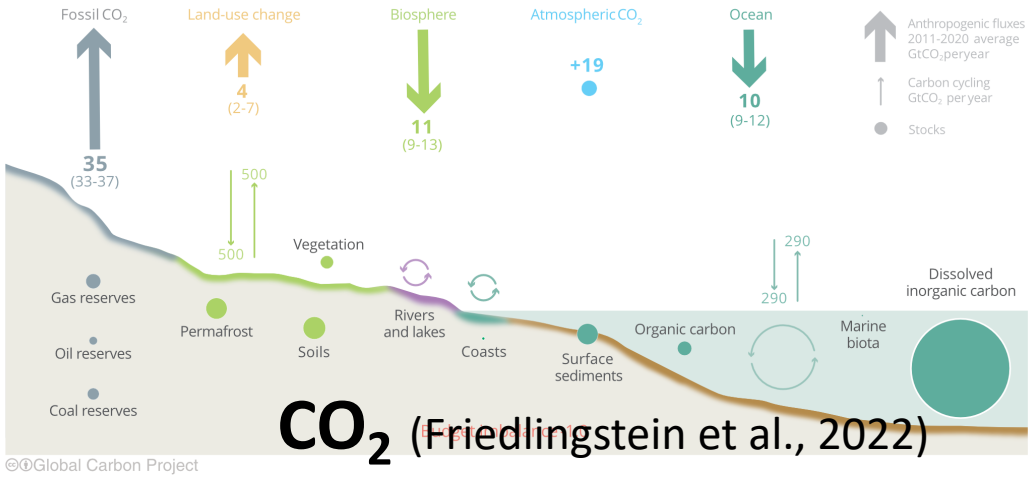
https://db.cger.nies.go.jp/ged/en/

DOIをつけて環境研の
地球環境データベース
より公開

https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20201127.001-e.html

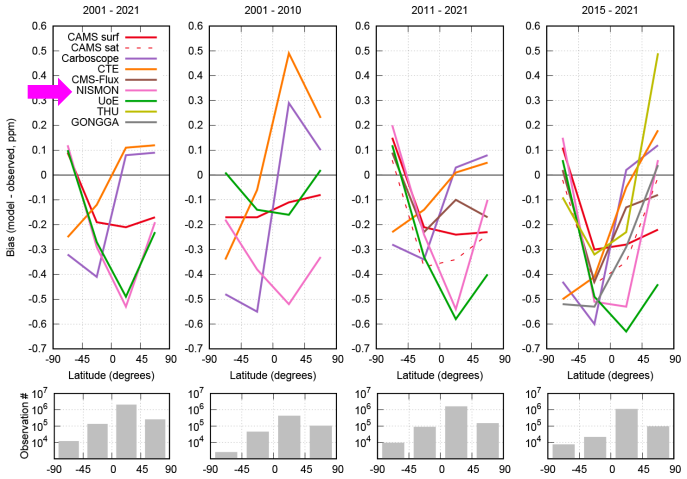
Global Carbon Projectへの参加

Global Carbon Project (GCP) によるGHG統合解析

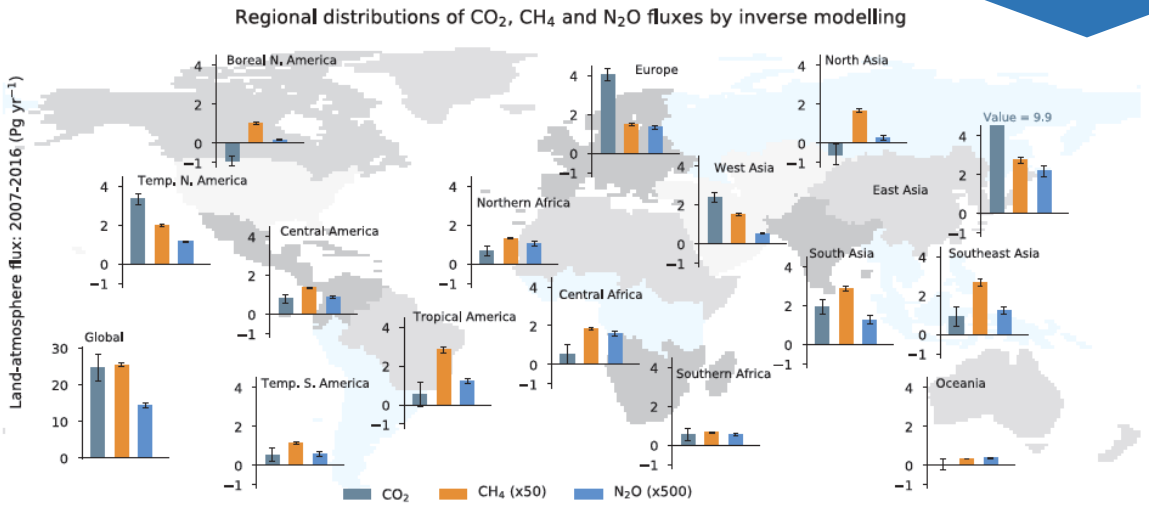


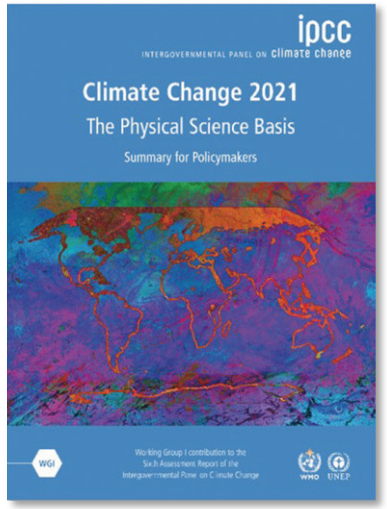
CO_2 (Friedlingstein et al., 2022)

逆解析相互比較



統合解析は毎年実施
NISMONは2020年から継続して参加
（日本からは唯一）



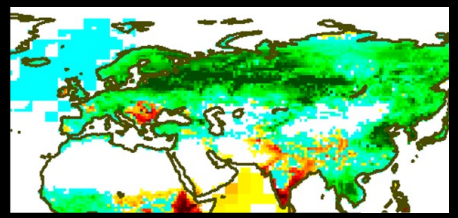


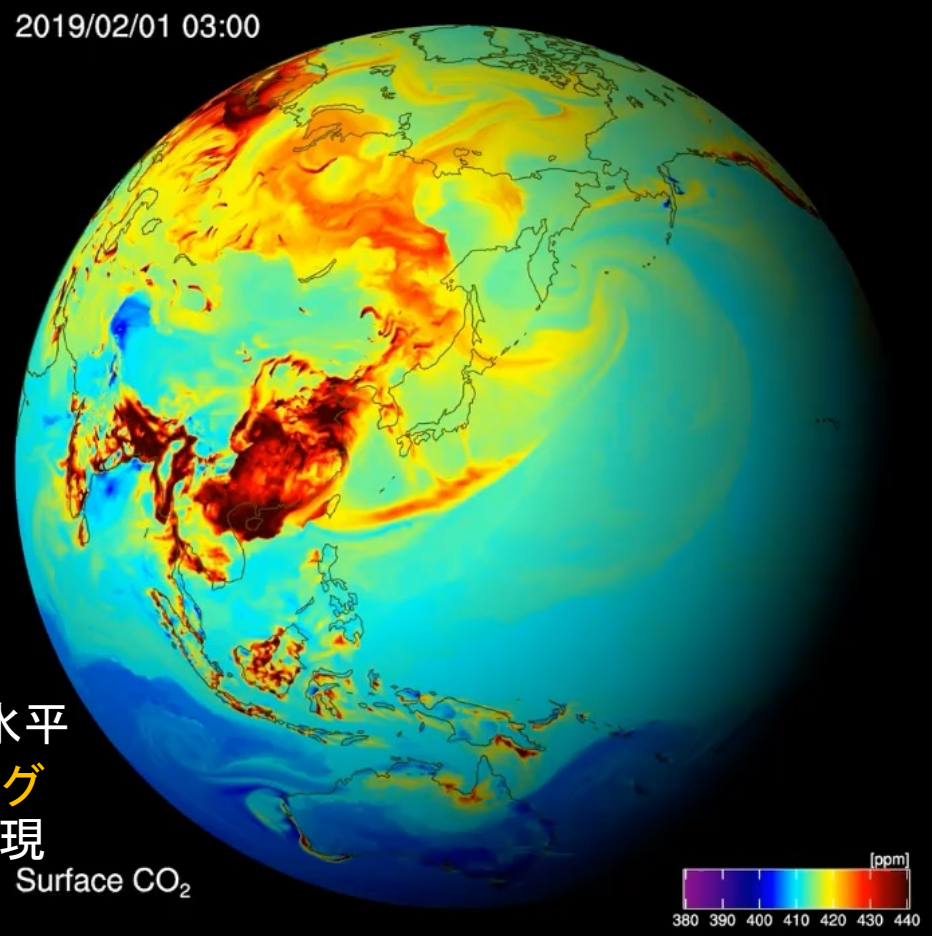
IPCC AR6

Friedlingstein et al., ESSD (2021, 2022a,b)

CO_2の高解像度シミュレーション

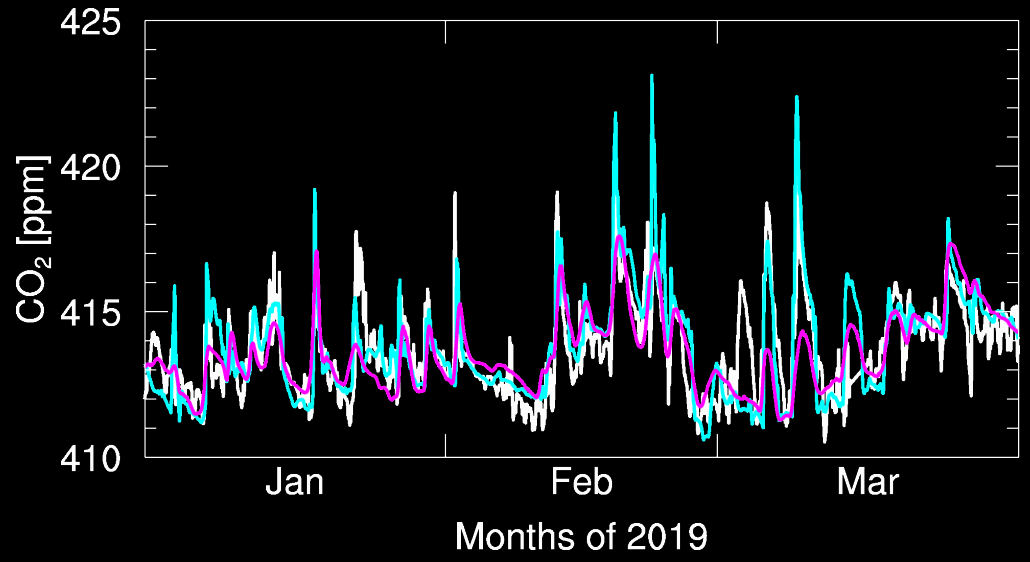
Inversion flux (1°×1°)
from NISMON-CO_2





高解像度モデル
（~14km）をJRA-55の水平
風速データでナッジング
して現実の輸送場を再現

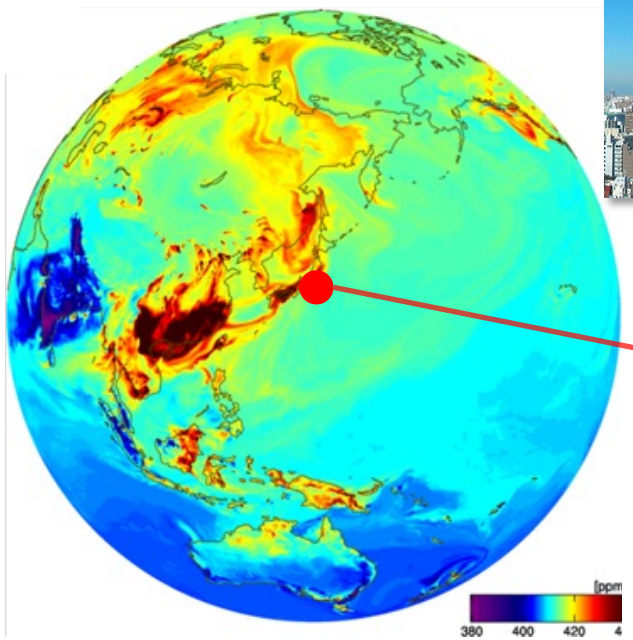
南鳥島における観測データとの比較



観測　NICAM-TM (~223 km)
NICAM-TM (~14 km)

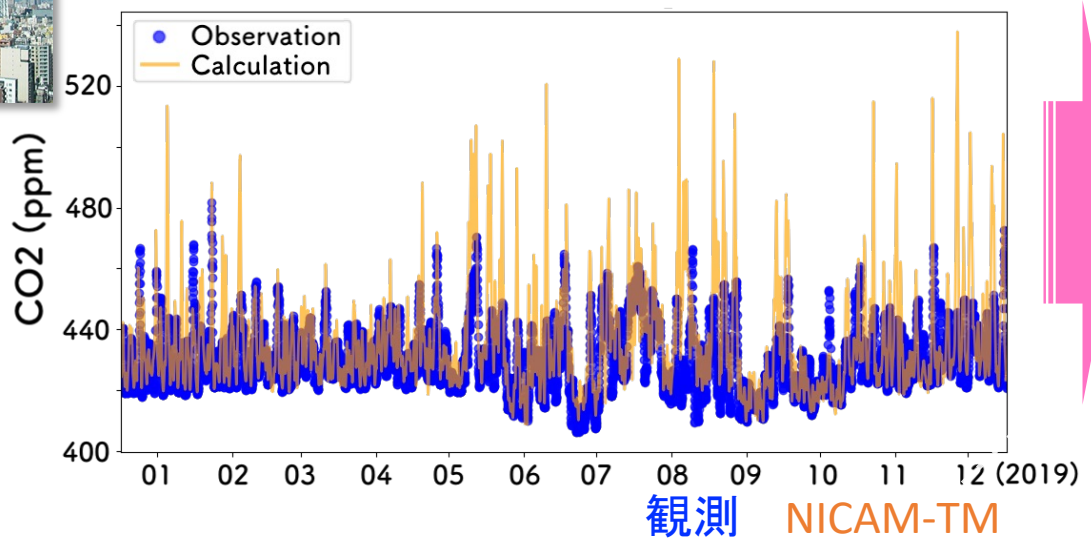
高解像度計算により、高濃度イベントを
よりシャープに再現

逆解析で得られた濃度場をベースとした東京排出量推定

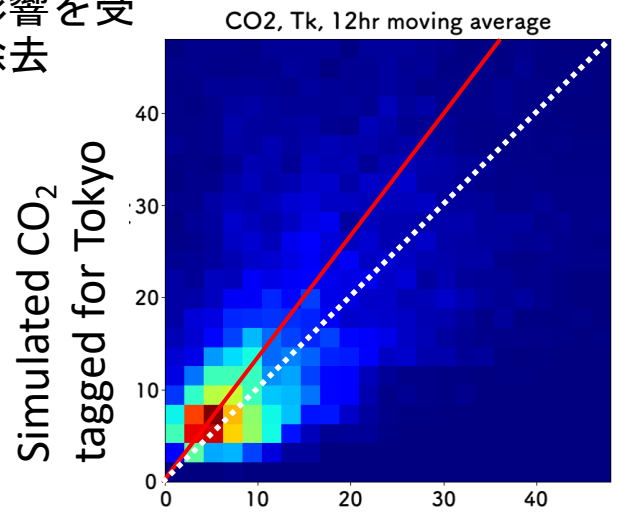


dx~14km

東京スカイツリーにおける
観測データとの比較



気象データなどをもと
にローカルの影響を受
けたデータを除去



Observed CO_2
— BG CO_2 simulated
from non-Tokyo area

"タグ付き"トレーサー計算により、東京から
のシグナルだけを抽出
（東京以外からの影響（バックグラウンドは
よく再現できていると仮定）

⇒ 東京からのCO_2
排出量を推定

MULTI EGGS
環境研究総合推進費 SII-8プロジェクト

今後の課題

- 逆解析の高解像度化
  - 高解像度化することによって再現性が向上
  ⇒ 観測データから取り込める情報を増やせると期待
  - 「国別排出量」といった社会的要求に答える
  - 高解像度と低解像度のハイブリッド手法などもあり得る
- SLCFとの複合解析を可能とするモデル・基盤構築
  - ４次元変分法逆解析システムはNICAM-TMがベース
  - NICAM-Chemといった化学反応計算が必要な化学種・エアロゾルは未対応
  - CH_4などはOHとの化学反応も重要
  - GHGとSLCFのモデル・解析基盤を共通化することで開発を効率化
- “GHG天気予報”
  - WMOのGHG Monitoring Infrastructure構想
  - 準リアルタイムの解析・シミュレーションの実施
  - CO_2フラックスに関する情報を迅速に提供

まとめ

- CO_2逆解析とNICAM
  - 質量保存性とラグランジュ保存性の両者が成り立つNICAMの力学コア
- ４次元変分法逆解析システムNISMON-CO_2を使った全球CO_2逆解析
  - 低解像度（ただし逆解析ではトップクラス）でオフライン化して計算を効率化
  - 長期解析結果を国際的な比較研究（GCP）に
- 高解像度シミュレーションを使ったCO_2放出量推定
  - タグ付きトレーサを使った東京の排出量推定
- 今後の課題
  - 逆解析の高解像度化
  - SLCFとの複合解析を可能とするモデル・基盤構築
  - “GHG天気予報”