

解 説

気象庁全球数値予報モデルをベースとした オンライン二酸化炭素輸送モデルの開発と 全球二酸化炭素濃度解析への導入について

中村 貴¹・眞木 貴史²・永井 康之³・小木 昭典⁴

要 旨

気象庁が発表する温室効果ガスに関する情報の高度化のため、気象庁全球数値予報モデルをベースにしたオンライン二酸化炭素輸送モデルを開発した。このモデルを用いて解析した大気中二酸化炭素濃度の分布は、月平均値化した独立した観測データに対する根平均二乗誤差で、対流圏下層で 4 ppm 程度、対流圏中層から下部成層圏にかけて 1 ppm 程度の精度であった。この誤差は検証が可能な地上～高度 13 km の全ての高度で従来のオフラインモデルによる誤差と比べ小さくなっており、このオンラインモデルの導入により大気中の二酸化炭素濃度分布の再現度が大きく向上したことが確認できた。このオンラインモデルは 2016 年から水平約 180 km の解像度で、2020 年から水平約 110 km の解像度で全球二酸化炭素濃度解析（二酸化炭素分布情報）に用いている。

1. はじめに

二酸化炭素（CO₂）をはじめとする温室効果ガスの大気中濃度の上昇は気候システムの急速な温暖化をもたらしている。大気中 CO₂ 濃度の増加と人間活動との関係は近年の知見の集積により解明が進み、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が 2021 年（令和 3 年）に公表した第 6 次評価報告書第一作業部会報告書（IPCC, 2021）では「人間の影響が大気、海洋、及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」と評価さ

れるに至った。

大気中 CO₂ 濃度の系統的な観測は 1957 年（昭和 32 年）に米国の研究機関により南極点で世界で初めて始まった。蓄積された観測データから大気中 CO₂ 濃度の上昇が明らかになり地球環境への影響が懸念されるようになると、温室効果ガスに関する知見の更なる集積を図るため、世界気象機関（WMO）は 1969 年（昭和 44 年）に始まった大気バックグランド汚染観測網（BAPMoN）やその後継の全球大気監視（GAW）計画の取組として、

¹ 情報基盤部数値予報課地球システムモデル技術開発室

² 気象研究所全球大気海洋研究部

³ 大気海洋部環境・海洋気象課大気海洋環境解析センター（現 気象研究所気候・環境研究部）

⁴ 大気海洋部環境・海洋気象課大気海洋環境解析センター（現 大気海洋部気象リスク対策課）
（令和 8 年 5 月 26 日発行）

加盟国に対して温室効果ガスの観測体制の強化を求めることとなった(澤, 2021)。気象庁はこの WMO の求めに応じ 1987 年(昭和 62 年)に大気中 CO₂ 濃度の観測を開始(伊藤, 1987)した。1990 年(平成 2 年)には WMO の要請に応え温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の運営を開始する(須田ほか, 2010; 大久保ほか, 2020)など、温室効果ガス監視の取組を強化していった。気象庁以外の国内外の気象機関, 研究機関でも 1980 年代から 1990 年代を中心に大気中 CO₂ 濃度の観測網の整備が進められ, その観測地点数は WDCGG Data Summary 48 号(WMO, 2024)に掲載のある数(2022 年時点)で 184 地点に達した。

一方で, 大気中の CO₂ の動向の定量的な把握には地球上に散在する観測点のデータだけでは不十分だったことから, 海外では 1980 年代頃から 3 次元数値モデルを用いた解析が行われるようになり, 1993 年(平成 5 年)には国際的なモデル相互比較プロジェクトである TransCom の活動が始まる(Gurney *et al.*, 2002; Gurney *et al.*, 2003)など, 数値モデルを用いた大気中 CO₂ 濃度の解析の取組が世界的に広まっていった。1997 年(平成 9 年)に主要国に対して温室効果ガスの排出削減義務を規定した「京都議定書」が採択されると, 排出削減の達成状況を確認するための温室効果ガスの監視体制の強化の必要性も高まっていった。2007 年(平成 19 年)には GAW 計画においても, 同計画の実施方針を定めた戦略計画(2008-2015)で観測データとモデル同化技術を用いたシームレスな情報による地球環境の監視が掲げられた(堤, 2007; 須田ほか, 2010)。近年では 2015 年(平成 27 年)に地球温暖化を 2 °C より十分低く保つ目標を掲げ, その目標達成状況を定期的に確認(グローバル・ストックテイク⁵等)するパリ協定が締結され, 2024 年には WMO がこれらの国際的な活動を調整する全球温室効果ガス監視(G3W)計画⁶の開始を執行理事会で承認するなど, 温室効果ガス監視の取組は世界的に見ても重要性がま

すます高まっている。

このような国際動向を背景に, 気象庁は温室効果ガスの監視体制の強化を図るため, 1998 年(平成 10 年)に大気中 CO₂ 濃度をシミュレートする数値モデルの開発に着手した。このとき開発が始まった二酸化炭素輸送モデル CDTM(Carbon Dioxide Transport Model)(Sasaki *et al.*, 2003)(以下, 旧 CO₂ モデル)は開発の進捗とともに, まず大気中 CO₂ 濃度の観測データのデータチェックや分析をするための補助資料として利用を始め, 続いて大気トレーサーモデル相互比較計画(TransCom)をはじめとする国内外の研究プロジェクト(Gurney *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2006; Stephens *et al.*, 2007; Peylin *et al.*, 2013; Thompson *et al.*, 2016)へこのモデルを用いて参加するなど, 利用の場を広げてきた。上記の Stephens *et al.* (2007)では旧 CO₂ モデルはモデル相互比較実験 TransCom3(Gurney *et al.*, 2003)に参加したモデルの中で対流圏の CO₂ 鉛直濃度勾配が実測値に近いモデルの一つという評価も得た。2009 年(平成 21 年)には観測データをモデルに同化して大気中 CO₂ 濃度を解析する二酸化炭素解析システムを開発し(Maki *et al.*, 2010), 地球温暖化問題に関する国民への啓発や国際貢献を目的に数値モデルを用いた大気中 CO₂ 濃度の解析成果を提供する「二酸化炭素分布情報」(池上ほか, 2009; 藤田, 2009)を開始した。

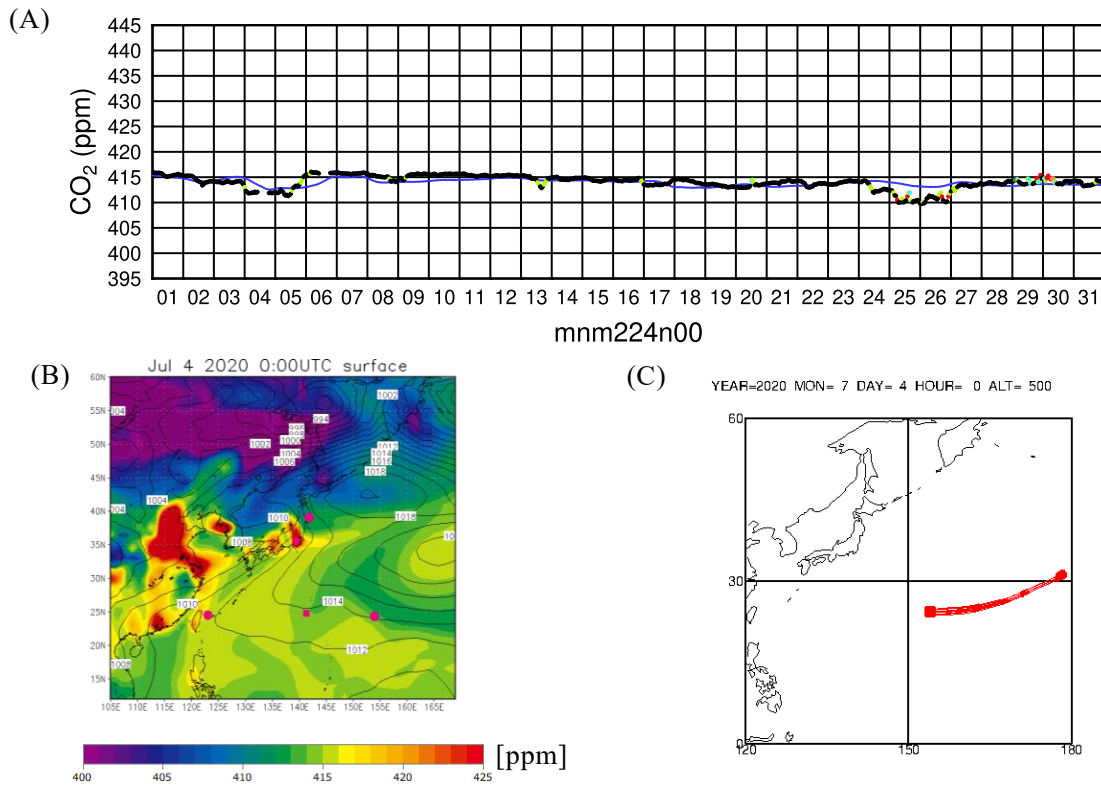
しかしながら, この二酸化炭素解析システムを構成していた旧 CO₂ モデルは自身で気象場の時間発展を計算せず, あらかじめ他のモデルで作成した気象場を外部から与えることで駆動する, いわゆるオフラインモデルであったことから, 二酸化炭素を輸送する気象場の表現が外部強制力の時間解像度, 空間解像度に依存し, 気象擾乱の構造や時間発展, またこれらに伴う二酸化炭素の輸送の取扱いに限界があった。旧 CO₂ モデルが抱えるこのような課題を改善し, 大気中で二酸化炭素が輸送される様子を大気モデルで計算した擾乱

⁵ パリ協定に基づいて 5 年に 1 回実施される, 目標達成状況の確認。

⁶ <https://wmo.int/activities/global-greenhouse-gas-watch-g3w> (2025 年 12 月 26 日閲覧)

第 1 表 温室効果ガス監視に関する気象庁と国内外の主な動き。

年	気象庁の動き	国内外の動き
1957		米国スクリプス海洋研究所が世界初の大気中 CO ₂ 濃度の系統的な観測を南極点で開始
1958		米国スクリプス海洋研究所によるマウナロア山（ハワイ）での大気中 CO ₂ 濃度観測の開始
1969		世界気象機関（WMO）大気バックグラウンド汚染観測網（BAPMoN）の開始
1981	海洋 CO ₂ の研究観測の開始	
1987	大気中 CO ₂ 濃度の観測を綾里にて開始	
1989		WMO 全球大気監視（GAW）計画の発足
1990		IPCC 第 1 次評価報告書（FAR）が順次公表開始
	WMO 温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）の発足	
1995		IPCC 第 2 次評価報告書（SAR）が順次公表開始
1997		京都議定書の採択
1998	（CDTM の開発に着手）	
2001		IPCC 第 3 次評価報告書（TAR）が順次公表開始
2007		IPCC 第 4 次評価報告書（AR4）が順次公表開始
2008		京都議定書の第一約束期間（2012 年まで）
2009	二酸化炭素分布情報の提供開始（地表面のみ）	温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）打上げ
2010	（GSAM-TM の開発に着手）	
2011	航空機による北西太平洋（厚木～南鳥島の航路）上空の温室効果ガスの観測を開始（2024 年に終了）	
2012	二酸化炭素分布情報の高度化（3 次元的な情報提供の開始）	
2013	全球の海洋による二酸化炭素吸収量に関する情報提供の開始	IPCC 第 5 次評価報告書（AR5）が順次公表開始
2015		パリ協定の締結
2016	二酸化炭素分布情報に GSAM-TM を導入（水平解像度約 180 km）	
2018		温室効果ガス観測技術衛星 2 号（GOSAT-2）打上げ
2020	二酸化炭素分布情報の高分解能化（水平解像度約 110 km 版 GSAM-TM の導入）	
2021		IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）が順次公表開始
2024	二酸化炭素分布情報の高度化（気柱平均濃度の情報提供を開始）	WMO 全球温室効果ガス監視（G3W）計画の WMO 執行理事会での承認
2025		温室効果ガス・水循環観測技術衛星（GOSAT-GW）打上げ



第 1 図 地上観測結果のデータチェックに用いている資料の例.

(A) 2020 年 7 月の 1 か月間の南鳥島における大気中 CO₂ 濃度の地上観測値 (黒点: バックグラウンド値と判定された観測値, 黒以外の点: バックグラウンド値ではないと判定された観測値) と二酸化炭素輸送モデル (青線: 新 CO₂ モデル (TL159)) による計算結果の比較図. 縦軸は濃度 (ppm), 横軸は時間 (日).

(B) 2020 年 7 月 4 日 00UTC における二酸化炭素輸送モデル (新 CO₂ モデル (TL159)) で計算された日本周辺の地表面 CO₂ 濃度分布 (陰影, 単位: ppm) 及び海面気圧 (等値線, 単位: hPa). 赤紫色の●印は気象庁の地上観測点 (綾里, 南鳥島, 与那国島) を表す. (この図は航空機観測データのデータチェックにも用いるため, 航空機観測の発着地, 経由地となる厚木, 硫黄島も赤紫色の■印でプロットされている.)

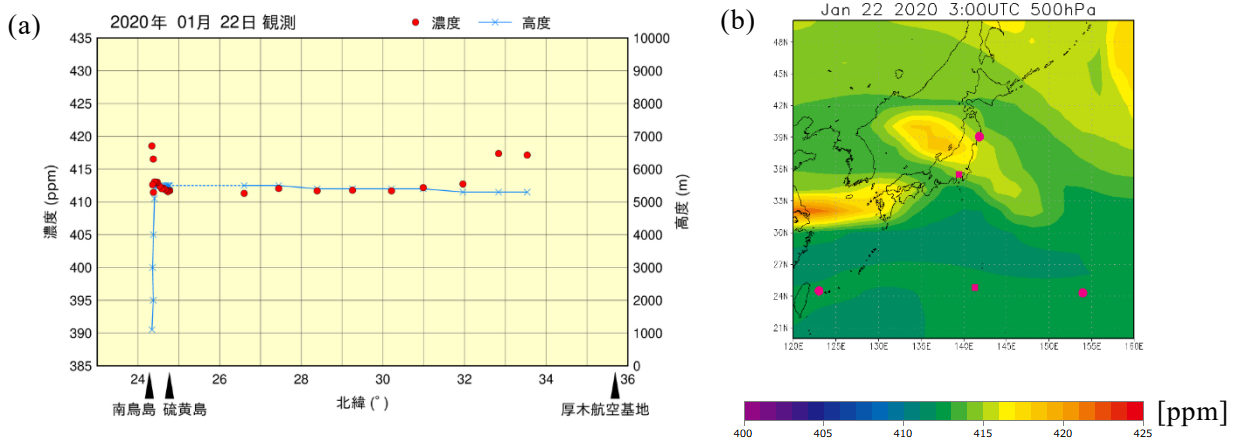
(C) 2020 年 7 月 4 日 00UTC に南鳥島付近に存在していた気塊の過去 72 時間の流入経路を推定した後方流跡線 (バックトラジェクトリ).

上記資料のうち, 二酸化炭素輸送モデルは (A), (B) で使用されている.

の構造を維持したまま計算するため, 2010 年 (平成 22 年) に日々の予報業務で用いている全球数値予報モデル GSM (Global Spectral Model) をベースに気象場の時間発展と物質輸送を同時に計算するオンライン二酸化炭素輸送モデル GSAM-TM (Global Spectral Atmosphere Model – Transport Model) (以下, 新 CO₂ モデル) の開発に着手, 2016 年 (平成 28 年) に約 180 km の水平解像度で二酸

化炭素解析システムに導入, さらに 2020 年 (令和 2 年) には約 110 km の水平解像度へ高解像度化も行った.

本稿では, 池上ほか (2009) 以降の気象庁の業務における二酸化炭素輸送モデルの利用場面 (温室効果ガス観測データのデータチェックや大気中 CO₂ 濃度の全球解析等), 新 CO₂ モデルの開発の経過と, 新 CO₂ モデルの精度について述べる. な



第 2 図 航空機観測結果のデータチェックに用いていた資料の例.

(a) 2020 年 1 月 22 日の厚木～南鳥島の飛行経路上の CO₂ 濃度観測値. 赤丸 (縦軸左) は観測された濃度 (ppm), 青線 (縦軸右) は観測が行われた高度 (m), 横軸は観測が行われた緯度 (°).

(b) 観測とほぼ同時刻 (03UTC) の二酸化炭素輸送モデル (新 CO₂ モデル (T_L159)) で計算した 500 hPa 面 CO₂ 濃度分布 (単位 : ppm). 赤紫色の■印は航空機観測の発着地である厚木及びフライトにより経由することがある硫黄島を表す. (図には気象庁の地上観測 3 地点も●印でプロットされている.)

お, 第 1 表に 1957 年 (昭和 32 年) 以降の気象庁と国内外の温室効果ガス監視に関する動きを示している.

2. 二酸化炭素輸送モデルの利用

2.1 観測結果のデータチェック

気象庁は GAW 計画の下, 大気中温室効果ガスの観測を国内の地上観測地点⁷で行っており, 2011 年 2 月から 2024 年 3 月までは北西太平洋 (厚木～南鳥島, フライトにより直行又は硫黄島経由) 上空を航行する航空機上でも観測を行っていた (中村ほか, 2011). これらの観測データは, その公表の前にバックグラウンド値⁸の判定や, 異常データの混入がないかなどのデータチェックが行わ

れ, 特異な変動が観測されたなどの場合にはその要因の分析検討も行われている. 二酸化炭素輸送モデルの利用は上述のとおり, この観測結果のデータチェックや変動要因の分析検討を行う際の補助として始まった.

第 1 図は地上観測結果のデータチェックに用いている資料の例である. CO₂ 濃度時系列図 (第 1 図 A) は CO₂ 濃度の時間変動の把握や特異事例の検出のため, 分布図 (第 1 図 B) は CO₂ 濃度の変動をもたらすバックグラウンド場の把握のため, 後方流跡線図 (第 1 図 C) は観測点に到達した空気の流入経路の把握のために用いている. 二酸化炭素輸送モデルは第 1 図 A, B で使用⁹されている.

第 2 図は航空機観測結果のデータチェックに用

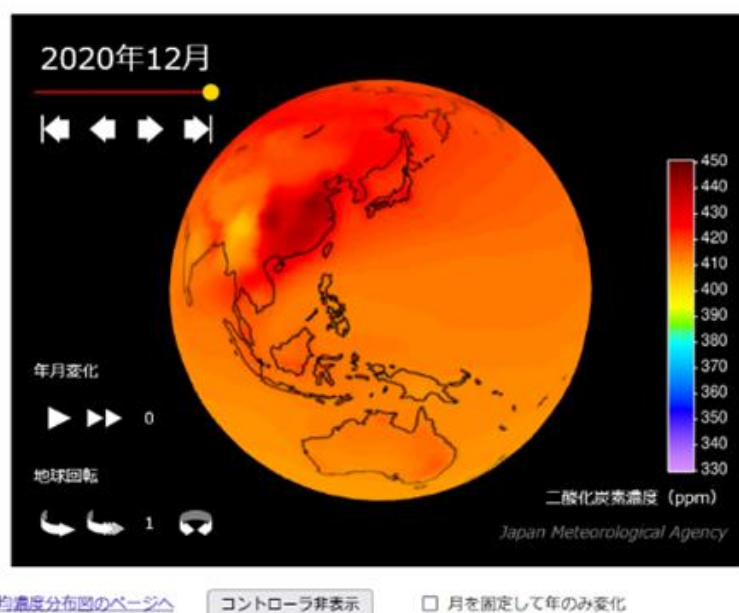
⁷ 2024 年 3 月をもって与那国島 (沖縄県与那国町) での観測を終了し, 2025 年 12 月現在綾里 (岩手県大船渡市) と南鳥島 (東京都小笠原村) にて観測を継続している.

⁸ 観測データから空間代表性の高いサンプルを抽出するため, バックグラウンド値 (局所的な濃度変動の影響を受けていない観測値) であるか否かの判定を行っている.

⁹ 第 1 図 C には二酸化炭素輸送モデルの計算結果は使用されていないが, 第 1 図 B と併用して検討を行うため掲載した.

二酸化炭素濃度 球面分布図（月平均値） | 二酸化炭素分布情報

令和4年2月24日更新



第3図 「二酸化炭素分布情報」の掲載図の一例。ここで示す『二酸化炭素濃度 球面分布図』はウェブページ上では動画となっていて、大気中CO₂濃度が地域ごとの濃淡や1年周期の変動を伴いながらも上昇していく（赤くなる）様子を視覚的に表現している。

いていた資料の例である。航空機観測では観測中に性質の異なる空気に入れ替わることがあり、第2図aで性質の変化が見られる場合にその位置を確認し、第2図bを参考に空気塊の性質の検討を行っていた。

2.2 全球CO₂解析と二酸化炭素分布情報

気象庁は地球温暖化問題に関する国民への普及啓発や国際的な炭素循環研究への貢献を目的に、世界中から収集した観測データ等を基に二酸化炭素解析システムを用いて地球全体の大気中CO₂濃度を解析し、その分布や変化の状況を提供する「二酸化炭素分布情報」を2009年（平成21年）に開始した。「二酸化炭素分布情報」では毎年2月頃に、最新の観測データ等を用いて解析された1985年以降直近（情報を更新した年の前々年）

までの30年以上にわたる月平均大気中CO₂濃度のデータを公開し、CO₂濃度分布や時間変動を示した図表や解説の提供を行っている。

ここで解析された大気中CO₂濃度解析値は「二酸化炭素分布情報」のほかに、海の様々な変化を国民に広くお知らせする「海洋の健康診断表」の一コンテンツである「海洋による二酸化炭素の吸収（全球）」においても吸収量の見積もりに必要な大気中のCO₂濃度として利用されている（飯田ほか、2014）ほか、得られたCO₂フラックスについては個別に要請があった研究者等に提供しており、学術論文等（e.g., Kondo *et al.*, 2019）で活用されているほか、IPCC AR5 や AR6 において引用されている。

第3図は二酸化炭素分布情報ウェブページ¹⁰に掲載している図の一つ、「二酸化炭素濃度 球面分

¹⁰ https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info_kanshi.html

布図」である。この図はウェブページ上では閲覧者により地球の回転などを制御できる動画となっており、気候変動に関する啓発活動や教育の場面で活用され、地球が青い色から赤い色に変化していく様子を通じて大気中 CO₂ 濃度が地域ごとの濃淡や1年周期の変動を伴いながらも上昇し続けていることを視覚的に訴えることを狙いとしている。このほかにも、年ごとの大気中 CO₂ 濃度上昇幅の変動を示した「二酸化炭素濃度年増加量平面分布図」(図略)を用いた自然の気候変動(エルニーニョ現象, ラニーニャ現象)との関係の解説などの図を掲載している。

3. オンライン二酸化炭素輸送モデルの開発

3.1 新 CO₂ モデル (GSAM-TM) の開発

既述のとおり、オフライン輸送モデルである旧 CO₂ モデル (CDTM) はそのモデルが開発されて以来、観測データのチェック、大気中 CO₂ 濃度の全球解析(二酸化炭素分布情報等)のそれぞれに用いられていたが、気象場が外部強制力に依存し詳細な二酸化炭素の輸送の表現に限界があるという課題を抱えていた。新 CO₂ モデル (GSAM-TM) は、旧 CO₂ モデルが抱えるこれらの課題を解決する新しいオンライン輸送モデルとして2010年(平成22年)に開発が始まった。

ベースとなる大気モデルには予報部数値予報課(現情報基盤部数値予報課)が開発し日々の予報業務に用いている気象庁全球数値予報モデル (GSM, JMA, 2013) のバージョン GSM0808 (気象庁予報部, 2009; 気象庁予報部, 2019)¹¹ の低解像度版¹²を用いた。GSM は大気場の時間発展を波数空間上で計算するスペクトルモデルであり、格子系は水平方向には適合ガウス格子 (Juang, 2004; 気象庁予報部, 2005)¹³ が、鉛直方向には地形と気

圧を高度ごとの比率で按分して定めた σ -p ハイブリッド座標 (Simmons and Burridge, 1981; JMA, 2013) が用いられている。水平解像度は旧 CO₂ モデルで採用していた 2.5°×2.5°等緯度経度格子(格子間隔約 240 km)と同程度になるよう T_L95 (格子間隔約 180 km)を採用した(その後の高解像度化については第3.4節を参照)。鉛直層数は60層であり、地上から850 hPaまでの層の配置は旧 CO₂ モデルの5層から新 CO₂ モデルでは11層、最下層の厚さは旧 CO₂ モデルの30 hPa (約300 m) から新 CO₂ モデルでは3 hPa (約30 m) と地表面近くの層配置が強化されたほか100 hPaより上空にも多くの層が配置されている。

移流過程は質量保存セミラグランジュ法 (Gravel and Staniforth, 1994; 気象庁予報部, 2004) を、鉛直混合をもたらす物理過程¹⁴としてマスフラックス型の積雲対流スキーム (Arakawa and Shubert, 1974) と拡散係数型の乱流混合スキーム (Mellor and Yamada, 1974) を用いている。新 CO₂ モデルでは大気モデルが扱う気象場の詳細な構造を二酸化炭素の輸送計算に直接用いることを目的に、ベースとなる大気モデルの予報変数に対して行われる移流計算に大気中 CO₂ 濃度の移流も組み込み、大気中二酸化炭素の輸送も同時に計算させることとした。ただし、上述の移流計算には物理過程による鉛直混合は含まれておらず、元の GSM の物理過程でも二酸化炭素に対する効果は計算されていないことから、元の GSM の物理過程からマスフラックス及び拡散係数を抽出し二酸化炭素濃度の混合を別途見積もっている。

上述の予報変数への大気中 CO₂ 濃度の追加に加え、さらに気象場のナッジングの組込を行った。ナッジングとは一定の時定数であらかじめ得られた気象データに寄せる強制項を気象場の時間

¹¹ 2008年8月の更新から2012年12月の更新までのGSMのバージョン名。「GSAM-TM」は、GSM0808が開発中はGSAMと呼ばれていたことに由来する。

¹² 2010年当時の高解像度予報の解像度はT_L959(水平格子間隔約20 km)であった。T_Lは全球スペクトルモデルの最大切断波数を表す。また水平解像度として併記されるkm単位の格子間隔は日本付近の緯度における値を表す。

¹³ 適合ガウス格子(reduced Gaussian grid)は一般のガウス格子では格子間隔が狭まる高緯度で計算量削減のため間引きが行われている格子系で、GSM0808以降のGSMで採用されている。

¹⁴ 雲水過程や乱流混合など、モデル格子で直接扱うことのできない現象を指す。

第2表 CDTM 及び GSAM-TM の諸元.

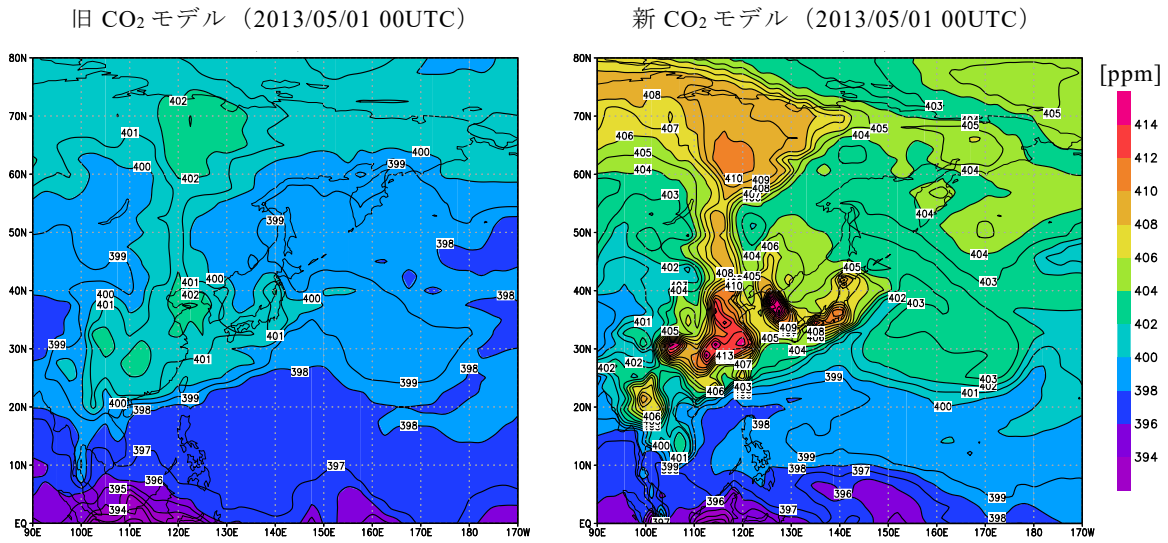
		旧 CO ₂ モデル (CDTM)	新 CO ₂ モデル (GSAM-TM)
気象場		計算済みの気象場を参照する.	ベースモデル (GSM) により計算 (ナudgingあり, 時定数 24 時間)
参照する 外部の 気象場		JRA-25 (Onogi <i>et al.</i> , 2007) 格子スケールの輸送過程の計算のため水平 風・非断熱加熱率を, 鉛直混合の計算のため 6 時間ごとの気温・比湿・水平風・非断熱加熱 率を時間内挿して使用.	JRA-55 (Kobayashi <i>et al.</i> , 2015) (2023 年まで) JRA-3Q (Kosaka <i>et al.</i> , 2024) (2024 年以降) ベースモデルで計算した気象場へのナudging のため 6 時間ごとの水平風を時間内挿して 使用.
格子系		等緯度経度格子	適合ガウス格子
水平解像度		2.5°×2.5° (約 240 km) (二酸化炭素分布情報 2009 年-2015 年)	T _L 95 (約 1.875°, 約 180 km) (二酸化炭素分布情報 2016 年-2019 年) T _L 159 (約 1.125°, 約 110 km) (二酸化炭素分布情報 2020 年以降)
鉛直座標・ 層数 (層配置)		σ-p ハイブリッド 32 層 モデルトップ 5.0 hPa 地上-850 hPa に 5 層 850 hPa-100 hPa に 23 層 最下層厚 30 hPa	σ-p ハイブリッド 60 層 モデルトップ 0.1 hPa 地上-850 hPa に 11 層 850 hPa -100 hPa に 24 層 最下層厚 3 hPa
水平移流		セミラグランジュ法	質量保存セミラグランジュ法 (Gravel and Staniforth, 1994; 気象庁予報部, 2004)
鉛直移流		上流差分法	
鉛 直 混 合	積雲	浅い対流 (Tiedtke, 1993) に加え, 積雲対流 スキーム (Kuo, 1974) で計算した積雲存在範 囲で乱流混合を強化.	積雲対流スキーム (Arakawa and Shubert, 1974) で計算したマスフラックスに基づき鉛 直混合.
	境界層	境界層スキーム (Mellor and Yamada, 1974) による乱流混合	
質量保存 ¹⁵		総量が保存されるように全球一様の係数を掛 ける.	輸送過程 (質量保存セミラグランジュ法) で 質量保存が考慮されている.

発展を求める計算式に加える手法であり, 気象観測データの同化システムを持たない数値モデルが自ら時間発展を計算した気象場はやがて現実の大気から乖離してしまうことから, これを避けるために必要な過程である. 新 CO₂ モデルでは, あらかじめ得られた気象データとして当時の最新の気象庁長期再解析である JRA-55 (Kobayashi *et al.*, 2015) の 6 時間間隔の水平風 (南北風・東西風) を用い, 時定数は Tanaka *et al.* (2003) に倣

い 24 時間とした.

大気中の二酸化炭素は安定な物質であることから, 新 CO₂ モデル, 旧 CO₂ モデルとも大気中の生成消滅は無視できるものと仮定している. この仮定を置くことで, 大気中の CO₂ 濃度の変動は地表面からの吸収・放出と気象場による移流・拡散によるものと限定できる. 大気・地表面間の CO₂ 吸収・放出過程はベースとなる GSM にはない過程であることから, 参照する外部データ (吸収・

¹⁵ 一般に, 水平移流にセミラグランジュ法を採用した場合, モデル全体における物理量の保存が失われるので, 何らかの補正が必要となる.



第 4 図 (左) 旧 CO₂ モデル (同化無し計算) と (右) 新 CO₂ モデル (T_L95 同化無し計算, ただし地表面フラックスは第 3 表の旧 CO₂ モデルで解析されたものを使用) で計算された 2013 年 5 月 1 日 00UTC の日本付近の地表面 (モデル最下層) CO₂ 濃度分布 (単位 ppm).

放出量分布) に基づいて地表面フラックスとして大気中から CO₂ を吸収・大気中へ CO₂ を放出する過程を実装した。

こうして開発された新 CO₂ モデルの, ここまでに述べたオンライン化や地表面付近への鉛直層配置の強化などにより, 表現される CO₂ 濃度の空間変動スケールが第 4 図の事例のようにそれまでの数 ppm (第 4 図左) から 10 数 ppm (第 4 図右) へと大きくなった. これに伴い時間変動スケールも大きくなり, 第 4.1 節で後述するように観測値との対応が改善した. 第 2 表に旧 CO₂ モデルと新 CO₂ モデルの諸元を示す.

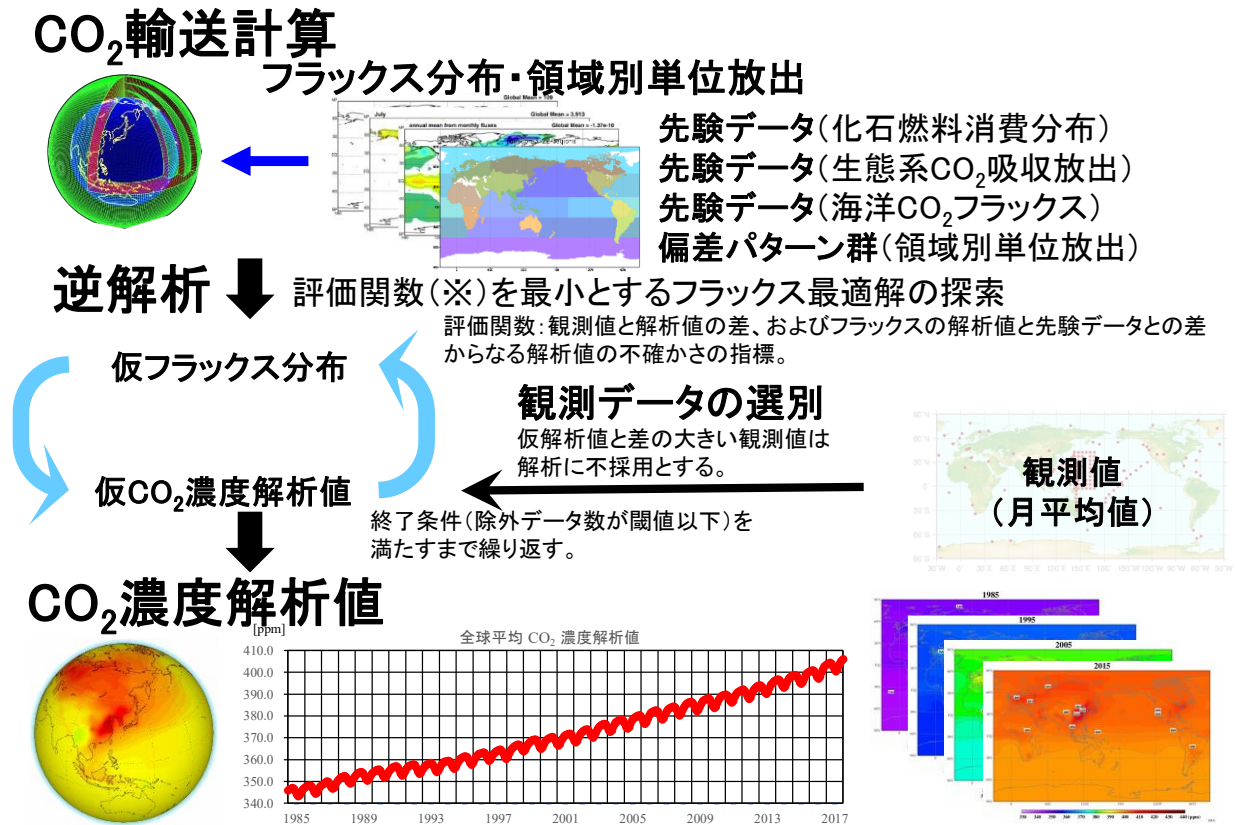
3.2 二酸化炭素解析システムへの新 CO₂ モデルの導入

新 CO₂ モデルの開発に引き続き, 大気中 CO₂ 濃度のグローバル解析を新 CO₂ モデルをベースに行うため, 二酸化炭素解析システム (第 5 図) への新 CO₂ モデルの組込を行った.

二酸化炭素解析システムが採用するデータ同化手法 (詳細は補遺を参照) は逆解析と呼ばれ, 観測値と CO₂ 濃度分布, CO₂ 吸収・放出量 (地表面フラックス) との関係を得るため, 複数パターンの地表面フラックスを地域・期間を区切って与え, 放出された CO₂ の大気中での拡散の様子 (すなわちある地域・期間からの CO₂ 放出のインパクト) を, 二酸化炭素輸送モデルを用いて計算する. ここで, モデル計算結果を観測データのチェックに用いる際には CO₂ の放出源や放出時期による区別は必要なかったが, 逆解析では地域・期間で区切った各地表面フラックスから観測へのインパクトを評価するため独立して計算する必要がある. これに対応するため予報変数を発生源別・発生時期別に分離し, 同時かつ独立に扱えるよう新 CO₂ モデルの拡張を行った.

続いて, 逆解析においてモデル格子点値を観測要素に変換する観測演算子¹⁶で扱える格子系を, 旧 CO₂ モデルの等緯度経度格子に加え新 CO₂ モ

¹⁶ 観測演算子とは, データ同化を行うに際して必要となる, 観測値と同等の値へのモデル格子点データからの変換 (観測地点への内挿やモデル予報変数から観測物理量への変換など) を行う変換式のこと.



第 5 図 二酸化炭素解析システムによる大気中 CO₂ 濃度の全球解析の流れ。

デルの適合ガウス格子も扱えるようプログラムの改修を行った。

これらの開発により、二酸化炭素解析システムを構成するモデルを旧 CO₂ モデルから新 CO₂ モデルに置き換え、新 CO₂ モデルの計算結果に対してデータ同化を行い解析値を得ることが可能となった。

3.3 CO₂ 地表面フラックス先験データの更新

前節までで述べたとおり、ここまでの開発で二酸化炭素解析システムを構成するモデルを旧 CO₂ モデルから新 CO₂ モデルに置き換え、新 CO₂ モデルの計算結果に対してのデータ同化が可能となった。しかしながら、先験データ(第 5 図に示す、仮フラックス分布と仮 CO₂ 濃度の繰り返し解析の中で最初に与える地表面フラックスデータ)については従前のままであり、吸収・放出量分布を解析期間中固定し、排出総量の変化に合わせた全

球一様の係数で補正するという手法をとっていたことから、近年の経済発展等に伴う化石燃料消費起源の CO₂ 排出増加が大きい地域で過少に、排出増加が小さい地域で過大に見積もるようになってきていた。

このことから、新 CO₂ モデルを用いて全球 CO₂ 解析を実施するにあたっては最近の経済発展等による CO₂ 吸収・放出量の変化の地域差を反映させるため、新 CO₂ モデルに与える先験データに地域差のある経年変化をもつデータを導入した。地域差のある経年変化をもつ化石燃料消費起源 CO₂ 排出分布データとして、CDIAC の月別データ (Andres *et al.*, 2013 ; Andres *et al.*, 2015 ; Andres *et al.*, 2016) を、大気・海洋間の CO₂ 吸収・放出量データとして地球環境・海洋部海洋気象課海洋環境解析センター(現大気海洋部環境・海洋気象課大気海洋環境解析センター)の海洋による CO₂ 吸収量の月別解析値(飯田ほか, 2014 ; Iida *et al.*,

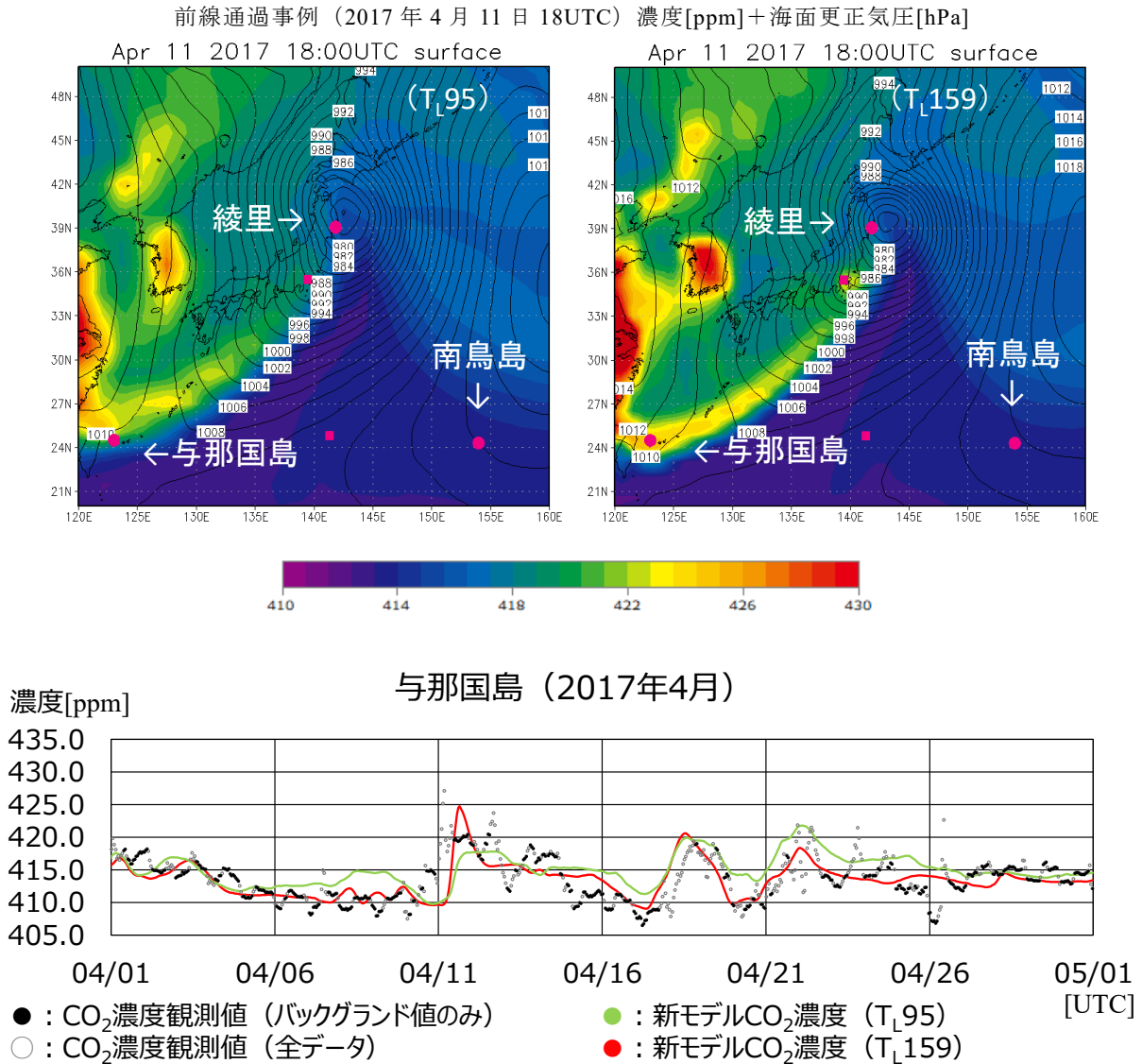
第 3 表 CO₂ モデルで使用する CO₂ 吸収・放出量データセット（地表面 CO₂ フラックス）.

モデル	旧 CO ₂ モデル (CDTM)		新 CO ₂ モデル (GSAM-TM)
用途 (注 1)	観測データチェック ※ 観測データの同化は無し	大気中 CO ₂ 濃度解析 (二酸化炭素解析システム)	用途による使い分け無し
化石燃料 (分布)	解析期間中固定 CDIAC による 1995 年の 1°×1°分布 (Brenkert, 1998)	1990 年以前 (期間中固定): CDIAC による 1990 年の 1°×1°分布 (Andres <i>et al.</i> , 1996) 1995 年以降 (期間中固定): CDIAC による 1995 年の 1°×1°分布 (Brenkert, 1998) 1990 年-1995 年: 両者を按分	経年変化あり CDIAC による 1°×1°月別分布 (Andres <i>et al.</i> , 2013; Andres <i>et al.</i> , 2015; Andres <i>et al.</i> , 2016)
化石燃料 (総量)	総量補正なし	総量補正あり 二酸化炭素分布情報 2009 年- 2014 年 CDIAC (Marland <i>et al.</i> , 2004; Boden <i>et al.</i> , 2012; Boden <i>et al.</i> , 2013) 二酸化炭素分布情報 2015 年 GCP (Le Quéré <i>et al.</i> , 2015a)	総量補正あり 二酸化炭素分布情報 2016 年以 降 GCP (Le Quéré <i>et al.</i> , 2015b; Le Quéré <i>et al.</i> , 2016; Le Quéré <i>et al.</i> , 2018a; Le Quéré <i>et al.</i> , 2018b; Friedlingstein <i>et al.</i> , 2019; Friedlingstein <i>et al.</i> , 2020; Friedlingstein <i>et al.</i> , 2022)
土地利用 変化 (注 2)	1980 年の値 (Houghton <i>et al.</i> , 1987)	なし (TransCom3 (Gurney <i>et al.</i> , 2000) の設定に基づく)	
生態系	陸域生態系モデル (CASA) (Randerson <i>et al.</i> , 1997) で作成された月別気候値		
海洋	1995 年の月別値 (Obata, 2001)	月別気候値 (Takahashi <i>et al.</i> , 1999)	月別解析値 (経年変化あり) (Iida <i>et al.</i> , 2015; Iida <i>et al.</i> , 2021)
偏差 パターン		TransCom3 の 22 領域における 単位量放出	TransCom3 の 22 領域における 単位量放出 (注 3)

注 1) 旧 CO₂ モデルは、観測データチェック用途で利用開始後に国際モデル相互比較に準じた仕様の二酸化炭素解析システムを構築したことから両用途で異なる地表面フラックスを用いていたが、新 CO₂ モデル導入の際に統一された。

注 2) 「土地利用変化」とは、森林伐採や耕作地化など土地利用形態の変化に伴い、それまでの生態系により維持されていた CO₂ 吸収・放出の均衡が変化することによって生じる吸収・放出量。年による土地利用変化の規模の変化や、利用形態が変化した土地からの CO₂ 吸収・放出自体が経年変化することから「土地利用変化」は経年変化を伴う。特定の年の値に固定してモデルに入力する場合はその年からの変化分が、土地利用変化を先験データとして用いない場合は土地利用変化全体が、データ同化による修正量に含まれるかたちとなる。

注 3) ただし新 CO₂ モデルの観測データチェック用途の計算では、逆解析の解析期間内においては逆解析の結果と同値となるよう逆解析で得た係数を掛けて使用し、解析期間外は逆解析の結果を外挿して用いている。



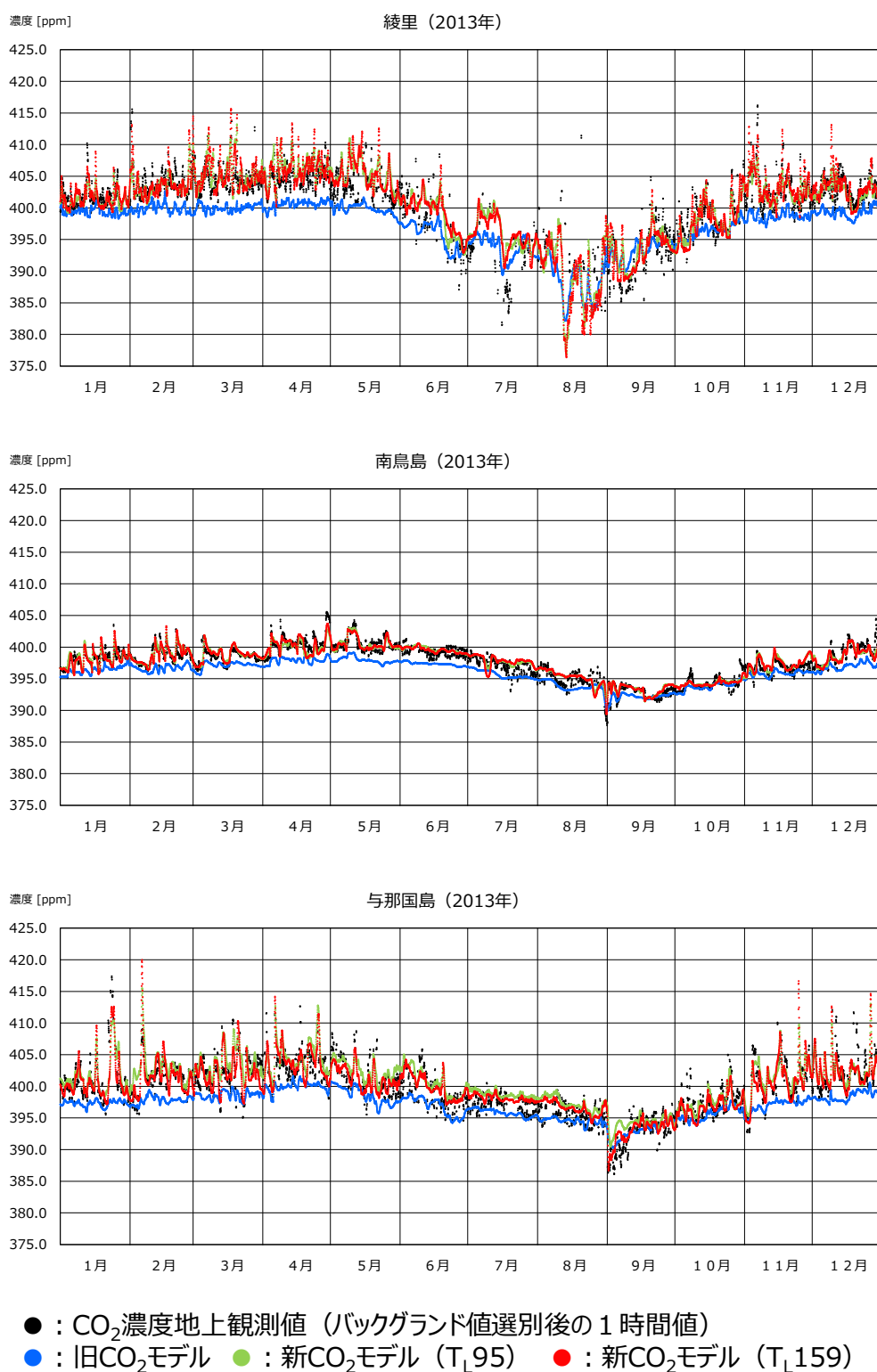
第6図 (上段) 2017年4月11日 18:00UTCの日本周辺の(左) T_L95, (右) T_L159のそれぞれ新CO₂モデルで計算した地表面CO₂濃度の分布図(黒の等値線はモデルで計算した海面更正気圧)。(下段) 2017年4月の1か月間(1日00:00 UTC-30日24:00 UTC)の与那国島における観測及び新CO₂モデル(T_L95, T_L159)によるCO₂濃度の時系列図(単位 ppm)。

2015; Iida *et al.*, 2021) を利用することとした。

ここまでの開発をもって2016年(平成28年)3月に「二酸化炭素分布情報」に新CO₂モデルを導入し、観測データチェック用途での新CO₂モデルの利用も開始した。第3表に旧CO₂モデル、新CO₂モデルそれぞれで使用している地表面CO₂吸収・放出量データセットを示す。

3.4 新CO₂モデル(GSAM-TM)の高解像度化

第3.3節までで述べたとおり、2016年(平成28年)に新CO₂モデルをT_L95(格子間隔約180km)の水平解像度で導入した。しかしながら、旧CO₂モデルに比べCO₂濃度の空間分布の表現は改善したものの、地上観測点がとらえる現象のスケールに比べモデルが表現する現象のスケールはT_L95ではまだ粗く、実際の観測値には含まれてい



第7図 国内地上観測点(綾里, 南鳥島, 与那国島)におけるCO₂濃度観測値(バックグラウンド値と判別された1時間値), 各CO₂モデル(旧CO₂モデル(観測データチェック用), 新CO₂モデル(T_L95), 新CO₂モデル(T_L159))の2013年の1年間の濃度変化. モデルの値は観測点の位置に対して4点内挿した1時間ごとの値.

第 4 表 観測された CO₂ 濃度（ただしバックグラウンド値と判別された値）及び各モデルによる CO₂ 濃度（ただしバックグラウンド値と判別された観測値と同時刻の特別値）から季節変動成分が除去された濃度変動の大きさ（二乗平均平方根）[ppm]及び観測と各モデル特別値の相関係数．季節変動成分の除去方法は本文を参照．

	季節変動成分を除去した濃度変動の 二乗平均平方根[ppm]			季節変動成分を除去した濃度変動の 観測と各モデルとの相関係数			
	観測値	旧モデル	新モデル	新モデル	旧モデル	新モデル	新モデル
		2.5°×2.5°	T _L 95	T _L 159	2.5°×2.5°	T _L 95	T _L 159
綾里	2.473	0.914	1.967	2.301	0.307	0.482	0.491
南鳥島	1.072	0.448	0.872	0.941	0.623	0.602	0.613
与那国島	2.366	0.695	1.820	2.121	0.418	0.576	0.634

ない観測点近隣の吸収・放出源の情報がモデル計算結果には離散化や数値拡散により偽のシグナルとして含まれてしまう事例も見受けられた．このような偽のシグナルは観測データのチェックの妨げとなり，さらには衛星観測をはじめとした今後の観測データの利用拡充において妨げとなる可能性が考えられた．このことから，新 CO₂ モデルによる大気中 CO₂ 濃度分布の表現力の向上を図るため T_L159（水平解像度約 110 km）へ解像度を引き上げることとした．

解像度 T_L159（水平解像度約 110 km）でのテスト結果から，低気圧や前線に対応した CO₂ 濃度の空間分布，時間変動が T_L95 に比べより細かく表現され，数値拡散により生じる偽のシグナルも抑制されることが確認できた．第 6 図に前線通過に対応した CO₂ 濃度変動が与那国島で観測された 2017 年 4 月 11 日の例（地表面 CO₂ 濃度分布と与那国島における当該事例の前後の CO₂ 濃度時系列）を示す．日本付近を発達中の低気圧と前線が通過中の事例で，T_L95，T_L159 のいずれでも低気圧後面（寒冷前線）の高 CO₂ 濃度空気塊を表現しているが T_L159 の方が細かく表現されている．与那国島における地上観測と比較した時系列図からは，いずれのモデルも 1 日周期の変動は捉えきれていないものの，前線通過事例については

T_L159 の方が鋭い CO₂ 濃度変動を表現していて変動幅も観測に近いことが分かる．この T_L159 の新 CO₂ モデルは 2020 年（令和 2 年）2 月の「二酸化炭素分布情報」より利用を開始した．

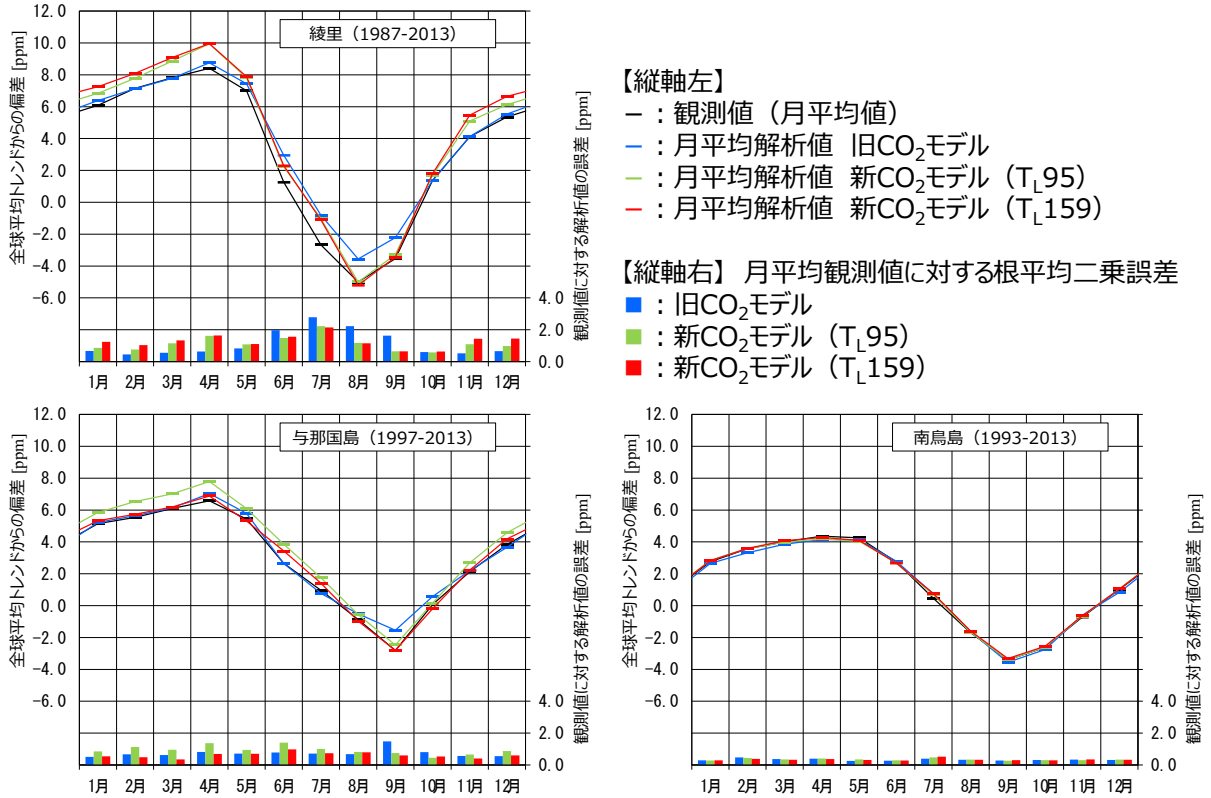
4. 新 CO₂ モデル（GSAM-TM）の検証

4.1 観測データチェック用特別値の検証

第 2.1 節で述べたとおり，観測データのチェックに二酸化炭素輸送モデル（データ同化無し）で計算された CO₂ 濃度（特別値）を用いている．このモデル計算結果の精度を確認するため，2013 年（平成 25 年）の 1 年を対象に，国内地上観測点（綾里，南鳥島，与那国島）で観測された CO₂ 濃度（特別値）と，新 CO₂ モデル（T_L95，T_L159），旧 CO₂ モデルで計算された同地点における CO₂ 濃度（特別値）の比較を行った．

第 7 図に，綾里，南鳥島，与那国島の各観測点の 2013 年の 1 年間の観測及び各モデルによる CO₂ 濃度変動を示す．旧 CO₂ モデルによる観測データチェック用の計算は地表面フラックスに経年変化がなく観測値の同化もされていない一方，新 CO₂ モデルによる計算は一度二酸化炭素解析システムにて観測値（月平均値）を同化して得られた地表面フラックスを用いている¹⁷ため，純粋なモデルの特性の違いに加え地表面フラックス置き

¹⁷ ここでの比較に用いた新 CO₂ モデルが参照する地表面フラックスは 1985 年-2017 年の地上観測値を同化した全球 CO₂ 解析で得られたものである．なお，観測値のデータチェックに用いるモデル計算は全球 CO₂ 解析で得られた地表面フラックスを時間外挿して用いている．



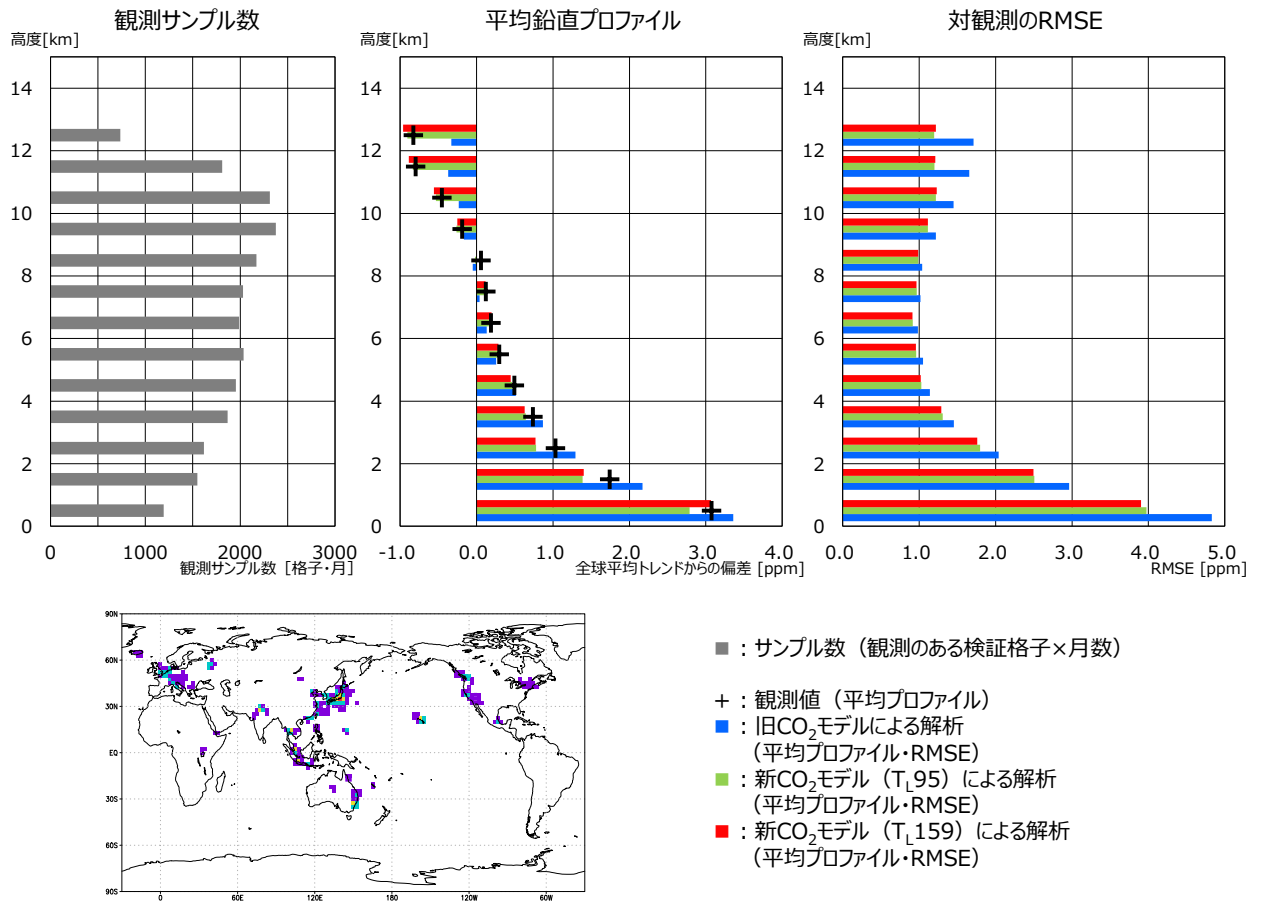
第 8 図 (左上) 綾里, (右下) 南鳥島, (左下) 与那国島における旧 CO₂ モデル, 新 CO₂ モデル (T_L95), 新 CO₂ モデル (T_L159) それぞれを用いて二酸化炭素解析システムにより解析した月平均 CO₂ 濃度解析値と観測値の月平均の各月ごとの観測開始 (綾里 1987 年, 南鳥島 1993 年, 与那国島 1997 年) から 2013 年までを平均した季節変動成分 (折れ線, 左側縦軸), 及び観測値の月平均に対する根平均二乗誤差 (棒グラフ, 右側縦軸). 季節変動成分は各月の観測値・解析値から WDCGG が解析した全球解析値トレンド (WMO, 2023) を差し引いてから月別平均することで抽出した.

換えの効果が加わっているという点に留意が必要であるが, 新 CO₂ モデルの方が旧 CO₂ モデルに比べ季節変動がよく表現されていることが確認できる. 特に, 観測される濃度がピークとなる時期 (4 月-5 月頃) には観測値と旧 CO₂ モデルで数 ppm の程度の乖離がみられていたが, 新 CO₂ モデルでは観測される季節変動に概ね追従するようになった.

より周期の短い 1 日から数日スケールの CO₂ 濃度変動 (以下, 短周期の変動) は, 低気圧や前線の通過に対応する 10 ppm 程度の濃度変動が観測された事例に対して旧 CO₂ モデルでは数 ppm の変動にとどまっていたものが新 CO₂ モデルでは同程度の変動を再現するようになった.

この短周期の変動の再現性を定量的に評価するため, 観測, モデルそれぞれについて時別値から 30 日移動平均を季節変動成分とみなして除去し, 観測及び各モデルの短周期変動 (季節変動成分が除去された濃度変動) の大きさ (二乗平均平方根) の比較と, 短周期変動の観測と各モデルとの相関係数の比較を行った (第 4 表). 短周期変動の大きさは旧 CO₂ モデルでは観測値の半分程度だったものが, 新 CO₂ モデルでは T_L95 で 8 割程度, T_L159 で 9 割程度であった. 短周期変動の観測値とモデル計算結果の相関係数も, 旧 CO₂ モデルにおいても短周期変動成分に一定の相関がみられた南鳥島を除き, 旧 CO₂ モデルより新 CO₂ モデルの方が, 新 CO₂ モデルにおいては解像度が高

全球CO₂解析 対 航空機観測 (CONTRAIL) 検証 (全球・通年)



第 9 図 航空機観測 (CONTRAIL) により 2005 年から 2013 年までに空港上空で観測された CO₂ 濃度の鉛直プロファイルの平均、及び旧 CO₂ モデル、新 CO₂ モデル (TL95)、新 CO₂ モデル (TL159) の各モデルを用いた全球 CO₂ 解析で得られた鉛直プロファイルの平均(上段中央)及び対観測の根平均二乗誤差(RMSE) (上段右). 得られたサンプル (月平均値化された観測が存在する格子数) の高度別分布 (上段左) と地理的分布 (下段左) も示す. 経年増加分を除去するため、観測値、解析値とも WDCGG 全球解析 (2023 年 11 月公表, WMO, 2023) による全球平均トレンドを差し引いている.

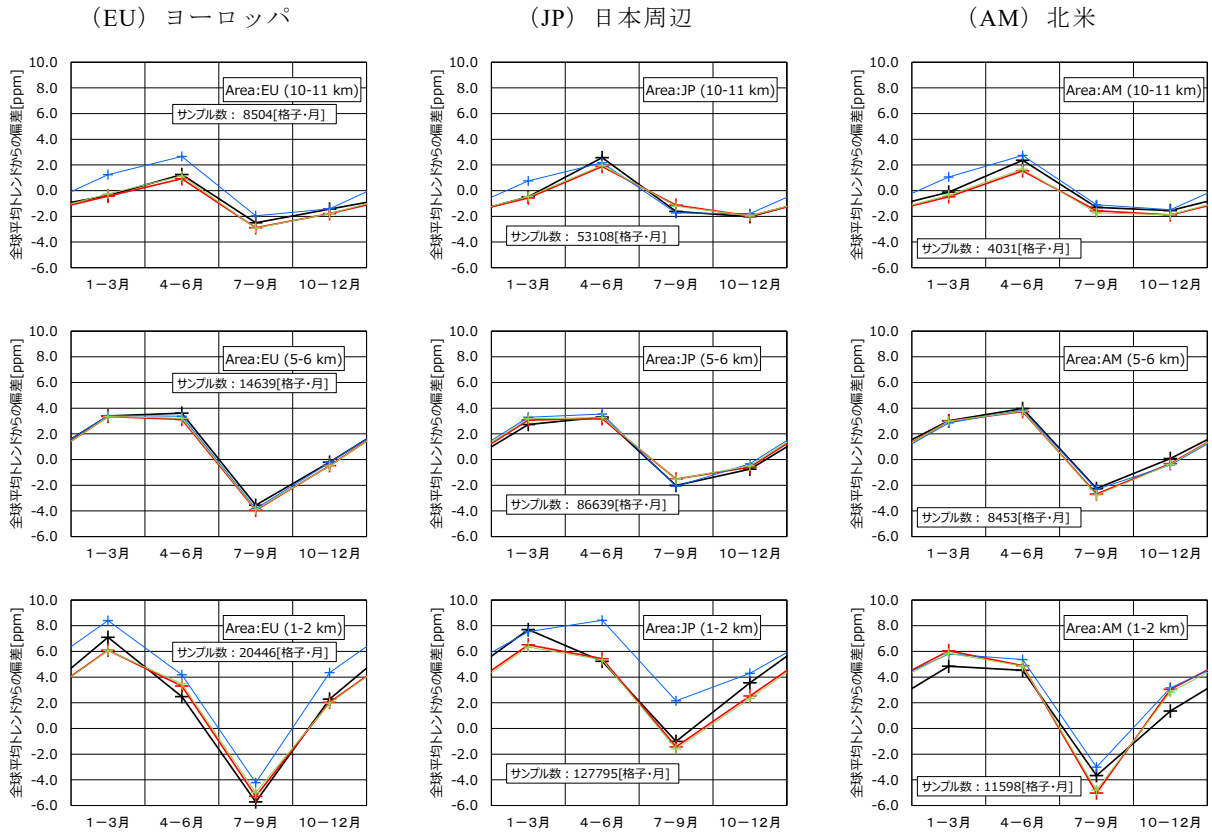
い方が相関も高くなっている. このことから新 CO₂ モデルの方が、また解像度が高い方がメリハリのある、かつ観測値の変動と対応のよい表現がされるようになったことが確認できる.

4.2 全球 CO₂ 解析の検証 (対国内地上観測)

続いて、二酸化炭素解析システムでデータ同化を行い公開している「二酸化炭素分布情報」の月平均値の精度を確認するため、新旧 CO₂ モデルの月平均値と国内地上観測点の観測による月平均

値との比較を行った.

第 8 図に国内地上観測点 (綾里, 南鳥島, 与那国島) における観測と各モデルの月平均値の季節変動成分 (全球平均トレンドからの偏差), 及び観測の月平均を真値とした月別の根平均二乗誤差 (RMSE) を示す. 比較期間は各観測点の観測開始 (綾里: 1987 年, 南鳥島: 1993 年, 与那国島: 1997 年) から新旧 CO₂ モデルで期間を揃えて比較ができる (旧 CO₂ モデルによる最終の全球 CO₂ 解析の解析期間末である) 2013 年までとした. こ



+ : 航空機観測 + : 旧モデル (CDTM) + : 新モデル (GSAM-TM) (T_L95) + : 新モデル (GSAM-TM) (T_L159)

第 10 図 ヨーロッパ (EU), 日本周辺 (JP), 北米 (AM), (以下次ページ) インド周辺, 東南アジア, ハワイ
 周辺, (以下次々ページ) オーストラリア周辺の各地域の, 観測値・解析値の平均的な季節変動 (観測
 値・解析値から経年変化分として WDCGG が解析した全球平均トレンド (2023 年 11 月公表, WMO,
 2023) を差し引いた値). 上から高度 10 km-11 km, 5 km-6 km, 1 km-2 km の 3 か月平均 (1 月-3 月, 4
 月-6 月, 7 月-9 月, 10 月-12 月). 次々ページに検証の領域分けを示す.

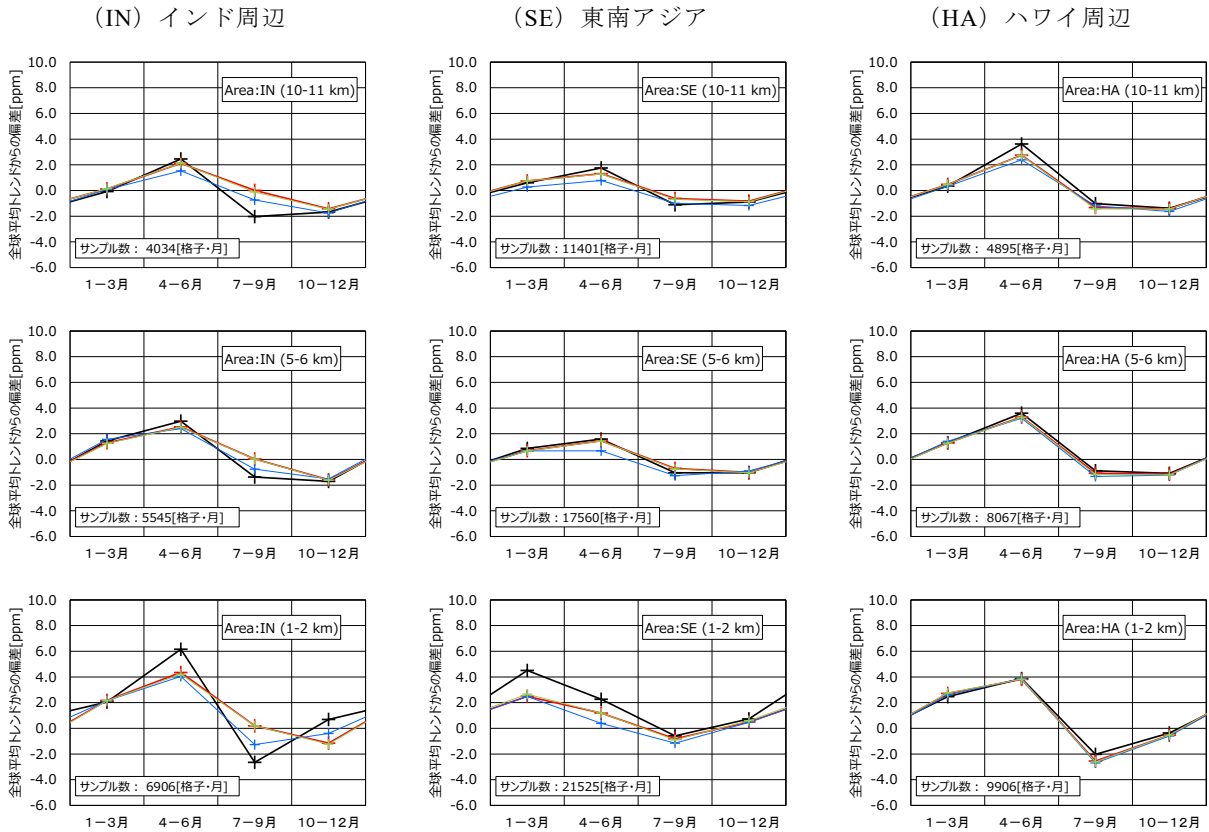
の比較では経年増加しベースが異なる年の濃度を同等に扱うため, WDCGG が解析した全球解析値 (WMO, 2009; 堤ほか, 2009) の増加トレンド (2023 年 11 月公表, WMO, 2023) を控除するという形で季節変動成分のみを取り出すという操作を行った. なお, 比較に用いている観測値 (月平均値) は新旧モデルいずれの解析にも同化されており独立検証ではないこと, 第 3 表に示すとおり新旧 CO₂ モデルで先験フラックスが異なること, さらに旧 CO₂ モデルにおいては第 4.1 節の観測データチェック用のモデル計算で使用したフラックスとも異なることに留意が必要である.

第 8 図によれば, 各モデルとも各観測点における季節変動 (位相・振幅) は概ね再現されている

が, 第 4.1 節の結果と同様に旧 CO₂ モデルに比べ新 CO₂ モデルの方がメリハリのある季節変動を示している. 解析に使用した観測値を真値とした解析値の根平均二乗誤差からは, 新 CO₂ モデルによる解析値は旧 CO₂ モデルによる解析値と比較して一概にどちらが観測に近いとまでは言えないが, 解析に利用された地点の濃度は新 CO₂ モデル・旧 CO₂ モデルとも使用された先験フラックスに関わらず同程度の精度で解析できていることが分かる.

4.3 全球 CO₂ 解析の検証 (3 次元分布)

二酸化炭素解析システムで得られた大気中 CO₂ 濃度の解析値の 3 次元分布の精度を確認するため,



+ : 航空機観測 + : 旧モデル (CDTM) + : 新モデル (GSAM-TM) (T_{L95}) + : 新モデル (GSAM-TM) (T_{L159})

第 10 図 (続き) ヨーロッパ, 日本周辺, 北米 (ここまで前ページ), インド周辺 (IN), 東南アジア (SE), ハワイ周辺 (HA), (以下次ページ) オーストラリア周辺の各地域の観測値・解析値の平均的な季節変動 (観測値・解析値から経年変化分として WDCGG が解析した全球平均トレンド (2023 年 11 月公表, WMO, 2023) を差し引いた値). 上から高度 10 km-11 km, 5 km-6 km, 1 km-2 km の 3 か月平均 (1 月-3 月, 4 月-6 月, 7 月-9 月, 10 月-12 月). 次ページに検証の領域分けを示す.

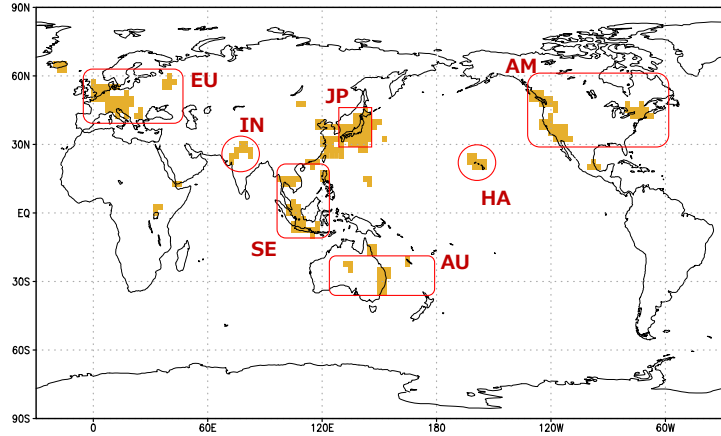
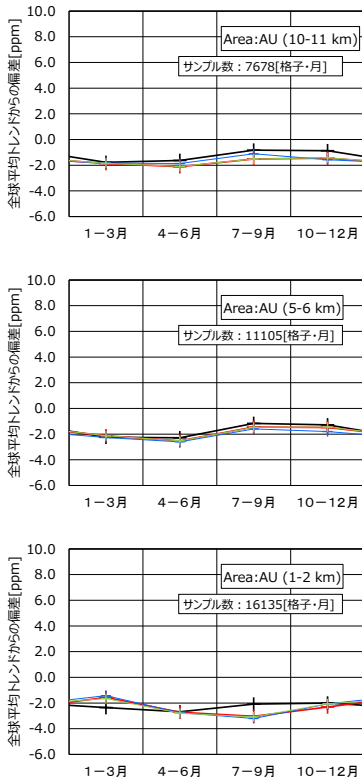
航空機による CO₂ 濃度観測値との比較を行った. 航空機による観測値は国立環境研究所などが中心となって行われている民間航空機を活用した観測プロジェクト CONTRAIL (Machida *et al.*, 2008 ; Machida *et al.*, 2018) による空港から離陸し上昇中又は着陸のため下降中の観測値を用いた. この観測は同化に利用していない独立観測データである. 二酸化炭素解析システムで得られる解析値は月平均値であるため, 観測値, 解析値とも 2.5°×2.5°, 高度 1000 m ごとの月平均格子点値に変換して比較を行った. 比較期間は旧 CO₂ モデルと新 CO₂ モデル (T_{L95} , T_{L159}) とで共通で比較ができる 2005 年から 2013 年までとした.

第 9 図に新旧 CO₂ モデル及び観測による平均的

な鉛直プロファイル (観測値, 解析値から経年変化分として WDCGG が解析した全球平均トレンド (2023 年 11 月公表, WMO, 2023) を控除した値) 及び新旧 CO₂ モデルの高度別の根平均二乗誤差を示す. この図の解釈にあたってはサンプルが日本付近に集中しているため検証スコアが日本付近に重みが乗っていることに留意する必要があるが, 観測値の平均的な鉛直プロファイル (第 9 図上段中央の+印) から示される上部対流圏・下部成層圏領域 (高度 8.5 km-12.5 km) の鉛直濃度勾配が, 旧 CO₂ モデルに比べ新 CO₂ モデル (T_{L95} , T_{L159}) ではよく再現されていることが分かる. この高度での根平均二乗誤差も旧 CO₂ モデルでは高度 8.5 km で 1.0 ppm であったものが高度 12.5

(AU) オーストラリア

検証領域図



+ : 航空機観測 + : 旧モデル (CDTM) + : 新モデル (GSAM-TM) (T_L95) + : 新モデル (GSAM-TM) (T_L159)

第 10 図 (続き) ヨーロッパ, 日本周辺, 北米 (ここまで前々ページ), インド周辺, 東南アジア, ハワイ周辺 (ここまで前ページ), オーストラリア周辺 (AU) の各地域の観測値・解析値の平均的な季節変動 (観測値・解析値から経年変化分として WDCGG が解析した全球平均トレンド (2023 年 11 月公表, WMO, 2023) を差し引いた値). 上から高度 10 km-11 km, 5 km-6 km, 1 km-2 km の 3 か月平均 (1 月-3 月, 4 月-6 月, 7 月-9 月, 10 月-12 月). 地図は検証の領域分けを示す.

km では 1.7 ppm と大きく拡大しているのに比べ、新 CO₂ モデル (T_L95, T_L159) では高度 8.5 km の 1.0 ppm から高度 12.5 km の 1.2 ppm と高度上昇に伴う根平均二乗誤差の拡大が新 CO₂ モデルでは抑えられていることが分かる. そのほかの高度についても、バイアス (第 9 図上段中央の+印と各モデル横棒グラフとの差) で見ると旧 CO₂ モデルの正バイアスが新 CO₂ モデルでは負バイアスに転じていて一概にバイアスが縮小したとは言えないが、根平均二乗誤差でみると高度 0.5 km で旧 CO₂ モデルでの 4.8 ppm が新 CO₂ モデル (T_L95) で 4.0 ppm, 新 CO₂ モデル (T_L159) で 3.9 ppm に、高度 1.5 km-2.5 km でも旧 CO₂ モデルに比べ新 CO₂ モデルの方が小さくなっていった. 対流圏中層

(高度 3.5 km-7.5 km) においても、いずれのモデルも根平均二乗誤差で 1 ppm 程度であったが、高度 3.5 km-7.5 km のどの高度でも新 CO₂ モデルの方が小さい値となっていた. これらの結果から、新 CO₂ モデルによる全球 CO₂ 解析の方がいずれの高度においても良い精度であることが確認できた. なお、高度 0.5 km において新 CO₂ モデルの T_L95 と T_L159 とでバイアスに違い (T_L159 の方が小さい) がみられるが、これは人為起源排出の影響を受けやすい空港付近で高解像度な方がメリハリある分布を表現しやすいことが影響している可能性がある.

さらに地域ごと、高度ごとの精度を確認するため、航空機観測による鉛直プロファイルが得られ

ている 7 個の地域（ヨーロッパ (EU), 日本周辺 (JP), ハワイ (HA), 北米 (AM), インド (IN), 東南アジア (SE), オーストラリア (AU)) に分け、地域別かつシーズン（1 月-3 月, 4 月-6 月, 7 月-9 月, 10 月-12 月）別に、高度 10 km-11 km（上部対流圏から季節や地域により下部成層圏に対応）、5 km-6 km（対流圏中層に対応）、1 km-2 km（境界層上端から対流圏下層に対応）の観測値と解析値の比較を行った。第 10 図に、各領域、各高度の観測と解析による季節変動（観測値、解析値から経年変化分として WDCGG が解析した全球平均トレンド（2023 年 11 月公表, WMO, 2023）を控除した 3 か月平均）を示す。

観測では東南アジア (SE) を含む北半球 (EU, IN, JP, HA, AM) で冬（1 月-3 月）から春（4 月-6 月）にかけて濃度の極大、夏（7 月-9 月）に濃度の極小となっていて、その振幅は中緯度以北の陸上やインド周辺の地表面近くで大きく、高度が上がるにつれて振幅は小さくなるという特徴が、南半球（ここではオーストラリア (AU) 周辺）では冬（7 月-9 月）から春（10 月-12 月）にかけて極大となる季節変動があるが北半球ほど振幅は小さくなく、高度が下がるにつれて不明瞭になるという特徴がみられた。新 CO₂ モデル (T_L95, T_L159) による解析値は北半球において観測された季節変動の特徴を概ね再現していて、旧 CO₂ モデルの中高緯度 (EU, JP, AM) 高度 10 km-11 km で見られた冬季の正バイアスも見られなくなった。またヨーロッパ (EU) の高度 1 km-2 km ではほぼ年間を通じて、日本付近 (JP) の高度 1 km-2 km で春～夏に旧 CO₂ モデルで見られた正のバイアスも新 CO₂ モデルでは小さくなっていた。一方で、東南アジア (SE) で 1 月-3 月, 4 月-6 月の旧 CO₂ モデルで見られた負バイアスはモデルが変わってもほぼそのままとなり、インド周辺 (IN) ではいずれのモデル、高度とも観測された季節変動を十分に表現できなかった。また、オーストラリア周辺 (AU) では高度 1 km-2 km で振幅は小さいものの 1 月-3 月に極大、7 月-9 月に極小という北半球と同位相になっていた。

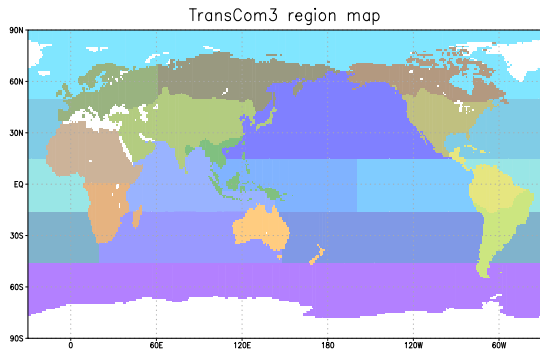
5. まとめと今後の課題

気象庁が発表する温室効果ガスに関する情報の高度化のため、全球数値予報モデル GSM をベースにオンライン二酸化炭素輸送モデル (GSAM-TM) を開発した。新 CO₂ モデルは従来のオフライン二酸化炭素輸送モデル (CDTM) と比べ、対航空機観測の RMSE や、上部対流圏～下部成層圏のバイアスを縮小するなど大気中の二酸化炭素の動態をより精緻かつ観測と整合的に表現でき、新 CO₂ モデルを二酸化炭素解析システムに導入することにより全球 CO₂ 濃度解析の精度向上につなげることができた。さらに、解像度の T_L95 から T_L159 への引き上げにより、時空間構造が精度を維持したまま詳細に表現できるようになったことが確認できた。

一方で、Ishijima *et al.* (2022) で指摘されるように、数時間スケールの現象を表現するには高い解像度が必要で、高解像度化された T_L159 の新 CO₂ モデルでもなお数時間から一日のスケールの変動の表現は充分ではなかった。短い時間スケールの変動の表現の改善には下部境界条件の改良（地表面フラックスの日変化の導入）や更なるモデル解像度の引き上げなどが必要と考えられる。

また、新 CO₂ モデルを二酸化炭素解析システムに導入しても東南アジアやインド周辺では解析値と独立観測の間に季節変動の表現の差がみられていて、要因としてこれら地域では同化可能な観測が少なく解析値を拘束しきれていないことが考えられる。

全球 CO₂ 濃度解析で用いる観測データは現地観測データの利用にとどまっており、利用できている現地観測データの分布の偏りや、GOSAT や GOSAT-2, GOSAT-GW, OCO-2 をはじめとする最近十数年の衛星による温室効果ガス観測体制の拡充を考えると、まだ観測データの活用を強化する余地が残されている。現在この未活用である衛星データの導入 (Maki *et al.*, 2023) に向けた開発を進めており、これら観測データの導入により大気中二酸化炭素のより精度の高い動態の把握を目指す予定である。



第 11 図 大気中 CO₂ の全球解析で用いる陸域 11, 海域 11 の区分図. 区域分けは Gurney *et al.* (2000) による.

補遺 二酸化炭素解析システムについて

2009 年に大気中 CO₂ 濃度の全球解析 (二酸化炭素分布情報) を開始するにあたり開発した二酸化炭素解析システムは, 大気中の CO₂ の拡散を計算する輸送計算部分と観測データを利用するデータ同化部分で構成される. 全球 CO₂ 解析は年 1 回, 二酸化炭素輸送モデルによる計算 (2015 年 (平成 27 年) までは旧 CO₂ モデルを, 2016 年 (平成 28 年) から 2019 年までは新 CO₂ モデル (T_L95), 2020 年以降は新 CO₂ モデル (T_L159) を輸送計算部分に使い, データ同化部分に世界各地から収集された最新の観測データを用いて行っている.

同化に用いている手法は「ベイズ統合逆解析」(Enting, 2002; Baker *et al.*, 2006; 池上ほか, 2009; Maki *et al.*, 2010) と呼ばれており, 大気中 CO₂ 濃度は二酸化炭素の発生源別 (地域, 期間, 発生原因) の吸収・放出 (地表面 CO₂ フラックス) からの寄与の線形結合で表現できるといふ仮定の下, 現実的かつ観測データを尤もよく再現する発生源別の吸収・放出の組合せを解析するものである. 具体的には, 発生源別の吸収・放出として第一推定値 (先験フラックス) と地域別・期間別にいくつかの仮の CO₂ 放出源を与え, 地域別・期間別の

CO₂ 吸収・放出量の第一推定値と解析値の差 (すなわち仮の放出源の大きさ) と観測点における大気中 CO₂ 濃度の観測値と解析値 (二酸化炭素輸送モデルで計算した先験フラックスや仮放出源から観測点への寄与の合計) の差からなる評価関数を最小とする解 (仮の放出源の組合せ) を求める. 先験フラックスには化石燃料消費量, 生態系による吸収・放出量, 大気・海洋間の CO₂ 交換量を, 仮の放出源としてモデル相互比較実験 TransCom3 (Gurney *et al.*, 2000) の設定に基づいて全球を陸域 11 領域, 海域 11 領域 (第 11 図) に区切った月ごとの単位放出量を与えている (第 3 表も参照). ベイズ統合逆解析で解かれる変数は CO₂ 吸収・放出量ではあるが, 二酸化炭素輸送モデルで先験フラックスや仮放出源から観測点への寄与を求める際に各格子への寄与も求められているため, 大気中 CO₂ 濃度分布も同時に求められる.

解析に用いる大気中 CO₂ 濃度の観測データは, 世界気象機関 (WMO) 温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) に報告され公開されている, 固定観測点における月平均値, 及び移動体 (船舶・航空機) 観測から作成した月別格子点データを用いている. ただし, WDCGG データポリシーに基づき, 観測データを「二酸化炭素分布情報」に用いることに同意が得られた (気象庁による観測を含む) 第 5 表に記載の機関の固定観測点データ及び第 6 表に記載の移動体観測データのみを使用している. 移動体 (船舶・航空機) による観測データは必ずしも同じ座標で観測されるとは限らないことから, 船舶による観測は経緯度 5°×5°の海域内で 1 か月に観測された値を平均して, 航空機による観測は航路ごとに高度一定と仮定し緯度 5°ごとに区切った空域内¹⁸で 1 か月に観測された値を平均して作成している.

このようにして観測データセット (月平均値) ができると, これを全て同化して仮解析を行う (第 5 図). 仮解析で得られた月平均値と観測データセ

¹⁸ 現在使用する航空機観測は第 6 表に記載の 2 航路のものである. いずれも南北方向の移動が主であること, 東西方向の濃度変化は南北方向に比べ小さいことを考慮し, 5°×5°の格子点値化に際して経度は実際の座標にかかわらず固定とした. なお, 東京-シドニー航路は高度 10.5 km, 東京-南鳥島航路は高度 6 km 固定としている.

第 5 表 二酸化炭素分布情報に使用した固定点観測データの提供機関.

略称	提供機関名	国・地域
RSE	Ricerca sul Sistema Energetico - RSE S.p.A.	Italy
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia
ECCC	Environment and Climate Change Canada	Canada
ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development	Italy
FMI	Finnish Meteorological Institute	Finland
HMS	Hungarian Meteorological Service	Hungary
IAA	Direcion Nacional del Antartico- Instituto Antartico Argentino, Buenos Aires, Argentina	Argentina
AEMET	State Meteorological Agency of Spain	Spain
ITM	Department of Applied Environmental Science, Stockholm University	Sweden
JMA	気象庁 (Japan Meteorological Agency)	Japan
MGO	Voeikov Main Geophysical Observatory	Russia
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	USA
SAWS	South African Weather Service	South Africa
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	France
NIWA	National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd.	New Zealand
IAFMS	Italian Air Force Mountain Centre	Italy
SAIPF	埼玉県環境科学国際センター (Center for Environmental Science in Saitama)	Japan
UBAG	German Environment Agency	Germany

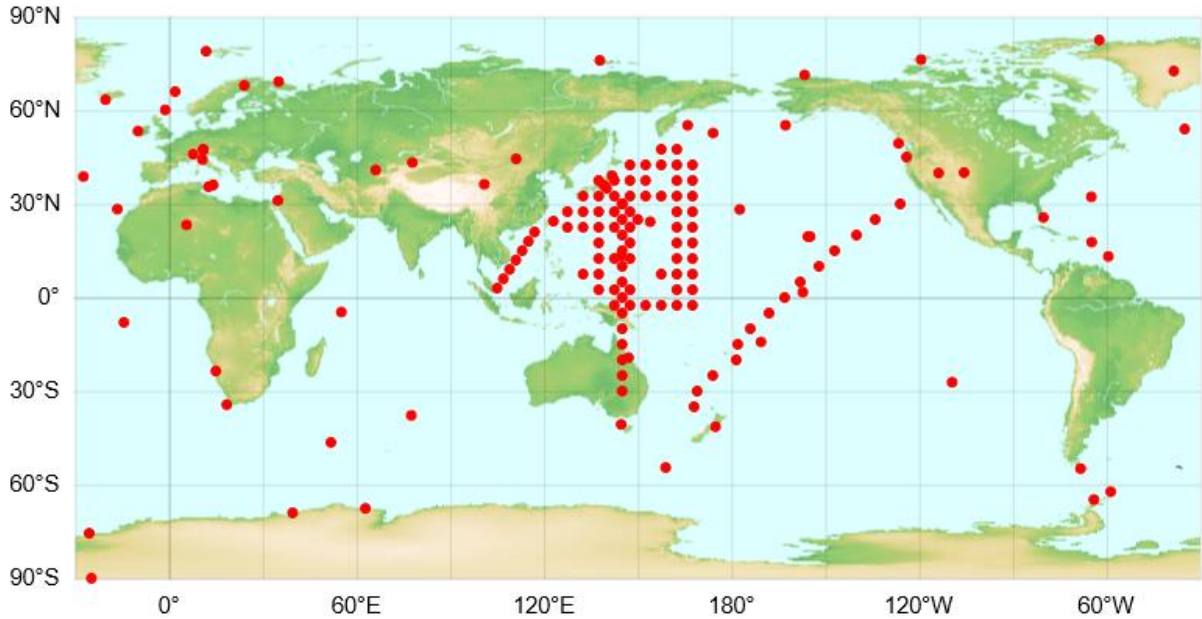
注) 固定点として報告されている NOAA による太平洋及び東シナ海の船舶観測を含む。

第 6 表 二酸化炭素分布情報に使用した移動体観測データ.

船舶	気象庁海洋観測船
船舶	篤志観測船 (ありげーたーりばてい号) (交通エコロジー・モビリティ財団, 1998 ; 交通エコロジー・モビリティ財団, 1999 ; 交通エコロジー・モビリティ財団, 2000)
航空機	民間航空機を利用した東京～オーストラリア間の観測 (CONTRAIL, Machida <i>et al.</i> , 2008)
航空機	気象庁航空機観測 (厚木～南鳥島) (中村ほか, 2011)

ットとを比較し, 差が観測データの不確かさよりも著しく大きい値は除外, さらに除外された値の割合が高い (5 割を超える) 観測点はすべての値を除外して二次観測データセットを作成する. この二次観測データセットを同化して再び仮解析を行い, 一回目と同様に仮解析値と観測データセットとを比較し, 仮解析値との差が大きい観測値

を除外する. この操作を繰り返し行い, この観測データセットから除外される値が一定数以下 (ここでは 15 個としている) になったところで, 最終的な解析を行い解析値とする. 第 12 図に 2024 年 (令和 6 年) の解析で使用された観測点の分布を示す.



第 12 図 二酸化炭素分布情報（2024 年 3 月版）に使用した観測点の分布。

謝辞

大気中 CO₂ 濃度の全球解析に用いている逆解析システムは TransCom3 (Gurney *et al.*, 2000) の実験システムを基に開発されている。全球解析に用いた観測データは世界各地の研究機関等から WDCGG に報告されたデータ (第 5 表, 第 6 表) を用いている。第 4.3 節の二酸化炭素濃度分布の 3 次元的な検証については CONTRAIL (Machida *et al.*, 2008 ; Machida *et al.*, 2018) の観測データを比較に用いた。この場を借りて御礼申し上げる。

略語一覧

BAPMoN: Background Air Pollution Monitoring Network 大気バックグラウンド汚染観測網 (1989 年に開始した WMO 全球大気監視 (GAW) 計画の前身, 1969 年に WMO が開始した世界的な温室効果ガス等の観測の取組)

CASA: Carnegie-Ames-Stanford approach 陸域生態系モデル

CDIAC: Carbon Dioxide Information Analysis Center 米国二酸化炭素情報解析センター (1982 年設立, 2017 年閉鎖)

CDTM: Carbon Dioxide Transport Model (旧) 二

酸化炭素輸送モデル (観測部環境気象課 (現 大気海洋部環境・海洋気象課) が開発した オフライン二酸化炭素輸送モデル)

CONTRAIL: Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner 国立環境研究所などが実施する民間航空機による温室効果ガス観測プロジェクト

GAW: Global Atmosphere Watch 全球大気監視 (地球環境の長期的な監視と情報提供を通じて社会への還元を図る WMO の取組)

GCP: Global Carbon Project グローバルカーボンプロジェクト (炭素循環に関する国際プロジェクト)

G3W: Global Greenhouse Gas Watch 全球温室効果ガス監視 (WMO がグローバルストックテイクへの貢献を目的に推進する, 観測の充実とデータ交換を推進する取組)

GOSAT: Greenhouse gases Observation SATellite 温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(環境省, 国立環境研究所, 宇宙航空研究開発機構が開発し 2009 年に打ち上げられた, 大気中温室効果ガスの濃度を宇宙から観測する衛星)

GOSAT-2: Greenhouse gases Observation SATellite-2 温室効果ガス観測技術衛星 2 号「いぶき 2

号) (2018年に打ち上げられた GOSAT の後継衛星)

GOSAT-GW: Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle 温室効果ガス・水循環観測技術衛星「いぶき GW」(2025年に打ち上げられた GOSAT-2 の後継衛星)

GSAM-TM: Global Spectral Atmosphere Model—Transport Model (新) 二酸化炭素輸送モデル (GSM をベースに地球環境・海洋部環境気象管理官 (現大気海洋部環境・海洋気象課) と気象研究所で共同開発したオンライン二酸化炭素輸送モデル)

GSM: Global Spectral Model 全球スペクトルモデル (予報部数値予報課 (現情報基盤部数値予報課) が開発した全球数値予報モデル)

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル

JRA-25: Japanese 25-year Reanalysis 気象庁 25 年長期再解析

JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis 気象庁 55 年長期再解析

JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century 気象庁第 3 次長期再解析

OCO-2: Orbiting Carbon Observatory-2 軌道上炭素観測衛星 2 号 (米国航空宇宙局が開発し 2014 年に打ち上げられた, 大気中温室効果ガスの濃度を宇宙から観測する衛星)

RMSE: root mean square error 根平均二乗誤差

ppm: parts per million 濃度の単位で, 乾燥大気分子 100 万個中に含まれる注目するガス成分の分子数を表す。

TransCom: Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project 大気トレーサーモデル相互比較計画 (大気微量成分の輸送モデルの比較検証を目的とした国際プロジェクト)

TransCom3: TransCom が実施した 3 番目のモデル相互比較実験

WDCGG: World Data Centre for Greenhouse Gases 温室効果ガス世界資料センター (WMO の

要請により気象庁が運営する温室効果ガスの観測データを収集・整理・公開するデータセンター)

WMO: World Meteorological Organization 世界気象機関

参考文献

- Andres, R. J. *et al.* (1996): A $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ degree distribution of carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement manufacture, 1950-1990. *Global Biogeochem. Cycles*, **10**, 419-429.
- Andres, R. J. *et al.* (2013): Monthly fossil fuel CO₂ emissions: Mass of emissions gridded by one degree latitude by one degree longitude. CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
<https://doi.org/10.3334/CDIAC/ffe.MonthlyMass.2013>.
- Andres, R. J. *et al.* (2015): Monthly fossil fuel CO₂ emissions: Mass of emissions gridded by one degree latitude by one degree longitude. CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
<https://doi.org/10.3334/CDIAC/ffe.MonthlyMass.2015>.
- Andres, R. J. *et al.* (2016): Monthly fossil fuel CO₂ emissions: Mass of emissions gridded by one degree latitude by one degree longitude. CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
<https://doi.org/10.3334/CDIAC/ffe.MonthlyMass.2016>.
- Arakawa, A. and W. H. Shubert (1974): Interaction of a cumulus and cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Baker, D. *et al.* (2006): TransCom3 inversion intercomparison: Impact of transport model error on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1988-2003. *Global Biogeochem.*

- Cycles*, **20**, GB1002.
<https://doi.org/10.1029/2004GB002439>.
- Boden, T. A. *et al.* (2012) : Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2012.
- Boden, T. A. *et al.* (2013) : Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2013.
- Brenkert, A. L. (1998) : Carbon dioxide emission estimates from fossil-fuel burning, hydraulic cement production, and gas flaring for 1995 on a one degree grid cell basis. CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
<https://doi.org/10.3334/CDIAC/ffe.ndp058.2003>.
- Enting, I. G. (2002) : Inverse Problems in Atmospheric Constituent Transport. Cambridge University Press.
- Friedlingstein, P. *et al.* (2019) : Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, **11**, 1783-1838.
<https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- Friedlingstein, P. *et al.* (2020) : Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, **12**, 3269-3340.
<https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- Friedlingstein, P. *et al.* (2022) : Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data*, **14**, 1917-2005.
<https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
- 藤田建 (2009) : 気象庁における二酸化炭素濃度の全球分布情報. *天気*, **56**, 65-69.
- Gravel, S. and A. Staniforth (1994) : A mass-conserving semi-Lagrangian scheme for shallow-water equations. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 243-248.
- Gurney, K. *et al.* (2000) : TransCom 3 Experimental Protocol. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, USA, Paper No. 707.
- Gurney, K. R. *et al.* (2002) : Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, **415**, 626-630.
- Gurney, K. R. *et al.* (2003) : TransCom 3 CO₂ inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information. *Tellus*, **55B**, 555-579.
- Houghton, R. A. *et al.* (1987) : The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use: Geographic distribution of the global flux. *Tellus*, **39B**, 122-139.
- 飯田洋介ほか (2014) : 全球における大気-海洋間二酸化炭素交換量推定手法の開発. 測候時報 (特別号), **81**, S1-S25.
- Iida, Y. *et al.* (2015) : Trends in pCO₂ and sea-air CO₂ flux over the global open oceans for the last two decades. *J. Oceanogr.*, **71**, 637-661.
- Iida, Y. *et al.* (2021) : Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *J. Oceanogr.*, **77**, 323-358.
- 池上雅明ほか, (2009) : 二酸化炭素分布情報について. 測候時報, **76**, 221-229.
- IPCC (2021) : Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 3-32,
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Ishijima, K. *et al.* (2022) : Understanding temporal variations of atmospheric Radon-222 around Japan using model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 343-359.
- 伊藤朋之 (1987) : 気象庁 大気二酸化炭素の観測

- を開始. 天気, **34**, 336.
- JMA (2013) : Global Spectral Model (JMA-GSM1212). Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency, 43-61.
<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/index.htm>
- Juang, H.-M. H. (2004) : A reduced spectral transform for the NCEP Seasonal Forecast Global Spectral Atmospheric Model. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1019-1035.
- 気象庁予報部 (2004) : セミラグランジュ統一モデル. 数値予報課報告別冊, **50**, 51-60.
- 気象庁予報部 (2005) : セミラグランジュ統一モデル. 数値予報課報告別冊, **51**, 32-47.
- 気象庁予報部 (2009) : 気象庁全球モデル. 数値予報課報告別冊, **55**, 1-2.
- 気象庁予報部 (2019) : 気象庁全球モデルにおける近年の改良. 数値予報課報告別冊, **65**, 1-11.
- Kobayashi, S. *et al.* (2015) : The JRA-55 Reanalysis: General specification and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Kondo, M. *et al.* (2019) : State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget. *Global Change Biology*, **26**, 1068-1084.
- Kosaka, Y. *et al.* (2024) : The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49-109.
- 交通エコロジー・モビリティ財団 (1998) : 一般商船による北太平洋の温室効果ガスの観測システムの構築報告書.
- 交通エコロジー・モビリティ財団 (1999) : 一般商船による北太平洋の温室効果ガスの観測報告書 (2).
- 交通エコロジー・モビリティ財団 (2000) : 一般商船による北太平洋での温室効果ガス観測システムの構築 報告書.
- Kuo, H. L. (1974) : Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1232-1240.
- Le Quéré, C. *et al.* (2015a) : Global Carbon Budget 2014. *Earth System Science Data*, **7**, 47-85.
<https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>.
- Le Quéré, C. *et al.* (2015b) : Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data*, **7**, 349-396.
<https://doi.org/10.5194/essd-7-349-2015>.
- Le Quéré, C. *et al.* (2016) : Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, **8**, 605-649.
<https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>.
- Le Quéré, C. *et al.* (2018a) : Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data*, **10**, 405-448.
<https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.
- Le Quéré, C. *et al.* (2018b) : Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, **10**, 2141-2194.
<https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>.
- Machida, T. *et al.* (2008) : Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 1744-1754.
- Machida, T. *et al.* (2018) : Atmospheric CO₂ mole fraction data of CONTRAIL-CME, ver.2023.1.0. Center for Global Environmental Research, NIES.
 (<https://doi.org/10.17595/20180208.001>, accessed 2024-09-09)
- Maki, T. *et al.* (2010) : New technique to analyse global distributions of CO₂ concentrations and fluxes from non-processed observational data. *Tellus*, **62B**, 797-809.
- Maki, T. *et al.* (2023) : Independent bias correction method for satellite observation data introduced to CO₂ flux inversion. *SOLA*, **19**, 157-164.
- Marland, G. *et al.* (2004) : Global, regional, and national CO₂ emissions, in Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1974) : A hierarchy of

- turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- 中村雅道ほか (2011) : 航空機による上空の温室効果ガス観測の開始について～WMO/GAW計画に貢献する気象庁の温室効果ガス観測～. 測候時報, **78**, 259-268.
- Obata, A (2001) : Ocean uptake of anthropogenic CO₂ in a general circulation – biogeochemical model including isopycnal diffusion –. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **51**, 125-145.
- 大久保沙貴ほか (2020) : 温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) 設立 30 周年 – ウェブサイトの刷新をはじめとする最近 10 年の活動報告と, 今後のデータ利活用促進に向けて –. 測候時報, **87**, 47-62.
- Onogi, K. *et al.* (2007) : The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Peylin, P. *et al.* (2013) : Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO₂ inversions. *Biogeosciences*, **10**, 6699–6720.
<https://doi.org/10.5194/bg-10-6699-2013>.
- Randerson, J. T. *et al.* (1997) : The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochem. Cycles*, **11**, 535-560.
- Sasaki, T. *et al.* (2003) : Optimal sampling network and availability of data acquired at inland sites. *Global Atmosphere Watch Report*, No. 148, 77-79.
- 澤庸介 (2021) : 気象庁における温室効果ガス観測. 地球環境, **26**, 3-12.
- Simmons, A. J. and D. M. Burridge (1981) : An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758–766.
- Stephens, B. B. *et al.* (2007) : Weak Northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, **316**, 1732-1735.
- 須田一人ほか (2010) : 温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) 設立 20 周年. 測候時報, **77**, 161-186.
- Takahashi, T. *et al.* (1999) : Net sea-air CO₂ flux over the global oceans: An improved estimate based on the sea-air pCO₂ difference. Proceedings of the 2nd International Symposium: CO₂ in the Oceans, The 12th Global Environment Tsukuba, 18-22 January 1999, 9-15.
- Tanaka, T. Y. *et al.* (2003) : MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM: Model description. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **53**, 119-138.
- Thompson, R. L. *et al.* (2016) : Top-down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s. *Nature Communications*, **7**.
<https://doi.org/10.1038/ncomms10724>.
- Tiedtke, M. (1993) : Representation of clouds in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3040-3061.
- 堤之智 (2007) : 全球大気監視 (GAW) プログラムにおける新戦略計画について. 天気, **54**, 733-739.
- 堤之智ほか (2009) : WDCGG における主要温室効果ガスの全球濃度解析手法. 測候時報, **76**, 207-220.
- WMO (2009) : Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases. *Global Atmosphere Watch Reports*, No. 184, (WMO TD No. 1473), 31pp.
- WMO (2023) : WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 19, 11pp.
- WMO (2024) : WMO WDCGG Data Summary, No. 48, 103pp.