



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 26-020J

日本におけるCMIP6気候モデルと観測データとの比較

地表、ラジオゾンデ、衛星観測および再解析における気温の比較

杉山 大志（キャノングローバル戦略研究所 研究主幹）

2026. 8

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

The Canon Institute for Global Studies

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <https://cigs.canon/>

日本における CMIP6 気候モデルと観測データとの比較

地表、ラジオゾンデ、衛星観測および再解析における気温の比較

キャノングローバル戦略研究所

研究主幹 杉山大志

要旨

本稿では、1979 年以降の日本の地表付近および上空の気温について、CMIP6 の個別モデルと、地表気温観測、ラジオゾンデ観測、衛星による下部対流圏気温、JRA-3Q 再解析を、年ごとの推移と 10 年当たりの気温上昇率の両面から比較した。上空では、日本国内 13 地点の 850、700、500 hPa の気温を比較した。衛星による下部対流圏気温 (TLT) は、高度ごとの気温を異なる重みで合成した指標である。本稿では、UAH v6.1 に対応する高度別の重みをラジオゾンデ、JRA-3Q および CMIP6 の鉛直気温分布に適用し、衛星系列と比較するための TLT 相当気温を作成した。主要な衛星系列には UAH v6.1 および NOAA STAR v5.0 を用いた。なお JRA-3Q は観測データと数値予報モデルをデータ同化によって統合した再解析であり、独立した観測データではない。

三つの地表観測系列がそろった 1979–2021 年では、気温上昇率は CMIP6 の 40 モデル平均で $0.349^{\circ}\text{C}/10$ 年、気象庁で $0.307^{\circ}\text{C}/10$ 年、KON2022 で $0.260^{\circ}\text{C}/10$ 年、堅田系列で $0.302^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。1979–2024 年の 850、700、500 hPa では、ラジオゾンデがそれぞれ 0.239 、 0.263 、 $0.221^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q 再解析が 0.243 、 0.238 、 $0.276^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 平均が 0.334 、 0.344 、 $0.346^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。UAH v6.1 との比較では、衛星観測値が $0.168^{\circ}\text{C}/10$ 年、UAH に対応する高度別の重みを用いてラジオゾンデから作成した TLT 相当気温が $0.248^{\circ}\text{C}/10$ 年、同じ重みを用いた CMIP6 平均が $0.338^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。1981–2024 年では、NOAA STAR v5.0 が $0.196^{\circ}\text{C}/10$ 年、同じ期間の UAH v6.1 が $0.186^{\circ}\text{C}/10$ 年、UAH 型の CMIP6 平均が $0.347^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。すなわち、CMIP 平均は衛星観測値を大きく上回った。

キーワード: CMIP6、地表気温、ラジオゾンデ、下部対流圏気温、UAH、NOAA STAR、JRA-3Q、再解析、TLT 相当気温、気候モデル

目次

要旨	2
1. 問題設定	4
2. データ	4
2.1 気象庁の地表気温	4
2.2 近藤純正 KON2022	4
2.3 堅田元喜の田舎気温データセット	4
2.4 ラジオゾンデ(IGRA v2.2、日本国内 13 地点)	5
2.5 UAH v6.1 および NOAA STAR v5.0 の衛星下部対流圏気温	5
2.6 JRA-3Q 再解析	6
2.7 CMIP6	6
3. 比較方法	8
3.1 気温上昇率の計算と比較期間	8
3.2 時系列図と気温上昇率の比較図	8
3.3 UAH 型 TLT 相当気温の作成	9
3.4 比較結果の位置づけ	10
4. 結果	10
4.1 地表気温の時系列	10
4.2 地表気温の上昇率	10
4.3 分析期間の最終年を変えた場合の地表気温上昇率	11
4.4 上空 850 hPa	12
4.5 上空 700 hPa	13
4.6 上空 500 hPa	14
4.7 上空における期間別比較と結果の安定性	16
4.8 衛星下部対流圏気温、再解析および TLT 相当気温の比較	17
5. 解釈	20
5.1 モデルと観測の気温上昇率の差は地表より上空で大きい	20
5.2 観測地点と補正方法が異なる地表気温系列の比較	20
5.3 衛星観測・再解析と TLT 相当気温の比較	21
5.4 UAH と NOAA STAR の整合性	21
5.5 モデルと観測の差を生む要因	21
6. 分析上の限界	21
7. 結論	23
参考文献・データ資料	24
付録 A CMIP6 モデル別の気温上昇率	25
付録 B 13 高層観測地点と衛星 TLT 格子	26
付録 C 堅田データセットによる全国系列の作成	27
付録 D UAH 型 TLT 相当気温の作成方法と感度確認	27
付録 E RSS v4.0 の衛星間校正問題と補足的比較	30

1. 問題設定

気候モデルは、将来の気温上昇や気候影響の評価に広く用いられている。その妥当性を検証する一つの方法は、過去に実際に起きた気温変化をモデルがどの程度再現しているかを比較することである。

本稿では、日本の地表付近と上空における気温変化について、CMIP6 モデルが観測された気温上昇率をどの程度再現しているかを検証する。地表付近では、気象庁の 15 地点系列、近藤純正の KON2022、および堅田元喜による田舎地点の系列を用いる。上空では、日本国内 13 地点のラジオゾンデ観測、UAH および NOAA STAR の衛星下部対流圏気温、ならびに JRA-3Q 再解析と比較する。RSS による補足的比較は付録 E に示す。JRA-3Q は、観測を数値予報モデルへ同化した再解析として、観測とは分けて示す。

個別モデルのばらつきと観測値の位置を同時に確認するため、年ごとの気温変化を示す時系列図と、分析期間の気温上昇率を小さい順に並べた図を用いる。この表示方法は Spencer (2021, 2024a) を参考にした。

本稿では、次の三点を検討する。第一に、CMIP6 が計算した地表付近の気温上昇率は、観測地点と補正方法の異なる三つの地表気温系列とどの程度一致するか。第二に、850、700、500 hPa の各気圧面、および下部対流圏の広い高度範囲に感度をもつ TLT 相当気温について、モデル、ラジオゾンデ、UAH、NOAA STAR および JRA-3Q 再解析の上昇率はどの程度一致するか。第三に、分析期間、観測地点および高度方向の感度を変えた場合にも、結果が維持されるかである。

2. データ

2.1 気象庁の地表気温

気象庁が公表する「日本の年平均気温」に採用されている 15 地点（網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島）の年平均気温偏差を用いる。これらは都市化の影響が比較的小さいとされる観測地点である。偏差の基準期間は 1991–2020 年とし、本稿では 1979–2024 年を分析対象とする。

2.2 近藤純正 KON2022

KON2022 は、全国 28 地点を対象に、観測時刻・観測回数、百葉箱から通風筒への変更、観測地点の移転、都市化、露場の通風悪化による日だまり効果などを地点ごとに補正して接続した年平均気温系列である。公開値は 1893–2021 年に及ぶが、本稿では 1979 年以降を用いる。本稿では、公開表に掲載された 28 地点の年平均気温を年ごとに単純平均して全国系列を作成した。KON2022 の観測地点は、気象庁の 15 地点および CMIP6 の抽出地点とは一致しない。

2.3 堅田元喜の田舎気温データセット

計算方法は Katata et al. (2025)、数値データは Katata and Fujibe (2026) による。観測地点から半径 3 km 以内の 2005 年人口密度が 100 人/km²未満である 42 の田舎地点を選び、区内観測所 (Kunai)、AMeDAS お

よび気象官署の観測を接続したデータセットである。標高差、観測時刻・観測間隔、観測装置の変更などが補正されており、1916–2023 年の地域別気温系列が収録されている。

公開データセットの年平均 CSV には、日本全国を単一の系列として示す列がない。そこで本稿では、Northern Japan、Eastern Japan、Western Japan の三つの地域平均を、地域面積や観測地点数による重み付けを行わず単純平均し、全国の田舎地域を代表する気温系列として用いる。1979–2023 年には三地域の欠測がない。集計方法による違いを確認するため、各年に利用できる七地域の値を単純平均した系列も作成した。1979、1982、1993、1994 年には一部地域の欠測があるが、1979–2021 年の気温上昇率は、三地域の単純平均が $0.302^{\circ}\text{C}/10$ 年、七地域の単純平均が $0.303^{\circ}\text{C}/10$ 年であり、集計方法を変えても結果はほとんど変わらない。

2.4 ラジオゾンデ(IGRA v2.2、日本国内 13 地点)

NOAA の Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA) v2.2 月平均値から、気象庁が高層気象観測を行う日本国内 13 地点を固定して用いた。地点は稚内、札幌、秋田、輪島、館野、八丈島、潮岬、福岡、鹿児島、名瀬、石垣島、南大東島、父島である。00 UTC と 12 UTC の 850、700、500 hPa 気温を対象とする。

各地点、観測時刻、暦月について 1991–2020 年平均からの偏差を求め、00 UTC と 12 UTC、13 地点の順に単純平均した。この系列は本稿で作成したものであり、気象庁が公表する公式の日本平均上空気温ではない。IGRA は品質管理済みであるが、観測機器、観測方法、地点および処理方法の変更による不連続をすべて補正した気候均質化系列ではない。

気象庁は 2023 年 7 月、一部地点の GPS ゾンデ処理ソフトウェアを更新した。公式通知では、期待される改善は主として日中の湿度観測について説明されており、過去の気温系列を一括して再処理し、長期的な気温上昇率を改定したものではない。

館野では 2020 年 6 月に定常観測用ゾンデが iMS-100 型から RS41-SG 型へ変更された。古林(2023)が 58 回の有効な比較観測から求めた RS41-SG–iMS-100 の平均気温差は、850 hPa で日中 -0.03 K、夜間 $+0.01$ K、700 hPa で日中・夜間とも $+0.02$ K、500 hPa で日中 $+0.11$ K、夜間 $+0.04$ K であった。測器変更の影響は高度と観測時刻によって異なり、この一地点の結果を国内 13 地点の全期間へ一律に適用することはできない。

TLT 相当気温の作成には、地表付近の月平均気温と、1000、850、700、500、400、300、250、200、150、100 hPa の月平均気温を用いた。925 hPa は 1992 年以前に月平均値が公表されていないため、全期間に共通する気圧面から除外した。各地点と観測時刻について月別平年値からの偏差を求め、00 UTC と 12 UTC を平均した後、13 地点を単純平均した。

2.5 UAH v6.1 および NOAA STAR v5.0 の衛星下部対流圏気温

UAH v6.1 および NOAA STAR v5.0 の下部対流圏気温(Temperature of the Lower Troposphere; TLT)は、主として MSU/AMSU 系統の衛星による酸素のマイクロ波放射観測に基づく。STAR v5.0 は、安定軌道の

AMSU-A/ATMS 観測を基準として過去へ遡って衛星系列を接続し、NOAA-11~14 および NOAA-15 の較正ドリフトを再較正したデータセットである(Zou et al., 2023)。UAH と STAR は重なる衛星放射観測を利用するため、完全に独立した二組の観測ではない。RSS v4.0 では、NOAA-14 の相対的な昇温ドリフトを残したまま系列を接続したことが長期傾向を押し上げたと言われている(Christy et al., 2018)。このため、本稿の主解析には UAH と STAR を用い、RSS による計算は付録 E に示す。

UAH および STAR の月別 2.5 度格子から、日本国内 13 地点に最も近い格子値を取り出した。ラジオゾンデの TLT 相当気温が有効な地点・観測時刻・月を適用し、各地点・暦月について 1991-2020 年平均からの偏差を求めた。両系列で選ばれた最近傍格子中心は 13 地点すべてで一致した。UAH の分析期間は 1979-2024 年、STAR を含む比較は同系列が利用できる 1981-2024 年とした。双線形補間による 1979-2024 年の UAH の気温上昇率は、主解析との差が $0.001^{\circ}\text{C}/10$ 年未満であった。

2.6 JRA-3Q 再解析

JRA-3Q は、気象庁が一貫した数値予報・データ同化システムを用いて作成した長期再解析である。ラジオゾンデ、航空機、地上観測、衛星放射などを数値予報モデルへ同化し、ラジオゾンデ気温には RISE v1.7.2 によるバイアス補正を適用している。UAH または STAR の TLT 指数を直接同化しているわけではないが、MSU/AMSU 系統を含む衛星放射を利用するため、ラジオゾンデや衛星観測から独立したデータセットではない。

本稿では、JRA-3Q の 1.25 度格子による月別・時刻別統計から、00 UTC と 12 UTC の気温を日本国内 13 地点に対応させた。主解析には最も近い格子を用い、双線形補間で感度を確認した。ラジオゾンデが利用できる地点・観測時刻・月だけを残し、地点・観測時刻・暦月別の 1991-2020 年平均からの偏差を、ラジオゾンデと同じ順序で集計した。本稿の 13 地点平均は、気象庁が公表する公式の日本平均ではない。

2.7 CMIP6

地表付近については、CMIP6 の月平均地表気温(変数名は tas で、地上約 2 m の気温を表す)を気象庁の 15 地点に最も近い格子から抽出できる 40 モデルを用いた。上空については、CMIP6 の Amon(大気月平均)テーブルに収録された月平均気温(変数名 ta)を 850、700、500 hPa について利用でき、同じアンサンブル実現値と格子を用いた historical 実験と SSP2-4.5 実験を連結できる 39 モデルを用いた。各モデルについて一つの実現値を採用し、1979-2014 年には historical 実験、2015-2024 年には SSP2-4.5 実験を用いた。地表付近の解析には、この 39 モデルに EC-Earth3-Veg(r2i1p1f1 / gr)を加えた 40 モデルを用いている。

上空では、ラジオゾンデ観測に欠測がある地点と月をモデル側からも除外した。各地点および暦月について 1991-2020 年平均からの偏差を求めた後、13 地点の値を単純平均した。地表付近では、気象庁と CMIP6 は同じ 15 地点に対応する。一方、KON2022 と堅田系列は観測地点が異なる。

UAH 型の TLT 相当気温には、39 モデルの大気の月平均気温(ta)を各モデルで利用できる気圧面から 100 hPa まで用いた。鉛直補間の代表地表気圧上の温度節点には地上約 2 m 気温(tas)を、放射に対する直接の地表面寄与には地表面温度(ts)を用いた。各地点の 1979-2024 年平均地表気圧(ps)を固定の代表値と

し、その気圧より下に位置する気圧面は除外した。ラジオゾンデが利用できる地点と月を比較系列に共通して適用した後、各系列について地点・暦月別の 1991-2020 年平均からの偏差を計算した。

表 1 データと比較条件

系列	期間	観測地点・集計方法	本稿での位置づけ
気象庁(地表)	1979-2024	公式系列の 15 地点	CMIP6 地表気温との主要比較
近藤(KON2022)	1979-2021	公開表 28 地点の単純平均	補正方法の違いを確認
堅田	1979-2023	三地域の単純平均による田舎気温系列	補正方法の違いを確認
CMIP6 地表	1979-2024	40 モデル、気象庁 15 地点に対応	地表比較
ラジオゾンデ(IGRA v2.2)	1979-2024	日本国内 13 地点、非均質化	固定気圧面と二種類の TLT 相当気温
UAH v6.1 TLT	1979-2024	13 地点に対応する 2.5 度格子	衛星下部対流圏気温(主要比較)
JRA-3Q 再解析	1979-2024	13 地点に対応する 1.25 度格子	独立な観測データではない
NOAA STAR v5.0 TLT	1981-2024	13 地点に対応する 2.5 度格子	衛星下部対流圏気温(主要比較)
CMIP6 上空	1979-2024	39 モデル、13 地点に対応	固定気圧面比較
CMIP6 の UAH 型 TLT 相当気温	1979-2024	39 モデル、UAH 型	衛星 TLT との比較

出所・注: 気象庁、近藤(2022)、Katata et al. (2025); Katata and Fujibe (2026)、NOAA IGRA、UAH、NOAA/NESDIS/STAR、JRA-3Q、CMIP6 に基づく。JRA-3Q は観測を数値予報モデルへ同化した再解析であり、独立した観測データではない。

3. 比較方法

3.1 気温上昇率の計算と比較期間

年平均気温偏差に最小二乗法(OLS)による直線を当て、その傾きを 10 倍した値を気温上昇率($^{\circ}\text{C}/10$ 年)として示す。回帰係数の標準誤差には、時系列の自己相関を考慮した Newey-West 法を用い、最大ラグを 3 年とする。モデルごとの気温上昇率から単純平均、中央値、第 5 および第 95 百分位を求める。第 5-第 95 百分位はモデル間のばらつきを表すものであり、統計的な信頼区間ではない。

上空の主な分析期間は 1979-2024 年である。NOAA STAR v5.0 TLT は 1981 年 1 月から収録されるため、同系列を含む比較は 1981-2024 年とする。

3.2 時系列図と気温上昇率の比較図

各系列を同じ図で比較しやすくするため、Spencer(2024a)を参考に、比較期間の回帰直線から得られる 1979 年の推定値を各系列から差し引き、グラフ上の起点をそろえた。この操作で変わるのは系列の上下位置だけであり、気温上昇率や年々変動は変化しない。時系列図には年平均値を示し、個々のモデルを細い線、モデル平均と観測系列を太い線で描く。

気温上昇率の比較図では、各モデルと観測系列の気温上昇率を小さい順に並べる。CMIP6 モデルはすべて同じ色とし、観測系列にはそれぞれ異なる色を用いる。CMIP6 モデルの平均気温上昇率は水平の破線で示し、モデル名は横軸にすべて表示する。

3.3 UAH 型 TLT 相当気温の作成

UAH Version 6 の TLT は、中部対流圏(TMT)、対流圏界面付近(TTP)、下部成層圏(TLS)の層平均気温を、 $TLT = 1.53846TMT - 0.54808TTP + 0.00962TLS$ として合成する(Spencer et al., 2017)。UAH 型では、この係数を Remote Sensing Systems(RSS)が公開する米国標準大気の MSU チャネル 2、3、4 の数値重み関数に適用した。MSU の観測位置 4 および 8 に対応する重みを用い、全高度の気温が一様に 1°C 変化したとき、合成値も 1°C 変化するよう正規化した。得られた重みは約 624 hPa で最大となり、海面を地表とする標準大気では、地表面温度への本来の直接感度は 8.92%である。STAR v5.0 の TLT も、Spencer et al. (2017)に従って TMT、TUT および TLS の回帰合成から作成される(Zou et al., 2023)。したがって、STAR との比較には図 10・11 と同じ UAH 型の高度別の重みを適用したラジオゾンデ、JRA-3Q および CMIP6 の系列を用いる。

ラジオゾンデには地表付近気温と 10 の標準気圧面(1000、850、700、500、400、300、250、200、150、100 hPa)を用いた。CMIP6 には各モデルで利用できる 100 hPa までの気圧面、地上約 2 m 気温、地表面温度および地表気圧を用いた。JRA-3Q には 1000~100 hPa の解析気温、地上 2 m 気温および地表気圧を用いた。気圧の対数に対する線形補間によって重みを配分し、100 hPa より上の応答は主解析から除いた。ラジオゾンデと JRA-3Q には一貫した地表面温度系列がないため、地表付近または地上 2 m 気温を直接の地表面項にも用いた。UAH および STAR との比較では、ラジオゾンデが有効な地点・観測時刻・月を全系列に共通して適用した。

標準大気のうち代表地表面より下に位置する部分の応答は、地中の大気の寄与として残さず、地表面温度にかかる係数へ移した。地表面の境界を重み関数の鉛直格子へ挿入して区間積分したため、この係数は標高に対して連続的に変化する。したがって、8.92%は海面を地表とする標準大気での本来の直接感度であり、各地点で地表面温度にかかる有効な係数は代表地表気圧によって異なる。

1994 年 6-9 月は、日本の 13 地点すべてで 200、150、100 hPa の有効観測数が 10 未満であり、IGRA の月平均値が収録されていなかった。この 4 か月については、地点・観測時刻・暦月別の 1991-2020 年平均の鉛直分布に、利用できる最上位気圧面の偏差を加えて 100 hPa まで延長した。同じ補完は、八丈島の 2017 年 8 月および 9 月の 12 UTC と、輪島の 2023 年 12 月の 00 UTC にも適用した。補完を行わず 1994 年を資料のある 8 か月で年平均する場合、および全期間について 250 hPa より上を除外する場合も、モデルと観測の双方で計算した。さらに、Spencer et al. (2017)が示す陸上 TLT の平均値に合わせ、海面を地表とする標準大気での直接感度を 17%とした計算も行った。この計算では、大気部分の鉛直形状を保ったまま、その係数の合計が 0.83 となるよう一様に調整した。

UAH 型の TLT 相当気温は、公開された静的な重み関数による近似であり、衛星間較正、軌道変化、観測時刻、走査角、雲・降水などを含む UAH または STAR の運用処理を再現しない。このため、作成した系列は衛星 TLT そのものではなく「TLT 相当気温」と呼ぶ。850、700、500 hPa の三気圧面だけでは高度方向の応答を十分に表現できないため、主解析には利用できる鉛直気温分布全体を用いた。

3.4 比較結果の位置づけ

地表付近では、気象庁と CMIP6 を同じ 15 地点で比較する。上空の固定気圧面では、ラジオゾンデ、JRA-3Q 再解析および CMIP6 を同じ地点・気圧面で比較する。次に、ラジオゾンデ、JRA-3Q および CMIP6 の鉛直気温分布に UAH 型の同じ高度方向の感度を適用し、UAH v6.1 および NOAA STAR v5.0 の衛星 TLT と比較する。

4. 結果

4.1 地表気温の時系列

図 1 には、40 モデルの時系列と三つの地表観測系列を示す。三つの観測系列には共通した年々変動がみられる。KON2022 の気温上昇率は気象庁および堅田系列より低い。1979 年以降の気象庁と堅田系列の気温上昇率は近い。Katata et al. (2025) が指摘する 20 世紀全体の都市化の影響は、本稿が対象とする 1979 年以降においては気象庁と堅田系列の間の大きな差とはなっていない。

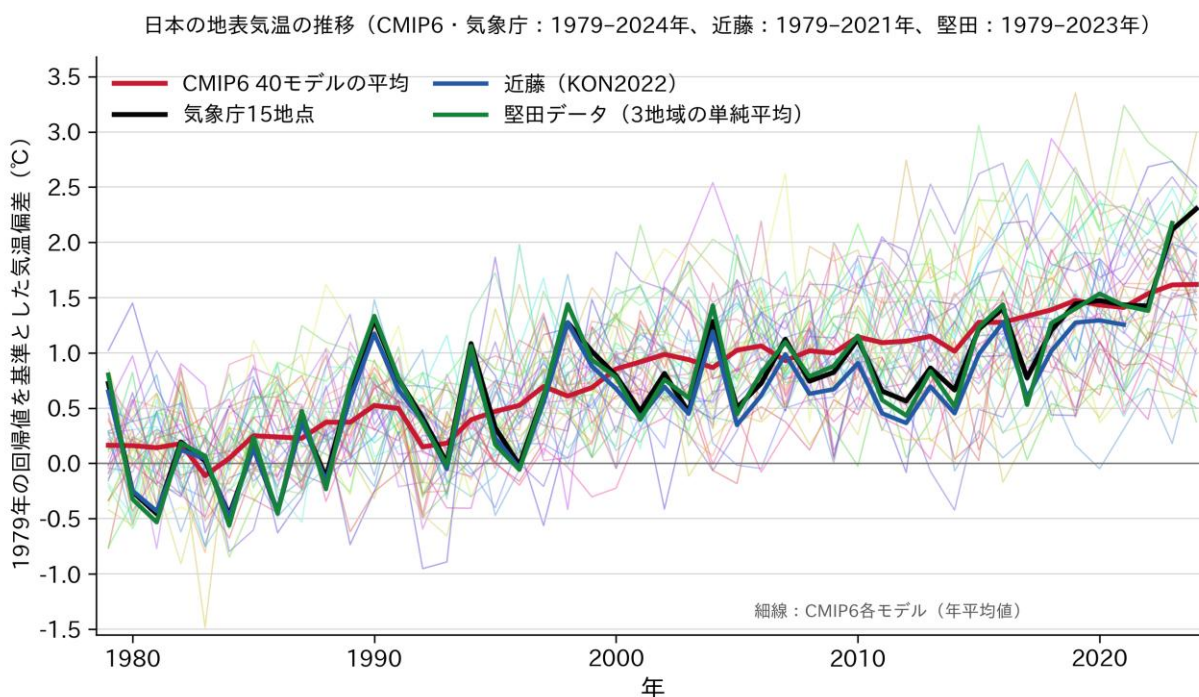


図 1 日本の地表気温の推移：CMIP6 の各モデルと観測データの比較（CMIP6・気象庁は 1979–2024 年、近藤は 1979–2021 年、堅田は 1979–2023 年）

出所・注：細線は CMIP6 の 40 モデル。CMIP6 は付録 A に示す実現値・格子の公開月平均地上約 2 m 気温から作成し、KON2022 は公開表 28 地点の年平均気温を単純平均した。各系列から、1979–2021 年の回帰直線が 1979 年を取る値を差し引き、グラフ上の起点をそろえた。図には年平均値を示し、気温上昇率も同じ年次値から計算した。気象庁、近藤 (2022)、Katata et al. (2025); Katata and Fujibe (2026)、CMIP6 に基づく。

4.2 地表気温の上昇率

1979–2021 年の気温上昇率は、CMIP6 の 40 モデル平均が $0.349^{\circ}\text{C}/10$ 年、気象庁が $0.307^{\circ}\text{C}/10$ 年、KON2022 が $0.260^{\circ}\text{C}/10$ 年、堅田系列が $0.302^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。三つの観測値はいずれも個別モデルの気温上昇率の範囲内にある。観測値を上回るモデルの割合は 65.0–70.0%であった。

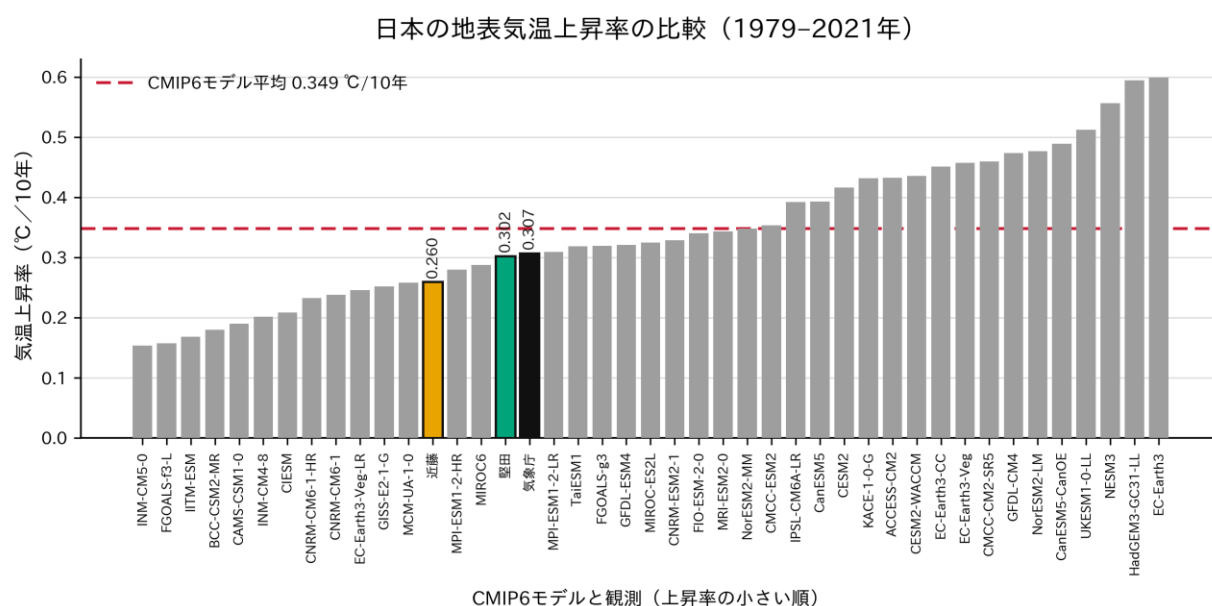


図2 日本の地表気温上昇率の比較(1979–2021 年)

出所・注: 縦軸は年次値から最小二乗法で求めた気温上昇率。横軸は上昇率の小さい順である。CMIP6 モデルは同じ色、観測系列はそれぞれ異なる色で示した。赤い破線は 40 モデルの上昇率の単純平均。出所は図 1 と同じ。

表 2 地表気温の期間別上昇率

期間	CMIP6 平均	気象庁	近藤(KON2022)	堅田
1979–2014	0.344	0.275	0.224	0.269
1979–2019	0.350	0.294	0.245	0.286
1979–2021	0.349	0.307	0.260	0.302
1979–2023	0.352	0.332	—	0.329
1979–2024	0.353	0.356	—	—

出所・注: 単位は°C/10 年。—は原データ終了後で計算しない。各気温系列に基づく。

4.3 分析期間の最終年を変えた場合の地表気温上昇率

地表気温から求めた上昇率は、分析に含める最終年によって変化する。1979–2014 年では、気象庁の上昇率は 0.275°C/10 年で、CMIP6 平均の 0.344°C/10 年を下回った。1979–2023 年では、気象庁が 0.332°C/10 年、堅田系列が 0.329°C/10 年、CMIP6 平均が 0.352°C/10 年であった。2024 年を加えると気象庁は 0.356°C/10 年、CMIP6 平均は 0.353°C/10 年となり、両者はほぼ一致した。2014 年までの結果だけでは、その後に観測とモデルの差が縮小したことが反映されない。一方、2024 年までの結果だけでは、2021 年頃まで両者の間に差がみられたことが分からない。

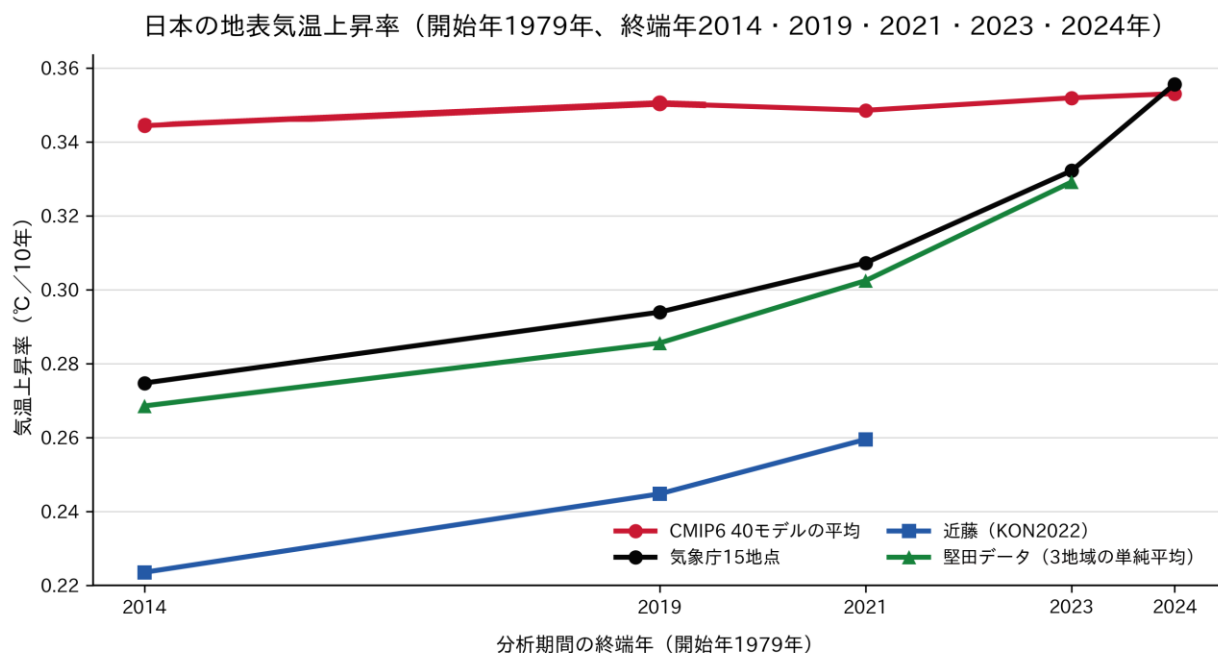


図3 日本の地表気温上昇率と終端年の関係(開始年 1979 年、終端年 2014・2019・2021・2023・2024 年)

出所・注: 開始年を 1979 年に固定し、終端年を 2014、2019、2021、2023、2024 年に変えて最小二乗法で上昇率を求めた。近藤系列は 2021 年、堅田系列は 2023 年まで。

4.4 上空 850 hPa

1979-2024 年の 850 hPa では、気温上昇率はラジオゾンデが $0.239^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q 再解析が $0.243^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 の 39 モデル平均が $0.334^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。CMIP6 平均はラジオゾンデを $0.096^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q を $0.091^{\circ}\text{C}/10$ 年上回った。ラジオゾンデ以上のモデルは 79.5%、JRA-3Q 以上は 79.5%であった。

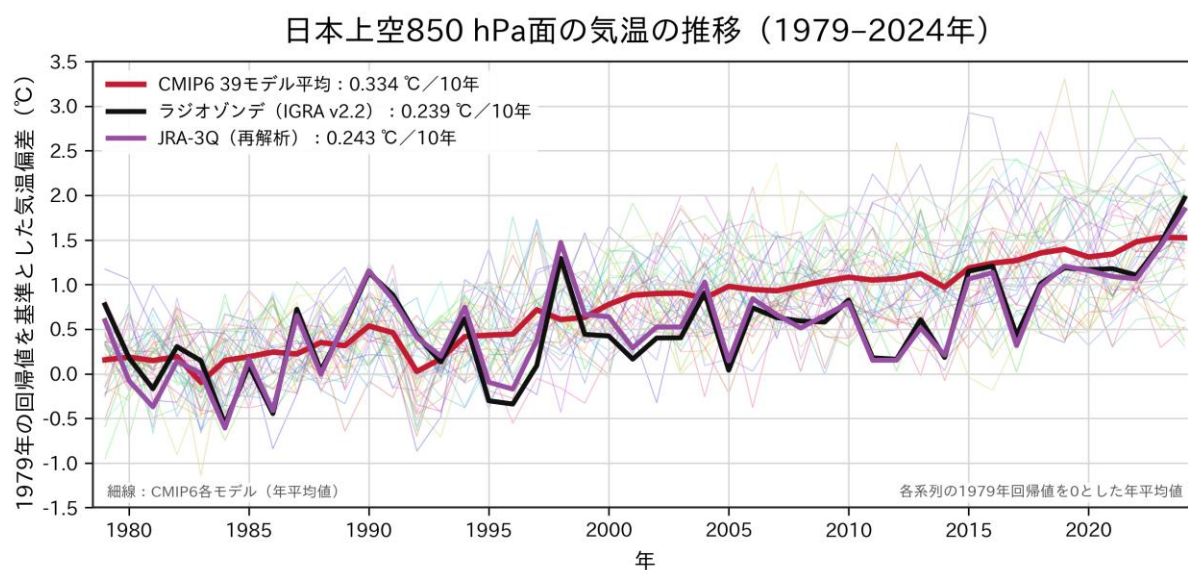


図4 日本上空 850 hPa 面の気温の推移:CMIP6 の各モデルと観測データの比較(1979-2024 年)

出所・注: 細い線は CMIP6 の 39 モデルで、モデルごとに色を変えて示した。各系列から 1979-2024 年の回帰直線が 1979 年に取り値を差し引き、年平均値を示した。ラジオゾンデ(IGRA v2.2)、JRA-3Q 再解析、CMIP6 に基づく。

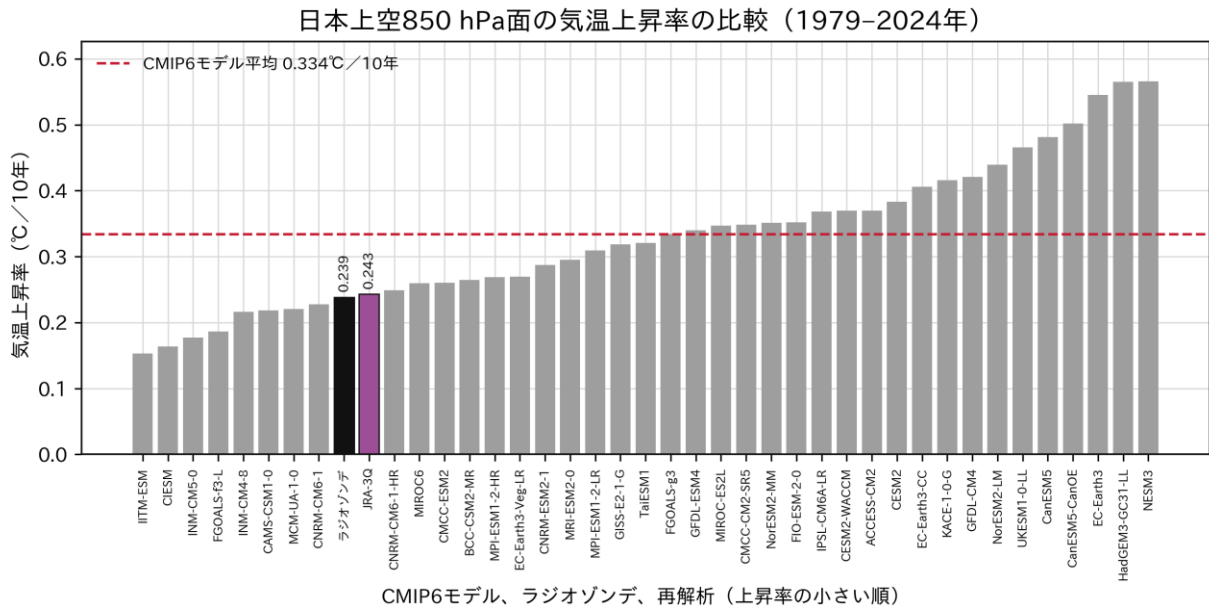


図 5 日本上空 850 hPa 面の気温上昇率の比較(1979–2024 年)

出所・注: 年次値から最小二乗法で気温上昇率を求めた。CMIP6 モデルは同じ色、ラジオゾンデと JRA-3Q 再解析は異なる色で示した。赤い破線は 39 モデルの単純平均である。

4.5 上空 700 hPa

1979–2024 年の 700 hPa では、気温上昇率はラジオゾンデが $0.263^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q 再解析が $0.238^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 の 39 モデル平均が $0.344^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。CMIP6 平均はラジオゾンデを $0.082^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q を $0.106^{\circ}\text{C}/10$ 年上回った。ラジオゾンデ以上のモデルは 74.4%、JRA-3Q 以上は 82.1%であった。

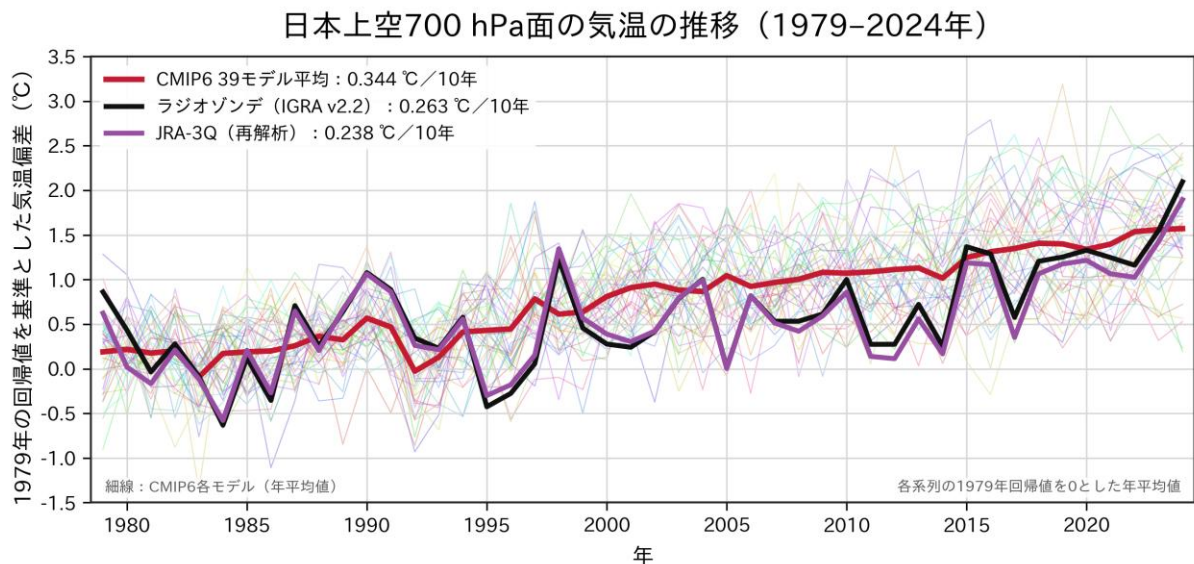


図 6 日本上空 700 hPa 面の気温の推移: CMIP6 の各モデルと観測データの比較(1979–2024 年)

出所・注: 表示方法と資料は図 4 と同じ。JRA-3Q は再解析として示した。

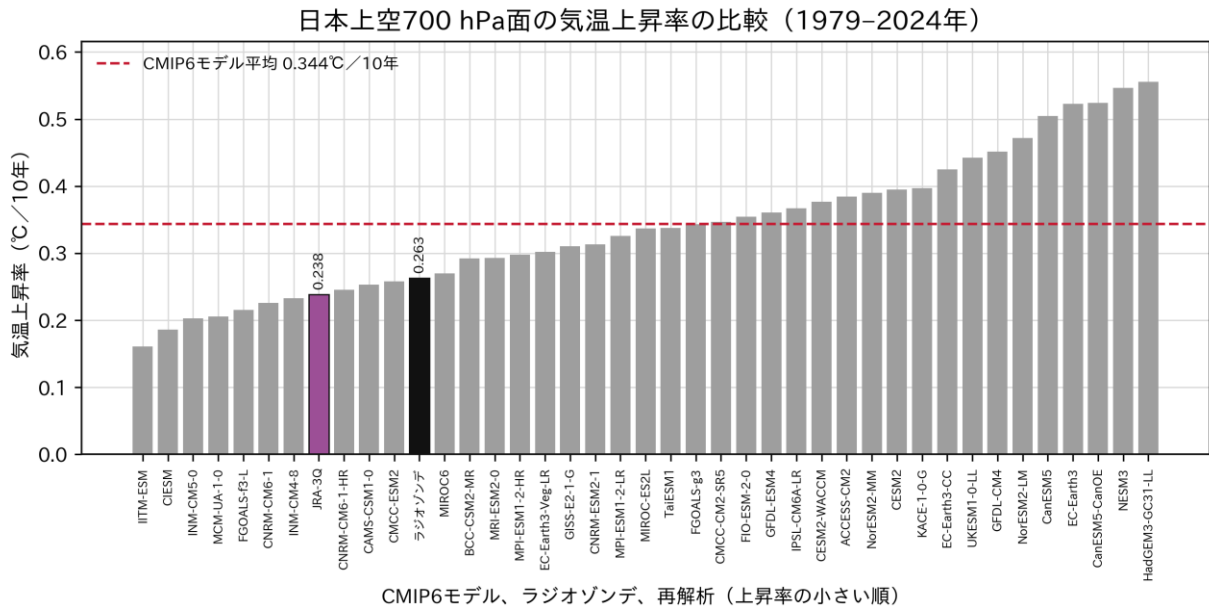


図7 日本上空 700 hPa 面の気温上昇率の比較(1979–2024 年)

出所・注: 年次値から最小二乗法で気温上昇率を求めた。CMIP6 モデルは同じ色、ラジオゾンデと JRA-3Q 再解析は異なる色で示した。赤い破線は 39 モデルの単純平均である。

4.6 上空 500 hPa

1979–2024 年の 500 hPa では、気温上昇率はラジオゾンデが $0.221^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q 再解析が $0.276^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 の 39 モデル平均が $0.346^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。CMIP6 平均はラジオゾンデを $0.125^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q を $0.070^{\circ}\text{C}/10$ 年上回った。ラジオゾンデ以上のモデルは 89.7%、JRA-3Q 以上は 71.8%であった。

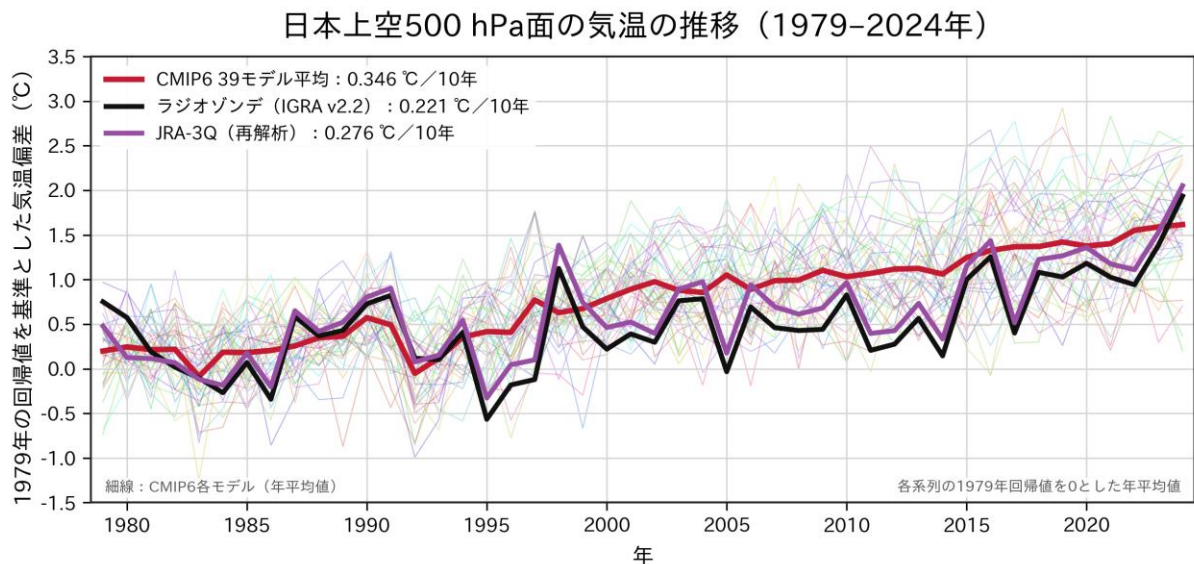


図8 日本上空 500 hPa 面の気温の推移: CMIP6 の各モデルと観測データの比較(1979–2024 年)

出所・注: 表示方法と資料は図4と同じ。JRA-3Q は再解析として示した。

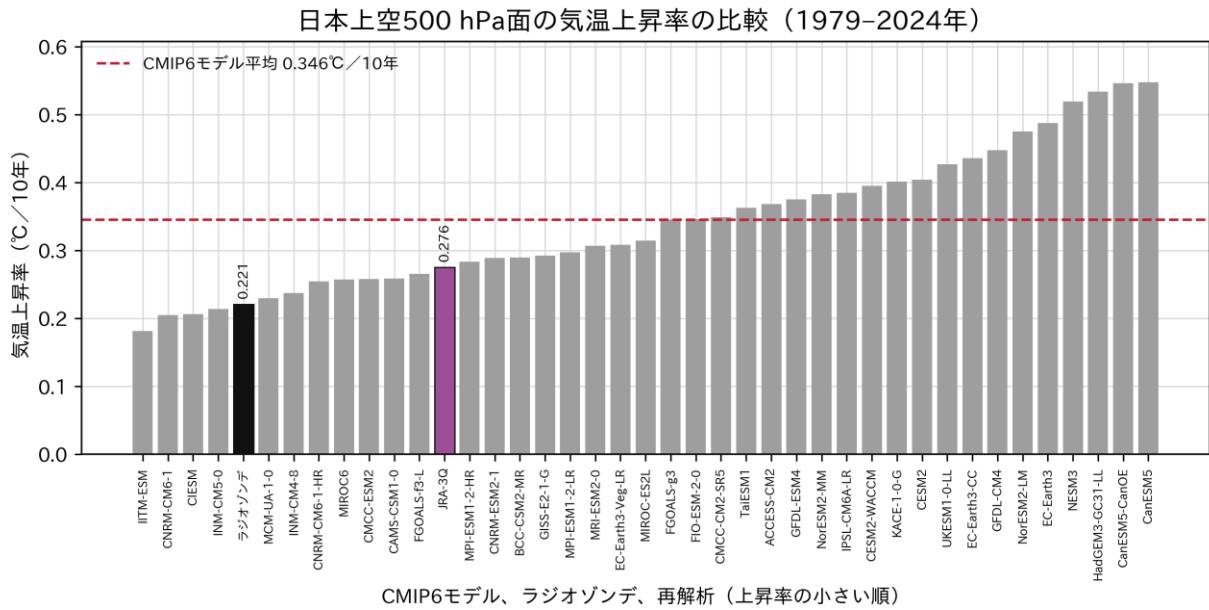


図9 日本上空 500 hPa 面の気温上昇率の比較(1979–2024 年)

出所・注：年次値から最小二乗法で気温上昇率を求めた。CMIP6 モデルは同じ色、ラジオゾンデと JRA-3Q 再解析は異なる色で示した。赤い破線は 39 モデルの単純平均である。

4.7 上空における期間別比較と結果の安定性

表 3 上空の期間別・気圧面別の気温上昇率

期間	hPa	ラジオゾンデ	JRA-3Q 再解析	CMIP6 平均	CMIP6 中央値	CMIP6 5-95%範囲	ゾンデ以上 (%)
1979-2014	850 hPa	0.098	0.147	0.329	0.325	0.169-0.520	97.4%
1979-2014	700 hPa	0.109	0.114	0.334	0.334	0.173-0.517	100.0%
1979-2014	500 hPa	0.075	0.168	0.330	0.324	0.175-0.487	100.0%
1979-2019	850 hPa	0.166	0.186	0.334	0.324	0.171-0.560	94.9%
1979-2019	700 hPa	0.190	0.175	0.344	0.344	0.190-0.542	94.9%
1979-2019	500 hPa	0.149	0.221	0.341	0.349	0.198-0.534	100.0%
1979-2024	850 hPa	0.239	0.243	0.334	0.334	0.176-0.547	79.5%
1979-2024	700 hPa	0.263	0.238	0.344	0.338	0.201-0.527	74.4%
1979-2024	500 hPa	0.221	0.276	0.346	0.346	0.207-0.535	89.7%

出所・注: 単位は℃/10 年。JRA-3Q は観測を数値予報モデルへ同化した再解析。第 5-第 95 百分位は 39 モデル間の分布を示す。

特定のモデル群が平均値を左右していないかを確認するため、39 モデルからの再標本化、開発機関ごとにモデルを平均した後で 25 機関の値を単純平均する方法、および一モデルずつ除外する解析を行った。いずれの方法でも、CMIP6 平均とラジオゾンデの差は三つの気圧面すべてで正であった。ただし、年ごとの「CMIP6 平均ーラジオゾンデ」に Newey-West 法(最大ラグ 3 年)を適用して求めた 95%信頼区間には、1979-2024 年の 850 hPa と 700 hPa でゼロが含まれた。このため、モデル平均の上昇率がラジオゾンデより大きいことは三つの気圧面で共通するものの、その差がすべての気圧面で統計的に有意であるとはいえない。なお、地表の解析を上空と同じ 39 モデルに限った場合、1979-2024 年のモデル平均上昇率は 0.350℃/10 年で、40 モデル平均の 0.353℃/10 年との差は約 0.003℃/10 年であり、結論に影響しなかった。

4.8 衛星下部対流圏気温、再解析および TLT 相当気温の比較

UAH 型では、1979–2024 年の気温上昇率は UAH v6.1 が $0.168^{\circ}\text{C}/10$ 年、ラジオゾンデから作成した TLT 相当気温が $0.248^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q 再解析から作成した TLT 相当気温が $0.261^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 平均が $0.338^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。結果を図 10・11 に示す。NOAA STAR v5.0 を含む 1981–2024 年の比較結果は図 12・13 に示す。

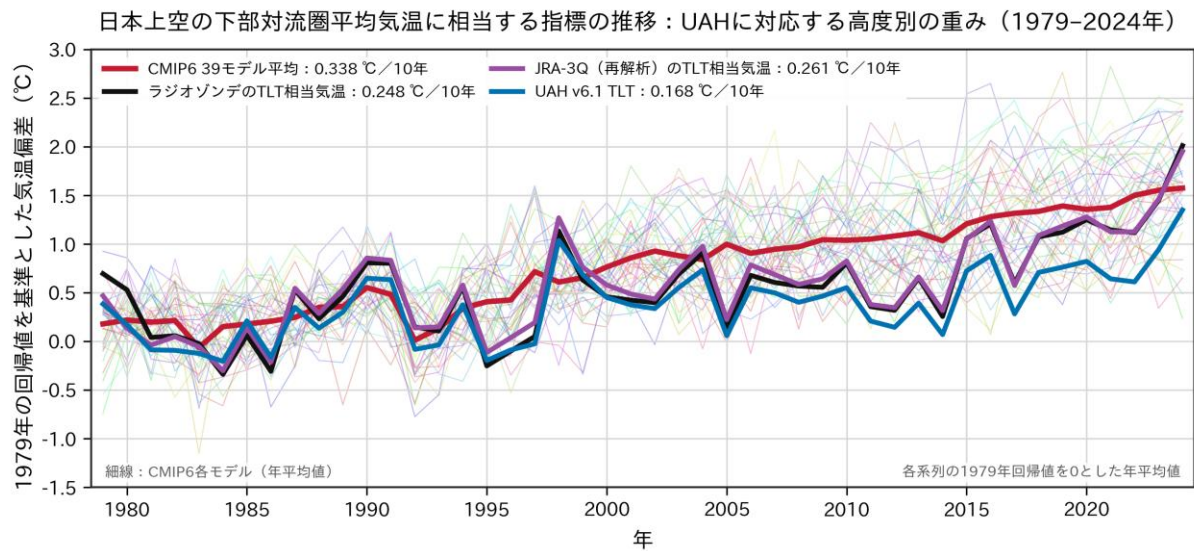


図 10 日本上空の下部対流圏平均気温に相当する指標の推移：UAH に対応する高度別の重み（1979–2024 年）

出所・注：細い線は CMIP6 の 39 モデルで、モデルごとに色を変えて示した。ラジオゾンデの有効地点・月を全系列に共通して用いた。各系列から 1979–2024 年の回帰直線が 1979 年を取る値を差し引き、年平均値を示した。JRA-3Q は再解析。

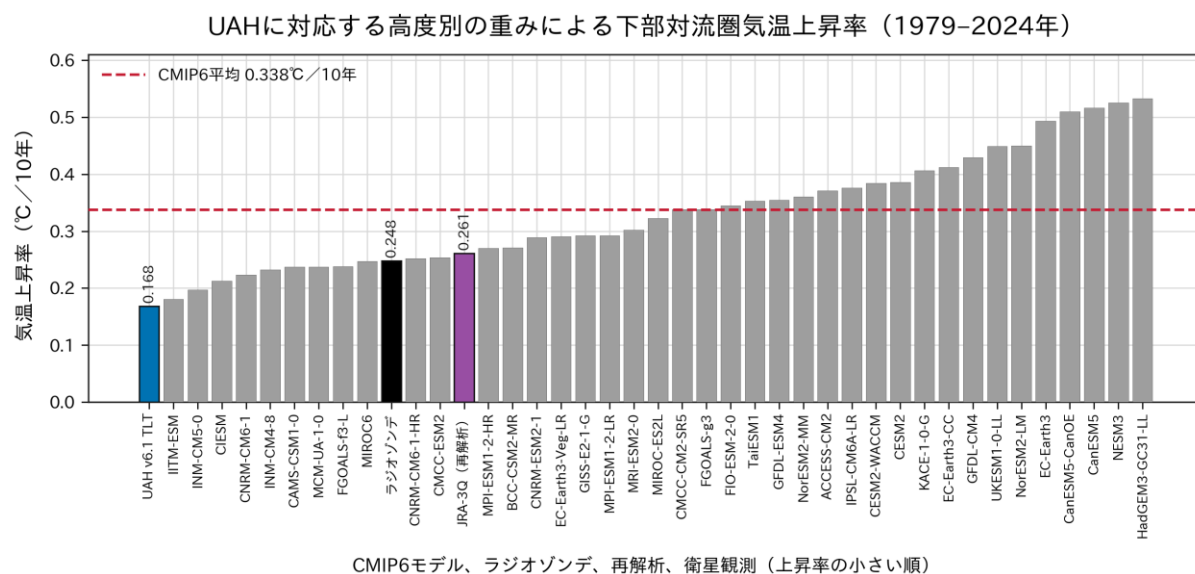


図 11 日本上空の下部対流圏平均気温に相当する指標の上昇率:UAH に対応する高度別の重みによる比較(1979–2024 年)

出所・注: 年次値から最小二乗法で気温上昇率を求めた。CMIP6 モデルはすべて同じ色、ラジオゾンデ、JRA-3Q、UAH はそれぞれ異なる色で示した。赤い破線は 39 モデルの単純平均。JRA-3Q は再解析。

NOAA STAR v5.0 が利用できる 1981–2024 年に期間をそろえると、UAH 型の CMIP6 平均、ラジオゾンデ、JRA-3Q および STAR の気温上昇率は、それぞれ 0.347、0.287、0.279、0.196℃/10 年であった。CMIP6 平均は STAR を 0.151℃/10 年上回った。同じ期間の UAH v6.1 は 0.186℃/10 年で、STAR との差は 0.011℃/10 年であった。RSS v4.0 では 0.302℃/10 年となったが、同系列は主たるモデル検証には用いない。RSS の計算結果と衛星間較正上の問題は付録 E に示す。

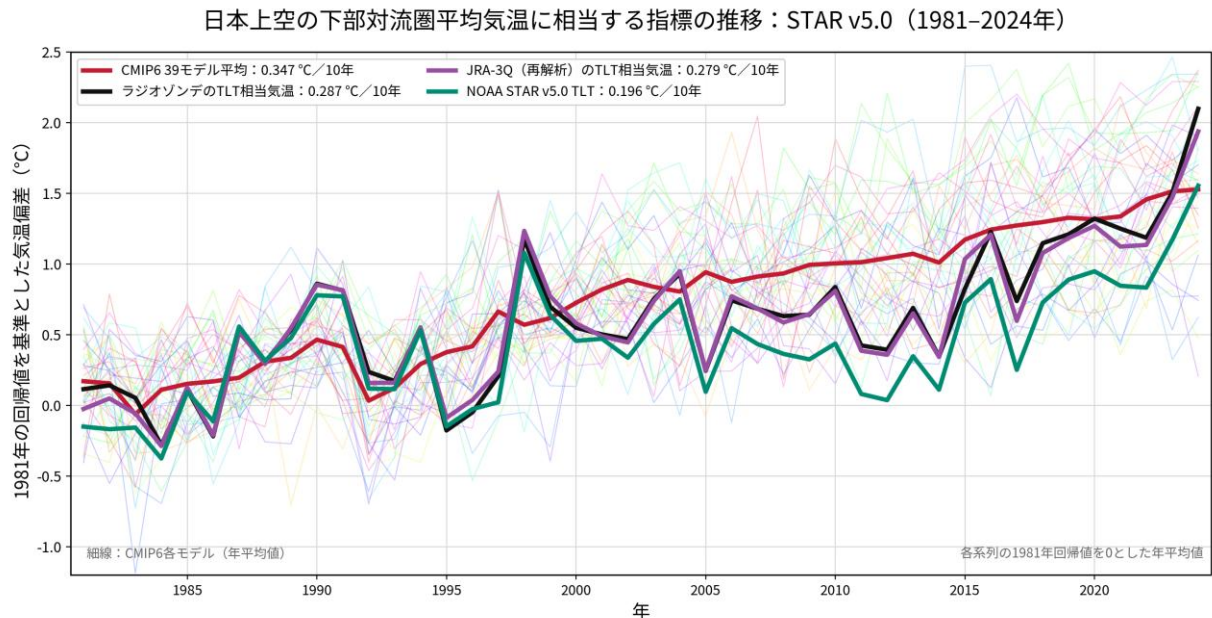


図 12 日本上空の下部対流圏平均気温に相当する指標の推移：NOAA STAR v5.0 と UAH 型の高度別の重みによる比較 (1981–2024 年)

出所・注：STAR v5.0 TLT は NOAA/NESDIS/STAR の月別 2.5 度格子から作成した。比較対象のラジオゾンデ、JRA-3Q および CMIP6 には図 10 と同じ UAH 型の高度別の重みを適用した。細線は CMIP6 の 39 モデル。ラジオゾンデが有効な地点・観測時刻・月を全系列に共通して用いた。各系列から 1981–2024 年の回帰直線が 1981 年を取る値を差し引き、年平均値を示した。JRA-3Q は再解析。

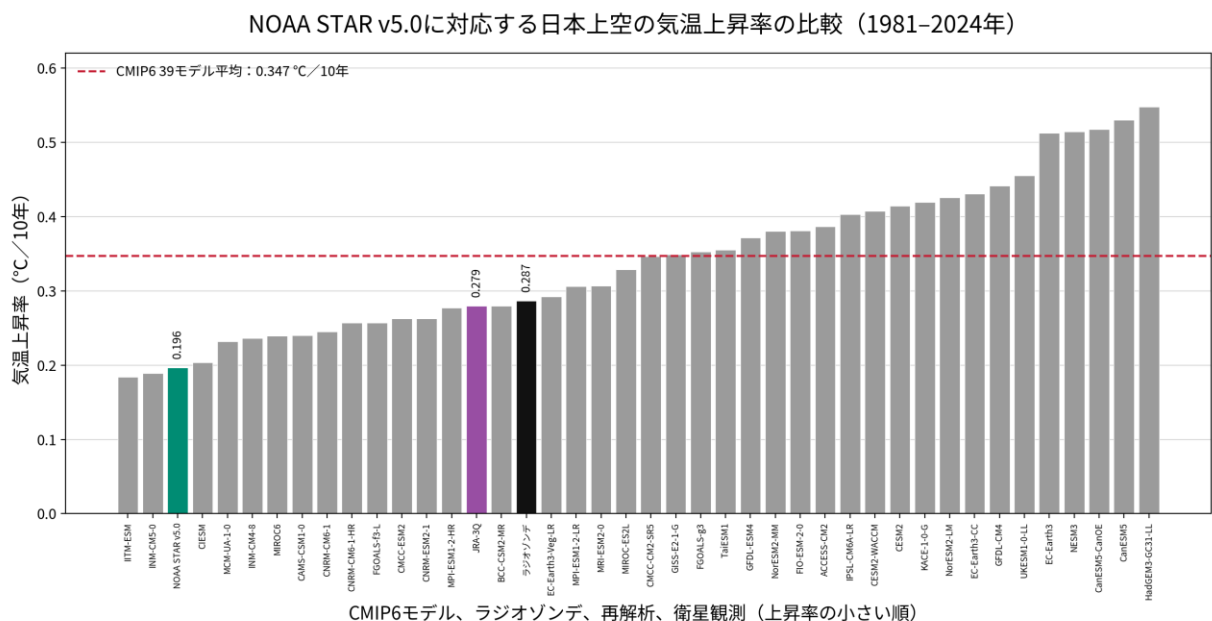


図 13 NOAA STAR v5.0 に対応する日本上空の気温上昇率の比較(1981–2024 年)

出所・注：図 12 の年次値から最小二乗法で気温上昇率を求めた。CMIP6 モデルは灰色、ラジオゾンデ、JRA-3Q、STAR はそれぞれ異なる色で示した。赤い破線は 39 モデルの単純平均。STAR との比較系列には UAH 型の高度別の重みを用いた。

表 4 UAH 型・STAR 型の衛星 TLT および TLT 相当気温の上昇率

系列・統計	気温上昇率(℃/10 年)	CMIP6 平均ー当該系列	当該系列以上のモデル (%)
UAH 型(1979-2024 年)			
UAH v6.1 TLT	0.168	+0.170	100.0%
ラジオゾンデから作成	0.248	+0.089	76.9%
JRA-3Q 再解析から作成	0.261	+0.076	71.8%
CMIP6 平均	0.338	—	—
CMIP6 中央値	0.338	—	—
CMIP6 第 5-第 95 百分位	0.211-0.517	—	—
STAR 型(1981-2024 年)			
NOAA STAR v5.0 TLT	0.196	+0.151	94.9%
ラジオゾンデから作成	0.287	+0.061	64.1%
JRA-3Q 再解析から作成	0.279	+0.068	66.7%
CMIP6 平均	0.347	—	—
CMIP6 中央値	0.349	—	—
CMIP6 第 5-第 95 百分位	0.202-0.519	—	—

出所・注:単位は℃/10 年。第 3 列の単位も℃/10 年。第 5-第 95 百分位は 39 モデル間の分布であり、信頼区間ではない。UAH 型は 1979-2024 年、STAR 型は 1981-2024 年。JRA-3Q は再解析。STAR 型のラジオゾンデ、JRA-3Q および CMIP6 には、UAH 型と同じ高度別の重みを適用した。

5. 解釈

5.1 モデルと観測の気温上昇率の差は地表より上空で大きい

1979-2021 年の地表気温では、CMIP6 の 40 モデル平均は三つの観測系列を 0.042-0.090℃/10 年上回った。ただし、いずれの観測値も個別モデルの上昇率の範囲内にあり、気象庁と CMIP6 を 2024 年まで比較すると両者の上昇率はほぼ等しい。したがって、地表について確認できるのは、1979-2021 年にモデル平均の上昇率が観測よりやや大きかったことであり、対象期間を通じて一貫した大幅な差があったとはいえない。

これに対して、1979-2024 年の上空では、CMIP6 平均がラジオゾンデを 0.082-0.125℃/10 年、JRA-3Q 再解析を 0.070-0.106℃/10 年上回った。ラジオゾンデ以上のモデルは 74.4-89.7%、JRA-3Q 以上は 71.8-82.1%であった。JRA-3Q を加えても、三つの固定気圧面で CMIP6 平均の気温上昇率が比較系列より大きいという関係は変わらなかった。

5.2 観測地点と補正方法が異なる地表気温系列の比較

KON2022 と堅田データセットは、いずれも気象庁の 15 地点系列とは観測地点とデータ処理が異なる。KON2022 は 28 地点について観測条件の変化を地点別に補正している。一方、堅田データセットは周辺人口密度に基づいて田舎地点を選び、区内観測所から AMeDAS に至る長期系列を復元している。それでも、1979-2021 年の上昇率は堅田系列が 0.302℃/10 年、気象庁が 0.307℃/10 年で、両者はほぼ等しい。し

たがって、少なくともこの期間の上昇率については、観測地点と処理方法の違いによる気象庁と堅田系列の差は小さい。

5.3 衛星観測・再解析と TLT 相当気温の比較

UAH 型では CMIP6 平均が $0.338^{\circ}\text{C}/10$ 年で、ラジオゾンデ $0.248^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q 再解析 $0.261^{\circ}\text{C}/10$ 年、UAH v6.1 $0.168^{\circ}\text{C}/10$ 年を上回った。STAR を含む 1981–2024 年では、CMIP6 平均 $0.347^{\circ}\text{C}/10$ 年に対し STAR は $0.196^{\circ}\text{C}/10$ 年であり、その差は $0.151^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。UAH と STAR という二つの主要衛星系列のいずれを用いても、CMIP6 平均の気温上昇率は衛星観測を上回った。

1981–2024 年の気温上昇率は UAH が $0.186^{\circ}\text{C}/10$ 年、STAR が $0.196^{\circ}\text{C}/10$ 年で、差は $0.011^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。年次値の相関係数も 0.968 であり、両系列は年々変動と長期傾向の双方でよく一致した。ただし、UAH と STAR は重なる衛星放射を利用しているため、統計的に独立した二つの観測ではない。

5.4 UAH と NOAA STAR の整合性

NOAA STAR v5.0 では、NOAA-11~14 にみられた見かけの昇温ドリフトと NOAA-15 の冷却ドリフトを再較正によって抑え、安定軌道の衛星から過去へ遡って系列を接続している (Zou et al., 2023)。Christy et al. (2018) も、ラジオゾンデおよび再解析との比較から NOAA-12 と NOAA-14 に見かけの昇温が含まれることを示している。本稿の日本 13 地点に対応する TLT では、STAR の気温上昇率は UAH とほぼ一致した。このため、本稿では UAH と STAR を主要な衛星系列として用いる。RSS の問題点と補足的比較は付録 E に示す。

5.5 モデルと観測の差を生む要因

モデルと観測の差には、温室効果ガスやエアロゾルに対するモデルの応答、海洋との熱交換、対流圏の気温減率、東アジアの大気循環、現実が生じた内部変動、観測機器や観測方法の変更などが影響する。本稿の解析だけでは、それぞれの要因が差にどの程度寄与したかは特定できない。

6. 分析上の限界

観測地点の違い: 気象庁と CMIP6 は同じ 15 地点に対応するが、KON2022 と堅田系列は異なる地点や地域区分を用いる。後二者と CMIP6 の差には、観測地点の違いによる影響も含まれる。

堅田データセットを用いた全国系列: 公開データセットには全国平均の系列がないため、本稿では三地域の平均値を単純平均した。この計算では、地域の面積、人口、観測地点数による重み付けを行っていない。

ラジオゾンデ観測の均質性: IGRA v2.2 の月平均値は品質管理を受けているが、観測機器、観測方法、地点および処理方法の変更をすべて補正した気候均質化系列ではない。2023 年の気象庁の処理更新は主として日中の湿度観測の精度向上を目的とし、過去の気温系列を一括して再処理したものではない。館野の新旧ゾンデ比較は測器差の一例を示すが、国内 13 地点の全期間に共通する補正係数を与えるものではない。

衛星系列の非独立性:UAH と STAR は重なる MSU/AMSU 系統の観測を用いる。衛星間較正、日変化補正、MSU と AMSU の接続および TLT の合成方法は異なるが、両者の一致を完全に独立した観測による確認とみなすことはできない。

JRA-3Q の非独立性と時間的一貫性:JRA-3Q は、バイアス補正されたラジオゾンデ、衛星放射その他の観測を数値予報モデルへ同化した再解析であり、観測とモデルのいずれからも完全には独立していない。また、1991 年 1 月 1 日と 2022 年 1 月 1 日に生産ストリームの接続があり、同化する観測システムも期間中に変化する。境界前後の変化を生産上の段差だけに帰属させることはできない。

TLT 相当気温の近似:UAH 型の TLT 相当気温は、公開された静的な重み関数を鉛直気温分布へ適用した近似であり、衛星の運用処理を再現しない。STAR との比較には同系列の TLT 合成方法に対応させて UAH 型の重みを用いたが、STAR の再較正、日変化補正および衛星接続を再現するものではない。ラジオゾンデと JRA-3Q では地表面温度の代わりに地表付近または地上 2 m 気温を用いたこと、100 hPa より上を主解析から除いたことも不確実性となる。

統計区間の範囲:Newey-West 法による 95%区間は、年次差系列の自己相関だけを考慮した参考値である。モデル間の非独立性、観測誤差、高度方向の重みの不確実性は含まれず、小標本補正も行っていない。

内部変動と使用した実現値:CMIP6 モデルは、現実の日本で生じた年々の気温変動を再現するように初期化されていない。また、本稿では各モデルについて一つのシミュレーションだけを用いている。

モデル間の非独立性:40 モデルまたは 39 モデルの中には、共通するコードを使用するモデルや、同じ研究機関で開発されたモデルが含まれる。このため、モデル数をそのまま互いに独立な標本の数とみなすことはできない。

historical 実験と SSP2-4.5 実験の接続:2015 年以降は SSP2-4.5 実験を用いる。historical 実験だけで計算できる 1979-2014 年の結果も示すが、2015 年以降に実際に生じた放射強制とシナリオで仮定された放射強制の間には差がありうる。

分析期間の最終年による違い:直近の高温年を含めると観測から求めた上昇率が大きくなり、地表におけるモデルとの差は縮小する。このため、一つの終端年だけに基づいて結論を一般化することはできない。

7. 結論

1979–2021 年の地表気温では、10 年当たりの上昇率は CMIP6 の 40 モデル平均で 0.349°C 、気象庁で 0.307°C 、KON2022 で 0.260°C 、堅田系列で 0.302°C であった。各観測値を上回るモデルの割合は 65.0–70.0%であった。

ただし、地表におけるモデルと観測の差は、分析期間の最終年によって変わる。1979–2024 年の上昇率は気象庁が $0.356^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 平均が $0.353^{\circ}\text{C}/10$ 年で、両者はほぼ一致した。一方、1979–2021 年および 1979–2023 年では CMIP6 平均の方が大きかった。したがって、地表について、対象期間にかかわらずモデルが一貫して過大な気温上昇を示したとは結論できない。

1979–2024 年の 850、700、500 hPa では、ラジオゾンデの気温上昇率は 0.239 、 0.263 、 $0.221^{\circ}\text{C}/10$ 年、JRA-3Q 再解析は 0.243 、 0.238 、 $0.276^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 平均は 0.334 、 0.344 、 $0.346^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。CMIP6 平均は三つの気圧面すべてでラジオゾンデと JRA-3Q を上回った。ただし、ラジオゾンデと JRA-3Q の差は高度によって異なり、再解析を用いることでモデルとの差が一様に変化するわけではなかった。

UAH 型による 1979–2024 年の比較では、UAH v6.1 が $0.168^{\circ}\text{C}/10$ 年、ラジオゾンデが $0.248^{\circ}\text{C}/10$ 年、CMIP6 平均が $0.338^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。CMIP6 平均は UAH を $0.170^{\circ}\text{C}/10$ 年上回った。

NOAA STAR v5.0 を加え、期間を 1981–2024 年にそろえると、UAH と STAR の気温上昇率はそれぞれ 0.186 、 $0.196^{\circ}\text{C}/10$ 年で、両者はほぼ一致した。CMIP6 平均は $0.347^{\circ}\text{C}/10$ 年で STAR を $0.151^{\circ}\text{C}/10$ 年上回った。UAH と STAR のいずれを主要衛星系列として用いても、CMIP6 平均は日本上空の衛星観測より大きな気温上昇率を示した。RSS v4.0 では $0.302^{\circ}\text{C}/10$ 年となった。ただし、この差は RSS に残る NOAA-14 の衛星間較正上の問題による見かけの昇温の影響を含むため、主たるモデル検証には用いず、付録 E に補足的比較を示した。

UAH と STAR は重なる衛星放射を異なる方法で処理した系列であり、JRA-3Q もラジオゾンデと同系統の衛星放射を同化している。したがって、これらは独立な系列ではない。

1979–2024 年では、ラジオゾンデおよび JRA-3Q の気温上昇率は個別モデルの分布範囲内にあり、UAH v6.1 は 39 モデルの最小値を下回った。共通期間 1981–2024 年では、UAH と STAR はいずれも個別モデルの分布範囲内だが下限に近かった。

参考文献・データ資料

- Christy, J. R. (2017): Testimony before the U.S. House Committee on Science, Space & Technology, 29 March 2017. <https://docs.house.gov/meetings/SY/SY00/20170329/105796/HHRG-115-SY00-Wstate-ChristyJ-20170329.pdf>
- Christy, J. R., Spencer, R. W., Braswell, W. D. and Junod, R. (2018): Examination of Space-Based Bulk Atmospheric Temperatures Used in Climate Research, *International Journal of Remote Sensing*, 39, 3580–3607. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1444293>
- Durre, I. et al. (2018): Enhancing the Data Coverage in the Integrated Global Radiosonde Archive, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 35, 1753–1770. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0223.1>
- Eyring, V. et al. (2016): Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geoscientific Model Development*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Japan Meteorological Agency: Japanese 75-year Reanalysis (JRA-3Q) Diurnal Monthly Statistics, NSF NCAR GDEX. <https://doi.org/10.5065/PK9Z-C990>
- Katata, G., Nakayama, R., Fujibe, F., and Maeda, S.: Reconstruction of the Background Air Temperature Record in Japan (1916–2023): Implications for Climate Change and Urbanisation Bias in the 20th Century, *International Journal of Climatology*, 45, e70141, <https://doi.org/10.1002/joc.70141>, 2025.
- Katata, G. and Fujibe, F.: Monthly Background/Rural Air Temperature Data in Japan (1916–2023), <https://doi.org/10.24567/0002006246>, 2026.
- Kosaka, Y. et al. (2024): The JRA-3Q Reanalysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 102, 49–109. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-004>
- Kuma, P., Bender, F.-M. and Jönsson, A. R. (2023): Climate Model Code Genealogy and its Relation to Climate Feedbacks and Sensitivity, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15, e2022MS003588. <https://doi.org/10.1029/2022MS003588>
- Mears, C. A. and Wentz, F. J. (2017): A Satellite-Derived Lower-Tropospheric Atmospheric Temperature Dataset Using an Optimized Adjustment for Diurnal Effects, *Journal of Climate*, 30, 7695–7718. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0768.1>
- McKittrick, R. and Christy, J. R. (2020): Pervasive Warming Bias in CMIP6 Tropospheric Layers, *Earth and Space Science*, 7, e2020EA001281. <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>
- O’Neill, B. C. et al. (2016): The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Po-Chedley, S., Thorsen, T. J. and Fu, Q. (2015): Removing Diurnal Cycle Contamination in Satellite-Derived Tropospheric Temperatures, *Journal of Climate*, 28, 2274–2290. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00767.1>
- Po-Chedley, S. et al. (2022): Internal variability and forcing influence model-satellite differences in the rate of tropical tropospheric warming, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(47), e2209431119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2209431119>
- Remote Sensing Systems: MSU/AMSU Weighting Functions. https://data.remss.com/msu/weighting_functions/ (2026 年 8 月 17 日取得)
- Remote Sensing Systems (2017): FAQ about the V4.0 TLT Update. <https://www.remss.com/blog/faq-about-v40-tlt-update/>
- Santer, B. D. et al. (2021): Using Climate Model Simulations to Constrain Observations, *Journal of Climate*, 34, 6281–6301. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0768.1>
- Spencer, R. W. (2017): Comments on the New RSS Lower Tropospheric Temperature Dataset, 6 July 2017 (非査読). <https://www.drroyspencer.com/2017/07/comments-on-the-new-rss-lower-tropospheric-temperature-dataset/>
- Spencer, R. W. (2021): An Earth Day Reminder: ‘Global Warming’ is Only ~50% of What Models Predict, 22 April 2021 (非査読). <https://www.drroyspencer.com/2021/04/an-earth-day-reminder-global-warming-is-only-50-of-what-models-predict/>
- Spencer, R. W. (2024a): Proof That the Spencer-Christy Method of Plotting Temperature Time Series is Best, 9 February 2024 (非査読). <https://www.drroyspencer.com/2024/02/proof-that-the-spencer-christy-method-of-plotting-temperature-time-series-is-best/>
- Spencer, R. W., Christy, J. R. and Braswell, W. D. (2017): UAH Version 6 Global Satellite Temperature Products: Methodology and Results, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 53, 121–130. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0010-y>

Zou, C.-Z. et al. (2021): Post-Millennium Atmospheric Temperature Trends Observed From Satellites in Stable Orbits, Geophysical Research Letters, 48, e2021GL093291. <https://doi.org/10.1029/2021GL093291>

Zou, C.-Z., Xu, H., Hao, X. and Liu, Q. (2023): Mid-Tropospheric Layer Temperature Record Derived From Satellite Microwave Sounder Observations With Backward Merging Approach, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128, e2022JD037472. <https://doi.org/10.1029/2022JD037472>

NOAA/NESDIS/STAR: Mean Layer Temperature—NOAA, Version 5.0, Climate Data Record. <https://doi.org/10.25921/tn91-wv50> (2026 年 8 月 20 日取得)

気象庁 (2023)「高層気象観測における一部観測地点の観測データの改善について」。
<https://www.data.jma.go.jp/suishin/oshirase/pdf/20230703.pdf>

古林絵里子 (2023)「RS41-SG 型と iMS-100 型 GPS ゾンデの比較観測による特性評価」『高層気象台彙報』78、21–39。
https://www.data.jma.go.jp/kousou/information/journal/2023/pdf/78_21_Kobayashi.pdf

近藤純正 (2022)「K225 日本の地球温暖化、再解析 2022」。<https://wind.gp.tohoku.ac.jp/personal/rk7j-kndu/kenkyu/ke225.html>

気象庁「日本の年平均気温」。https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html

NOAA NCEI, Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA). <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>

UAH, Version 6.1 Global Temperature Products. <https://www.nsstc.uah.edu/climate/>

付録 A CMIP6 モデル別の気温上昇率

地表付近には 40 モデル、上空と UAH 型・RSS 型 TLT 相当気温には EC-Earth3-Veg を除く 39 モデルを用いた。地表の気温上昇率は 1979–2021 年、上空と TLT 相当気温は 1979–2024 年について計算した。単位は℃／10 年。

モデル	実現値／格子	地表気温	850 hPa	700 hPa	500 hPa	UAH 型 TLT	RSS 型 TLT
ACCESS-CM2	r1i1p1f1 / gn	0.433	0.370	0.384	0.369	0.371	0.371
BCC-CSM2-MR	r1i1p1f1 / gn	0.180	0.264	0.292	0.290	0.271	0.271
CAMS-CSM1-0	r1i1p1f1 / gn	0.190	0.219	0.253	0.259	0.237	0.230
CESM2	r4i1p1f1 / gn	0.417	0.383	0.395	0.405	0.386	0.388
CESM2-WACCM	r1i1p1f1 / gn	0.436	0.370	0.377	0.395	0.384	0.380
CIESM	r1i1p1f1 / gr	0.209	0.164	0.186	0.207	0.213	0.205
CMCC-CM2-SR5	r1i1p1f1 / gn	0.460	0.349	0.346	0.349	0.338	0.341
CMCC-ESM2	r1i1p1f1 / gn	0.354	0.260	0.258	0.258	0.254	0.258
CNRM-CM6-1	r1i1p1f2 / gr	0.238	0.228	0.226	0.205	0.223	0.223
CNRM-CM6-1-HR	r1i1p1f2 / gr	0.233	0.249	0.245	0.255	0.252	0.248
CNRM-ESM2-1	r1i1p1f2 / gr	0.329	0.287	0.313	0.289	0.289	0.288
CanESM5	r1i1p1f1 / gn	0.393	0.482	0.504	0.548	0.516	0.496
CanESM5-CanOE	r1i1p2f1 / gn	0.489	0.502	0.524	0.547	0.510	0.504
EC-Earth3	r1i1p1f1 / gr	0.599	0.545	0.523	0.488	0.493	0.500
EC-Earth3-CC	r1i1p1f1 / gr	0.451	0.406	0.425	0.436	0.412	0.409
EC-Earth3-Veg	r2i1p1f1 / gr	0.457	—	—	—	—	—
EC-Earth3-Veg-LR	r1i1p1f1 / gr	0.246	0.270	0.302	0.308	0.291	0.284
FGOALS-f3-L	r1i1p1f1 / gr	0.158	0.187	0.215	0.266	0.238	0.219

モデル	実現値／格子	地表気温	850 hPa	700 hPa	500 hPa	UAH 型 TLT	RSS 型 TLT
FGOALS-g3	r1i1p1f1 / gn	0.320	0.334	0.343	0.346	0.338	0.337
FIO-ESM-2-0	r1i1p1f1 / gn	0.341	0.352	0.355	0.346	0.345	0.344
GFDL-CM4	r1i1p1f1 / gr1	0.474	0.421	0.451	0.448	0.429	0.432
GFDL-ESM4	r1i1p1f1 / gr1	0.321	0.340	0.361	0.375	0.355	0.354
GISS-E2-1-G	r1i1p3f1 / gn	0.252	0.319	0.311	0.293	0.292	0.301
HadGEM3-GC31-LL	r1i1p1f3 / gn	0.595	0.565	0.556	0.534	0.533	0.539
IITM-ESM	r1i1p1f1 / gn	0.168	0.153	0.161	0.182	0.181	0.173
INM-CM4-8	r1i1p1f1 / gr1	0.201	0.216	0.233	0.238	0.232	0.225
INM-CM5-0	r1i1p1f1 / gr1	0.154	0.177	0.203	0.214	0.197	0.189
IPSL-CM6A-LR	r1i1p1f1 / gr	0.392	0.368	0.367	0.385	0.376	0.374
KACE-1-0-G	r1i1p1f1 / gr	0.432	0.416	0.397	0.402	0.406	0.406
MCM-UA-1-0	r1i1p1f2 / gn	0.258	0.221	0.206	0.230	0.237	0.231
MIROC-ES2L	r1i1p1f2 / gn	0.325	0.347	0.337	0.314	0.323	0.329
MIROC6	r1i1p1f1 / gn	0.288	0.260	0.270	0.257	0.247	0.252
MPI-ESM1-2-HR	r1i1p1f1 / gn	0.280	0.269	0.298	0.284	0.270	0.268
MPI-ESM1-2-LR	r1i1p1f1 / gn	0.309	0.310	0.326	0.298	0.292	0.295
MRI-ESM2-0	r1i1p1f1 / gn	0.344	0.295	0.293	0.307	0.302	0.302
NESM3	r1i1p1f1 / gn	0.557	0.566	0.547	0.519	0.525	0.532
NorESM2-LM	r1i1p1f1 / gn	0.477	0.439	0.472	0.475	0.450	0.449
NorESM2-MM	r1i1p1f1 / gn	0.348	0.352	0.390	0.383	0.360	0.359
TaiESM1	r1i1p1f1 / gn	0.319	0.321	0.338	0.363	0.353	0.340
UKESM1-0-LL	r1i1p1f2 / gn	0.513	0.466	0.442	0.427	0.449	0.445

出所・注: Pangeo CMIP6 catalog と年次系列に基づく。実現値／格子は member_id / grid_label の順。historical 実験と SSP2-4.5 実験を接続した。地表気温欄は、付録に示す実現値／格子の公開月平均地上約 2 m 気温から本文の手順で作成した年次系列に基づく。EC-Earth3-Veg は r2i1p1f1 / gr である。UAH 型と RSS 型は、それぞれの高度方向の感度を適用した TLT 相当気温。

付録 B 13 高層観測地点と衛星 TLT 格子

IGRA ID	地点	緯度	経度	衛星 TLT 緯度	衛星 TLT 経度
JAM00047401	稚内	45.415	141.679	46.25	141.25
JAM00047412	札幌	43.060	141.329	43.75	141.25
JAM00047582	秋田	39.717	140.099	38.75	141.25
JAM00047600	輪島	37.391	136.895	36.25	136.25
JAM00047646	館野	36.058	140.126	36.25	141.25
JAM00047678	八丈島	33.122	139.779	33.75	138.75
JAM00047778	潮岬	33.450	135.757	33.75	136.25
JAM00047807	福岡	33.582	130.376	33.75	131.25
JAM00047827	鹿児島	31.555	130.548	31.25	131.25
JAM00047909	名瀬	28.385	129.495	28.75	128.75

IGRA ID	地点	緯度	経度	衛星 TLT 緯度	衛星 TLT 経度
JAM00047918	石垣島	24.337	124.164	23.75	123.75
JAM00047945	南大東島	25.829	131.229	26.25	131.25
JAM00047971	父島	27.092	142.191	26.25	141.25

出所・注: UAH、RSS および STAR は各地点に最も近い 2.5 度格子を用い、13 地点すべてで同じ格子中心となった。JRA-3Q は最も近い 1.25 度格子を用いた。双線形補間による感度も確認した。経度は東経。

付録 C 堅田データセットによる全国系列の作成

- 地域別の年平均値には、公開データセットのファイル「annual_temp_region_means_1940_1949anomaly_regenerated.csv」に収録された地域平均列を用いた。
- 全国系列は、Northern Japan、Eastern Japan、Western Japan の三つの地域平均を単純平均して作成した。1979–2023 年には、いずれの地域にも欠測がない。
- 1916–2023 年における三地域の単純平均の上昇率は $0.106^{\circ}\text{C}/10$ 年で、Katata et al. (2025) が示した全国の田舎気温系列の約 $0.11^{\circ}\text{C}/10$ 年と整合する。
- 七地域の系列では、1979、1982、1993、1994 年に一部地域の欠測がある。1979–2021 年の上昇率は、三地域の単純平均で $0.302^{\circ}\text{C}/10$ 年、各年に利用できる七地域の単純平均で $0.303^{\circ}\text{C}/10$ 年である。
- データセットが正式な分析対象とする期間は 1916–2023 年である。CSV に収録された 1911–1915 年の一部地域の値は、全国系列の作成には用いない。
- 公開データセットには、地点ごとの原値、地点一覧、補正内容を示すフラグ、全国平均の公式系列、信頼区間は含まれていない。

復元方法については Katata et al. (2025)、数値データについては Katata and Fujibe (2026) を参照した。本稿の三地域の単純平均は公開データから作成したものであり、データ作成者が公表した単一の「全国指数」ではない。

付録 D UAH 型 TLT 相当気温の作成方法と感度確認

公開重み関数による計算（以下、計算 A）では、RSS が公開する米国標準大気の MSU チャネル 2、3、4 の数値重み関数を UAH Version 6 の層平均気温の合成係数で組み合わせた。海面を地表とする標準大気について、大気部分と地表面温度への直接感度の合計を 1 に正規化すると、地表面への本来の直接感度は 0.0892、大気部分は 0.9108 となる。気圧帯別の重みを付表 D1 に示す。

付表 D1 UAH 型の計算 A における気圧帯別の重み

気圧範囲	係数
1013.25–850 hPa	+0.1281
850–700 hPa	+0.1594
700–500 hPa	+0.2793
500–300 hPa	+0.2722
300–200 hPa	+0.0684
200–100 hPa	+0.0066
100 hPa より上	−0.0031
地表面温度への本来の直接感度(海面)	+0.0892

出所・注: RSS の標準大気数値重み関数と Spencer et al. (2017) の UAH 係数から計算。係数を小数第 4 位に丸めているため、表示値の合計は厳密に 1 とならない場合がある。標高のある地点では、代表地表面より下となる大気応答を地表面温度の係数へ移す。

気圧面への重みの配分には対数気圧補間を用いた。CMIP6 で一般的な 19 気圧面を用いた数値試験では、仮定した滑らかな気温上昇率の鉛直分布に対する離散化誤差は $0.001^{\circ}\text{C}/10$ 年未満であった。一方、地表付近と 850、700、500 hPa だけを用い、500 hPa より上を除外すると正規化した応答の約 65%しか残らない。このため、本稿では三気圧面の単純な平均や回帰式ではなく、利用できる鉛直気温分布全体を用いた。

付表 D2 UAH 型 TLT 相当気温の感度確認

条件	IGRA	UAH	CMIP6 平均	CMIP6—IGRA
公開重み関数(100 hPa まで、海面基準の直接感度 8.92%)	0.248	—	0.338	+0.089
海面基準の地表面温度への直接感度を 17%に変更	0.261	—	0.333	+0.073
上層を補完しない(1994 年は資料のある 8 か月で年平均)	0.250	—	0.337	+0.087
250 hPa より上を除外	0.245	—	0.328	+0.083
100 hPa より上の気圧面も使用	—	—	0.338	—
CMIP6 の地表面温度の代わりに地上気温を使用	—	—	0.340	—
北海道・本州・九州の 8 地点	0.281	0.200	0.363	+0.082
UAH の全 13 地点・全月	—	0.169	—	—

出所・注: 期間は 1979–2024 年、単位は℃／10 年。主比較の UAH は IGRA と同じ有効地点・月を用いた。全 13 地点・全月を用いた値は 0.169℃／10 年である。

公開重み関数による計算と、地表面温度への直接感度を 17%に変更した計算のいずれでも、CMIP6 平均は IGRA の TLT 相当気温を上回った。上層の欠測補完を行わない場合、250 hPa より上を除外する場合、対象地点を変える場合にも同じ大小関係が得られた。CMIP6 側だけで 100 hPa より上を含めた場合、および地表面温度を地上約 2 m 気温で置き換えた場合にも、CMIP6 平均の気温上昇率が IGRA および UAH より大きいという結果は変わらなかった。

付録 E RSS v4.0 の衛星間較正問題と補足的比較

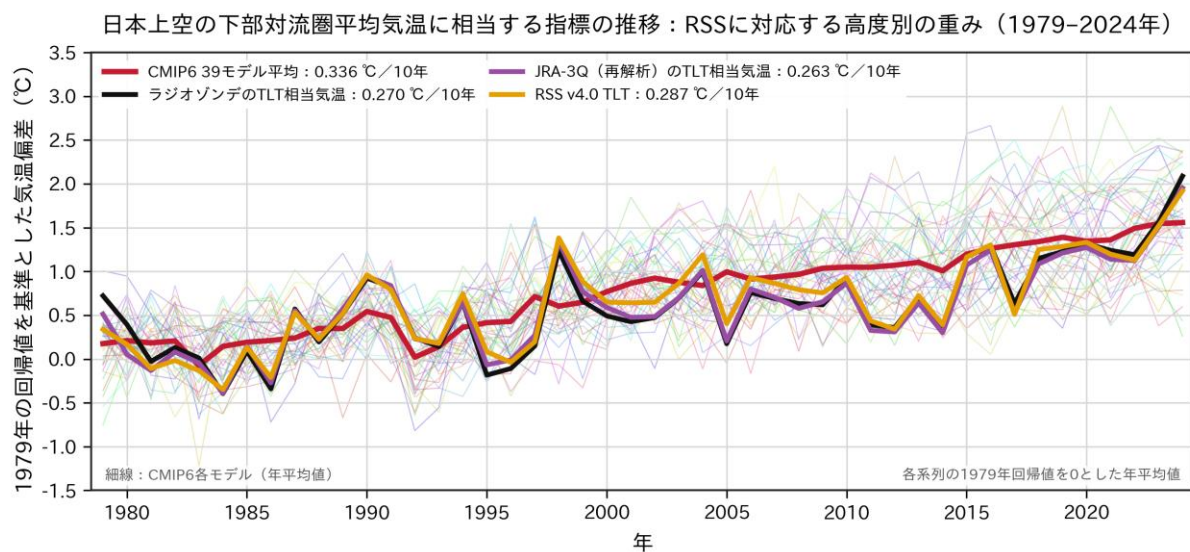
Christy et al.(2018)は、四つの衛星気温データセットをラジオゾンデおよび再解析と比較し、NOAA-12 と NOAA-14 の処理済み観測に見かけの昇温が含まれる証拠を示した。特に NOAA-14 は NOAA-15 に対して約 $0.2^{\circ}\text{C}/10$ 年大きな相対的傾向を示し、UAH は NOAA-14 の利用期間を 2001 年までに制限して衛星間の傾向差を調整したのに対し、RSS v4.0 は NOAA-14 の相対的に大きな昇温傾向を系列に残したと説明されている。

Zou et al.(2023)は、安定軌道の AMSU-A/ATMS 観測を基準に過去へ遡って衛星系列を再較正し、NOAA-11、NOAA-12 および NOAA-14 の見かけの昇温ドリフトを除去した。この結果得られた STAR v5.0 の長期傾向は UAH に近く RSS より低い。本稿の日本領域の TLT でも同じ関係が得られた。このため RSS v4.0 は主たるモデル検証には用いず、計算過程と結果を透明性確保のため補足的に示す。

RSS 型では、RSS が公式に提供する陸域 TLT 重み関数を用いた。公開ファイル自体には Version 4.0 との表示がないため、ここでは「RSS が公式に提供する陸域 TLT 重み関数」と呼ぶ。この静的な高度方向の感度を鉛直気温分布へ適用した計算は、RSS の運用処理全体を再現するものではない。

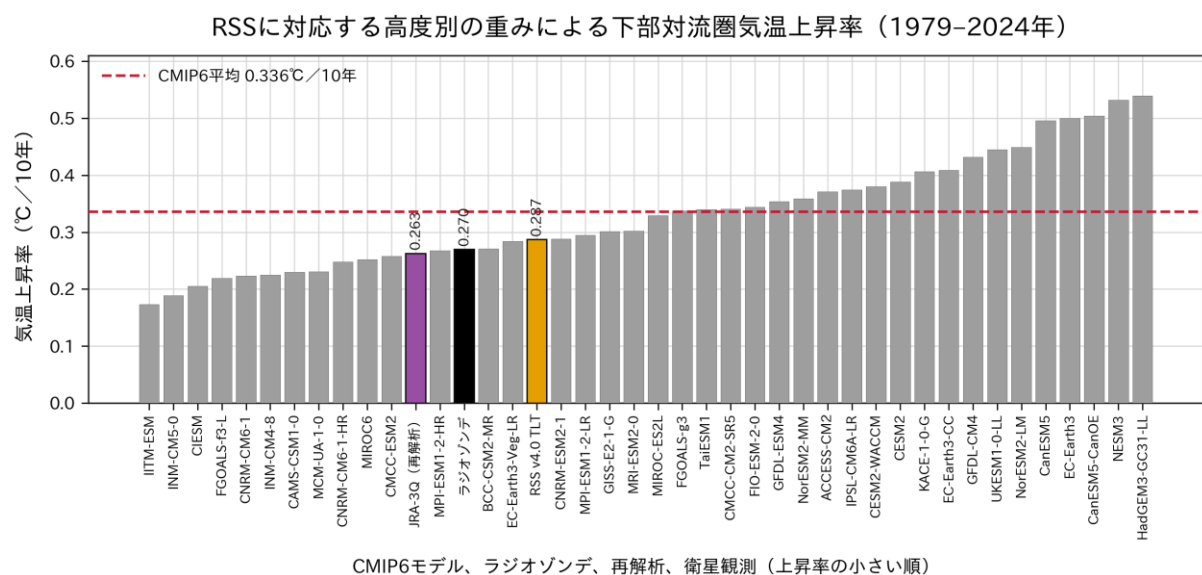
RSS 型では、RSS が公式に提供する陸域 TLT 数値重み関数を同じ対数気圧補間によって適用した。公開重み関数の大気部分の積分値は 0.8420、直接の地表面応答は 0.1510 で、両者の合計 0.9931 を用いて全応答を正規化した。100 hPa より上の小さな負の応答は主解析から除いたが、残った応答は再正規化していない。

RSS v4.0 の月別 2.5 度格子から日本国内 13 地点に最も近い格子値を取り出し、ラジオゾンデの TLT 相当気温が有効な地点・観測時刻・月を共通して適用した。各地点・暦月について 1991–2020 年平均からの偏差を求め、1979–2024 年を分析した。双線形補間による RSS の気温上昇率は、最近傍格子による値との差が $0.003^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。



付図 E1 日本上空の下部対流圏平均気温に相当する指標の推移：RSS に対応する高度別の重み（1979-2024 年）

出所・注：細い線は CMIP6 の 39 モデルで、モデルごとに色を変えて示した。ラジオゾンデの有効地点・月を全系列に共通して用いた。各系列から 1979-2024 年の回帰直線が 1979 年を取る値を差し引き、年平均値を示した。JRA-3Q は再解析。



付図 E2 日本上空の下部対流圏平均気温に相当する指標の上昇率：RSS に対応する高度別の重みによる比較（1979-2024 年）

出所・注：年次値から最小二乗法で気温上昇率を求めた。CMIP6 モデルはすべて同じ色、ラジオゾンデ、JRA-3Q、RSS はそれぞれ異なる色で示した。赤い破線は 39 モデルの単純平均。JRA-3Q は再解析。

付表 E1 RSS v4.0 と RSS 型 TLT 相当気温の上昇率(1979–2024 年)

系列・統計	気温上昇率(℃/10 年)	CMIP6 平均－当該系列	当該系列以上のモデル (%)
RSS 型:RSS v4.0 TLT	0.287	+0.049	64.1%
RSS 型:ラジオゾンデから作成	0.270	+0.066	69.2%
RSS 型:JRA-3Q 再解析から作成	0.263	+0.072	71.8%
RSS 型:CMIP6 平均	0.336	—	—
RSS 型:CMIP6 中央値	0.337	—	—
RSS 型:CMIP6 第 5-第 95 百分位	0.203-0.507	—	—

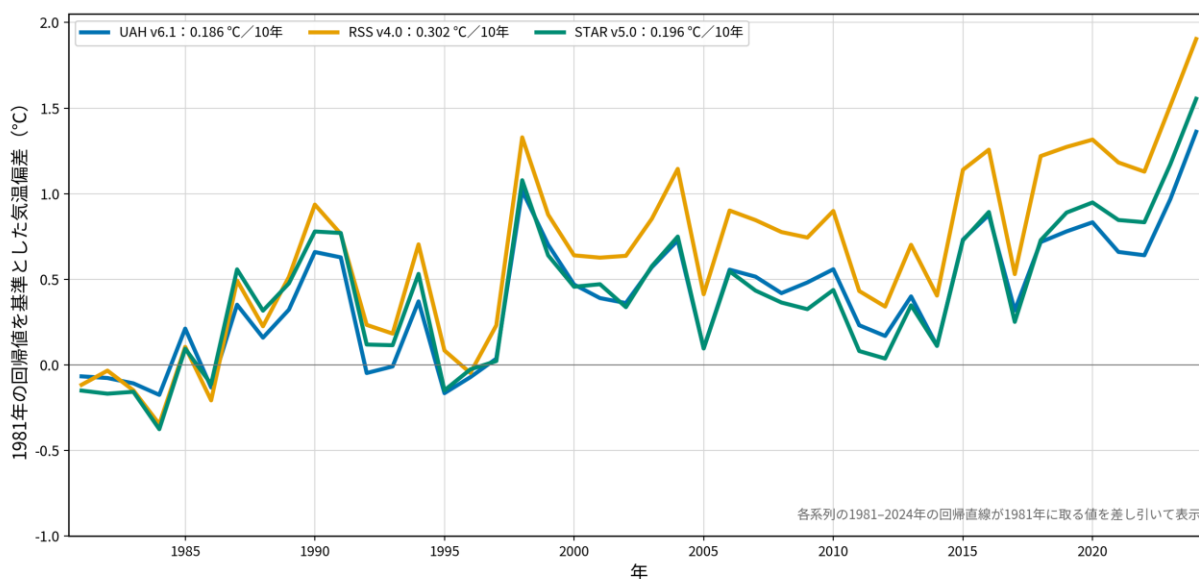
出所・注: JRA-3Q は再解析。第 5-第 95 百分位は 39 モデル間の分布であり、信頼区間ではない。第 3 列の単位は℃/10 年。

1979–2024 年の気温上昇率は、RSS v4.0 が 0.287℃/10 年、RSS 型のラジオゾンデが 0.270℃/10 年、JRA-3Q 再解析が 0.263℃/10 年、CMIP6 平均が 0.336℃/10 年であった。CMIP6 平均と RSS の差は 0.049℃/10 年であった。年次の「CMIP6 平均－RSS」に Newey-West 法を適用した上昇率差の 95%区間は -0.026–0.123℃/10 年で、ゼロを含んだ。

同じ地点・月で抽出した UAH と RSS の年次値の相関係数は 0.967 であったが、RSS の気温上昇率は UAH を 0.119℃/10 年上回った。一方、同じラジオゾンデに二種類の高度方向の感度を適用した場合の差は 0.021℃/10 年、CMIP6 平均の差は-0.002℃/10 年であった。したがって、UAH と RSS の傾向差は TLT の高度方向の感度の違いでは説明できない。

JRA-3Q から作成した TLT 相当気温を双線形補間で求めると、RSS 型は 0.264℃/10 年であり、最近傍格子による主解析との差は小さかった。JRA-3Q はラジオゾンデと衛星放射を同化した再解析データセットであるため、観測データと独立ではない。

日本上空の衛星 TLT 年平均気温: UAH・RSS・NOAA STAR の比較 (1981–2024 年)



付図 E3 日本上空の衛星 TLT 年平均気温: UAH v6.1、RSS v4.0、NOAA STAR v5.0 の比較(1981–2024 年)

出所・注: 各系列の月別 2.5 度格子から日本国内 13 地点に最も近い格子を抽出し、ラジオゾンデが有効な地点・観測時刻・月を共通して適用した。各系列について 1981–2024 年の線形回帰を行い、回帰直線が 1981 年を取る推定値を年次値から差し引いて起点をそろえた。凡例の数値は同期間の気温上昇率である。

共通期間 1981–2024 年の気温上昇率は、UAH v6.1 が $0.186^{\circ}\text{C}/10$ 年、RSS v4.0 が $0.302^{\circ}\text{C}/10$ 年、NOAA STAR v5.0 が $0.196^{\circ}\text{C}/10$ 年であった。RSS は UAH を $0.117^{\circ}\text{C}/10$ 年、STAR を $0.106^{\circ}\text{C}/10$ 年上回った。付図 E3 では回帰直線の 1981 年推定値をそろえているため、年々変動の共通性と長期傾向の差を同時に確認できる。

付表 E2 RSS 型 TLT 相当気温の感度確認

条件	RSS 観測	ラジオゾンデ	CMIP6 平均
主解析: RSS 最近傍、RSS 陸域重み、同一 13 地点・IGRA 有効月	0.287	0.270	0.336
RSS 観測を双線形補間	0.284	0.270	0.336
RSS 公式海域 TLT 重み関数(鉛直重みの両端感度)	0.287	0.266	0.337
北海道・本州・九州の 8 地点	0.313	0.310	0.367
北海道・本州・九州の 8 地点、RSS 双線形補間	0.313	0.310	0.367
全 13 地点・全月(RSS のみ)	0.288	—	—
全 13 地点・全月、RSS 双線形補間(RSS のみ)	0.285	—	—
CMIP6 の直接地表項にも地上気温 tas を使用	0.287	0.270	0.340
CMIP6 のみ 100 hPa より上の気圧面も使用	—	—	0.338

出所・注: 期間は 1979–2024 年、単位は $^{\circ}\text{C}/10$ 年。RSS 観測は陸海を含む公式全球格子から日本国内 13 地点に対応する値を抽出した。合成系列には RSS が公式に提供する陸域 TLT 重み関数を用いた。