

### 3.13 気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算完了

#### 3.13.1 はじめに

当庁はこれまで、第1次 (JRA-25: Japanese 25-year Reanalysis; Onogi et al. 2007) (2005年度完成) 及び第2次 (JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis; 古林ほか 2015) (2012年度完成) 長期再解析を実施してきた。長期再解析の目的は、季節アンサンブル予報システム (EPS: Ensemble Prediction System) 等の各種数値予報モデルの開発及び精度評価、地球温暖化等の気候監視や異常気象分析業務等に利用可能な、長期間の均質で高品質な気候データセットの作成及び提供である。

数値予報課では、長期再解析データの期間延長と品質向上を図るため、1947年9月以降を対象とする気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century; Kosaka et al. 2024) を実施した。JRA-3Qでは、JRA-55以降の現業全球数値予報システム及び海面水温 (SST) 解析の開発成果や、国内外の気象機関等によるデータレスキュー、衛星運用機関による衛星データの再処理による過去の観測データ拡充の成果等を活用している。

JRA-3Qは、2014年度から本計算に向けた準備 (実行システム構築、観測データ取得・整備、予備実験等) を進め、2019年8月から本計算を開始し、2022年11月末に過去期間の全ての計算を完了した。品質評価については、気象研究所気候・環境研究部第一研究室と協力して行った。また、2021年10月からJRA-3Q版気候データ同化システムの準リアルタイム運用を開始している。

JRA-3Qデータは、2022年2月に運用開始した新しい季節EPSや2022年3月に更新した全球EPSの開発・精度評価、気候監視・異常気象分析 (2023年5月にJRA-55データからJRA-3Qデータに切替え)、過去の災害事例の調査、海況解析、温室効果ガス解析等、庁内の幅広い業務で活用されている。また、JRA-3Qデータは気候変動の影響評価や再生可能エネルギー立地条件調査等の気候変動対策の分野をはじめ、様々な分野での活用が期待されることから、2023年3月から民間気象業務支援センター等を通して社会に広く提供している<sup>1</sup>。

本稿では、JRA-3Qの仕様全般と基本特性について解説する。なお、本稿は日本気象学会・気象集誌第102巻第1号に発表したJRA-3Q総合報告論文 (Kosaka et al. 2024) を和文で要約したもので、図表の出典は明示されているものを除き全て同論文である。但し、参考文献の一部を和文のものに変更してある。

<sup>1</sup> JRA-3Qデータの取得方法については、JRA-3Qホームページ ([https://jra.kishou.go.jp/JRA-3Q/index\\_ja.html](https://jra.kishou.go.jp/JRA-3Q/index_ja.html)) を参照されたい。

#### 3.13.2 データ同化システム

表3.13.1にJRA-3Qのデータ同化システムの概要と、比較のためにJRA-55のデータ同化システムの概要を合わせて示す。JRA-3Qは2018年12月時点の現業全球データ同化システム (JMA 2019) の低解像度 (TL479解像度) 版に基づいており、JRA-55実施以降の現業システムにおける開発成果が反映されている。予報モデルについては、物理過程の大幅な改良により放射収支、地表面顕熱・潜熱フラックス、降水分布等における系統誤差が縮小した気象庁の全球スペクトルモデル (GSM) が使用されている (表3.13.2)。また、2018年6月に更新されたスーパーコンピュータシステムにおける計算機資源増強によりJRA-55よりも高解像度化されている。

##### (1) 背景誤差共分散

JRA-3Qデータ同化システムで用いている背景誤差共分散は、2018年12月時点の気象庁現業システムのものと同様に同じであり、JRA-55と同じ静的な背景誤差共分散モデルに基づいている。この背景誤差共分散モデルは、NMC法 (Parrish and Derber 1992) を用いて、2015年の1年間の24時間予報と48時間予報との差から統計的に算出されたものである。

なお、(1) ラジオゾンデ定時観測の国際的ネットワーク確立前の1957年以前、(2) 衛星観測データ導入前の1958~1972年、(3) 旧世代の衛星観測システムを用いる1973年1月~1998年7月の期間については、背景値の誤差が増加することを考慮するために、対数比湿以外の制御変数の背景誤差共分散をそれぞれ(1) 15%、(2) 50%、(3) 11%増加させている。これらのスケールリングファクターは、Desroziers et al. (2005) による観測空間での背景誤差の診断法を、1999/2000年を対象にしてそれぞれ行った、(1) 1950年代前半相当縮退観測システムインパクト実験、(2) 衛星排除インパクト実験、(3) TOVS/改良型TOVS (ATOVS) 衛星観測システム比較実験のD値 (観測値 - 背景値) に適用して得たものである。

##### (2) 陸面解析

JRA-55ではオフライン版気象庁生物圏モデル (SiB) を大気モデルの出力で強制することにより陸面解析値を作成したが (古林ほか 2015)、観測に基づいた大気強制力を与えておらず、オフラインモデルを用いる利点が活用されていなかった。これを踏まえ、JRA-3Qでは前のサイクルで作成された陸面予報値を基本的にそのまま予報初期値として利用することとした。ただし、毎日18UTCの陸面解析値には積雪深解析の結果を反映させている。

##### (3) 積雪深解析

JRA-3Qでは、JRA-55と同様、積雪深解析の第一推定値を陸面過程の積雪深と衛星積雪域から作成し、

表 3.13.1 JRA-55 と JRA-3Q で用いたデータ同化システムの仕様。中黒の箇条書きは JRA-55 に対する JRA-3Q の優位点を表す。

	JRA-55	JRA-3Q
解析期間	1958 年以降	1947 年 9 月以降
基本システム	2009 年 12 月時点の気象庁現業システム (JMA 2007, 2013)	2018 年 12 月時点の気象庁現業システム (JMA 2019)
水平解像度	TL319 (約 55km)	TL479 (約 40km)
鉛直層	0.1hPa までの 60 層	0.01hPa までの 100 層
解析手法	4 次元変分法 (インナー解像度 T106)	4 次元変分法 (インナー解像度 TL319)
ラジオゾンデ気温観測バイアス補正	2006 年まで : RAOBCORE V1.4 (Haimberger et al. 2008) 2007 年以降 : RAOBCORE V1.5 (Haimberger et al. 2012) ・ ERA に基づいたバイアス推定	RISE(RICH with solar elevation dependent) v1.7.2 (Haimberger et al. 2012) ・ 周辺地点との比較に基づいたバイアス推定 ・ 季節依存性の考慮 (1979 年以降)
衛星輝度温度	RTTOV-9.3 (Saunders 2008)	RTTOV-10.2 (Saunders et al. 2012) ・ 計算精度向上 ・ 温室効果ガス濃度変動の考慮
陸面解析	オフライン SiB	予報モデルの陸面予報値をサイクル
SST 及び海水	COBE-SST (1 度格子) (Ishii et al. 2005)	1985 年 5 月まで : COBE-SST2 (1 度格子) (Hirahara et al. 2014) 1985 年 6 月以降 : MGDSST (0.25 度格子) (栗原ほか 2006)
オゾン	1978 年まで : 気候値 1979 年以降 : MRI-CCM1(T42L68) (Shibata et al. 2005)	MRI-CCM2(TL159L64) (Deushi and Shibata 2011) ・ 新しいモデルを用いて全期間作成

表 3.13.2 JRA-55 と JRA-3Q で用いた予報モデルの仕様。中黒の箇条書きは JRA-55 に対する JRA-3Q の優位点を表す。

	JRA-55	JRA-3Q	改良の効果
	2009 年 12 月時点の気象庁 GSM (JMA 2007, 2013)	2018 年 12 月時点の気象庁 GSM (本田・坂本 2019)	
長波放射	散光因子近似を用いたバンド射出率法 テーブル参照法 (成層圏で重要な吸収体)	2 方向吸収近似 相関 k-分布法 (成層圏で重要な吸収体)	・ 成層圏気温プロファイルの改善
雲放射	ランダムオーバーラップ (短波)	マキシマム・ランダムオーバーラップ (短波) 水雲粒光学特性の見直し 積雲上昇流域の雲量診断の導入	・ 放射収支の改善
エアロゾル	陸上型、海上型	硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩、砂塵	・ 放射収支の改善
積雲対流	Arakawa-Schubert スキーム	Arakawa-Schubert スキーム ・ 対流性上昇流内での降水変換率の導入 ・ 雲底以下の対流性上昇モデルの改良 ・ 融解・蒸発過程の精緻化	・ 加熱プロファイルの改善 ・ 降水分布の改善
雲	Smith スキーム 層積雲 : 川合 (2004)	Smith スキーム : 雲水量計算法の改良 層積雲 : 発動条件に相対湿度の閾値を追加 雲氷落下スキームの改良	・ 対流圏中層乾燥バイアスの軽減 ・ 過剰な層積雲を抑制 ・ 放射収支の改善
接地境界層	Monin-Obukhov 相似則 ・ 非反復解法 (Louis et al. 1982)	Monin-Obukhov 相似則 ・ 普遍関数法 (Beljaars and Holtslag 1991)	・ 顕熱・潜熱の過剰バイアスの緩和
非地形性重力波抵抗	Rayleigh 摩擦 (50hPa から上層)	Scinocca (2003)	・ QBO の表現改善
陸面	生物圏モデル (SiB) (佐藤 1989) ・ 温度 1 層、水分 3 層 ・ 雪 1 層	改良型 SiB ・ 土壌層 7 層 (温度・水分共通) ・ 積雪 4 層 (最大)	・ 地上気温の日変化の表現改善
海水	1 層海水モデル 開水・海水排他格子	4 層海水モデル 開水・海水混在格子	・ 極域の低温バイアスが改善

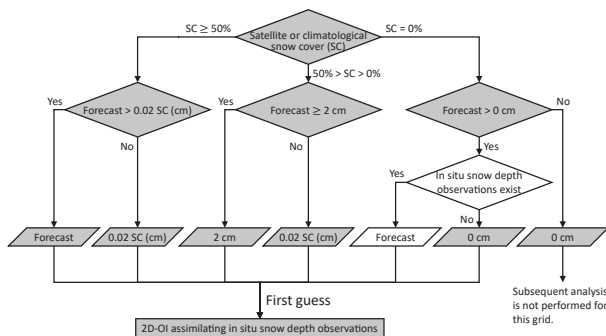


図 3.13.1 積雪深第一推定値作成処理のフローチャート。無地の記号で示された処理は JRA-55 以降に追加されたもの、陰影の記号で示された処理は JRA-55 で用いたものと同じものである。

その後、2次元最適内挿法(2D-OI)でSYNOP積雪深観測を同化している(古林ほか2015)。JRA-55では積雪深解析処理における2つの不具合が見つかった。1つ目は、海岸部の積雪データの内挿処理の問題により海岸付近の積雪深が非現実的な値となる問題である(気象庁2015)。JRA-3Qではその様な問題が再発しないよう、不具合を修正するとともに、積雪深解析値に上限値(5m)を設定している。2つ目は、衛星積雪域に負バイアスがある領域(海岸付近等)で衛星積雪域が第一推定値として利用された場合に、2D-OIにおいて正インクリメントがバイアス特性の異なる陸面解析積雪深を第一推定値とする周辺地域にまで広がり、周辺地域の積雪深解析値が過大となる傾向が見られることである。JRA-3Qではこの欠点を改善するために、第一推定値の作成において衛星積雪域の利用可否を判定する際にSYNOP積雪深観測も参照するよう変更している(図3.13.1)。

### 3.13.3 境界条件及び強制場

#### (1) SST及び海水

1985年6月以降については、西岸境界流付近のSSTの急峻な水平勾配が大気境界層に与える影響をより適切に表現できるよう、衛星観測に基づく0.25度解像度のMGDSST(栗原ほか2006)を利用している。1985年5月以前については、現場観測データが少ない海域におけるSSTの時間・空間変動特性の表現改善のためのリコンストラクション手法、及び、品質の向上した海水データを用いた、現場観測に基づく1度解像度のCOBE-SST2(Hirahara et al. 2014)を利用している。なお、1985年6月から1990年12月の期間についてはCOBE-SST2を用いたプロダクト(JRA-3Q-COBE)も作成しており、SSTデータセットの違いが大気解析に与える影響等を調査することが可能となっている。

#### (2) オゾン

JRA-3Qでは、予報モデルの放射過程及び、衛星赤外測器輝度温度同化における放射伝達計算の入力データ

として、下部成層圏のオゾン濃度ピークの過小バイアスが改善されたMRI-CCM2.1(Deushi and Shibata 2011; Yukimoto et al. 2019)を用いて作成されたオゾン再解析データを使用している。MRI-CCM2.1を駆動する気象場として、1958年以降の期間はJRA-55データを利用し、1957年以前の期間はJRA-3Q予備実験データを利用した。衛星オゾン全量観測データのナッジングにおいては、Level 2データを新たに取得して地上からのオゾン全量観測値で衛星間のバイアスを補正することで独自に均質化したものを1979年以降の期間に利用している(Naoe et al. 2020)。一方、1978年以前は利用可能な衛星観測データがないためナッジングを行っていない。このため、1978年以前のオゾン再解析データについては、1980~1984年の衛星オゾン全量観測ナッジング有無実験から算出した補正值を用いてオゾン混合比のバイアス補正を行っている。また、1957年以前のオゾン再解析データについては、気象場を切り替えた影響を考慮するために、1961~1965年の気象場切替え実験から算出した補正值を用いてオゾン混合比のバイアス補正を行っている。さらに、1hPaより上層については、1991~1997年のオゾン混合比平均値とSPARCのHALOE/MLS月別気候値(Randel et al. 1998)からバイアス補正を行っている(全期間)。

### 3.13.4 観測データ

1957年以前の期間については、気象庁再解析では初めて対象とする期間であることから、同期間の本計算実施に向けて以下のデータソースから観測データの収集・整備を行った(表3.13.3)。

地上観測については、ハドレーセンター地上観測データセットHadISD v3.1.0.201911p(Dunn 2019)から取得した。このデータセットは、米国環境情報センター(NCEI)の地上観測データセットISD(Smith et al. 2011)から長期間観測を行っている地点を抽出し、品質管理が行われたものである。海上観測については、包括的海洋-大気データセットICOADSリリース3.0(Freeman et al. 2017)から取得した船舶及びブイによる海上気象観測データを利用した。加えて、米国海洋大気庁(NOAA)/環境科学共同研究所(CIRES)の20世紀再解析等の入力データとして利用されている地表面気圧観測データバンクISPDバージョン4(Compo 2019)も取得した。

高層観測については、NCEIが収集・整備を行っている全球ラジオゾンデアーカイブIGRAバージョン2(Durre et al. 2016)から取得した。加えて、国際地球観測年(1957~1958年)以前の期間の高層観測データをデータレスキューによりデジタル化して収録したCHUANバージョン1.7(Bronnimann and Stickler 2013)も取得したが、IGRAバージョン2との重複データの特定・除去が困難であることが分かったため、重複がないことを確認できた日本の地点のみを利用す

ることとした。

これらのデータセットに収録されている国内観測地点数は、特に1950年代初頭以前において非常に少ないことから（例えば、日本の高層観測は1947年には10を超える地点で開始されていたが、IGRAバージョン2で1947年まで遡れるのは2地点のみ）、気象研究所で観測原簿からデジタル化された日本の9地点の地上観測データ及び館野のラジオゾンデ観測データを追加した。加えて、利根川・荒川決壊で東京など関東平野に大きな被害をもたらしたことで知られるカスリーン台風（1947年9月）について、本事例の調査・研究に資するよう解析精度向上を図るため、前後の期間（1947年9月～10月）の日本のラジオゾンデ観測を高層月報（Central Meteorological Observatory 1948）からデジタル化して追加した。

1958年以降の期間の観測データは、JRA-55で整備した観測データセット（古林ほか 2015）を基本としつつ、再較正により均質性が向上した衛星データ等、JRA-55実施以降に新たに利用可能となった観測データセットを可能な限り収集して利用している（表 3.13.3、表 3.13.4、図 3.13.2）。例えば大気追跡風（AMV）については、気象庁気象衛星センターがひまわり 8号用のAMV導出アルゴリズムをひまわり 5号（GMS-5）からひまわり 7号（MTSAT-2）に適用して新たに作成した再処理AMVを利用している（Abe et al. 2021）。

JRA-3Qで用いる熱帯低気圧ボーガスについては、JRA-55と異なり、気象庁の台風ボーガス作成手法（JMA 2019）を用いて全領域で熱帯低気圧ボーガスを自主作成し利用している。熱帯低気圧ボーガスの作成に必要な熱帯低気圧情報（中心位置、中心気圧、強風半径等）については、北西太平洋領域においては、1950年以前の期間はベストトラック・データベース（IBTrACS; Knapp et al. 2010）、1951年以降の期間は気象庁熱帯低気圧情報を利用している。北西太平洋以外の領域においては、2021年までIBTrACS、2022年以降は国際民間航空機関（ICAO）に指名された熱帯低気圧アドバイザーセンターから受信した熱帯低気圧電文を利用している。

上記に加えて、JRA-55実施以降に現業システムで利用開始された新しい観測システムである全球航法衛星システム（GNSS）地上観測網の天頂遅延量と高波長分解能赤外探査計の輝度温度をJRA-3Qでは利用している。地上GNSS天頂遅延量については、1994～2014年の期間は気象研究所作成の再処理データを、それ以降の期間は現業取得データを利用している。

### 3.13.5 データ同化システムの基本性能

#### (1) 2日予報スコア

データ同化システムで用いているものと同じ予報モデルによる延長予報の対初期値検証スコアを比較することにより、各データ同化システムにおける解析値・

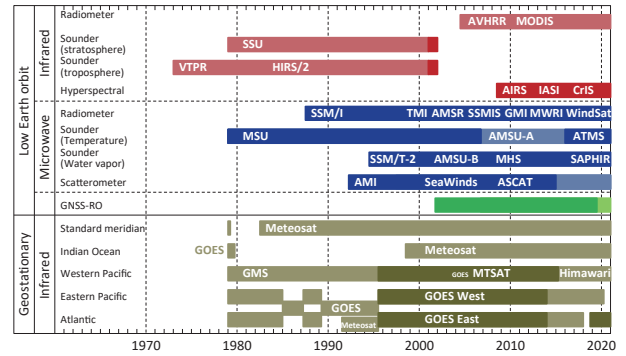


図 3.13.2 JRA-3Q で用いた衛星観測データ。濃い陰影は JRA-55 からの追加期間及び再較正・再処理データによる更新期間を表す。

予報値の整合性、観測システムの変遷の影響、プロダクトの時間的均質性等を推察できる。

図 3.13.3 と図 3.13.4 はそれぞれ、北半球及び南半球の中・高緯度 500hPa 高度 2 日予報と熱帯域対流圏上層及び下層の風ベクトル 2 日予報について、JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの二乗平均平方根（RMS: Root-mean-square）誤差を示している。予報スコアの良い順に JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 となっており、データ同化システムの着実な性能向上の効果が認められる。また、再処理衛星データの取得・利用等による観測データの拡充・品質向上も予報スコア向上に寄与している。特に、JRA-3Q では 1990 年代の南半球中・高緯度の 500hPa 高度 RMS 誤差が大きく改善した結果、他の期間・領域との予報スコアの差が縮小しており、プロダクトの均質性が向上していると言える。これは、TIROS 実用型鉛直サウンダ（TOVS: TIROS Operational Vertical Sounder）輝度温度の間引き間隔縮小（JRA-55 では 250km のところを JRA-3Q では 125km に変更）及び背景誤差共分散の調整（第 3.13.2 項 (1)）の効果と考えられる。

他方、前衛星期間（1972 年以前）の南半球中・高緯度及び熱帯においては、JRA-55 と同様に観測システムの拡充に反して予報スコアが徐々に悪化する傾向が見られる。再解析対象期間当初、これらの領域において RMS 誤差が小さいのは観測データによる拘束が不十分であるためと考えられ、この期間の観測システムのもとのデータ同化システムの性能には依然として課題があることを示唆している。

#### (2) ラジオゾンデ観測データに対する背景値の適合度

対背景値 D 値（観測値-背景値）からは、予報モデルの性能や観測データのバイアス等の評価に有益な情報を得ることができる。ここでは、JRA-3Q、JRA-55 及び JRA-25 で使用したラジオゾンデ気温観測の対背景値 D 値の全球平均及び RMS の時系列の比較を行う。

対流圏におけるラジオゾンデ気温観測との整合性については、JRA-3Q は 1980 年代以降において JRA-55

表 3.13.3 JRA-3Q で用いた観測データソース（従来型データ、熱帯低気圧情報、地上 GNSS 天頂遅延量）。無地のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものから新たに追加、又は再校正・再処理されたもの、陰影のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものと同じものである。

データ提供元	データ種別、及びデータ提供元による識別名	利用期間	備考
<b>従来型データ</b>			
NOAA/NCEI	ICOADS R3.0	1947 年 9 月～1957 年 12 月	Freeman et al. (2017)
	IGRA V2	1947 年 9 月～1957 年 12 月	doi:10.7289/V5X63K0Q
NOAA/CIRES	ISPD V4	1947 年 9 月～1957 年 12 月	doi:10.5065/9EYR-TY90
ハドレーセンター	HadISD v3.1.0.201911p	1947 年 9 月～1957 年 12 月	Dunn (2019)
NCAR	CHUAN V1.7 (国内地点のみ利用)	1947 年 9 月～1957 年 12 月	doi:10.5065/AHPM-FC10
	積雪深 (米国)	1957 年 11 月～2011 年 8 月	doi:10.5065/B6MM-RS76
ECMWF		1958 年 1 月～2002 年 8 月	Uppala et al. (2005)
気象庁		1961 年 1 月～	
	ラジオゾンデ (国内地点)	1947 年 9 月～10 月	高層月報 (Central Meteorological Observatory 1948) からデジタル化
	ドロップゾンデ (伊勢湾台風周辺) GAME 及び SCSMEX	1959 年 9 月 21 日～26 日 1998 年 4 月～1998 年 10 月	JMA (1961) からデジタル化 Lau et al. (2000), Yasunari (2001)
気象研究所石井正好氏	地上観測 (稚内、札幌、函館、新潟、東京、神戸、潮岬、福岡、鹿児島)	1947 年 9 月～1957 年 12 月	観測原簿からデジタル化
気象研究所釜淵弘隆氏	ラジオゾンデ (館野)	1947 年 9 月～1949 年 12 月	科研費基礎研究 S 26220202 観測原簿からデジタル化
山中大学氏	ラジオゾンデ (インドネシア)	1991 年 11 月～1999 年 5 月	Okamoto et al. (2003)
RIHMI	積雪深 (ロシア)	1950 年 1 月～2008 年 12 月	<a href="http://meteo.ru/english/climate/snow.php">http://meteo.ru/english/climate/snow.php</a>
中国地面気象記録月報	積雪深 (中国)	1971 年 1 月～2006 年 12 月	印刷物からデジタル化
IMH	積雪深 (モンゴル)	1975 年 1 月～2007 年 12 月	
<b>熱帯低気圧情報</b>			
NOAA/NCEI	IBTrACS v03r05	1947 年 9 月～2012 年 12 月	Knapp et al. (2010)
	IBTrACS v04	2013 年 5 月～2021 年 12 月	
気象庁	北西太平洋ベストトラック	1951 年 2 月～2012 年 12 月 2013 年 5 月～2021 年 12 月	<a href="https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html">https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html</a>
	北西太平洋熱帯低気圧情報	2012 年 12 月～2013 年 4 月 2022 年 1 月～	
	TCAC (ホノルル、レユニオン、マイアミ、ナンディ、ニューデリー) 及び TCWC (メルボルン) 熱帯低気圧電文	2012 年 12 月～2013 年 4 月 2022 年 1 月～	<a href="https://community.wmo.int/en/activity-areas/aviation/hazards/tropical-cyclones">https://community.wmo.int/en/activity-areas/aviation/hazards/tropical-cyclones</a> <a href="https://community.wmo.int/en/tropical-cyclone-regional-bodies">https://community.wmo.int/en/tropical-cyclone-regional-bodies</a>
<b>地上 GNSS 天頂遅延量</b>			
気象研究所小司禎教室長	再処理地上 GNSS 天頂遅延量	1995 年 1 月～2014 年 8 月	
気象庁		2014 年 9 月～	

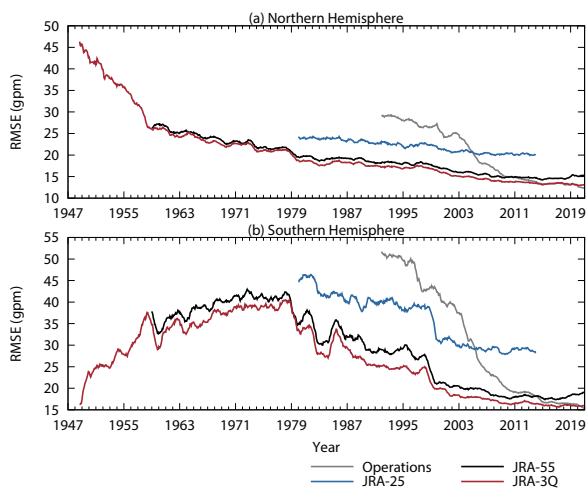


図 3.13.3 JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの 500hPa 高度 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a) 北半球中・高緯度 (90°-20°N)、(b) 南半球中・高緯度 (20°-90°S)。

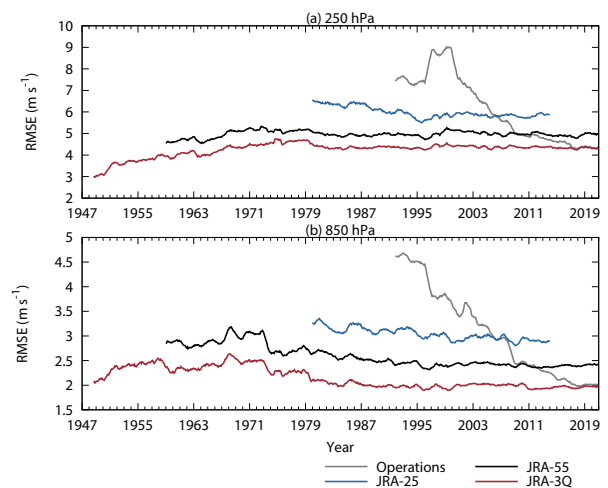


図 3.13.4 JRA-3Q、JRA-55、JRA-25 及び現業全球データ同化システムの熱帯域 (20°N-20°S) 風ベクトル 2 日予報 RMS 誤差。検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。(a) 250hPa、(b) 850hPa。

と比べて非常に良くなっている。具体的には、250hPa 付近の D 値時系列では、JRA-55 の対流圏上層に高温

表 3.13.4 JRA-3Q で用いた観測データソース（衛星輝度温度、AMV、散乱計海上風、GNSS-RO 屈折角）。無地のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものから新たに追加、又は再校正・再処理されたもの、陰影のセルで示された観測データは JRA-55 で用いたものと同じものである。

データ提供元	データ種別、及びデータ提供元による識別名	利用期間	備考
<b>衛星輝度温度</b>			
ECMWF	VTPR	1973 年 1 月～1979 年 2 月	Uppala et al. (2005)
	HIRS 及び SSU AMSU-A	1978 年 11 月～2001 年 12 月 1998 年 8 月～2003 年 5 月	
NOAA/NCDC	SSM/I	1987 年 6 月～2004 年 12 月	
NOAA/NCEI	MSU CDR V1.0	1978 年 11 月～2006 年 12 月	doi:10.7289/V51Z429F
NOAA/CLASS	AMSU-A	1998 年 8 月～2012 年 12 月	<a href="https://www.av1.class.noaa.gov/saa/products/search?datatype_family=TOVS">https://www.av1.class.noaa.gov/saa/products/search?datatype_family=TOVS</a>
	SSM/I	1987 年 7 月～2012 年 12 月	<a href="https://www.av1.class.noaa.gov/saa/products/search?datatype_family=DMSP">https://www.av1.class.noaa.gov/saa/products/search?datatype_family=DMSP</a>
気象庁	AIRS	2008 年 7 月～2020 年 12 月	
	IASI	2008 年 7 月～	
	CrIS	2015 年 5 月～	
	SSM/I	2006 年 3 月～2021 年 4 月	
	SSMIS	2012 年 6 月～	
	AMSR2	2016 年 9 月～	
	GMI	2017 年 5 月～	
	MWRI	2016 年 11 月～2019 年 8 月	
	WindSat	2020 年 9 月～2020 年 10 月	
	AMSU-A 及び MHS	2003 年 6 月～	
	ATMS	2016 年 11 月～	
SAPHIR	2014 年 7 月～2022 年 1 月		
CSR	2005 年 6 月～		
気象庁気象衛星センター	GMS-5、GOES 9、MTSAT-1R 再処理 CSR	1995 年 7 月～2009 年 12 月	
宇宙航空研究開発機構	再校正 TMI V05A (8 相当)	1998 年 2 月～2015 年 4 月	<a href="https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/en/archives_v6.html">https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/en/archives_v6.html</a>
	再校正 AMSR-E V4.400.400	2002 年 6 月～2011 年 10 月	<a href="https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/tb/index_en.html">https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/tb/index_en.html</a>
	再校正 AMSR2 V2.220.220	2012 年 7 月～2016 年 8 月	<a href="https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/tb/index_en.html">https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/datacatalog/tb/index_en.html</a>
	再校正 GMI V05A	2014 年 3 月～2017 年 5 月	<a href="https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/en/archives_v6.html">https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/en/archives_v6.html</a>
EUMETSAT	SSM/T-2、AMSU-B、MHS FCDR v4.1	1994 年 7 月～2017 年 12 月	Hans et al. (2019)
	再処理 Meteosat CSR	2000 年 5 月～2000 年 12 月	<a href="https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MFG:CSR1">https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MFG:CSR1</a>
	Meteosat CSR	2001 年 1 月～2009 年 8 月	<a href="https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MFG:CSR-IODC">https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MFG:CSR-IODC</a> <a href="https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MSG:CSR">https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MSG:CSR</a>
EUMETSAT CM SAF	SSM/I、SSMIS FCDR E3	1987 年 7 月～2015 年 12 月	doi:10.5676/EUM_SAF_CM/FCDR_MWI/V003
<b>AMV</b>			
ECMWF	Meteosat, GMS, GOES	1979 年 1 月～1996 年 1 月	Uppala et al. (2005)
気象庁	Meteosat, GOES, Himawari	2001 年 1 月～	
	AVHRR, MODIS	2004 年 6 月～	
気象庁気象衛星センター	再処理 GMS	1979 年 1 月～1979 年 11 月	
	再処理 GMS-3～-4	1987 年 3 月～1995 年 6 月	
	再処理 GMS-5、GOES 9、MTSAT	1995 年 6 月～2015 年 7 月	Abe et al. (2021)
EUMETSAT	再処理 Meteosat-2～-7	1982 年 5 月～2000 年 12 月	van de Berg et al. (2001)
	Meteosat-5～-7	2001 年 1 月～2001 年 2 月	
CIMSS	再処理 GOES	1995 年 1 月～2015 年 7 月	Wanzong et al. (2014)
<b>散乱計海上風</b>			
EUMETSAT OSI SAF	ERS/AMI CDR	1992 年 3 月～2001 年 1 月	doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0009
	QuikSCAT/SeaWinds CDR	1997 年 7 月～2009 年 11 月	doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0002
	Metop-A/ASCAT CDR	2007 年 1 月～2014 年 3 月	doi:10.15770/EUM_SAF_OSI_0006
気象庁	Metop/ASCAT	2014 年 4 月～	
<b>GNSS-RO 屈折角</b>			
EUMETSAT ROM SAF	CHAMP CDR v1.0	2001 年 9 月～2008 年 9 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0004
	COSMIC CDR v1.0	2006 年 4 月～2016 年 12 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0003
	Metop CDR v1.0	2006 年 10 月～2016 年 12 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0002
	Metop ICDR	2017 年 1 月～2019 年 7 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0006
	GRACE CDR v1.0	2007 年 2 月～2016 年 12 月	doi:10.15770/EUM_SAF_GRM_0005
気象庁	COSMIC、Metop、GRACE、TerraSAR-X、TanDEM-X	2017 年 1 月～	

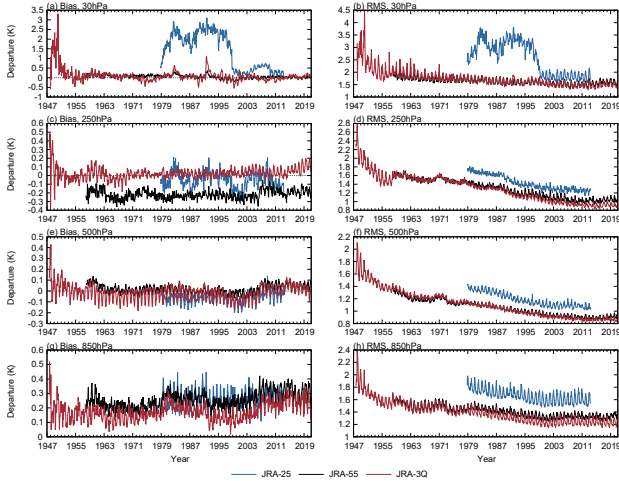


図 3.13.5 JRA-3Q、JRA-55 及び JRA-25 で使用したラジオゾンデ気温観測対背景値 D 値の全球平均、及び RMS の時系列

バイアスがあったことを示している (図 3.13.5 (c))。一方、JRA-3Q では、対流圏上層の高温バイアスが大幅に解消しており、ラジオゾンデ気温観測との整合性が非常に良くなっていることが分かる。また、850hPa 付近では、JRA-25、JRA-55、JRA-3Q とともに D 値平均値が正の方向にシフトしており、対流圏下層の低温バイアスを示唆しているが、JRA-3Q では D 値平均値が減少しており、低温バイアスが緩和していることが分かる (図 3.13.5 (g))。

他方、30hPa 付近では、JRA-3Q の RMS は JRA-55 と同程度であるが、D 値平均値は特に大規模火山噴火後の 1982 年 (エルチチョン火山) や 1991 年 (ピナツボ火山) に増大しており、成層圏の昇温の表現が弱いことを示唆している (図 3.13.5 (a), (b))。火山性エアロゾルの年々変動については、JRA-25、JRA-55、JRA-3Q のいずれの予報モデルでも考慮されていないことから、昇温量の表現の違いは主にラジオゾンデ観測データのインパクトの違いと考えられる。また、対流圏中層においては、1970 年代以前のラジオゾンデ気温観測との整合性に JRA-55 と比べて若干の改善が見られる。これらの要因としては、JRA-3Q では現在の充実した観測システムに対して最適化された水平相関距離が短い背景誤差共分散を利用しているため (図 3.13.6)、観測データの少ない過去期間においてモデルバイアスを十分に拘束できない場合があり得ることが推測される。水平相関距離の違いがデータ同化における観測データのインパクトに及ぼす影響については、今後、詳細な調査が必要と考えられる。

1940 年代は D 値平均値・RMS とともに大きい、この期間の観測データ数が非常に少なく、特に高層観測が北半球の一部地域しか存在しないことにより、背景値の精度が低いことに加え、統計的ばらつきが大きいことも要因の一つと考えられる。

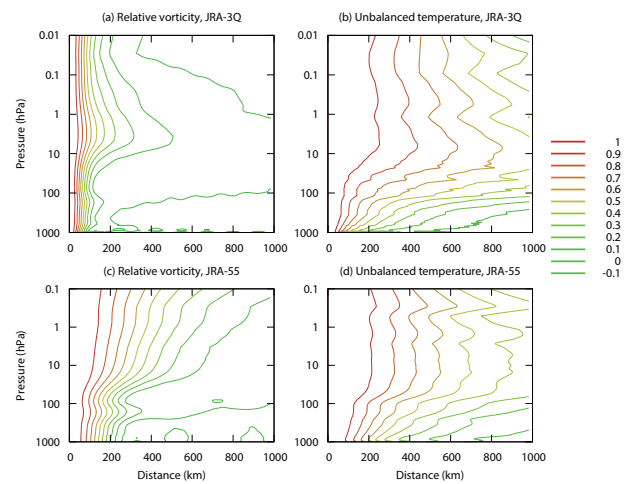


図 3.13.6 (a, b) JRA-3Q 及び (c, d) JRA-55 で利用した背景誤差共分散の水平相関の距離・高度断面図。(a, c) 相対渦度及び (b, d) 非バランス気温 (風の場と統計的に独立な気温成分) の背景誤差共分散の水平相関。相対渦度、非バランス気温等、変分法の制御変数の詳細は (竹内 2002) を参照。

### 3.13.6 JRA-55 からの改善点

#### (1) 全球エネルギー収支

地球規模のエネルギー循環は、温室効果ガスの増加やエアロゾルの変化、それに伴うフィードバックによって変化しており、水循環の強さや時間変化とともに、大きな関心もたれている。大気再解析では、データ同化により解析インクリメントが生じることから、エネルギーの時間保存性が担保されていない。しかし、再解析のエネルギー収支の評価を行うことは、データ同化システム、特に予報モデルの物理過程の性能評価になるとともに、海洋・陸面モデルの駆動データとしての性能を示すことになる。近年の衛星観測の充実により、大気上端における放射は正確に測定されるようになってきている。一方、気候系内部や地表面でのエネルギーの流れは、衛星による直接測定ができないため、大気上端と比べ不確か性が大きい。Wild et al. (2013) は、大気上端と地表面におけるエネルギー収支を、衛星観測と地表の観測データと第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) のシミュレーション結果を用いて推定した。この推定値やその改訂版 (Forster et al. 2021; Wild et al. 2015, 2019, 以下 W19 と表記) の値、推定の際に用いられた衛星観測に基づく放射エネルギーフラックスデータセット (CERES-EBAF Edition 4.0; Loeb et al. 2018; Kato et al. 2018)、大気海洋間のフラックスデータセット Oaflux (Yu 2019) を用い、JRA-3Q の各種エネルギーフラックスの評価を行った。

表 3.13.5 は、大気上端における再解析 (JRA-25, JRA-55, JRA-3Q, ECMWF 再解析 ERA5 (Hersbach et al. 2020)) と CERES-EBAF の 2002 年から 2008 年の年平均全球エネルギーフラックス及び W19 の現在

気候の見積りを示している。大気上端における JRA-3Q の全球平均短波放射入射量、短波放射反射量はともに W19 の誤差幅の範囲内であり、正味の短波放射入射量は JRA-55 よりも  $3 \text{ W m}^{-2}$  多くなっている。一方、JRA-3Q の外向き長波放射は W19 と比べ  $10 \text{ W m}^{-2}$  程度多く、JRA-55 と同程度だった。結果として、大気上端における JRA-3Q の全球平均正味エネルギーフラックス（下向き正）は JRA-55 の約半分の  $-5.5 \text{ W m}^{-2}$  となった。この点では JRA-55 から改善されたとと言えるが、依然として負値であり地球の冷却傾向を意味する。衛星観測による見積りや ERA5 ではわずかな温暖化傾向を示しており、今後の再解析では、外向き長波放射量の改善とともに正味のエネルギーフラックスの改善も課題である。

表 3.13.6 は、陸上、海上を含めた地表面における再解析および CERES-EBAF の年平均全球平均エネルギーフラックス（2002 年～2008 年平均）と W19 の見積りを示している。JRA-3Q の全球平均各放射フラックスは、いずれも W19 の誤差幅の範囲内にほぼ収まっている。顕熱フラックスも W19 とほぼ同じであったが、潜熱フラックスは約  $7 \text{ W m}^{-2}$  過剰となった。この結果、JRA-3Q の地表面における正味のエネルギーフラックス（下向き正）は、 $-4.4 \text{ W m}^{-2}$  となり、W19 とは約  $5 \text{ W m}^{-2}$  の差がみられた。また、海面上のみの正味のエネルギーフラックス（下向き正）は  $-6.5 \text{ W m}^{-2}$  であり、JRA-55 の  $-15.9 \text{ W m}^{-2}$  から大きく変わったが、依然として負の値を示している。この量は、海洋が温暖化していれば正になる量であり、Wild et al. (2015) の推定では  $+0.8 \text{ W m}^{-2}$  を示す。Valdivieso et al. (2017) によれば、海洋／結合再解析相互比較プロジェクトに参加している多くの再解析システムは正值を示しており、不確実性の幅は大きいが全球海洋の温暖化を示している。今後の再解析ではエネルギーインバランスの再現の改善も考慮すべき課題である。

## (2) 熱帯低気圧

JRA-55 では、JRA-25 に比べて全般的な熱帯低気圧の検出率は向上したものの、現実にはない長期的な弱体化傾向がみられることが指摘された（古林ほか 2015）。この課題に対処するため、JRA-3Q では、JRA-55 まで利用されていた熱帯低気圧周辺風の算出方法から変更し、気象庁現業システムに基づく熱帯低気圧ボーガスデータ作成手法を採用した。

図 3.13.7 に Hatsushika et al. (2006) の手法を基に計算した JRA-3Q および JRA-55 の熱帯低気圧検出率を示す。上述の通り、JRA-55 は 1980 年代後半以降、検出率の低下傾向がみられる一方、JRA-3Q は、JRA-55 でみられた弱体化傾向は解消され、期間を通して概ね 90 % を超える値を示している。このような改善には、気象庁のボーガス算出方法に変更したことにより、熱帯低気圧の空間構造をより適切に捉えた熱帯低気圧ボーガ

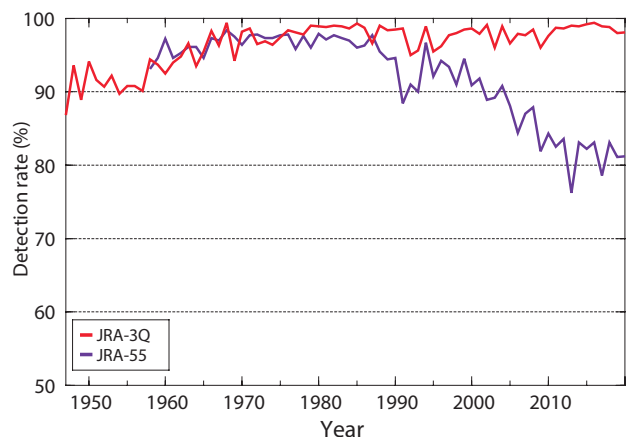


図 3.13.7 JRA-3Q 及び JRA-55 における熱帯低気圧の全球検出率

スの利用が可能になったことの寄与が大きいと考えられる。

## 3.13.7 JRA-3Q の基本特性

### (1) 気温解析値の時間均質性

近年の再解析データセットにおける長期変化傾向の再現性については、衛星輝度温度のバイアス補正手法の高度化等により、旧世代のものに比べて概ね改善している（例えば、Simmons et al. 2014, 2017）。他方、現在の充実した観測システムに対して最適化されたデータ同化システム（特に背景誤差共分散）を観測データの少ない過去期間に適用した場合に、モデルバイアスを十分に拘束できず、時間的均質性が損なわれる事例も報告されている（例えば、Simmons et al. 2020）。JRA-3Q データは数十年規模変動や気候変化に関する研究を含む幅広い分野において利用が期待されるため、その時間的均質性を評価しておくことは非常に重要である。ここでは、JRA-55 及び独立した観測データセットで再現されている長周期変動や長期変化傾向との比較を行う。

### 地上

図 3.13.8 は、全球平均地上気温について、JRA-3Q の月別時系列と、JRA-55、ERA5 及び独立な観測データセットとの比較を示している。独立な観測データセットとして、ここでは、ハドレーセンター／気候研究ユニットの全球気温データセット HadCRUT5 (Morice et al. 2021)、NOAA 全球地上気温データセット (NOAA-GlobalTemp: NOAA Global Surface Temperature Dataset; Huang et al. 2020)、ゴダード宇宙科学研究所地上気温データセット (GISTEMP: Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature; Lenssen et al. 2019)、Berkeley Earth データセット (Rohde and Hausfather 2020) を用いる。なお、JRA-55 と JRA-3Q の全球平均地上気温を算出する際、海上においては、船舶の気温観測のバイアスによる影響 (Simmons et al. 2004)



表 3.13.5 大気上端の年平均全球エネルギーバランス ( $W m^{-2}$ )。再解析 (JRA-25, JRA-55, JRA-3Q, ERA5) 及び CERES-EBAF の値は 2002~2008 年の期間平均である。W19 の値は Forster et al. (2021) 及び Wild et al. (2015, 2019) によるもので、21 世紀初頭における現在気候を代表しており、括弧内の値は不確実性の幅を表している。

大気上端	W19	JRA-25	JRA-55	JRA-3Q	ERA5	CERES-EBAF
太陽放射入射量	340 (340, 341)	341	341	341	340	340
太陽放射反射量	100 ( 96, 100)	95	100	97	98	99
正味太陽放射吸収量		246	241	244	243	241
外向き赤外放射	239 (236, 242)	255	251	250	242	240
正味放射 (下向き) ( $R_T$ )	0.7 (0.5, 0.9)	-7.9	-10.0	-5.5	0.7	0.8

表 3.13.6 地表面の年平均全球エネルギーバランス ( $W m^{-2}$ )。再解析 (JRA-25, JRA-55, JRA-3Q, ERA5) 及び CERES-EBAF の値は 2002~2008 年の期間平均である。W19 の値は Forster et al. (2021) 及び Wild et al. (2015, 2019) によるもので、21 世紀初頭における現在気候を代表しており、括弧内の値は不確実性の幅を表している。最後の行は全球海上平均正味エネルギーフラックスを表している。

地表面	W19	JRA-25	JRA-55	JRA-3Q	ERA5	CERES-EBAF
下向き太陽放射	185 (179, 189)	197	189	190	188	187
上向き太陽放射	25 ( 22, 26)	25	26	23	24	23
正味太陽放射 (下向き)	160 (154, 166)	172	164	166	164	164
太陽放射吸収量 (大気)	80 ( 74, 91)	75	77	78	79	77
下向き赤外放射	342 (338, 348)	327	338	340	340	345
上向き赤外放射	398 (394, 400)	399	400	400	398	399
正味赤外放射 (上向き)		72	62	60	58	53
顕熱フラックス	21 ( 15, 25)	20	20	21	17	
潜熱フラックス	82 ( 70, 85)	91	93	89	85	
正味エネルギーフラックス (下向き) ( $F_S$ )	0.6 (0.2, 1.0)	-11.6	-11.2	-4.4	4.1	
正味大気吸収 (全エネルギー入力= $R_T-F_S$ )		3.7	1.2	-1.1	-3.3	
正味海上エネルギーフラックス (下向き)	0.8 (0.4, 1.2)	-17.0	-15.9	-6.5	5.5	

を受けていると考えられる解析値の代わりに、背景値を利用している (陸上においては解析値)。

JRA-3Q、ERA5、及び、GISTEMP を除く観測データセットにおける最も気温の高い年の上位 3 位は 2016、2020、2019 年の順で一致している。その他のデータセットにおいても上位 3 位の年は同じだが順番が異なり、JRA-55 では 2016、2019、2020 年、GISTEMP では 2020、2016、2019 年の順となっている。JRA-3Q と JRA-55 の最も気温の高い年の順番の違いは、主に極域とアフリカにおける偏差の違いによるもので、特に北極海では JRA-55 において 2019 年に大きな正偏差となっていた。また、1970 年代以前においては、データセット間に比較的大きな差が見られる。これは主に、観測データの少ない海氷域及び南極大陸における気温推定値の差によるものと考えられる。JRA-55 と JRA-3Q の差については、予報モデルにおける開水・海水排他格子から開水・海水混在格子への改善に伴い (米原 2019)、海水密接度の変動の影響が海水域の気温推定値に表れやすくなったことも要因の一つとして考えられる。従って、海水域において気温の長周期変動の再現性を向上させるためには、海水密接度データの時間的均質性の向上が非常に重要と考えられる。

#### 対流圏下層から下部成層圏

図 3.13.9 は、対流圏下層から下部成層圏までの 4 層の全球平均気温偏差について、JRA-3Q の月別時系列

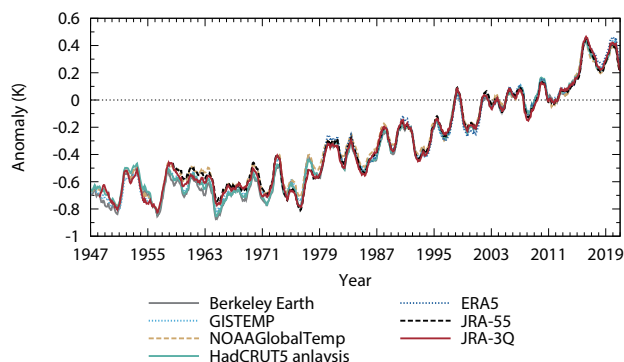


図 3.13.8 JRA-3Q、JRA-55、ERA5、HadCRUT5、NOAAGlobalTemp、GISTEMP、Berkeley Earth の全球平均地上気温の 12 か月移動平均値。JRA-55 と JRA-3Q の全球平均地上気温を算出する際、海上においては背景場を利用している (陸上においては解析値)。偏差はそれぞれのデータセットの 1991~2020 年の期間の気候値に対して計算されている。

と JRA-55 及び独立な観測データセットのものとの比較を示している。独立な観測データセットとして、ここでは、ハドレーセンターのラジオゾンデ気温プロダクト HadAT2 (Thorne et al. 2005) と、マイクロ波探査計 (MSU: Microwave Sounding Unit) 及び改良型マイクロ波探査計 (AMSU: Advanced Microwave Sounding Unit) プロダクト NOAA v4.1 (Zou and Wang 2011)、UAH v6.0 (Spencer et al. 2017)、RSS v4.0 (Mears and

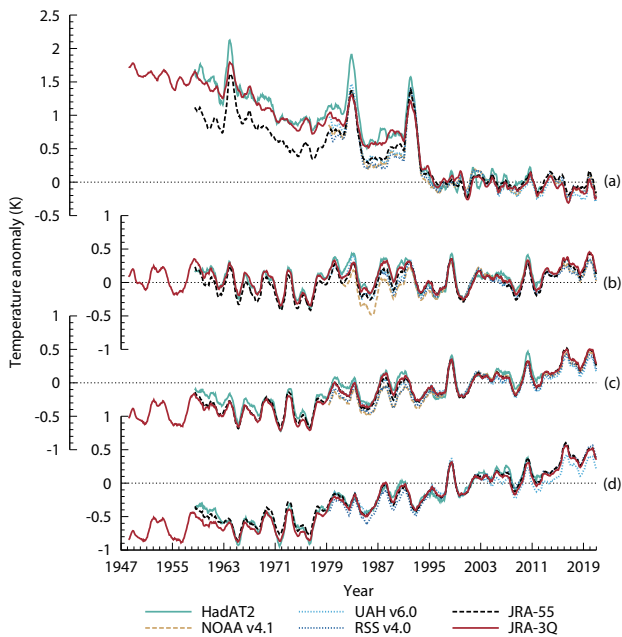


図 3.13.9 (a) 下部成層圏、(b) 対流圏上層、(c) 対流圏中層、(d) 対流圏下層の全球平均気温偏差の 12 か月移動平均値の時系列。RSS v4.0、UAH v6.0、NOAA v4.1 の時系列は MSU チャンネル 4、3、2 の観測値とその対流圏下層への外挿値であるのに対し、JRA-3Q、JRA-55、HadAT2 の時系列は気温から計算した MSU 等価量である。偏差はそれぞれのデータセットの 1995～2005 年の期間の気候値に対して計算されている。

Wentz 2016, 2017) を用いる。

JRA-3Q の全球平均気温では、第 3.13.5 項 (2) で述べた要因により、大規模火山噴火後の成層圏の昇温量が小さい傾向はあるが、その他の点では、ラジオゾンデ気温プロダクトやマイクロ波探査計気温プロダクトと非常によく似た変動が再現されている。特に、JRA-55 では過少だった下部成層圏気温の下降トレンドが JRA-3Q では HadAT2 とほぼ同等になっている (図 3.13.9 (a))。その要因の一つとしては、JRA-55 では 1978 年以前のオゾンデータが月別気候値であったのに対し、JRA-3Q では全期間について気象研究所化学気候モデル MRI-CCM2.1 (Deushi and Shibata 2011) により作成されたオゾン再解析データを利用していることが考えられる。また、JRA-55 で 2006 年以前のラジオゾンデ気温観測のバイアス補正に用いた RAOBCORE (Radiosonde Observation Correction using Reanalyses) V1.4 については、下部成層圏で下降トレンドが小さいことが指摘されており (Haimberger et al. 2012)、JRA-3Q では RISE (RICH with Solar Elevation Dependent) v1.7.2 に更新したことも要因として考えられる。

#### 中部成層圏から成層圏上端

図 3.13.10 は、中部成層圏、上部成層圏、成層圏上端の全球平均気温偏差について、JRA-3Q の月別時系列と JRA-55 及び独立な観測データセットのものとの比較を示している。旧バージョンの成層圏探査計 (SSU:

Stratospheric Sounding Unit) データに基づく衛星観測データセットについては、大きな不確実性があることが指摘されていたほか (Thompson et al. 2012)、同測器による観測が終了した 2006 年半ば以降のデータを取得することができなかった。その後、SSU データの再処理により不確実性の低減が図られているとともに、新しい衛星測器による成層圏気温データとの接続により 2006 年以降のデータが利用可能となっている (Maycock et al. 2018)。ここでは、最新の独立な観測データセットとして、米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) の SSU 及びマイクロ波リムサウンダ (MLS: Microwave Limb Sounder) 成層圏気温プロダクト (Randel et al. 2016) と NOAA の SSU 及び AMSU-A 成層圏気温プロダクト NOAA v3.0 (Zou and Qian 2016) を用いる。

JRA-3Q の長期変化傾向については、1980 年代以降において概ね衛星観測に基づく成層圏気温プロダクトのものと同様に、1970 年代以前においても 1980 年代以降とほぼ同等な長期変化傾向が表現されている。JRA-55 の時系列では、特に成層圏上端において、1950 年代末から 1960 年代にかけて気温が上昇する不自然な変動が見られていたが、これは、この期間において 10hPa 及びそれより上層に到達するラジオゾンデ観測が非常に少なかったことにより生じた低温バイアスによるものと考えられる。JRA-3Q では、予報モデルにおける成層圏の低温バイアスの低減が、このような不自然な変動の解消に寄与したものと考えられる。

他方、JRA-3Q の長周期変動の表現は衛星観測に基づく成層圏気温プロダクトのものとは比べてかなり小さく、JRA-55 のものと比べても弱まっている。これは、JRA-55、JRA-3Q とともに予報モデルにおいて、火山性エアロゾル、太陽定数、成層圏水蒸気量の年々変動が考慮されていないことが原因と考えられる。これに加えて、第 3.13.5 項 (2) で述べたように、JRA-3Q では現在の充実した観測システムに対して最適化された水平相関距離が短い背景誤差共分散を利用しているため、観測データの少ない過去期間においてモデルバイアスを十分に拘束できていないことも原因と考えられる。成層圏気温の変動の再現性向上には、予報モデルに現在考慮されていない前述の要因を取り入れるとともに、観測システムの変遷に応じた背景誤差共分散の最適化が必要と考えられる。

#### (2) カスリーン台風 (1947 年 9 月) の表現

JRA-3Q の 1957 年以前の期間は気象庁再解析では初めて解析対象とした期間である。この期間は、日本で大きな被害をもたらした災害がいくつも発生している点で重要である。一方、ラジオゾンデ定時観測の国際的なネットワークが確立されていない期間でもあるため、利用できる観測データが乏しい。従って、利用

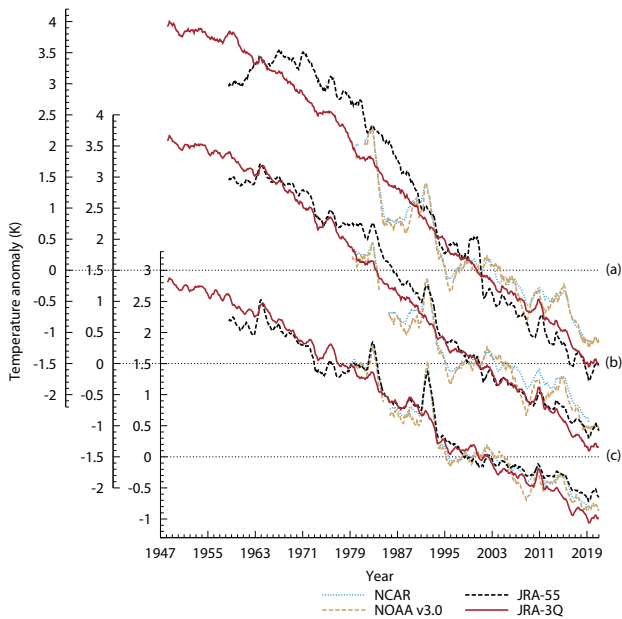


図 3.13.10 (a) 成層圏上端、(b) 上部成層圏、(c) 中部成層圏の全球平均気温偏差の12か月移動平均値の時系列。NOAA v3.0とNCARの時系列はSSUチャンネル3、2、1の観測値であるのに対し、JRA-3QとJRA-55の時系列は気温から計算したSSU等価量である。偏差はそれぞれのデータセットの1995~2005年の期間の気候値に対して計算されている。

にあたっては綿密な品質確認を行うことが重要である。本節では、国際地球観測年以前の期間における代表的な顕著現象として、1947年9月のカスリーン台風の事例を例に挙げ、JRA-3Qにおける再現性を見ていく。

カスリーン台風は1947年9月8日にマリアナ諸島の東で発生し、紀伊半島の南海上を北上した後、9月15日に北緯32度を超えてから北東に進路を変え、同日夜に房総半島の南端をかすめて、16日には三陸沖に進んだ。台風が日本に接近した時は衰弱しており、強風による被害は少なかった。しかし、台風により日本付近に停滞していた前線の活動が活発化し、関東地方と東北地方では大雨となった。関東南部では利根川と荒川の堤防が決壊し、埼玉県東部から東京で多くの家屋が浸水した。この水害は、首都圏の治水政策を論ずる際には今なお言及されている(例えば、Cabinet Office 2021)。

図 3.13.11 にカスリーン台風が日本に接近した1947年9月14日06UTCにおけるJRA-3Q、20CRv3 (Slivinski et al. 2019)、CERA-20C (Laloyaux et al. 2018)の各再解析の海面更正気圧と当時の天気図を示す。JRA-3Q、20CRv3共に当時の天気図とほぼ同じ位置にカスリーン台風が表現されていることが分かる。一方、CERA-20Cではカスリーン台風に対応する低圧部の表現が弱くなっており、位置も当時の天気図と比べて南にずれている。この原因としては、CERA-20Cにおいて、熱帯低気圧のベストトラックデータが品質

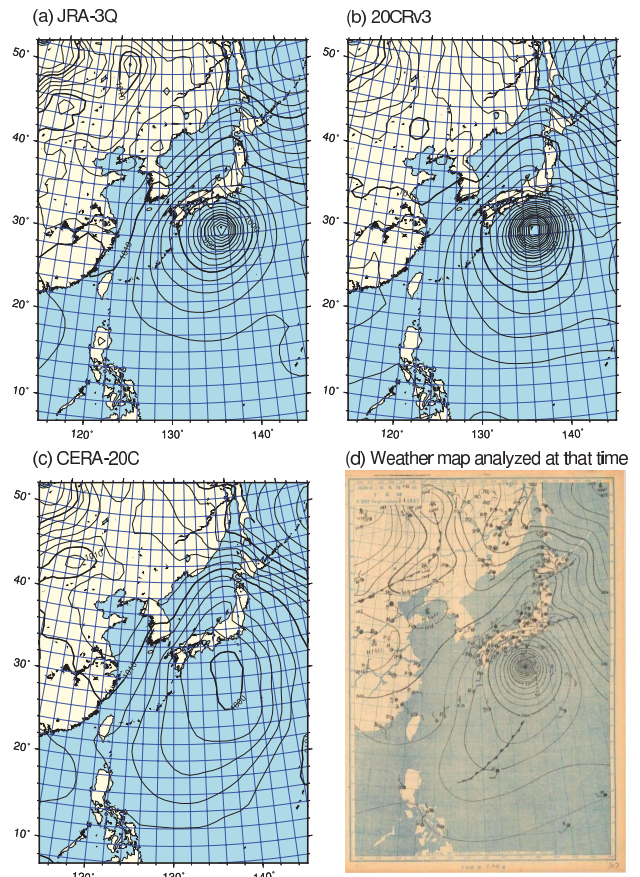


図 3.13.11 1947年9月14日における(a) JRA-3Q、(b) 20CRv3、(c) CERA-20Cの海面更正気圧解析値(hPa)と(d)当時の天気図(気象庁提供)

管理によって排除された可能性が考えられる。

### 3.13.8 まとめ

長期再解析データの期間延長と品質向上を図るため、1947年9月以降を対象とするJRA-3Q長期再解析を実施した。JRA-3Qでは、JRA-55以降の現業全球数値予報システム及びSST解析の開発成果や、国内外の気象機関等によるデータレスキュー、衛星運用機関による衛星データの再処理による過去の観測データ拡充の成果等を活用している。これらの成果の活用により、JRA-55から更にプロダクトの品質が向上していることが、2日予報スコア及びラジオゾンデ観測データに対する背景値の適合度による評価等により示された。

JRA-55の課題の一つであった大気上端及び地表面における全球正味エネルギーフラックスの大きな上向きバイアスは大幅に減少し、JRA-55と比べて観測に基づく見積りに近づいた。この改善は、予報モデルにおける各種物理過程の全般的な改良によるものと考えられる。しかしながら、自然及び人為的な外部強制に対する気候システムの応答に関する理解を深めるには依然として観測に基づく見積りからの差は大きく、エネルギー・水収支の更なる改善が必要と考えられる。JRA-55で見られた熱帯低気圧検出率の偽の低下傾向については、

気象庁現業システムに基づく熱帯低気圧ポーガスデータ作成手法の利用により解消した。下部成層圏気温の長期変化傾向の表現も改善しており、MRI-CCM2.1を用いて全期間のオゾン再解析データを作成し利用していること、ラジオゾンデ気温観測のバイアス補正が改善していることが主な要因と考えられる。また、対流圏上層における高温バイアスは大幅に解消し、対流圏下層における低温バイアスも緩和した。気象庁再解析としては初めて解析対象とした1957年以前の期間においては、カスリーン台風のような大きな被害をもたらした台風がJRA-3Qの海面更正気圧場に明瞭に表現されており、当時作成された天気図とも概ね整合している。

他方、いくつかの問題点も明らかになっている。大規模火山噴火後の成層圏の昇温量が小さい傾向があり、予報モデルにおいて火山性エアロゾルの年々変動が考慮されていないことが主要因と考えられる。加えて、JRA-3Qでは現在の充実した観測システムに対して最適化された水平相関距離が短い背景誤差共分散を利用しているため、観測データの少ない過去期間においてモデルバイアスを十分に拘束できない場合があり得ることも推測される。後者の要因については、1970年代以前の対流圏中層のラジオゾンデ気温観測との整合性がJRA-55と比べて若干改悪していること的主要原因とも考えられる。実際の年々変動に則した放射強制力の導入と観測システムの変遷に応じた背景誤差共分散行列の調整は今後の課題である。

将来の再解析の課題としては、現在の現業数値予報システムで用いられているハイブリッド同化やアウトグループ、衛星輝度温度データの全天同化等を導入し、雲・降水域を含めより多くの観測情報を解析に反映させることが挙げられる。また、海面や陸面、雪氷域での下部境界条件をより現実的に解析するため、陸面や海洋データ同化の高度化も必要と考えられる。

## 参考文献

Abe, M., K. Shimoji, Y. Kosaka, and S. Kobayashi, 2021: AMV reprocessing activity for JRA-3Q at MSC/JMA. *Proceeding of 15th International Winds Workshop*, 12–16.

Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.

Bronnimann, S. and A. Stickler, 2013: *The Comprehensive Historical Upper Air Network*. Research Data Archive at NCAR, Computational and Information Systems Laboratory, doi:10.5065/AHPM-FC10, Accessed 29 Aug 2017.

Cabinet Office, 2021: *White Paper Disaster Management in Japan*. Cabinet Office, Japan, 258 pp., <https://www.bousai.go.jp/en/documentation/>

[white\\_paper/pdf/2021/R3\\_hakusho\\_english.pdf](https://www.bousai.go.jp/en/documentation/white_paper/pdf/2021/R3_hakusho_english.pdf).

Central Meteorological Observatory, 1948: *Aerological data of Japan*.

Compo, et al., G. P., 2019: *The International Surface Pressure Databank version 4*. Research Data Archive at NCAR, Computational and Information Systems Laboratory, doi:10.5065/9EYR-TY90, Accessed 17 Mar 2020.

Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385–3396.

Deushi, M. and K. Shibata, 2011: Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model version 2 for the study of tropospheric and stratospheric chemistry. *Pap. Meteor. Geophys.*, **62**, 1–46.

Dunn, R. J. H., 2019: HadISD version 3: monthly updates. Hadleycentre tech. note, Met Office, 8 pp., Exeter, UK. <https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/publications/science/climate-science-technical-notes>.

Durre, I., X. Yin, R. S. Vose, S. Applequist, and J. Arnfield, 2016: *Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA), Version 2*. NOAA NCEI, doi:10.7289/V5X63K0Q, Accessed 29 Jul 2017.

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D. J. Lunt, T. Mauritsen, M. D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V. and P. Zhai and A. Pirani and S. L. Connors and C. Péan and S. Berger and N. Caud and Y. Chen and L. Goldfarb and M. I. Gomis and M. Huang and K. Leitzell and E. Lonnoy and J. B. R. Matthews and T. K. Maycock and T. Waterfield and O. Yelekçi and R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 923–1054.

Freeman, E., S. D. Woodruff, S. J. Worley, S. J. Lubker, E. C. Kent, W. E. Angel, D. I. Berry, P. Brohan, R. Eastman, L. Gates, W. Gloeden, Z. Ji, J. Lawrimore, N. A. Rayner, G. Rosenhagen, and S. R. Smith, 2017: ICOADS Release 3.0: A major update to the historical marine climate record.

- Int. J. Climatol.*, **37**, 2211–2237.
- Haimberger, L., C. Tavalato, and S. Sperka, 2008: Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records—Some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data. *J. Climate*, **21**, 4587–4606.
- Haimberger, L., C. Tavalato, and S. Sperka, 2012: Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations. *J. Climate*, **25**, 8108–8131.
- Hans, I., M. Burgdorf, S. A. Buehler, M. Prange, T. Lang, and V. O. John, 2019: An uncertainty quantified fundamental climate data record for microwave humidity sounders. *Remote Sens.*, **11**, 548, doi:10.3390/rs11050548.
- Hatsushika, H., J. Tsutsui, M. Fiorino, and K. Onogi, 2006: Impact of wind profile retrievals on the analysis of tropical cyclones in the JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 891–905.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, de P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thépaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049.
- Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, **27**, 57–75.
- 本田有機, 坂本雅巳, 2019: 全球モデル (GSM) の概要. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 136–155.
- Huang, B., M. J. Menne, T. Boyer, E. Freeman, B. E. Gleason, J. H. Lawrimore, C. Liu, J. J. Renne, C. Schreck, F. Sun, R. Vose, C. N. Williams, X. Yin, and H.-M. Zhang, 2020: Uncertainty estimates for sea surface temperature and land surface air temperature in NOAA GlobalTemp version 5. *J. Climate*, **33**, 1351–1379.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the KOBE collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865–879.
- JMA, 1961: *Official Report of Typhoon Vera*.
- JMA, 2007: *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-Processing and Forecasting System and Numerical Weather Prediction*. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 194 pp., <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/nwp-top.htm>.
- JMA, 2013: *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 188 pp., <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/nwp-top.htm>.
- JMA, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 229 pp., <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/nwp-top.htm>.
- Kato, S., F. G. Rose, D. A. Rutan, T. J. Thorsen, N. G. Loeb, D. R. Doelling, X. Huang, W. L. Smith, W. Su, and S.-H. Ham, 2018: Surface irradiances of Edition 4.0 Clouds and the Earth’s Radiant Energy System (CERES) energy balanced and filled (EBAF) data product. *J. Climate*, **31**, 4501–4527.
- 川合秀明, 2004: 雲水過程. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 72–80.
- 気象庁, 2015: JRA-55 の積雪深解析の不具合について. 気象庁地球環境・海洋部, 18 pp. <https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index-ja.html#quality>.
- Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IB-TrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 363–376.
- 古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌己, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66–115.
- Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi,

- H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa; T. Y. Tanaka, T. Tokuhira, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 49–109.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, S1–S18.
- Laloyaux, P., de E. Boisseson, M. Balmaseda, J.-R. Bidlot, S. Broennimann, R. Buizza, P. Dalhgren, D. Dee, L. Haimberger, H. Hersbach, Y. Kosaka, M. Martin, P. Poli, N. Rayner, E. Rustemeier, and D. Schepers, 2018: CERA-20C: A coupled reanalysis of the twentieth century. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **10**, 1172–1195.
- Lau, K. M., Y. Ding, J.-T. Wang, R. Johnson, T. Keenan, R. Cifelli, J. Gerlach, O. Thiele, T. Rickenbach, S.-C. Tsay, and P.-H. Lin, 2000: A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SC-SMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1261–1270.
- Lenssen, N. J. L., G. A. Schmidt, J. E. Hansen, M. J. Menne, A. Persin, R. Ruedy, and D. Zyss, 2019: Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **124**, 6307–6326.
- Loeb, N. G., D. R. Doelling, H. L. Wang, W. Y. Su, C. Nguyen, J. G. Corbett, L. S. Liang, C. Mitrescu, F. G. Rose, and S. Kato, 2018: Clouds and the earth’s radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) top-of-atmosphere (TOA), edn.-4.0 data product. *J. Climate*, **31**, 895–918.
- Louis, J.-F., M. Tiedtke, and J.-F. Geleyn, 1982: A short history of the operational PBL-parameterization at ECMWF. *Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization*, Reading, UK, ECMWF, 59–79, <https://www.ecmwf.int/en/publications>.
- Maycock, A. C., W. J. Randel, A. K. Steiner, A. Y. Karpechko, J. Christy, R. Saunders, D. W. J. Thompson, C.-Z. Zou, A. Chrysanthou, N. L. Abraham, H. Akiyoshi, A. T. Archibald, N. Butchart, M. Chipperfield, M. Dameris, M. Deushi, S. Dhomse, G. D. Genova, P. Jöckel, D. E. Kinnison, O. Kirner, F. Ladstädter, M. Michou, O. Morgenstern, F. O’Connor, L. Oman, G. Pitari, D. A. Plummer, L. E. Revell, E. Rozanov, A. Stenke, D. Visoni, Y. Yamashita, and G. Zeng, 2018: Revisiting the mystery of recent stratospheric temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 9919–9933.
- Mears, C. A. and F. J. Wentz, 2016: Sensitivity of satellite-derived tropospheric temperature trends to the diurnal cycle adjustment. *J. Climate*, **29**, 3629–3646.
- Mears, C. A. and F. J. Wentz, 2017: A satellite-derived lower-tropospheric atmospheric temperature dataset using an optimized adjustment for diurnal effects. *J. Climate*, **30**, 7695–7718.
- Morice, C. P., J. J. Kennedy, N. A. Rayner, J. P. Winn, E. Hogan, R. E. Killick, R. J. H. Dunn, T. J. Osborn, P. D. Jones, and I. R. Simpson, 2021: An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **126**, e2019JD032361, doi:10.1029/2019JD032361.
- Naoe, H., T. Matsumoto, K. Ueno, T. Maki, M. Deushi, and A. Takeuchi, 2020: Bias correction of multi-sensor total column ozone satellite data for 1978–2017. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 353–377.
- Okamoto, N., M. D. Yamanaka, S.-Y. Ogino, H. Hashiguchi, N. Nishi T. Sribimawati, and A. Numaguchi, 2003: Seasonal variations of tropospheric wind over Indonesia: comparison between collected operational radiosonde data and NCEP reanalysis for 1992–99. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 829–850.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center’s spectral statistical interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.
- Randel, W. J., A. K. Smith, F. Wu, C.-Z. Zou, and H. Qian, 2016: Stratospheric temperature trends over 1979–2015 derived from combined SSU, MLS, and SABER satellite observations. *J. Climate*, **29**, 4843–4859.
- Randel, W. J., F. Wu, J. M. Russell III, A. Roche, and J. W. Waters, 1998: Seasonal cycles and QBO variations in stratospheric CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O observed in UARS HALOE data. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 163–185.
- Rohde, R. A. and Z. Hausfather, 2020: The Berkeley Earth land/ocean temperature record. *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 3469–3479.

- 佐藤信夫, 1989: 生物圏と大気圏の相互作用. 数値予報課報告・別冊第 35 号, 気象庁予報部, 4–73.
- Saunders, R., 2008: RTTOV-9 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, 74 pp. <https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/rttov/>.
- Saunders, R., J. Hocking, P. Rayer, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, P. Brunel, F. Karbou, and F. Aires, 2012: RTTOV-10 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, 31 pp. <https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/rttov/>.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- Shibata, K., M. Deushi, T. T. Sekiyama, and H. Yoshimura, 2005: Development of an MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry. *Pap. Meteor. Geophys.*, **55**, 75–119.
- Simmons, A. C. Soci, J. Nicolas, B. Bell, P. Berrisford, R. Dragani, J. Flemming, L. Haimberger, S. Healy, H. Hersbach, A. Horányi, A. Inness, J. Munoz-Sabater, R. Radu, and D. Schepers, 2020: Global stratospheric temperature bias and other stratospheric aspects of ERA5 and ERA5.1. ECMWF Technical Memorandum 859, ECMWF, 38 pp., Reading, UK. doi:10.21957/rcxqfmg0.
- Simmons, A. J., P. Berrisford, D. P. Dee, H. Hersbach, S. Hirahara, and J.-N. Thépaut, 2017: A reassessment of temperature variations and trends from global reanalyses and monthly surface climatological datasets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 101–119.
- Simmons, A. J., P. Poli, D. P. Dee, P. Berrisford, H. Hersbach, S. Kobayashi, and C. Peubey, 2014: Estimating low-frequency variability and trends in atmospheric temperature using ERA-Interim. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 329–353.
- Simmons, A. J., P. D. Jones, da V. Costa Bechtold, A. C. M. Beljaars, P. W. Kållberg, S. Saarienen, S. M. Uppala, P. Viterbo, and N. Wedi, 2004: Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature. *J. Geophys. Res.*, **109**, D24 115, doi:10.1029/2004JD005306.
- Slivinski, G. P. Compo, L. C., J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, B. S. Giese, C. McColl, R. Allan, X. Yin, R. Vose, H. Titchner, J. Kennedy, L. J. Spencer, L. Ashcroft, S. Brönnimann, M. Brunet, D. Camuffo, R. Cornes, T. A. Cram, R. Crouthamel, F. Domínguez-Castro, J. E. Freeman, J. Gergis, E. Hawkins, P. D. Jones, S. Jourdain, A. Kaplan, H. Kubota, F. L. Le Blancq, T.-C. Lee, A. Lorrey, J. Luterbacher, M. Maugeri, C. J. Mock, G. W. K. Moore, R. Przybylak, C. Pudmenzky, C. Reason, V. C. Slonosky, C. A. Smith, B. Tinz, B. Trewin, M. A. Valente, X. L. Wang, C. Wilkinson, K. Wood, and P. Wyszynski, 2019: Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 2876–2908.
- Smith, A., N. Lott, and R. Vose, 2011: The Integrated Surface Database: Recent developments and partnerships. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 704–708.
- Spencer, R. W., J. R. Christy, and W. D. Braswell, 2017: UAH Version 6 global satellite temperature products: Methodology and results. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 121–130.
- 竹内義明, 2002: 全球 3 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 17–36.
- Thompson, D. W. J., D. J. Seidel, W. J. Randel, C.-Z. Zou, A. H. Butler, C. Mears, A. Osso, C. Long, and R. Lin, 2012: The mystery of recent stratospheric temperature trends. *Nature*, **491**, 692–697.
- Thorne, P. W., D. E. Parker, S. F. B. Tett, P. D. Jones, M. McCarthy, H. Coleman, and P. Brohan, 2005: Revisiting radiosonde upper-air temperatures from 1958 to 2002. *J. Geophys. Res.*, **110**, D18 105, doi:10.1029/2004JD005753.
- Uppala, S. M., P. W. Kållberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarienen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. Van De Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, and J. Woollen, 2005: The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961–3012.
- Valdivieso, M., K. Haines, M. Balmaseda, Y. Chang, M. Drevillon, N. Ferry, Y. Fujii, A. Köhl, A. Storto, T. Toyoda, X. Wang, J. Waters, Y. Xue, Y. Yin,

- B. Barnier, F. Hernandez, A. Kumar, T. Lee, S. Masina, and K. A. Peterson, 2017: An assessment of air-sea heat fluxes from ocean and coupled reanalyses. *Clim. Dyn.*, **49**, 983–1008.
- van de Berg, L., J. Gustafsson, and A. Yildirim, 2001: Reprocessing of atmospheric motion vectors from Meteosat image data. *ECMWF ERA-40 Project Report Series 3*, ECMWF, 159–168, <https://www.ecmwf.int/en/publications>.
- Wanzong, S., D. Santek, C. S. Velden, J. Daniels, D. Stettner, W. C. Bresky, and A. Bailey, 2014: Historical GOES AMV reprocessing. *Twelfth International Winds Workshop*, Copenhagen, Denmark, <https://cimss.ssec.wisc.edu/iwgg/iwggmeetings.html>.
- Wild, M., D. Folini, C. Schär, N. Loeb, E. G. Dutton, and G. König-Langlo, 2013: The global energy balance from a surface perspective. *Clim. Dyn.*, **40**, 3107–3134.
- Wild, M., M. Z. Hakuba, D. Folini, P. Dörig-Ott, C. Schär, S. Kato, and C. N. Long, 2019: The cloud-free global energy balance and inferred cloud radiative effects: an assessment based on 3 direct observations and climate models. *Clim. Dyn.*, **52**, 4787–4812.
- Wild, M., D. Folini, M. Z. Hakuba, C. Schär, S. I. Seneviratne, S. Kato, D. Rutan, C. Ammann, E. F. Wood, and G. König-Langlo, 2015: The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. *Clim. Dyn.*, **44**, 3393–3429.
- Yasunari, T. (ed.), 2001: Special Issue: GEWEX Asian monsoon experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79B**, 605 pp.
- 米原仁, 2019: 海水及び海面. 数値予報課報告・別冊第65号, 気象庁予報部, 93–95.
- Yu, L., 2019: Global air-sea fluxes of heat, fresh water, and momentum: energy budget closure and unanswered 5 questions. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **11**, 227–248.
- Yukimoto, S., H. Kawai, T. Kosshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model, Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 931–965.
- Zou, C.-Z. and H. Qian, 2016: Stratospheric temperature climate data record from merged SSU and AMSU-A observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **33**, 1967–1984.
- Zou, C.-Z. and W. Wang, 2011: Intersatellite calibration of AMSU-A observations for weather and climate applications. *J. Geophys. Res.*, **116**, D23 113, doi:10.1029/2011JD016205.