

気象庁長期再解析（長期の過去気候データセットの整備）の紹介

Introduction to reanalyses of the Japan Meteorological Agency :
Preparation of past long term climate datasets

高坂 裕貴*

1. はじめに

長期再解析の目的は、長期間にわたり均質かつ高品質な気候データセットを作成することである。再解析データは気象庁において、季節予報、気候系監視等の各種業務で基盤データとして活用されている。また、国内外においても、気象・気候・海洋学等の学術研究や、農業気象学や再生可能エネルギー等の応用分野において幅広く利用されている。本稿では、気象庁における長期再解析実施の概要について紹介する。

2. 長期再解析とは

本章では、長期再解析における気候データセットの作成方法について説明する。長期再解析で作成する気候データセットは、季節予報や気候系監視等の基盤データとして活用するため、以下の条件を満たしている必要がある。

- (a) 過去数十年にわたって地球全体をカバー
- (b) できるだけ多くの物理量（例えば、下向き太陽放射、雲量、地上 10m での風等）を収録
- (c) 高品質かつ時間的・空間的に均質

このような気候データセットを作成するためのアプローチの一つとしては、観測データのみを使う方法が考えられる。多くの気象機関では数十年から百年分の地上・高層観測データを蓄積しており、これを用いることにより観測地点の周辺では高品質なデータセットを作成することが可能である。一方で、観測データの分布は不均一であるため、観測データのみから地球全体をカバーしたデータセットを作成することは困難である。

この欠点を補うために、数値予報モデルによる直近の予測値を基に観測データで修正し、もっともらしい解析値を求めるという方法がある（図1）。こ

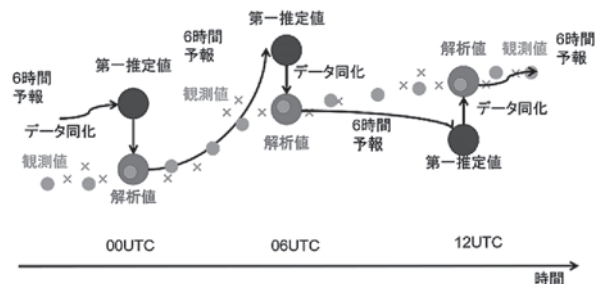


図1 データ同化サイクルの模式図

こで基となる予測値を「第一推定値」、解析値を求めるプロセスを「データ同化」と呼んでいる。データ同化では、観測値を単純に解析値とするのではなく、観測値と第一推定値の双方に重みをつけて内挿して解析値を求めている。解析値が観測値側に寄るかそれとも第一推定値側に寄るかは、データ同化を実行する際にそれぞれの値の持つ誤差の統計的性質として与えられる「観測誤差」と「背景誤差」（第一推定値の誤差）の設定によって決まることになる。観測誤差が背景誤差より小さい場合、解析値は観測データ側に寄り、逆に観測誤差が大きい場合、解析値は第一推定値側に寄ることになる。

現業（日々の予報作業）で利用する解析と気候監視等で利用する解析（再解析）は主に二つの点で異なっている。一点目としては、利用されるデータ同化（解析予報）システムが挙げられる。現業の解析では予報精度を向上させるためにデータ同化システムは随時改良されるのに対し、再解析は高品質かつ時間的・空間的に均質なデータセットを作成するためある時点で最新のシステムを凍結して継続利用している。二点目としては、利用される観測データが挙げられる。現業の解析では準リアルタイム実行に伴う時間的な制約により入電の遅れた観測データ

*気象庁情報基盤部数値予報課

を利用できないのに対し、再解析ではこのような観測データも利用することにより品質の向上を図っている。

長期再解析への取り組みは、主要な数値予報センターや気象研究機関において継続して行われている。気象庁では、長期再解析（JRA）として、これまでに第1次（JRA-25）を実施し、第2次であるJRA-55のプロダクト作成・提供を行っている。現在、第3次となるJRA-3Q（Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century）を実施しており、公開に向けた準備を行っていく予定である。表1にはJRA-25、JRA-55及びJRA-3Qの各仕様の概要を示す。最初の長期再解析となるJRA-25は、気象庁と電力中央研究所の共同で実施され、当時の他の機関の再解析と比べて、降水量分布や熱帯低気圧、大陸西岸沖の層積雲の再現性が優れたプロダクトが作成された¹⁾。しかしながら、下部成層圏の低温バイアスやアマゾン域の乾燥バイアスといった問題が判明した他、再解析対象期間が1979年以降に限られており、十年、数十年規模変動や気候変化の研究にはデータ期間が不十分という制約もあった。これらの課題に対応し、JRAの品質向上を図るため、次の章で述べるJRA-55へと切り替えた。

3. 気象庁55年長期再解析（JRA-55）

3.1 JRA-55の概要

JRA-25のデータ同化システムが構築されて以降、気象庁の現業数値解析予報システムには、様々な開発成果が導入された結果、モデルバイアスの軽減、解析値の力学的整合性の向上、衛星データの取り扱いの高度化が図られている。また、観測データに関しては、各国の気象衛星機関における衛星観測データの再処理（最新の処理アルゴリズムを過去の衛星観測データに適用することにより、高品質で均質な衛星プロダクトを作成する取組みのこと）等、均質性向上のための取組みが進んでいる。

これらの進展の成果を活用しながら、気象庁はよ

表1 JRAの仕様比較

	第3次長期再解析 (JRA-3Q)	第2次長期再解析 (JRA-55)	第1次長期再解析 (JRA-25)
解析期間	1940年代末～現在	1958年～現在	1979～2014年
データ同化システム	2018年12月版	2009年12月版	2004年3月版
水平分解能	約40km	約55km	約110km
鉛直層数	100層	60層	40層
海面水温	1980年代中頃まで1.0°	1.0°	1.0°
	1980年代中頃以降0.25°		
オゾン	オゾン解析値（全期間）	1978年まで気候値 1979年以降オゾン解析値	1979年以降オゾン解析値

り長期間の高品質な気候データセットの作成を目的に、日本では2度目となるJRA-55長期再解析^{2, 3)}を実施した。JRA-55は、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た1958年以降を解析対象期間としており、十年、数十年規模変動や気候変化の研究にも利用可能である。

本章ではJRA-55の基本特性について概略を述べた後、利用上の注意点について説明する。

3.2 JRA-55の基本特性

図2は、対流圏下層から下部成層圏までの4層の気温偏差を82.5°N～82.5°Sの領域で平均したものについて、JRA-55の月別時系列と、既存の再解析データ、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（HadAT2⁴⁾）とリモートセンシングシステム（RSS）のMSU及びAMSUマイクロ波探査計気温データV3.3^{5, 6)}を用いる。JRA-25の気温解析値には1998年頃に不自然なジャンプが生じているという問題があった。一方で、JRA-55は特に1970年代以前の対流圏下層から対流圏上層については、NCEP（米国環境予測センター）/NCAR（米国大気研究センター）再解析やERA-40（欧州中期予報センターが実施した再解析）と比べて、HadAT2と非常によく似た変動が再現されている。

図3は、500hPa高度における2日予報について、

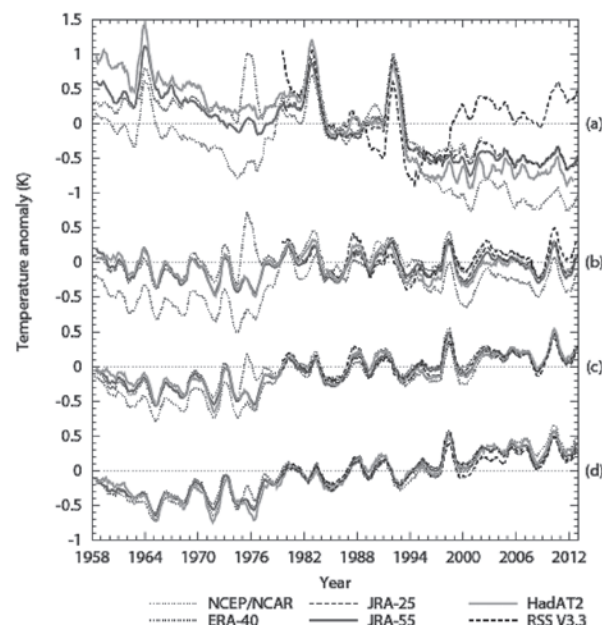


図2 (a)下部成層圏、(b)対流圏上層、(c)対流圏中層、(d)対流圏下層の気温偏差の82.5°N～82.5°Sの領域平均の12か月移動平均値の時系列

出典：Kobayashi et al. (2015)

JRA-25, JRA-55 及び気象庁現業システムの二乗平均平方根誤差を示している。JRA-55 と JRA-25 は現業システムと比べて予報スコアの変動が小さくなっており、再解析プロダクトの時間的均質性の高さが窺われる。また、JRA-55 は JRA-25 と比べて、予報スコアに大幅な向上が見られる。特に、南半球における予報スコアの向上には、データ同化システムの改善に加えて、JRA-25 本計算実施以降に新たに取得した衛星観測データの利用も寄与しているものと考えられる。

3.3 JRA-55 の全球エネルギー収支

本節では、JRA-55, JRA-25 で再現された年平均全球エネルギーバランスについて、Wild et al. (2013)⁷⁾ による地上観測データに基づいた見積りを用いて評価する。更に、JRA-55 で計算された大気上端の放射フラックスについて、Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) の衛星観測データ、及び JRA-25 のものとの違いを考察する。

表 2 は Wild et al. (2013)、及び JRA-25, JRA-55 における大気上端と地表面の年平均全球エネルギーバランスをそれぞれ示している。JRA-55 は JRA-25 と比べて、地表面下向き赤外放射フラックス及び大気上端太陽放射反射量が Wild et al. (2013) の見積りに近づいている。JRA-55 のエネルギーバランスは、全球平均で見ると、大気上端外向き赤外放射フ

ラックス、水循環、正味エネルギーフラックスを除き、概ね Wild et al. (2013) の不確実性の幅に収まっている。

図 4 は、JRA-55 の大気上端の放射フラックスと、CERES-Energy Balanced and Filled (EBAF) フラックスデータセット・エディション 2.7⁸⁾ と JRA-25 のものとの差の分布図をそれぞれ示している。JRA-55 の太陽放射反射量は JRA-25 のものから全般的に増加しており、特にアマゾン川流域と砂漠及び半砂漠域で大幅な増加が見られる。CERES と比較すると、JRA-55 の太陽放射反射量は熱帯・亜熱帯で過剰、南大洋で過少となっている。また、外向き長波放射について見ると、JRA-55 は CERES と比べて特に熱帯の対流活発域で過剰となっている。

3.4 JRA-55 データの入手方法と利用上の注意点

JRA-55 についてのより詳細な情報は JRA-55 のホームページ⁹⁾ で公開している。JRA-55 に関する最新のお知らせ、プロダクト利用手引書、参考文献等の情報を掲載しているので参照いただきたい。なお、JRA-55 のデータは（一財）気象業務支援センター¹⁰⁾ 等を通じて入手することが可能である。

再解析値は解析予報システムによる推定値であるため、誤差が含まれている点に注意が必要である。特に、太陽放射、雲分布等の要素は予報モデルの物理過程の性能に依存するため、気温・風等の解析値と比べて、品質に注意する必要がある。また、JRA-55 では水平分解能が約 55km と粗いため、地形の

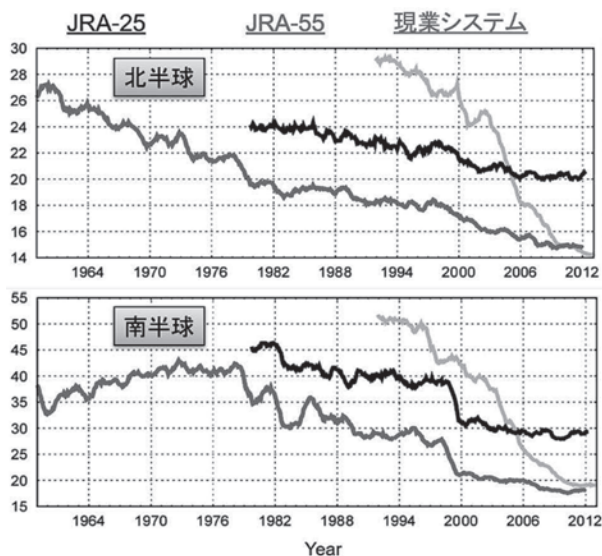


図 3 JRA-25, JRA-55 及び気象庁現業システムの 500hPa 高度における 2 日予報の二乗平均平方根誤差 [gpm] 検証対象はそれぞれの解析値。値は直前の 12 か月間の平均値を表す。上図は北半球中・高緯度、下図は南半球中・高緯度。

出典：Kobayashi et al. (2015)

表 2 大気上端及び地表面における年平均全球エネルギーバランス ($W m^{-2}$) JRA-25 と JRA-55 の値は 2002～2008 年の期間平均であるのに対し、Wild et al. (2013) の値は 21 世紀初頭における現在気候を代表している。括弧内の値は不確実性の幅を表している。

($W m^{-2}$)	Wild et al. (2013)	JRA-25	JRA-55
大気上端			
太陽放射入射量	340 (340, 341)	341	341
太陽放射反射量	100 (96, 100)	95	100
外向き赤外放射	239 (236, 242)	255	251
正味下向きフラックス		-7.9	-10.0
地表面			
下向き太陽放射	185 (179, 189)	197	189
太陽放射反射量	24 (22, 26)	25	26
太陽放射吸収量 (地表面)	161 (154, 166)	172	164
太陽放射吸収量 (大気)	79 (74, 91)	75	77
下向き赤外放射	342 (338, 348)	327	338
上向き赤外放射	397 (394, 400)	399	400
顕熱	20 (15, 25)	20	20
蒸発	85 (80, 90)	91	93
正味下向きフラックス	0.6 (0.2, 1.0)	-11.6	-11.2

出典：Kobayashi et al. (2015)

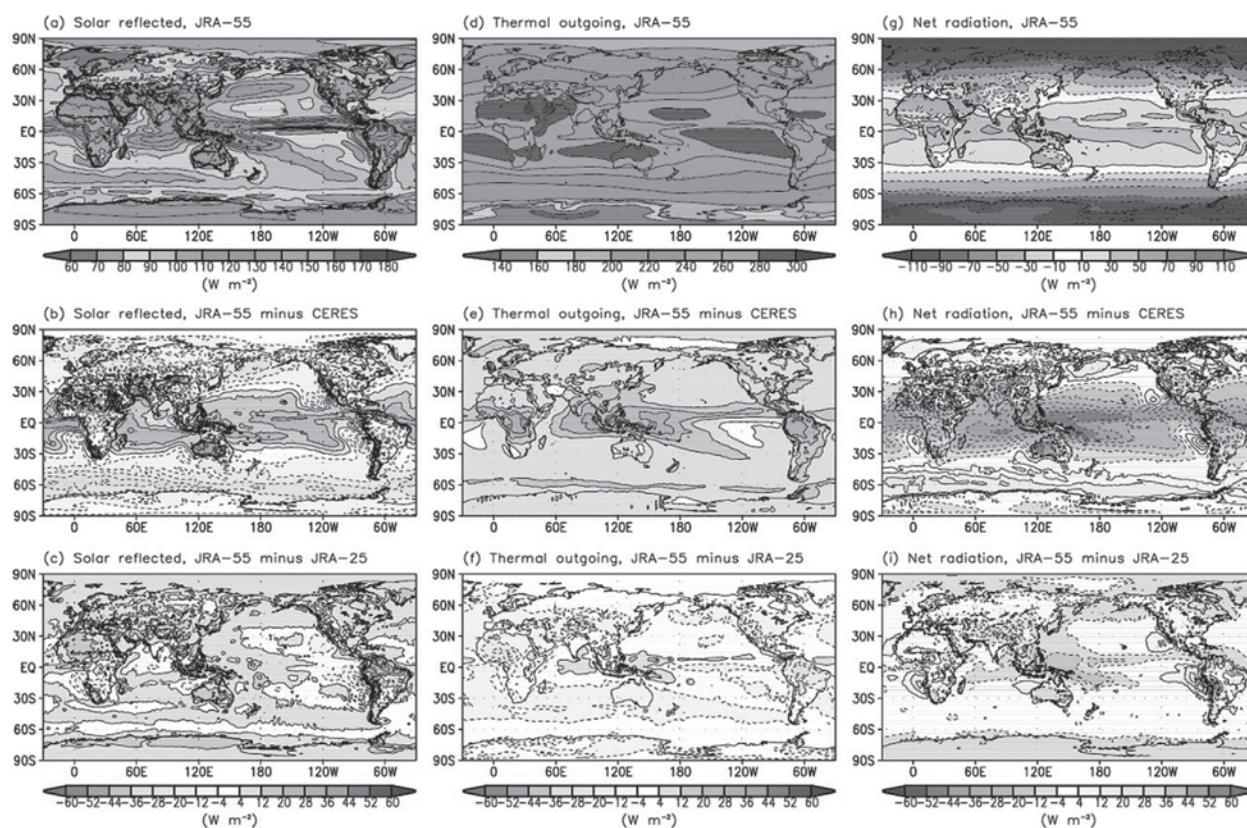


図4 大気上端における (a～c) 太陽放射反射量, (d～f) 外向き長波放射フラックス, (g～i) 正味放射フラックスの2002～2008年の期間平均値 (a, d, g) JRA-55, (b, e, h) JRA-55とCERES-EBAF ed. 2.7の差, (c, f, i) JRA-55とJRA-25の差

出典：Kobayashi et al. (2015)

表現や地表面付近の要素の精度に注意する必要がある。

4. 気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q)

現在、長期再解析データの更なる品質向上を図るため、現行のJRA-55実施以降の全球数値解析予報システムの開発成果とデータレスキュー（過去の観測データを発掘、収集し、気候研究等に活用できるようにする活動のこと）や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を活用した気象庁第3次長期再解析 JRA-3Q¹¹⁾の本計算を実施している。JRA-3Qでは1940年代末以降を対象としており、1990年代以降（ストリーム A）の本計算が2021年5月に完了した。2021年10月には、準リアルタイムでのプロダクト作成を開始している。また、本稿を執筆した2021年10月時点で、1960年代～1980年代（ストリーム B）及び1940年代末～1950年代（ストリーム C）の本計算を実施中であり、2021年度中に完了する予定である。なお、JRA-3Qのプロダクトは、JRA-55と同様に（一財）気象業務支援センター等を通じて提供され、計算済みのスト

リーム Aのデータは2021年秋頃から、全期間のデータは2022年中に公開される予定である。

JRA-3Qは2018年12月時点の現業全球データ同化システムの低解像度版に基づいており（表1）、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。例えば、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モデルが利用されている。また、2018年6月に運用が開始された気象庁の新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伴いJRA-55よりも高解像度化されている。海面水温については、西岸境界流付近の海面水温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、ストリーム A期間について衛星観測に基づいた0.25度解像度のデータを利用している。オゾンについては、JRA-55では1978年以前の期間は気候値を用いていたが、JRA-3Qでは新しい全球大気化学モデルを用いて全期間解析値を作成し利用している。

現在、JRA-3Qプロダクトの品質評価を進めている。ここでは、これまでの調査結果の一例を紹介す

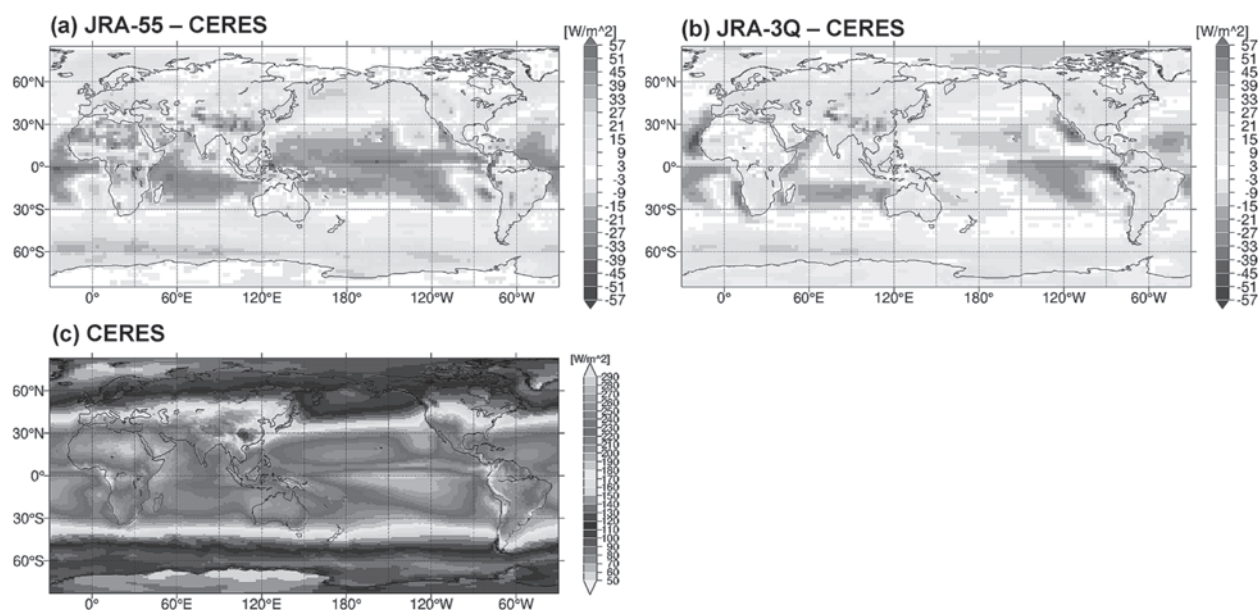


図5 地表面における下向き太陽放射フラックスの2001～2013年の期間平均値 (a) JRA-55とCERESの差, (b) JRA-3QとCERESの差, (c) CERES (気象研究所 原田やよい氏提供)

る。図5は、地表面下向き太陽放射フラックス（日射量）について、JRA-55とCERESの差、JRA-3QとCERESの差、及びCERESのものの分布図をそれぞれ示している。JRA-55ではアフリカ大陸や熱帯域において地表面下向き短波放射フラックスに負バイアスが見られていたが、JRA-3Qでは軽減していることが確認できる。今後、引き続き品質評価を進めると共に、プロダクトの公開に向けた準備を行っていく予定である。

5. まとめ

本稿では、長期間にわたって高品質で均質な気候データセットを作成する長期再解析の取組みについて紹介した。気象庁の現行の長期再解析であるJRA-55は、JRA-25実施以降の数値予報システムの開発成果や新たに整備された観測データセットを利用することにより、JRA-25よりも物理的整合性が大幅に向上している。また、現在、JRA-55から更に品質向上を図るため、新たな再解析であるJRA-3Qの本計算を実施している。JRA-3QではJRA-55と比べて、日射量の表現にも改善が見られており、太陽光発電への利用が広がることが期待される。

謝辞

気象庁長期再解析は、気象庁情報基盤部数値予報課、気象庁気象研究所気候・環境第一研究室をはじめ

め、多くの方々の共同で実施されたものであり、本稿の執筆にあたってご協力、ご指導をいただいた。ここに深く感謝申し上げる。なお、本稿の一部は気象庁再解析の論文^{3, 11)}から転載している。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi: 10.2151/jmsj.2015-001.
- 3) 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, 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 (2015)
- 4) 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**, D18105, doi : 10.1029/2004JD005753.
- 5) Mears, C. A., and F. J. Wentz, 2009a : Construction of the Remote Sensing Systems V3.2 atmospheric temperature records from the MSU and AMSU microwave sounders. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1040-1056.
- 6) Mears, C. A., and F. J. Wentz, 2009b : Construction of the RSS V3.2 lower tropospheric dataset from the MSU and AMSU microwave sounders. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1493-1509.
- 7) Wild, M., D. Folini, C. Schär, N. Loeb, E. G. Dutton, and G. König-Langlo, 2013 : The global energy balance from a surface perspective. *Climate Dyn.*, **40**, 3107-3134.
- 8) Loeb, N. G., B. A. Wielicki, D. R. Doelling, G. L. Smith, D. F. Keyes, S. Kato, N. Manalo-Smith, and T. Wong, 2009 : Toward optimal closure of the earth's top of atmosphere radiation budget. *J. Climate*, **22**, 748-766.
- 9) JRA-55 : 気象庁 55 年長期再解析 (accessed Oct. 13 2021), https://jrakishou.go.jp/JRA-55/index_ja.html
- 10) (一財) 気象業務支援センター, JRA-55 長期再解析データ (accessed Oct. 13 2021), <http://www.jmbc.or.jp/jp/offline/hd0020.html>
- 11) 気象庁, 気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗, 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁数値予報開発センター, 115-124 (2021)

著者略歴

高坂裕貴 (こうさか ゆうき)

2005 年 3 月気象大学校卒業。同年 4 月気象庁数値予報課に配属。数値予報で利用される観測データの品質管理、静止気象衛星可視データの再較正等の開発に携わる。2015 年 10 月から気象庁長期再解析の開発に従事。2016 年 4 月から 2018 年 3 月まで、欧州中期予報センターに派遣され、同センターの大気海洋結合再解析である CERA-20C について共同開発を行った後帰国し、現在に至る。