



気象庁55年長期再解析 (JRA-55)

原田 やよい^{*1}・古林 慎哉^{*2}・太田 行哉^{*3}・海老田 綾貴^{*4}
守谷 昌己^{*5}・小野田 浩克^{*6}・大野木 和敏^{*7}・釜堀 弘隆^{*8}
小林 ちあき^{*9}・遠藤 洋和^{*10}

1. はじめに

平成21年度に開始した気象庁55年長期再解析 (JRA-55, Ebita *et al.* 2011) は, 気象研究所, 気象衛星センターをはじめとする関係各所の協力および長期再解析推進委員会委員をはじめとする学識経験者の助言を得て実施され, 2013年3月に完了した。本稿では JRA-55 の概要と, JRA-55 を JRA-25 長期再解析および気象庁気候同化システムによって作成された解析値 (JRA-25/JCDAS, Onogi *et al.* 2007) や衛星観測データセットと比較した初期評価結果について報告する。更に, データの公開状況や気象庁業務への活

用について述べる。なお, JRA-55 の詳細については, 気象集誌に JRA-55 総合報告論文 (S. Kobayashi *et al.* 2014) を投稿している。

2. JRA-55 の概要

JRA-55 の対象期間はラジオゾンデ定時観測ネットワークが確立された1958年まで遡っている。20世紀後半から50年以上をカバーした4次元変分法による長期再解析としては, JRA-55 が世界で初めてである。

第1表に JRA-25/JCDAS からのシステムおよび境界値の変更点を示す。JRA-55 では数値予報モデルの高解像度化や長波放射スキームをはじめとする物理過程の改良, 4次元変分法の採用など, JRA-25以降の現業システムの改良を反映している。またラジオゾンデ気温観測における測器の変遷等の影響を取り除くため, RAOBCORE ver.1.4 (Haimberger *et al.* 2008) を導入した。更に衛星の切り替え時やバイアス特性の時間変化への対応を容易にするために, 変分法の内部でバイアス補正係数の更新を随時行う変分法バイアス補正 (VarBC: Variational Bias Correction) (Dee 2005) を輝度温度観測に対して導入した。境界値についても, 6種類の温室効果ガスの経年変化が考慮され, オゾン3次元日別値も新しい化学輸送モデルによるデータに更新するなど改良が施されている。

JRA-55 では, 様々な種類の観測データを利用している (第1図)。特に JRA シリーズを通じて初めて使用した1970年代以前の地上・高層観測データには, 低品質のものが多く存在するため, その品質管理が重

^{*1} (連絡責任著者) Yayoi HARADA, 気象庁地球環境・海洋部気候情報課。

yayoi.harada@met.kishou.go.jp

^{*2} Shinya KOBAYASHI, 気象庁地球環境・海洋部気候情報課。

^{*3} Yukinari OTA, 気象庁地球環境・海洋部気候情報課。

^{*4} Ayataka EBITA, 気象研究所企画室。

^{*5} Masami MORIYA, 気象庁予報部数値予報課。

^{*6} Hirokatsu ONODA, 気象庁地球環境・海洋部気候情報課。

^{*7} Kazutoshi ONOGI, 気象庁地球環境・海洋部気候情報課。

^{*8} Hirotaka KAMAHORI, 気象研究所気候研究部。

^{*9} Chiaki KOBAYASHI, 気象研究所気候研究部。

^{*10} Hirokazu ENDO, 気象研究所気候研究部。

注: 所属は平成25年度のもの。

© 2014 日本気象学会

第1表 JRA-25/JCDAS からの変更点.

	JRA-25/JCDAS	JRA-55
解像度	T106L40 (最上層0.4hPa)	TL319L60 (最上層0.1hPa)
時間積分スキーム	オイラー法	セミラグランジアン法
長波放射スキーム	線吸収 バンドモデル 水蒸気連続吸収帯 e-タイプのみ	線吸収 テーブル参照法 水蒸気連続吸収帯 e-タイプ及UP-タイプ
同化手法	3次元変分法	4次元変分法
背景誤差共分散行列	一定値	非衛星時代は1.8倍の誤差分散
バイアス補正 (ラジオンデ気温観測)	日射補正のみ (Andrae et al., 2004)	RAOBCORE Ver 1.4 (Haimberger et al., 2008)
バイアス補正 (衛星輝度温度観測)	オフライン	変分法バイアス補正
陸面解析	オフラインSiB (6時間間隔大気強制力)	オフラインSiB (3時間間隔大気強制力)
温室効果ガス	CO ₂ (375ppm固定)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CFC-11, CFC-12, HCFC-22 (年別値を日別内挿)
オゾン	日別3次元累年値 (MRI-CTM (T42L45))	月別3次元気候値*(~1978) 日別3次元累年値(1979~) (MRI-CTM (T42L68))
エアロゾル	海陸別年平均値気候値	光学的厚さ 月別2次元気候値* 光学的特性・鉛直プロファイル 海陸別年平均値気候値
海面水温	COBE v1.2 (~2006/02) " v1.5 (2006/03~) (1度格子)	COBE v1.5 (1度格子)

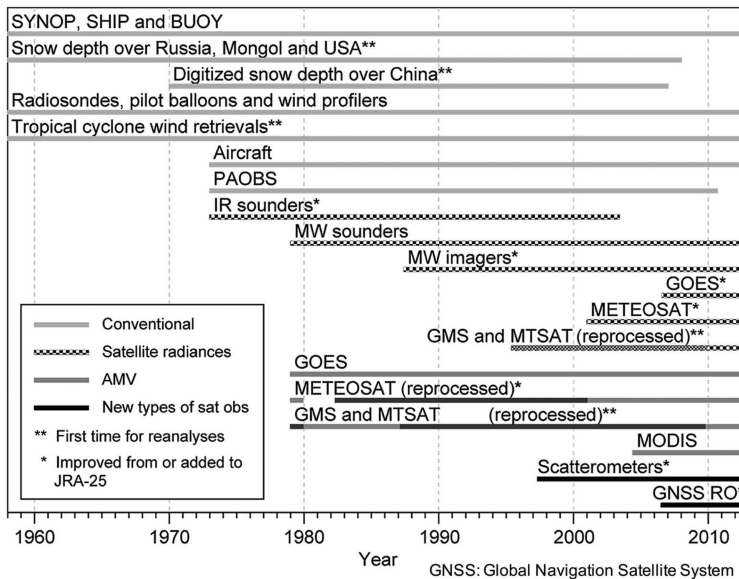
* 月別気候値を時間内挿して利用

要となる。衛星データについては、気象衛星センター、宇宙航空研究開発機構および欧州気象衛星開発機構をはじめとする、各機関で再処理された衛星データを可能な限り利用している。

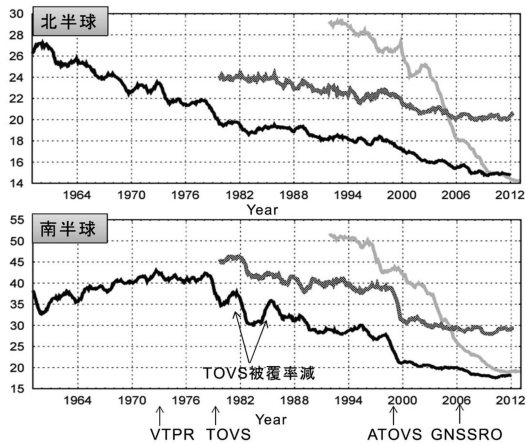
3. 初期評価結果

第2図に JRA-55 (黒色線) および JRA-25 (濃灰色線) を初期値とした48時間予報と、気象庁現業システム (薄灰色線) 48時間予報の500 hPa 高度場の根二乗平均誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) 時系列図を示す。北半球では、JRA-55の RMSE は JRA-25のものとは比べて期間を通じて8割ほどに減少しており、JRA-55のデータ同化システムの性能が大幅に向上していることを示している。また現業システムと比較して、再解析はいずれも RMSE がなだらかに減少しており、品質が安定している。一方、南半球では衛星観測システムの変遷に対応した RMSE の変動が見られる。

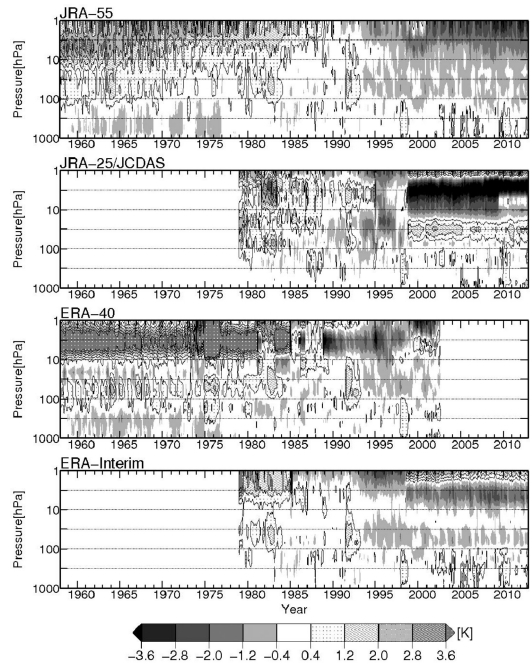
第3図には、1986年6月1日00 UTCにおける360 K等温位面の渦位の分布を示す。渦位は断熱・摩擦なしの条件下で保存量とみなされ、大気の流れのトレーサーとなりうる物理量である (Hoskins *et al.* 1985)。JRA-55における360 K等温位面上の渦位分布は (第3図上)、対流圏上層の圏界面付近における大気の流れをよく表しており、亜熱帯ジェット沿いの準定常ロスビー波動の微細構造や熱帯の対流活動活発域における大気応答の様子が良くとらえられている。JRA-25 (第3図下) と比較すると、大気大循環の流れの表現が大きく改善されたことがわか



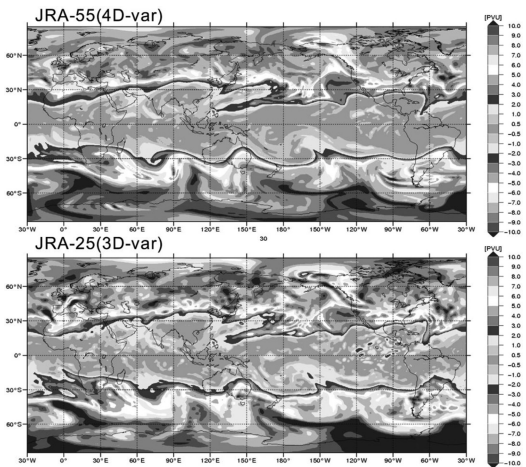
第1図 JRA-55で使用した観測データ.



第2図 JRA-55 (黒色線), JRA-25 (濃灰色線) および気象庁現業システム (薄灰色線) の500 hPa 高度場48時間予報のRMSE時系列図。単位はgpm。



第4図 JRA およびERAの全球平均気温偏差高度・時間断面図 [K]。それぞれの長期再解析について、各指定気圧面の1980~2001年の全球平均気温を基準として、そこからの偏差を描画している。



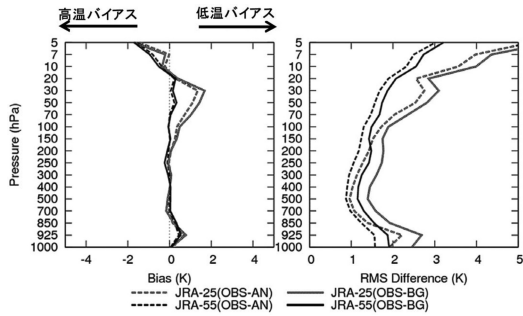
第3図 1986年6月1日00UTCにおける360 K等温面の渦位の分布図。上図はJRA-55, 下図はJRA-25のものをそれぞれ示す。単位は $10^{-6} \text{Km}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。

る。このような改善の要因として、同化手法に4次元変分法が導入されたこと、数値予報モデルの移流スキームがオイラー法からセミラグランジュ法に改良されたことが挙げられる。

第4図には、JRA およびERAの全球平均気温偏差高度・時間断面図を示す。ERA-40 (Uppala *et al.* 2005) では、1970年代半ばに大きな不連続が見られ、この年代のNOAA衛星の輝度温度観測の取り扱いに

問題があったことが指摘されている (Santer *et al.* 2004)。また、JRA-25とERA-40では、80年代前半の成層圏に不連続が見られ、NOAA衛星の切り替えに伴うTIROS実用型鉛直探査計 (TOVS: TIROS Operational Vertical Sounder) による輝度温度観測の品質変化のためと考えられる。更に、JRA-25の1998年の成層圏の大きな不連続は、数値予報モデルの成層圏気温にバイアスがあった状況下でNOAA衛星搭載の探査計がTOVSから改良型TOVS (ATOVS: Advanced TOVS) に切り替わり、成層圏で同化できる放射輝度温度データの質と量が、大きく変化したことによる。探査計切り替えの影響は、ERA-Interim (Dee *et al.* 2011) でも上部成層圏にわずかながら見られる。ERA-InterimとJRA-55では、VarBCの導入により、ERA-40、JRA-25に見られた不連続が軽減されている。全球平均気温偏差はこれまでのERA、JRA長期再解析の中では、JRA-55の各層での時間的な変動が最も滑らかである。

次に成層圏気温の観測データによる検証結果を示す。第5図左は1981年1月における全球の月平均気温



第5図 1981年1月における全球の月平均気温の対ラジオゾンデバイアス(左図)およびRMSD(右図)の鉛直分布図。実線は観測値と第一推定値の差、破線は観測値と解析値の差を、灰色線はJRA-25、黒色線はJRA-55の値をそれぞれ示す。単位はK。

の対ラジオゾンデバイアスである。JRA-25では(灰色線)、下部成層圏に顕著な低温バイアスが存在していた。この問題は、JRA-25で使用された全球予報モデルで使用されていた当時の放射スキームがもつ顕著な系統誤差に起因していることが判明しており、2004年12月に気象庁現業モデルにこの問題点を改善した新しい長波放射スキームが導入された。JRA-55では(黒色線)、この新放射スキームを使用したことにより、下部成層圏の顕著な低温バイアスが大幅に軽減している。

これまで主に JRA-55の改善点を述べてきたが、以

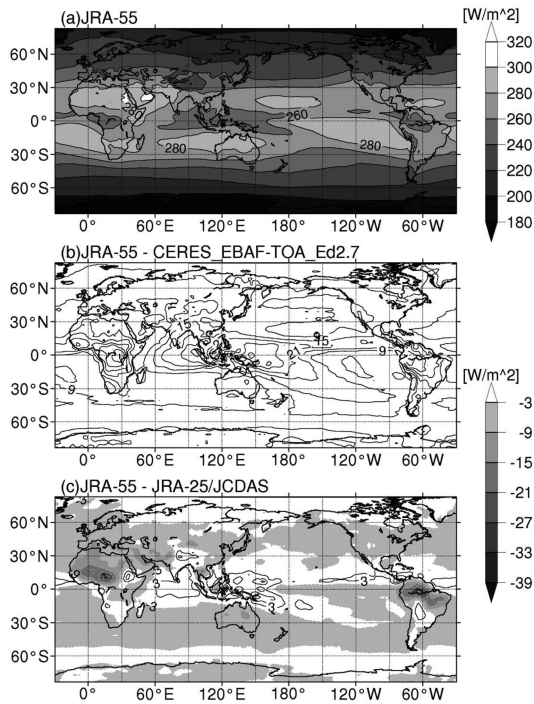
第2表 Wild *et al.* (2013) に示された観測のエネルギー収支の値(21世紀初頭の気候学的な値)を抜粋し、JRA-25/JCDASおよびJRA-55の値を追記したもの。長期再解析については2002~2008年の統計値。単位は Wm^{-2} 。

Background values		Wild <i>et al.</i> (2013)	JRA-25/JCDAS	JRA-55
Top of Atmosphere				
↓ A	Incoming Solar Radiation	340	341	341
↑ B	Reflected Solar Radiation	100	95	100
↓ C=A-B	Absorbed Solar Radiation	240	246	241
↑ D	Outgoing Longwave Radiation	239	255	251
C-D	Top of Atmosphere Net		-7.9	-10.0
Surface				
↓ E	Absorbed Longwave Radiation by Surface	342	327	338
↑ F	Surface Longwave Radiation	397	399	400
↑ G	Evapotranspiration	85	91	93
↑ H	Thermals	20	20	20
↓ I	Absorbed Solar Radiation by Surface	161	172	164
E-F-G-H+I	Net absorbed by surface		-11.6	-11.2

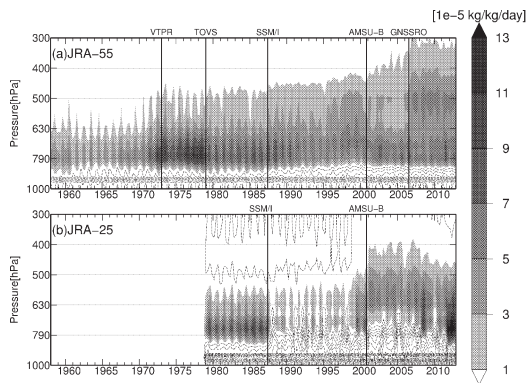
降は JRA-55に見られた改善が望まれる課題と改善すべき点について述べる。再解析では、データ同化時に解析インクリメント(解析値から第一推定値を引いた量)が生じ、エネルギーバランスが厳密には保たれていない。どの程度、現実のエネルギーバランスが再現されているかは、再解析の品質や様々な用途への有用性に関する有益な評価となり得る(Trenberth *et al.* 2009, 2011)。また Wild *et al.* (2013) は CERES (Wielicki *et al.* 1996) 等の観測情報から全球エネルギー収支の計算を行った。これに JRA-25と JRA-55の計算値を追記した(第2表)。JRA-55では JRA-25/JCDASと比較して、過大な外向き長波放射(OLR: Outgoing Long-wave Radiation)の緩和、過小であった地表面の下向き長波放射の増加、大気による短波放射の吸収の適正化など、放射スキーム改良による放射関係要素の改善が見られる。一方、過剰な水循環、大気上端および地表面での正味フラックス量などの悪化も見られている。

ここで、依然として観測値に比べて過大傾向にあるOLRの分布を確認しておく(第6図)。JRA-25/JCDASでは乾燥問題が生じていたアマゾン域やサハラ砂漠において見られた過大バイアスが、JRA-55では同データと比較して緩和された。一方、熱帯の対流活動活発域に着目すると、JRA-55では過大バイアスが悪化していることが分かる。晴天放射ではこの様な大きなバイアスは見られないことから、この過大バイアスは予報モデルの雲の分布・高さの再現性や光学的特性、雲放射過程と関連している可能性が高いと考えられる。

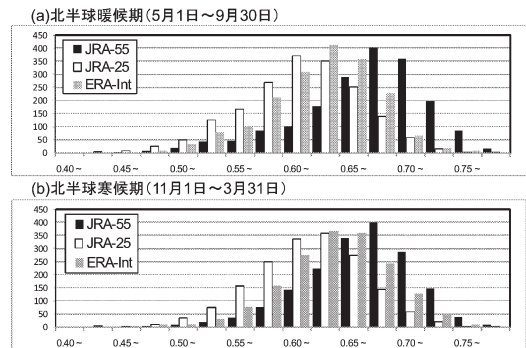
次に水循環に関連して考察する。Trenberth *et al.* (2011) では全球の可降水量については再解析値間の比較を行っているが、JRA-55では同量は $12.2 \times 10^8 km^3$ (2002~2008年平均値)と再解析値の中で最も少ない。これは、JRA-55で用いている数値予報モデルの対流圏中層に乾燥バイアスがあり、観測データにより水蒸気が補充されるものの、大気中に保持出来ずに降水として除去されてしまうことを示唆している。第7図には対流圏における比湿インクリメントの経年変化を示す。



第6図 2002~2008年平均の気象上端における外向き長波放射。(a)はJRA-55の値、(b)および(c)はJRA-55からそれぞれCERES、JRA-25/JCDASの値を引いたものをそれぞれ表す。(b)および(c)の等値線間隔は 6 Wm^{-2} 。



第7図 全球平均した比湿インクリメント(解析値-第一推定値)の時間-高度断面図。(a),(b)はJRA-55, JRA-25の値をそれぞれ表す。陰影は正のインクリメントを、点線の等値線は負のインクリメントを表し、その間隔は $2 \times 10^{-5} \text{ kgkg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 。



第8図 1998~2009年期間の熱帯域(22°S ~ 22°N)におけるJRA-55, JRA-25およびERA-Interimの対TRMM3B42日別降水量空間相関係数の出現頻度分布。空間相関はすべてのデータセットを 2.5 格子のボックス平均値に変換したのち計算を行っている。

JRA-55では、JRA-25で見られたマイクロ波放射計(SSM/I: Special Sensor Microwave/Imager)や改良型マイクロ波水蒸気探査計(AMSU-B: Advanced Microwave Sounding Unit-B)導入時のインクリメントの不連続は改善されているものの、データ同化時に、850 hPaより上層での水蒸気量の増加が期間を通して見られる。また1970年代前半のNOAA衛星赤外線探査計の輝度温度観測(VTPR: Vertical Temperature Profile Radiometer)の導入時に850~700 hPa付近に比湿インクリメントの増大が見られるほか、対流圏中・上層では、2000年以降に比湿インクリメントの増大が見られ、衛星観測システムの発展に伴い、最近の年代でより顕著となっている。

これまで述べたように、水循環は過剰傾向が明瞭ではあるものの、降水量の空間分布については大きな改善が見られたので最後に述べておく。第8図は熱帯域(22°S ~ 22°N)における各再解析データ日別降水量と熱帯降雨観測衛星(TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission)による日別降水量推定値(TRMM 3B42)との空間相関係数の出現頻度分布である。JRA-55は、JRA-25/JCDASやERA-Interimと比較して、空間相関係数の出現頻度分布がより高い領域に全体的にシフトしており、日別スケールの降水現象の再現性は、JRA-25/JCDASやERA-Interimと比較して優れていると言える。この傾向は、特に北半球の暖候期で明瞭となっている。

以上、JRA-55の性能に対する初期評価結果についてまとめると、48時間予報成績では期間中一貫して

JRA-25を上回り、JRA-25よりも安定して高性能であることが分かった。また成層圏については、JRA-25で見られた下部成層圏の低温バイアスはほぼ解消し、時間方向に不自然な不連続の少ない気温プロファイルを実現することが出来た。一方、熱帯の対流活動活発域で外向き長波放射の正バイアスが増加し、水収支では水循環がJRA-25よりも過剰となるなど、今後に向けた課題も見つかっている。ただし、水循環は過剰でありながらも日々の降水量の空間分布再現性については、JRA-25/JCDASやERA-Interimを上回る性能を示している。

4. データの公開状況

JRA-55のデータ公開については、JRA-25/JCDASと同様にJRA公式ページ (<http://jra.kishou.go.jp>, 2014年2月現在) から研究利用を対象にオンライン・無償公開を行っている。またこの他に、地球環境情報統融合プログラムデータ統合・解析システム (DIAS: Data Integration & Analysis System)、筑波大学計算科学研究センター (CCS: Center for Computational Sciences) およびアメリカ大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research, USA) などに協力いただき、これらの機関のサイトからもデータが取得可能となっている。

5. JRA-55の気象庁業務への活用

気象庁では、これまでJRA-25/JCDASを、気候系監視及び異常気象分析検討会での基礎資料、季節予報のための平年値、季節予報ガイダンス作成、過去再予報によるモデルの開発・評価・検証、エルニーニョ監視・予測、海況解析やオゾンの解析、メソモデルによる顕著事例の再現実験など、気象庁内の幅広い業務に活用してきた (第9図)。精度が向上した季節予報は、気候リスク管理の普及にもつながっている。JRA-55

長期再解析と主な業務への活用



第9図 長期再解析と主な気象業務への活用。

は2013年以降も準リアルタイムにJRA-55を継続する。今後、これらの業務について、順次JRA-55に置き換えて、予報や各種プロダクトのさらなる精度向上、知見の拡充を進める。また、JRA-55を活用した新規業務として、現業非静力学領域モデル (水平解像度5 km) を用いた領域ダウンスケーリングによる日本域詳細再現データの作成に着手しており、平成27年度の完成をめざしている。気象庁ではこれを活用して、日本域の詳細な気候変化を把握する一助として大雨等顕著現象の長期変化傾向の調査を行ったり、特別警報にも資する波浪や高潮の顕著事例調査を行う予定である。また大雨等の個々の顕著現象の事例調査への活用も期待されている。

6. JRA-55ファミリー

最後にJRA-55のサブプロダクトとして、気象研究所気候研究部で実施中のJRA-55 sub-product assimilating Conventional observations only (JRA-55C) とJRA-55 AMIP-type simulation (JRA-55 AMIP) を簡単に紹介する。JRA-55CはJRA-55と同じデータ同化システムを使いながら、衛星データを使用せず、従来型観測データのみを同化する手法で計算を実施している。JRA-55とJRA-55Cを比較することにより、衛星データの変動の影響を特定して

評価できることが期待される。また、JRA-55AMIPは、その名の通り、JRA-55のデータ同化システムで観測データを全く同化しない境界値のみを使用した数値モデルの長期積分 (<http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/NEWS/overview.php>) であり、モデルの気候特性を確認することが可能となる。これらとJRA-55を総称してJRA-55ファミリーと称する。これらのデータは、平成26年度中に計算を完了し、公開される予定となっている。JRA-55のデータとあわせて、国内外の調査・研究に大いに活用されることを期待している。なお、JRA-55Cの特性についてはC. Kobayashi *et al.* (2014) を参照願いたい。

参 考 文 献

- Dee, D. P., 2005: Bias and data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3323–3343.
- Dee, D. P. *et al.*, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553–597.
- Ebita, A. *et al.*, 2011: The Japanese 55-year Reanalysis “JRA-55” : An interim report. *SOLA*, **7**, 149–152.
- Haimberger, L., C. TAVOLATO 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.
- Hoskins, B. J., M. E. MCINTYRE and A. W. ROBERTSON, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877–946.
- Kobayashi, C. *et al.*, 2014: Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric reanalysis assimilating conventional observations only. *SOLA*, **10**, in press.
- Kobayashi, S. *et al.*, 2014: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, submitted.
- Onogi, K. *et al.*, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.
- Santer, B. D. *et al.*, 2004: Identification of anthropogenic climate change using a second-generation reanalysis. *J. Geophys. Res.*, **109**, D21104, doi:10.1029/2004JD005075.
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo and J. Kiehl, 2009: Earth’s global energy budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 311–323.
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo and J. Mackaro, 2011: Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses. *J. Climate*, **24**, 4907–4924.
- Uppala, S. M. *et al.*, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961–3012.
- Wielicki, B. A., B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, R. B. Lee III, G. L. Smith and J. E. Cooper, 1996: Clouds and the Earth’s Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 853–868.
- 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.