気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)の初期評価結果について

原田やよい・古林慎哉・太田行哉・小野田浩克・大野木和敏 気象庁地球環境・海洋部気候情報課

1. はじめに

平成21年度に計算を開始した気象庁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 助言のもとに実施され、平成25年3月に完了 した。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年まで遡り、20 世紀後半をカバーしたものとしては、4次元 変分法が導入された世界初の長期再解析で ある。本稿ではJRA-55の概要、JRA-25長期再 解析および気象庁気候同化サイクル(JRA-25/JCDAS、Onogi et al. 2007)や衛星観測 データセットとの比較結果など、JRA-55の初 期評価結果について報告を行う。

2. JRA-25/JCDAS からの変更点

第1図に 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 次元日別値を計算する化学輸送モ デルも更新され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 利用しており(第2図)、特に JRA では初め 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。

	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	<i>線吸収</i> バンドモデル 水蒸気 <i>連続吸収帯</i> e-タイプのみ	<i>縁吸収</i> テーブル参照法 <i>水蒸気連続吸収帯</i> e-タイプ及びP-タイプ
同化手法	3次元変分法	4次元変分法 (T106インナーモデル)
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 (ラジオゾンデ気温観測)	日射補正のみ (Andrae <i>et al</i> ., 2004)	RAOBCORE Ver 1.4 (Haimberger, 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)
	JRA-25/JCDAS	JRA-55
温室効果ガス	JRA-25/JCDAS CO ₂ (375ppm固定)	JRA-55 CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CFC-11, CFC-12, HCFC-22 (年別値を日別内挿)
温室効果ガス	JRA-25/JCDAS CO ₂ (375ppm固定) 日別3次元累年値 (MRI-CTM (T42L45))	JRA-55 CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CFC-11, CFC-12, HCFC-22 (年別値を日別内挿) 月別3次元気候値*(~1978) 日別3次元累年値(1979-) (MRI-CTM (T42L68))
温室効果ガス オゾン エアロゾル	JRA-25/JCDAS CO2 (375ppm固定) 日別3次元累年値 (MRI-CTM (T42L45)) 海陸別年平均値気候値	JRA-55 CO2, CH4, N2O, CFC-11, CFC-12, HCFC-22 (年別値を日別内挿) 月別3次元気候値*(~1978) 日別3次元累年値(1979-) (MRI-CTM (T42L68)) 光学的厚さ 月別2次元気候値* 光学的博生: 鉛直プロファイル 海陸別年平均値気候値

第1図 JRA-25/JCDAS からの変更点。



第2図 JRA-55 で使用した観測データ。

3. 結果

第3図にJRA-55(赤色線)、JRA-25(黒色線) および気象庁現業システム(灰色線)の 500hPa高度場2日予報のRMSE時系列図を示す。 北半球では、JRA-55のRMSEはJRA-25のものと 比べて期間を通じて8割ほど減少しており、 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、南半球では観測システムの変遷 に対応したスコアの変動が見られており、同 領域において性能を向上し安定させること が今後の課題である。



第 3 図 JRA-55 (赤色線)、JRA-25 (黒色線) お よび気象庁現業システム (灰色線)の 500hPa 高 度場 2 日予報の RMSE 時系列図。単位は gpm。 360K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360K等温位面上の渦位分布は(第4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 準定常ロスビー波伝播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4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る。このような改 善の要因として、一つには同化手法に4次元 変分法が導入されたこと、更に数値予報モデ 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5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原因である (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TOVS 輝度温度データの品質変化による。更に JRA-25の1998年の成層圏の大きな不連続は、



第4図 1986年6月1日 00UTCにおける360K等温位 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 10⁻⁶K*m²kg⁻¹s⁻¹。



第5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。

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衛星搭載のサウンダが TOVSからATOVS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 く変化したことが要因である。サウンダ切り 替えの影響は、ERA-Interim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に見られたジャンプが軽減されてい 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 的な連続性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 結果を示していく。第6図左は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 イアスである。JRA-25では(黒色線)、当時 の全球モデルに下部成層圏で顕著な低温バ 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いたが、 2004年12月に気象庁現業にこの問題点を改 善した新しい長波放射スキームが導入され た。JRA-55では(赤色線)、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。

第7図にはNASAの地球観測衛星AURA搭載の マイクロ波リムサウンダ観測(MLS/AURA)



第6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、黒色 線は JRA-25、赤色線は JRA-55 の値をそれぞれ 示す。単位は K。

(Schwartz et al. 2008) による検証結果を 示す。第7図aは2008/09年北半球冬季(12~2 月)におけるMLS/AURAの全球帯状気温である。 MLS/AURAのレベル2データは成層圏の気圧レ ベル数が多く、トップレベルは1e-5hPa(た だし利用推奨は261~0.001hPa)と非常に高 い。第7b~dには対MLS/AURA全球帯状平均気 温バイアスの緯度-高度断面図を示す。まず JCDASに注目する(第7図c)と、2000年代後 半では下部成層圏の低温バイアスは、前述の 通りTOVSからATOVSの切り替えにより解消さ れた一方、3~15hPa付近の上部成層圏では、 5K以上の低温バイアスが見られていた。これ は、JCDASで用いている高速放射伝達モデル (RTTOV-7) におけるマイクロ波上部成層圏 気温チャンネルの計算精度の問題と考えら れる。JRA-55やMERRAの同領域のバイアスに 注目すると、いずれもJCDASより明らかに軽 減されており、JRA-55の成層圏気温は、長期 変化傾向、鉛直プロファイルのいずれの面か らみても、JRA-25/JCDASから大きく品質改善 が成されたと言える。しかしながら成層圏圏 界面付近から中間圏にかけては、JRA-55や MERRAにおいても、依然として大きなバイア スが見られており、この点については今後実 施される長期再解析において改善されるこ とが望まれる。

次に、成層圏大気全般の流れの整合性の改



第7図 2008/09 年北半球冬季(12~2月)における(a) MLS/AURA の全球帯状気温および(b-d)対 MLS/AURA 全球帯状平均気温バイアスの緯度-高度断面図。バイアスについては、解析値が MLS/AURA よりも高い場合には正の値、低い場合には負の値を示す。単位は K。



第8図 MIM法(Iwasaki 1989)により計算した角運動量収支の時系列図(期間はいずれも2008年 12月21日~2009年2月10日)。黒色線は解析値の帯状平均東西風加速、赤色線は移流項、コリ オリ強制項、EPflux 収束・発散項、および摩擦項の合計値を、青色線はコリオリ強制項、EPflux 収束・発散項、および摩擦項の合計値をそれぞれ示す。単位はms⁻¹day⁻¹。

善について確認する。第8図は2008年12月21 日から2009年2月10日の期間において、等温 位面上質量重み付き帯状平均(MIM法、 Iwasaki 1989、Tanaka et al. 2004を参照) 場で計算した角運動量収支を示す。解析値で 表現される大気の流れが時空間的に整合し ていれば、帯状平均した運動方程式の左辺の 値(帯状平均東西風加速)が右辺の各項(移 流項、コリオリ強制項、EPflux収束・発散項、 および摩擦項)の合計値と常に等しい値を示 すはずである。また2009年1月は成層圏で波 数2型の大規模突然昇温(Major SSW)が発生 しており、SSW非発生時に比べて解析の整合 性を保つことがより困難と言える。まず5hPa 気圧面について見ると(第8図上から2段目)、 ICDASでは(第8図上から2段目右列)1月中旬 のSSW発生時に東西風が減速を示していたの に対して (図中黒線)、右辺の各項合計値 (図 中赤線)は加速の値を示すことが多く、角運 動量収支が整合していない。一方、JRA-55 では(第8図上から2段目左列)、SSW発生時に も右辺の各項合計値(図中赤線)が減速を示 しており、東西風の減速とよく整合している。 この他、10hPa や30hPaにおいても(第8図下 2段)、JRA-55はJCDASと比較して角運動量収 支がより良く整合している。このような改善 の主な要因として、先に述べたように、 JRA-55で新しい長波放射スキームの導入に より下部成層圏の低温バイアスが軽減され たことや、4次元変分法が導入されたことに より大気の流れの時間変化を考慮したイン クリメントが与えられるようになったこと などが考えられる。

これまで主にJRA-55の改善点を述べてき たが、以降はJRA-55に見られた改善が望まれ る課題とすべき点について述べていく。長期 再解析を気候研究へ利用する場合、時間均質 性に加えて、地球大気全体の熱収支や水収支 が適切に表現されていることが重要である。 Trenberth et al. (2009)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。さらにTrenberth et al. (2011)では、各長期再解析の全球エネル ギー収支について見積もっている。これに JRA-55での計算値を追記した(第1表)。

第1表 Trenberth et al. (2011)の Fig. 10 に示さ れた観測と各長期期再解析のエネルギー収支の 値から抜粋し、JRA-55 の値を追記したもの。単 位は Wm⁻²。統計期間は長期再解析が 2002~2008 年、観測が 2000~2005 年。ただし ERA-40 につい ては 1990 年代の値が示されている。

Background values		OBS	JRA-55	JRA-25	ERA-40*	ERA-I
Top of Atmosphere						
↓A	Incoming Solar Radiation	341.3	341.3	342	343	344
† B	Reflected Solar Radiation	101.9	99.9	95	105	100
↓C=A-B	Absorbed Solar Radiation	239.4	241.4	247	238	244
† D	Outgoing Longwave Radiation	238.5	251.4	255	245	246
C-D	Top of Atmosphere Net	0.9	-10.0	-8.0	-7.0	-2.0
Surface						
↓E	Absorbed Longwave Radiation by Surface	333	338	327	344	342
1 F	Surface Longwave Radiation	396	400	400	398	398
† G	Evapotranspiration	80	93	91	82	83
1 H	Thermals	17	20	20	16	17
↓I	Absorbed Solar Radiation by Surface	161	164	172	156	164
E-F-G-H+I	Net absorbed by surface	1	-11	-12	4	8

JRA-55ではJRA-25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。これ に関連して、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9 図)。JRA-25では(第9図c)、乾燥問題が生じ ていたアマゾン域、サハラ砂漠において過大 傾向が見られていたが、JRA-55では大幅に緩 和されたことが分かる(第9図d)。一方、熱 帯の対流活動活発域に着目すると、JRA-25、 JRA-55ともに過大傾向が見られる、これは JRAに限らず、長期再解析共通の特徴である (図省略)。更にJRA-55では、インド洋から 海洋大陸、西部太平洋にかけての広い範囲で IRA-25よりも過大傾向が増大したため、大気 上端の正味フラックスが悪化した。



第9図 2002~2008 年平均の外向き長波放射。(a) は NOAA 衛星による観測値、(b) および (c) は JRA-55、JRA-25 の値を、(d)は JRA-55 から JRA-25 の値を引いたものをそれぞれ表す。単位は Wm⁻²。

次に、水収支についてもエネルギー収支と 同様に、Trenberth et al. (2011)のFig.9の 水収支の値の抜粋に、JRA-55の値を追記した ものを示す(第2表)。JRA-55についてみると、 海洋上の降水量・蒸発量はいずれも観測値や 他の再解析と比べて過剰となっている。一方、 一番下段の全球の可降水量については再解 析中最も少ない。これらは、数値予報モデル に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10図には対流圏 における比湿インクリメント(解析値から第

第2表 Trenberth et al. (2011)の Fig.9 に示された観測と各長期期再解析の水収 支の値から抜粋し、JRA-55の値を追記した もの。単位は10³km³year⁻¹。統計期間は長 期再解析が2002~2008年、観測が2000~ 2005年。ただしERA-40 については1990 年代の値が示されている。

Background values		OBS	JRA-55	JRA-25	ERA-40*	ERA-I
Ocean						
Α	Evaporation	426	523	515	449	456
В	Precipitation	386	493	474	487	412
A-B		40	30	41	-38	44
Land						
C	Precipitation	114	122	105	112	119
D	Evaporation, transpiration	74	75	72	79	82
C-D		40	47	33	33	37
Atmosphere						
	Precipitable water	12.7	12.2	12.4	12.9	12.5
[103km3/year						m3/voorl

一推定値を引いたもの)の経年変化を示す。 JRA-55では、JRA-25で見られたSSM/Iや AMUS-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、 850hPa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VTPR導入時に850~ 700hPa付近に比湿インクリメントの増加が 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加が見ら れ、衛星観測システムの発展と伴い,最近の 年代でより顕著となっている。



第 10 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。単位は kgkg⁻¹day⁻¹。

これまで述べたように、海洋上の水循環は 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11図は熱帯域(22° S-22°N)における各再解析データ日別降水 量と対TRMM3B42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になっている。

(a)北半球暖候期(5月1日~9月30日)



第11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。

4. まとめ

JRA-55 の性能に対する初期評価を行った 結果、2 日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 なギャップの少ない気温プロファイルを実 現することが出来た。更に下部成層圏を中心 とする角運動量収支の改善が見られ、大気の 流れの整合性が増していることが確認され 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、水収支では海上 の水循環が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。

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-55C と JRA-55AMIP 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 AMIP タイプランであり、モデルの気 候特性を確認することが可能となる。これら 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。

5. 参考文献

- Dee, D. P., 2005: Bias and data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **131**, 3323-3343.
- Dee, D. P. and co-authors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Rov. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Ebita, A. and co-authors, 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.

- Iwasaki, T., 1989: A diagnostic formulation for wavemean flow interactions and Lagrangian- mean circulation with a hybrid vertical coordinate of pressure and isentropes. J. Meteor. Soc. Japan, 67, 293-312.
- Onogi, K. and Coauthors, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Santer, B. D. and Coauthors, 2004: Identification of anthropogenic climate change using asecond -generation reanalysis. *J. Geophys. Res.*, **109**, D21104, doi:10.1029/2004JD005075.
- Schwartz, M. J. and Coauthors, 2008: Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements. J. Geophys. Res., 113, D15S11, doi:10.1029/2007JD008783.
- Tanaka, D., T. Iwasaki, S. Uno, M. Ujiie and K.
 Miyazaki, 2004: Eliassen-Palm flux diagnosis based on isentropic representation. *J.Atmos.Sci.*, 61, 2370-2383.
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo and J. Kiehl, 2009: Earth's global energy budget. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **90**, 311-324.
- 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.
- Wielicki, B. A., B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, R. B. Lee, 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.