

全球大気長期再解析 JRA-25および JRA-55の推進

—2017年度藤原賞受賞記念講演—

大野木 和 敏*

このたびは日本気象学会藤原賞という名誉ある賞をいただき、心より感謝しております。長期再解析 JRA の気象学・気候学等への学術的貢献を気象学会からこのような形で認めていただいたことをたいへん嬉しく思います。大野木個人に対して表彰いただきましたが、長期再解析の実施には多くの方々の御協力・御支援をいただいております。今回の藤原賞は JRA 長期再解析に関わったすべての方への表彰と考えています。本稿では、日本での長期再解析の立ち上げからの経過を、限られた講演時間ではお話しできなかった話題や苦労話等を含めて紹介することにします。

はじめに 1. と 2. で長期再解析の歴史的経緯とその作成方法を説明します。前半の 3. ～ 5. は日本での長期再解析の立ち上げ期、すなわち大野木が長期再解析に関わるきっかけと JRA-25 の実施、第 3 回 WCRP 再解析国際会議までを述べます。後半の 6. ～ 8. では日本の長期再解析が世界に認められる過程、すなわち第 2 次長期再解析 JRA-55 の実施と利用促進の活動について紹介します。最後に 9. と 10. で長期再解析に関する話題と将来の見通しについて私見を述べます。長編になりますが、日本での長期再解析の記録として詳細に記述させていただきます。

なお、文中に多く出てくる英文略語は文末にまとめてあります。

* 気象庁総務部企画課 (現: 気象研究所)。

konogi@met.kishou.go.jp

—2017年10月2日受領—

—2017年12月8日受理—

1. 長期再解析の歴史的経緯

最初に、長期再解析 (以下、再解析) の歴史的経緯を紹介します。

全球大気再解析は、Trenberth and Olson (1988), Bengtsson and Shukla (1988) が提唱したのが最初です。計算機システムとモデル発展の成果を踏まえて、過去数十年分の客観解析の計算をやり直して均質な気候プロダクトを作ろうという提案です。

それを受けて1990年代に米国環境予測センター NCEP と米国大気研究センター NCAR が NCEP/NCAR R1 (対象年1948～, Kalnay *et al.* 1996), ヨーロッパ中期予報センター ECMWF が ERA-15 (1979～1993, Gibson *et al.* 1997) を実施しました。さらに、NCEP と米国エネルギー省 DOE が R1 で発覚したバグを修正しモデルを改善した NCEP/DOE R2 (1979～, Kanamitsu *et al.* 2002) を実施しました。これらは再解析の第 1 世代と考えられ、R1 と R2 は準リアルタイムに現在も同じシステムでデータ同化サイクルが継続されています。ネット上でのプロダクトの入手も容易なことから、現在も広く使われていますが、これらは約20年前のデータ同化システムに準じており解像度も低いため、最近の新しい再解析プロダクトに比べて品質が劣ることは否めません。

計算機資源が十分ではない時代には、データ同化サイクルを何十年分も実行するような資源はありませんでした。1990年代半ばに、欧米の再解析実施をみて気象庁長期予報課 (現在の気候情報課) でも再解析実施の構想がありましたが、計算機資源の制約から断念しています。当時はまだ再解析は「夢」のような話でした。

2000年代に入ると、ECMWF が ERA-40 (1957年9月～2002年8月, Uppala *et al.* 2005) を実施し、

日本でも気象庁と（一財）電力中央研究所（以下、電中研）が共同で JRA-25（1979～2004年, Onogi *et al.* 2007）を実施しました。これらは再解析の第2世代と考えられ、データ同化手法に3次元変分法（3D-var）を用い、衛星の放射輝度温度データを直接同化していることが特徴です。JRA-25の完了後は、2014年1月まで気象庁が JMA 気候同化システム JCDAS として準リアルタイムに継続しました。なお、名称を変更したのは実行主体が JRA-25は気象庁と電中研の共同だったのに対し、JCDAS は気象庁単独で実施したからです。名称は異なりますが JCDAS は JRA-25 のデータ同化システムを使った延長版です。

その後、再解析を実施する各数値予報センターでは新たな再解析が取り組まれ、海外では NCEP の CFSR（1979～2010, Saha *et al.* 2010）、米国航空宇宙局 NASA の全球モデルデータ同化局 GMAO による MERRA（1979～, Rienecker *et al.* 2011）、ECMWF の ERA-Interim（1979～, Dee *et al.* 2011）と、コロラド大学の CIRES と NOAA による地上気圧観測データのみを使用した20世紀再解析20CR

（1871～2010, Compo *et al.* 2011）の4つの再解析が実施されています。気象庁では第2次再解析として JRA-55（1958～2012, S. Kobayashi *et al.* 2015；Harada *et al.* 2016）を実施し、2013年に計算を完了しました。CFSR では、大気再解析としては世界で初めて間欠的ながら海洋との結合同化を導入しています。ECMWF の ERA-Interim は、ERA-40の1990年代以降の期間で降水量に不自然な振動と増加がみられたため、当初はその期間をやり直すための暫定的な再解析という位置づけで開始され、ERA-Interim という名称もそれに由来しています。しかし実際には、物理過程の改良だけでなく、解像度を上げ、4次元変分法（4D-var）を導入して ERA-40から大きく改良されたデータ同化システムが使われて、品質も大きく改良されたため、当初の予定（1989年以降）を1979年まで遡り、ERA-40とは独立した30年以上の一貫した再解析となっています。2010年代には再解析が多様化しているので世代として分類するのは難しいですが、ここまでを第3世代の再解析に分類できるでしょう。なお、各再解析を第1表にまとめました。また、それぞれ

第1表 各国の長期再解析一覧表。

長期再解析名称	実施機関	再解析対象期間	モデルの解像度	データ同化手法	データ公開年	備考
JRA-25/JCDAS	気象庁, 電力中央研究所	1979-2004, 2005-2014.1	T106L40	3D-var	2006	
JRA-55	気象庁	1958-2012, 2013-現在	TL319L60	4D-var	2013	2013年以後も準リアルタイムに継続
JRA-3Q	気象庁	1947-	TL479L100	4D-var	2021 (予定)	準備中 本文10, (3) を参照
ERA-15	ECMWF	1979-1993	T106L31	OI	1996	
ERA-40	ECMWF	1957.9-2002.8	TL159L60	3D-var	2004	
ERA-Interim	ECMWF	1979-現在	TL255L60	4D-var	2009	
ERA-20C	ECMWF	1900-2010	TL159L91	4D-var	2014	地上データのみを同化
CERA-20C	ECMWF	1901-2010	TL159L91(A) 1degL42(O)	4D-var	2016	地上データのみを同化 (大気海洋結合)
ERA5	ECMWF	1950-	TL639L137 TL319L137	4D-var (アンサンブル)	2017 公開開始	計算実行中
NCEP/NCAR R1	NCEP and NCAR	1948-現在	T62L28	3D-var	1997	
NCEP/DOE R2	NCEP and DOE	1979-現在	T62L28	3D-var	2001	
CFSR	NCEP	1979-2010 2011以後は CFSv2	T382L64	3D-var	2009	間欠的な 大気海洋結合同化
MERRA	NASA GMAO	1979-2016.2	1/2×2/3度, L72	3D-var	2009	
MERRA2	NASA GMAO	1980-現在	0.5×0.625度, L72	3D-var	2015	MERRA からのモデル改良, エアロゾル同化
20CR	NOAA and CIRES	1871-2010	T62L28	EnKF	2010	地上気圧データのみ同化
20CRv2c	NOAA and CIRES	1851-2014	T62L28	EnKF	2016	地上気圧データのみ同化

れの詳細はコロラド大学のCompoらによる再解析ポータルサイト (<https://reanalyses.org>, 2017年11月29日閲覧確認) にまとめられています。

2. 長期再解析の作成方法

再解析プロダクトの利用者は数多くいらっしゃいますが、これがどのように作成されているかご存じの方は少ないのではないかと思います。

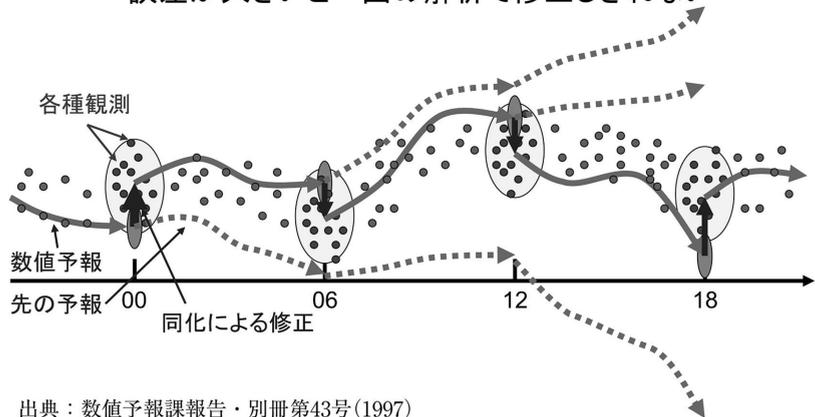
数値予報の現業では、高解像度 (2017年8月現在、水平方向20 km) の全球モデルを使って、データ同化と6時間予報を繰り返す「数値解析予報サイクル (データ同化サイクル, 第1図)」が運用されています。データ同化サイクルでは、6時間前の解析値を初期値とする6時間予報値を第一推定値 (たたき台) として、観測データの情報を取り込み、第一推定値を修正して解析値を作成します。データ同化サイクルは、物理的な整合性を持つ高精度のデータ同化と数値予報を交互に連続して実行することによって高精度の大気解析場を再現することを目的としています。

データ同化サイクルでは、第1図に示すように、ある時刻を初期値とする数値予報は予報時間が進むと実際の状況からずれていき、データ同化による修正をしないと破線のように誤差が拡大していきます。一定の時間間隔でデータ同化と予報を繰り返し、観測データの情報をモデルに取り込んで解析場を修正して、高品質の解析値を維持していきます。

また、空間的には、第2図に示すように観測データの水平分布に偏りがある場合には、最初は観測データの周囲で高精度の解析値が得られ周辺域の解析精度はそれより劣りますが、データ同化サイクルで同化と予報を繰り返すうちに高精度の情報が周辺域に伝播・拡散していき、地域的な差は多少あっても全体的に高精度の解析値になっていきます。

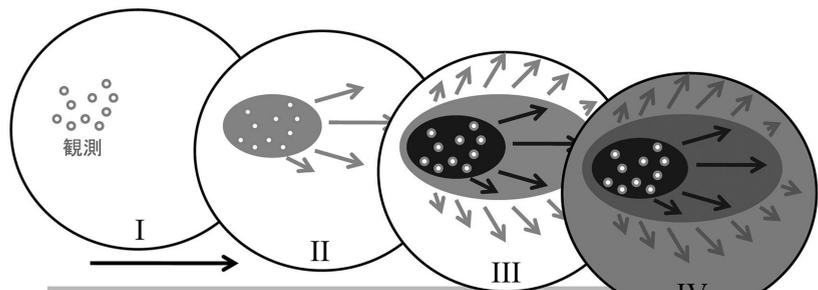
これを数十年間の長期にわたり繰り返すことによ

- 予報時間が長くなればなるほど誤差は増大
- 短時間の予報と同化の繰り返しで精度を保つ
- 誤差が大きいと一回の解析で修正しきれない



出典：数値予報課報告・別冊第43号(1997)

第1図 再解析の基盤技術：データ同化サイクル (1)。



- I. 観測分布は非一様
- II. データ同化により、観測周りの大気状態はより良い精度で解析される。予報によって、そのより良い精度の大気状態の範囲は拡大する。
- III. 次のデータ同化により、観測周りの大気状態はさらに良い精度で解析される。次の予報によって、より良い精度の大気状態の範囲はさらに拡大する。
- IV. これを繰り返すことによって、観測データの無い、もしくは不十分な地域でも、ある一定の精度で大気状態が解析されることになる。

出典：数値予報課報告・別冊第57号(2010)

第2図 再解析の基盤技術：データ同化サイクル (2)。

て高品質かつ時空間的に均質な解析値、すなわち気候プロダクトを作成するのが長期再解析 (long term Reanalysis) です。ここで、「再」は失敗のやり直しというネガティブな意味ではなく、過去のその時点にはできなかったことを最新のシステムを使って再現するというポジティブな意味で使っています。

再解析では現業数値予報の高解像度全球データ同化システムを基本としており、現業システムから多くのノウハウを利用させてもらっています。再解析からは観測データの品質に関する情報などの還元を努めています。

現業数値予報の全球データ同化サイクルは実時間1日あたり1日分を実行します。再解析は、これを過去に遡って数十年間分実行するものです。過去の時点の計算機や当時のモデルの性能では実現できなかった高精度で均質な大気状態が、最新版のデータ同化システムを使って長期間にわたって再現できることから、気候学者から再解析の提案がなされたのでした。ただし、モデルと計算機は高性能になっても、観測だけはやり直しができません。一部の衛星観測データはオリジナルの観測データから最新の手法によって再処理が可能ですが、その種類は限られます。再解析では、過去の観測データをできる限り収集し、それらの品質管理 (以下、QC) を施して品質のよいデータのみを使うようにすることがなにより重要です。たったひとつの低品質データを除去できず誤って同化してしまうだけで、データ同化サイクルによってその悪影響が引き継がれ、解析値の品質を大きく下げることになります。もちろん、現業のデータ同化サイクルでも観測データのQCが重要なものはいくつでもありませんが、過去に遡れば遡るほど品質に問題のあるデータが多いので、再解析でのQCは様々なエラーを想定して慎重に行う必要があります。再解析では現業と違って事前にオフラインでのQCが可能ですし、誤ったデータを復旧 (Recovery) することも可能です。紙媒体で残された観測データを電子化して使用する (データ救済: Data rescue) ことも可能で、それだけQCの重要性も高いと言えます。

現業運用モデルと同等の20 kmの高解像度のままでの数十年間のデータ同化サイクルを行うことは計算量や作成されるプロダクトの量が膨大になりすぎますので、再解析では解像度を落とし計算負荷を下げ実行します。JRA-55では水平解像度を55 kmに下げ55年分のデータ同化サイクルを実行しました。計算自体

は約3年でできましたが、観測データの整備やQC、データ同化システムの調整、予備実験による事前評価や、本計算終了後のプロダクト作成など、準備開始から終了まで、JRA-55では約7年を要しています。

以上のことからわかるように、再解析はあくまでもデータ同化の結果として作成される解析値です。学会の発表や論文などで再解析のことを「観測」と呼んだり、真値のように扱っていたりするものがありますが、データ同化に携わる者にとってはその部分がスキップされているように感じられ、心地よくありません。気象学における「解析 (Analysis)」という用語には2通りの意味があり、米国気象学会の用語集 (<http://glossary.ametsoc.org/wiki/Analysis>, 2017年11月29日閲覧確認) では明確に説明されています。ひとつは一般的な意味で観測データやモデルの結果を「分析」という意味、もうひとつはランダムに分布する観測データを規則的に並んだ格子点値に整えるの意味があります。再解析は後者の意味でデータ同化システムによって作成された解析値であり、いずれにしても、「観測」そのものではありません。

再解析の担当者として、高精度の再解析値を作成するための様々な努力をしていますが、それでも再解析値には様々な誤差が含まれていることを了解された上でご利用願います。誤差に関する情報はJRAの論文に記述しています。

3. ECMWF 再解析班への派遣

次に、大野木自身が再解析に関わることになった経緯を述べます。

私は1989年に数値予報課に転入して、台風の初期値解析や観測データのQC、データ同化やそのための包括的なデータベースCDAの構築 (大野木1996) 等の仕事を担当していました。CDAは、観測データにQC情報を付加したデータ同化用統合観測データのことです。再解析に関わるきっかけは、1998年4月から2000年3月までの2年間、ECMWFの再解析班に派遣される機会を得たことです。当時担当していた仕事とECMWFからの要請がマッチして私が派遣者に選ばれるという幸運に恵まれたのだと思います。ECMWFでは、ERA再解析チームの一員としてERA-40に携わりました。それまでECMWFには1979年のFGGEの再解析に金光正郎さん (故人)、ERA-15に野村厚さん (故人) が派遣されており、私はそれに続く派遣者となりました。

ECMWF では、Anthony Hollingworth 研究部長、Adrian Simmons データ課長の下に ERA 再解析班が置かれ、再解析の経験豊かな John King (Rex) Gibson 氏 (1998年10月まで班長)、Per Källberg 氏、Sakari Uppala 氏 (1998年11月から班長)、Angeles Hernandez 氏らと一緒に仕事をしました。後に JRA 再解析に熱帯低気圧周辺風データを提供していただくことになる米国の Michael Fiorino 氏も同時期に ERA に参加していました (1999年9月まで)。

ECMWF で与えられた仕事は、1978年以前を含む観測データの整備・品質調査とそれらの使用法の開発でした。ERA-40では、1979年以降を対象とした ERA-15からさらに20年遡るため、その間の観測データの整備と QC が必須です。その観測データの多くは米国 NCAR で Roy Jenne 氏が管理・整備して保存されていたものです。

アカデミックではないテクニカルな力仕事でしたが、それでも国・領域別にゾンド観測データの40年分の時系列を作成して昼夜の観測値を比較し、日射補正の有無の変遷から品質を確認して、その補正の必要性に関する情報を ERA-40 Report No.2としてまとめました (Onogi 2000)。これに関する仕事は同 Report の No.3 (Onogi and Sokka 2001), No.15 (Andrae *et al.* 2004) にも掲載されています。ECMWF 滞年の2年間は ERA-40の準備のみで、その本計算開始 (2001年1月) の前に帰国せざるを得ませんでした。再解析のデータ同化サイクルの実行システムを通じて ECMWF の優れた実験システムも学べて、この派遣時の経験がその後の数値解析予報実験システム NAPEX の構築や再解析実施に大きく役立ちました。

派遣期間中の1999年8月に第2回 WCRP 再解析国際会議が ECMWF 主催で開催され、日本からも多くの研究者が出席していました。この時点で使える再解析プロダクトは NCEP の R1 と ECMWF の ERA-15 しかなく、出席していた安成哲三先生の「日本でも再解析をやりたいね。」という言葉が印象に残りました。

帰国して数値予報課に戻ったのは2000年4月です。その年は気象庁のスーパーコンピュータシステム NAPS の更新 (2001年3月運用開始の NAPS7への更新) と、CDA の改良作業を進め、2001年5月に ver.1 より拡張性を持たせた CDA ver.2 を現業化することができました。また、ECMWF の優れた実験システムに少しでも近づくべく、NAPEX の構築を進め、2001年度末にはその初版が完成しました (大野木・入

口 2003)。

4. JRA-25

(1) 立ち上げ

時期は少し前後しますが、2000年の夏に電中研の筒井純一さんから、電中研の研究計画を立案するにあたって気象庁に対して再解析の共同研究のお誘いがあり、しかも計算には電中研のスパコンを使用させていただけるとのお話でした。これを受けて、当時気候情報課の気候モデル開発推進官だった平 隆介さんをはじめ、高野清治さんら、日本での再解析を実現しようとの思いを共有した気候関係者の熱心な調整の結果として、日本初の長期再解析 JRA-25実施にこぎつきました。気象庁側は当時の佐藤信夫数値予報課長、小佐野慎悟気候情報課長が積極的に電中研との調整にあたり、電中研側は筒井さんが計算機資源の使用を含む気象庁との共同研究計画の実施について所内の理解をいただくために努力され、電中研幹部の皆様へ決断いただいたことが大きかったと思います。このようにして、JRA-25は気象庁 (気候情報課と気象研究所気候研究部) と電中研の2001年4月から5年間の共同研究として開始することになりました。

もし電中研からこのようなお誘いをいただけていなければ、そしてそれが共同研究として JRA-25の実施につながっていなければ、日本での再解析実施はかなり遅れただろうと思います。その意味でも電中研には感謝の気持ちでいっぱいです。

欧州や米国で再解析が実施されるなか、日本での再解析実施は、欧米に対抗するとか日本の技術力を世界に示す (存在感を示す) ということだけではありません。国内での業務利用には現業モデルと整合性のある気候プロダクトが必要です。予報と解析は一体のものであり、系統誤差など特性の異なる海外の再解析プロダクトでは実際の利用や技術開発に支障がある場合も考えられます。研究利用には国産の再解析プロダクトがあればその品質情報の提供や研究成果の情報還元もしやすくなり、結果として日本の技術力が上がると期待されます。

(2) 準備と本計算

当時、私は立ち上げの状況を数値予報課で聞いておりましたが、気候情報課から再解析の具体的計画案の作成を依頼されて即日作成して提供したことや、NAPEX 構築時には長期再解析での利用も意識するなどできる限りの協力はしていました。NAPEX の

完成前の版は、2001年9月の3次元変分法導入時に発生した気候解析の不連続への対応のため、気候情報課の暫定JCDAS（気候解析用の最適内挿法でのデータ同化サイクル）としてそのままルーチン化されて利用されました。

そして2002年4月に私は気候情報課に異動し、再解析班長としてJRA-25再解析に本格的に携わることになりました。JRA-25の当初計画では、5年のうち、最初の2年間で観測データの準備、システム移植と予備実験、3、4年目で本計算の実行、5年目で結果の取りまとめ、論文作成、再解析プロダクト提供の予定でした。しかし実際にはそのように簡単に計画通りには進むことはなく、難題の連続でした。

まず、難題その1は観測データの準備です。気象庁に保存されていたデコードデータ（気象専用回線で入電した観測データをデータ同化サイクル入力用にフォーマットを整えたもの）は1975年2月からありましたが、ところどころにデータが全くない時期があり、また、データの量も1980年代は1990年代以降のデータ量よりかなり少ない状態で、海外機関からの観測データ取得が必須でした。幸いにも、派遣時の人脈を活かしてECMWFと交渉した結果、ERA-40で使った観測データをほぼ丸ごと提供してもらえることになりました。ECMWFのHollingsworth研究部長（当時）からは、「再解析はとても大きなプロジェクトだ。JRAに期待しているからぜひ頑張ってほしい。」との言葉をいただきました。この「ERA-40観測データ」のデータソースは十数機関に及びそれらから提供された観測データの集合体ですが、ECMWFの厚意により気象庁に代わって各機関からJRAでの使用許諾を取っていただきました。これはHollingsworth部長の配慮と聞いています。さらに、NCARからもSSM/Iデータを提供いただきました。大容量のデータでもあり難しい交渉でしたが、なんとかデータを手続き、再解析を実行できることになりました。ご支援いただいた気候・海洋気象部海務課（当時）には深く感謝しています。

実際には、ECMWFでのテープアーカイブ作業に時間が掛かるなどしたため（担当の方がほぼかかりっきりで作業して下さったそうです）、ERA-40観測データが届いたのは2年目の終わり頃になり、その時点で計画は既に1年遅れていました。入手したTOVS、ATOVSのデータ処理とQC作業が必要で、特に大変だったTOVSは坂本雅巳さんが、ATOVS

は古林慎哉さんが取り組みました。また、SSM/Iについては松本隆則さんが対応しました。衛星データ処理については、気象衛星センターから加藤浩司さん、小山 亮さんも気候情報課に3か月間併任駐在して対応されています。気象研究所の高橋清利さんには、中国の地面気象記録月報から積雪深データを電子化していただきました。

難題その2はデータ同化システムの電中研への移植です。これは2〜3年目に取り組みましたが、データ同化システムの移植はプログラム数が多く、そのうえ複雑で細かいデータ処理や計算機依存の処理が多いため、格子点値を扱う数値予報モデルの移植に比べると格段に難しいのです。さらに、スカラーマシンの日立SR8000（気象庁）からベクトルマシンの富士通VPP5000（電中研）への移植なので計算機のアーキテクチャも異なり、移植は困難を極めました。何しろどうやっても両者の結果が合わないのです。系統誤差のないランダムエラーの範囲に収められればよいのですが、結果の差を取ると明らかにバイアスがあります。電中研が移植作業専任のSEを2名割り当ててくれましたが、それでも問題を解決するまでに約半年かかり、データ同化システムの移植の困難さを痛感させられました。ここまでを最初の2年で終えるはずでしたが、早くも3年目がほぼ終了してしまいました。ここから2年で26年分の計算を完了させなければいけません。もはや予備実験をする時間的余裕はありません。ぶっつけ本番で本計算に突入することになりました。

難題その3は作成した再解析プロダクトの保存用ストレージの確保です。JRA-25の正式プロダクト量は約13TBですが、実験結果、中間生成物や一時ファイルなどを含めると30TB以上になります。それらを保存するストレージの確保が難題でした。幸いにも、ストレージ確保には、東大・小池俊雄教授と東大・柴崎亮介教授からのご支援をいただき、必要なディスク資源を確保できました。市販されていた外付けHDDの最大容量が256GBだった頃ですから、それを確保できたことはたいへん恵まれていました。ディスクの整備・設定は小出 寛さんが尽力してくれました。

難題その4は特に困難で、計算中に発覚した様々な不具合とそれへの対処でした。様々な不具合とは、例えば、熱帯に積雪域が大きく広がってしまったこと（2か月分やり直し）、使うべき観測データが使われて

いなかったこと（4か月分やり直し）などですが、とどめを刺されたのはGMSの再処理衛星風の風向が1994年の分から東西と南北で逆になっていた致命的なエラーでした。これに気付かないまま6年分近く計算してしまい、長期にわたる再計算をせざるをえない状況に追い込まれました。共同研究終了まで残りは半年あまりしかなかったため、数値予報課にお願いして、そのご厚意により、NAPS更新準備用の数値予報課の計算機の一部を借用させていただくことができました。そのほかにも、米国のMichael Fiorino氏から提供してもらった熱帯低気圧周辺風（TCR）データに2000年問題が内在していて日付が正しく認識されずそのデータが2000年1月以降使用されていませんでした。これも気付かずに計算してしまった2年1か月分の再計算も強いられることになり、結局8年分以上の再計算をしました。そのようなバタバタに見舞われながら、古林さんには正月返上で気候データ同化システムのNAPS更新作業（NAPS7⇒NAPS8、2006年3月運用開始のスーパーコンピュータシステム）に集中対応してもらい、JRA-25の本計算は共同研究期間終了（2006年3月31日）直前の2006年3月24日になんとか完了したのでした。まさに綱渡りでした。

JRA-25の計算は、電中研のスパコンで実行しましたが、計算量の膨大さ、移植の苦労など、研究機関である電中研が再解析の結果を利用するのではなく作成する作業を実施するにはかなりの負担をかけたのではないかと思います。電中研の主担当だった筒井純一さんと初鹿宏壮さんには深く感謝しています。

難題その5は再解析プロダクトの提供です。計算結果から提供プロダクトを作成する作業は気象要素の増強を含めて小出 寛さんが中心になって取り組みました。提供にあたり、プロダクトの取扱には調整が必要でした。まず、JRA-25のプロダクトは気象庁と電中研の共有物なのですが、共同研究開始時にはその取扱いについて何も定めていませんでした。両者の思惑の違いもあったことから、企画課の指導・調整を受けて、覚え書きを交わしました。また、研究者への提供についても、企画課が対応して下さり、オンライン提供への道を開いていただきました。これがその後の利用拡大と国際的地位の確立につながっており、これらの対応をしてくださった企画課（当時）の長谷川直之さんには深く感謝しています。オンライン提供システムの準備は大河原 望さんが担当しました。

JRA-25実施にあたっては、気候モデル開発推進官

だった萬納寺信崇さん、尾瀬智昭さんには、共同研究立ち上げや大学等への対応などをサポートいただきました。また、気象研究所気候研究部の山崎信雄さん、釜堀弘隆さん、高橋清利さんは計算結果の評価を担当されています。オゾンデータは環境気象管理官室の真木貴史さんに提供いただき、数値予報課の北川裕人さんには、そのオゾンデータを用いた放射過程へのインパクト調査をしていただきました。また、ERAなどと比べて現実の台風をよりよく再現するため、Fiorino氏から提供されたTCRデータを使用しました。

共同研究の中で、外部委員からなる再解析推進委員会（浅井富雄委員長）を組織し、再解析実施の支援をしていただきました。特に、木本昌秀委員からの「どんな卑怯な手を使ってでも再解析を必ず完成させよ。」との檄に励まされたのを思い出します。このような研究者側からの支援はJRA-25実施の苦勞を乗り越える力になりました。

（3）論文作成と品質

再解析は国際競争にさらされることから、計算が終了してホッとしている暇はありません。速やかに国際的な情報発信をすることが必要で、計算と並行して、計算終了の1年前から総合報告論文の執筆に取りかかっています。気象集誌編集委員長（岩崎俊樹さん）の了解を得て、Special Edition 扱いで投稿段階からページ数制限を超えた論文とさせていただきます。投稿論文に対し、米国の査読者から、「日本の気象庁が運用しているモデルの情報がない、それを詳しく書け」、とのメジャー改訂の査読結果が戻ってきて、記述を増強した結果、印刷時64ページにもなる大部の論文（Onogi *et al.* 2007）になってしまいました。

そのようにして完成させたJRA-25は、熱帯低気圧の解析精度が優れているという特徴がありました（Hatsushika *et al.* 2006）。これはTCRデータが効果的だったことを示しています。また、全球降水気候計画GPCPの降水量データとの相関が良いなどの長所がありました。一方で、アマゾン域が乾燥している、成層圏の気温バイアスが大きく観測システムの歴史的变化に大きく影響されている、放射フラックス量の系統誤差が大きいなどの欠点がありました。宣伝できる長所がある一方、再解析担当としては不本意な部分も多い再解析でした。

（4）「次」に向けた準備

そのような中、「次」の再解析に向けた作業をしておく必要があります。JRA-25の計算と並行して第2次再

解析に向けて NAPS 上での計算機資源の確保に努めました。JRA-25でのデータ同化システムの移植作業にかなりの労力を使ったことから、移植をなくしてその分の労力を事前の品質チェックや予備実験に充て、事前の準備を十分に行っておきたいという思いがありました。NAPS8で再解析用の計算機資源を確保していただけたことにはたいへん感謝しています。

さらには、私が ECMWF から2000年に帰国して以来途絶えていた気象庁から ECMWF への派遣について、Adrian Simmons データ課長と協議を続け、2006年4月から古林さんを派遣して再開しました。

5. 第3回 WCRP 再解析国際会議

世界気候研究計画 WCRP が主催する再解析国際会議は第1回が1997年に米国 (NCEP 主催) で (大野木ほか 1998)、第2回が1999年に英国 (ECMWF 主催) で (小出ほか 2000) 開催されて、第3回は再解析実施センターの第3極である日本でという話になっていました。当方としては、JRA-25が完了したタイミングで開催したいと思い、それまで待ってもらって、2008年の1月に東京で開催することになり、私は事務局長として準備にあたりました。

様々な調整については国際企画委員会を組織して進めました。委員には、私の ECMWF 派遣時の上司である Adrian Simmons 氏、当時私が委員を務めていた全球気候観測システム GCOS の気候のための大気観測パネル AOPC 議長の Michael Manton 氏、NCAR の Kevin Trenberth 氏らに中心になっていただき、WCRP 事務局の Gilles Sommeria 氏にも協力いただいて彼らの推薦を基にメンバーを依頼しました。委員には金光正郎氏、Eugenia Kalnay 氏、Phillip Arkin 氏らに加わってもらいました。プログラムの作成、招待講演者などの推薦はこの企画委員会でメールにて議論しましたが、Trenberth 氏の発言力が強く、彼が何かを提案してそれに対して数名が賛同して決まってしまう、というパターンで多くが進んだように思います。

会場については、いろいろな会場の可能性をあたり、最終的には、東京大学大学院工学研究科の小池俊雄教授と東京大学生産技術研究所の沖 大幹教授のご厚意により生産研究所の音響設備の優れたコンベンションホールを利用することができました。

第3回の会議を JRA-25の完成を受けての再解析国際会議と位置づけて、JRA-25の気候図 (JRA-25

Atlas) を竹内綾子さんに作成してもらい、その冊子を予稿集と一緒に参加者に配布するように手配しました。

開催資金は、気象庁と電中研で半額ずつ負担しました。海外では研究集会の開催費用は参加者から参加費を徴収して賄うのが一般的ですが、気象庁主催の場合は国の機関としてそれができません。このあたりの事情は Trenberth 氏ら欧米の研究者には理解しにくく、らしく説明に苦労したのを覚えています。

海外の参加者からの旅費補助については、途上国からの参加者に WCRP, GCOS, 地球観測に関する政府間会合 GEO からの補助を、米国からの参加者に NCAR, NOAA, 米国国立科学財団 NSF からの補助を受けることができました。これらの補助については事務局を通さずにできるよう調整して、支出いただく機関から補助対象者に適切な通貨で直接支払われました。

本会議は2008年1月28日～2月1日に開催しました。小池俊雄教授に招いていただいた総合科学技術会議の薬師寺泰蔵委員にも初日の挨拶をいただき午前中は傍聴いただきました。私は冒頭の招待講演として JRA-25の講演をさせてもらい、そのほか、日本の研究者、気象庁職員から多くの口頭発表、ポスター発表がありました。合計で21か国から260名の参加者を得て、会議は成功裏に終了しました (大野木ほか 2008)。開催に向けてご協力いただいた関係者の皆様に改めて感謝します。最後のパネルディスカッションでは、欧州の参加者数名に議事メモ作成を依頼して快く引き受けていただき、英国気象局 UKMO の Nick Rayner さんが終了後も居残ってそれらをまとめて下さいました。このような参加者からの協力はたいへんありがたいものです。

6. JRA-55

(1) いったん再解析を離れる

再解析国際会議終了後の2008年4月に私は気候情報課から異動し、数値予報課数値予報班の観測データ処理グループ長を2年間、気象研究所台風研究部第一研究室長を1年間務めました。

その間、後任の再解析班長を海老田綾貴さんが務め、第2次再解析 JRA-55の立ち上げと準備をして2010年はじめから計算を開始しました。海老田さんは新たな再解析立ち上げに向けた調整を上手くリードしてくれて、必要に応じて私からも助言しました。その間の成果は、JRA-55の中間報告論文としてまとめら

れています (Ebita *et al.* 2011).

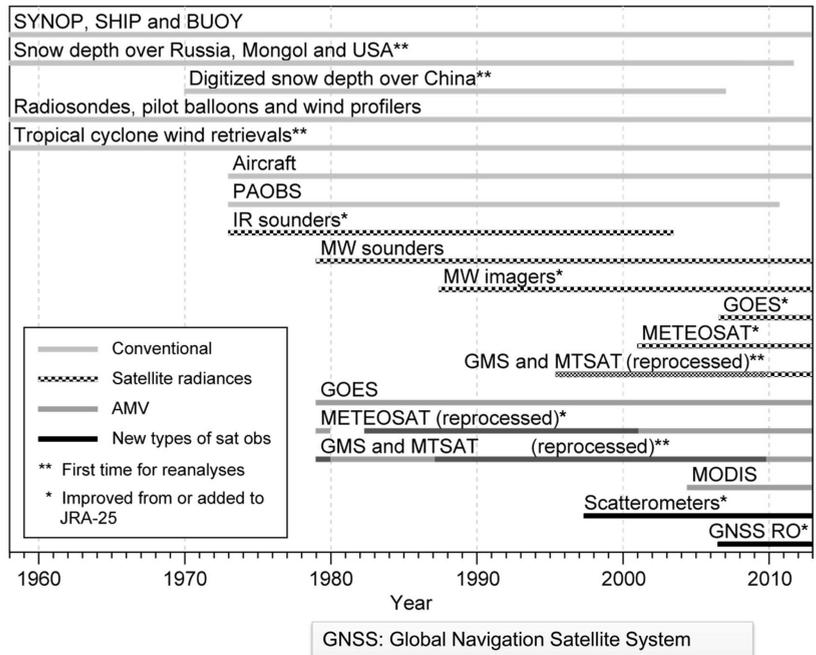
(2) 準備と計算実行

2011年4月に、私は3年ぶりに気候情報課に戻り、再び再解析を担当する機会をいただきました。今度は気候モデル開発推進官としてマネジメントが主になりましたが、思い残しの多いJRA-25からの改良を図るため、様々な側面から計算の実行を指揮しました。

JRA-55は、2009年12月時点の数値予報現業の全球データ同化システムに準じたシステムを用いた、1958~2012年の55年分の再解析です。使用した観測データは第3図に種別ごとの時系列で示します。

JRA-55では、JRA-25で使用した「ERA-40観測データ」に加えて新たに従来型観測の追加データや衛星再処理データなどを入手して使用しています。システムの水平解像度はTL319 (55 km 相当) で、JRA-25から5年9か月分進歩したシステムを用いています。特に放射スキームの改良により成層圏の系統誤差が大幅に軽減されています。大きな変更はデータ同化手法が3次元変分法から4次元変分法になっていることです。50年間以上を対象とする再解析としては、JRA-55は4次元変分法を使った唯一の再解析です。衛星観測データの少ない(無い)1978年以前については、予備実験の結果を踏まえて背景誤差を大きめにデータ同化サイクルを実行しています。JRA-25とJRA-55の主要部分について第2表に示します。

実施体制は、海老田綾貴さんの後任として原田やよいさんが再解析班長となり計算結果のモニターと解析を担当、古林慎哉さんが衛星データの担当、太田行哉さんが地上観測やゾンデによる高層観測等の従来型観測データと計算実行システムの担当、小野田浩克さんがweb ツールと一部衛星の担当として、JRA-55の実行体制が整いました。小野田さんの前任の守谷昌己さんにはオゾンデータや衛星データ処理を、宮岡健吾さんには衛星による積雪域データを作成いただいでいま



第3図 JRA-55期間の観測システムの変遷。

す。

気象研究所気候研究部第五研究室では、小林ちあきさんがJRA-55実行システムを気象研究所システムに移植しました。両者のシステム構成の違いなどから移植作業は簡単ではなく、気象庁本庁のJRA-55システムを構築した太田行哉さんのサポートを得ながら行っています。こうしてJRA-55 Family (後述) の計算を行う体制を整えました。また、同研究室はJRA-55の評価を担当し、釜堀弘隆さんは主として熱帯低気圧の再現性等を、小林ちあきさんは成層圏の循環場の評価 (Kobayashi and Iwasaki 2015) をしています。

JRA-25では何度も致命的なエラーによる再計算を強いられたことから、計算結果のモニターを特に重視し、様々な変数の時系列や水平分布をチェックしやすいようにモニターツールを充実させました。また、実行システムの管理を整え、バージョンの変更や管理はバージョン管理ソフトウェアのSubversionを利用しその記録を進捗や評価結果とともにwikiで共有して、誤りのないように努めました。さらに、気候情報課、気象研究所気候研究部のメンバーからなる評価グループを設置して適時に評価会合を開催して品質を確認しました。

JRA-25に続き、気象庁地球環境・海洋部主催で長

第2表 JRA-25/JCDAS と JRA-55の比較.

	JRA-25/JCDAS	JRA-55
対象期間	26年 (1979-2004) /(2005-2014.1)	55年 (1958-2012) (2013年以後もリアルタイムに継続)
システムのバージョン	2004年3月の現業システムに準拠 ただし, 層積雲スキームを先行導入, SSM/I 可降水量同化を採用	2009年12月の現業システムに準拠
分解能	T106L40 (~110 km) (上端0.4 hPa)	TL319L60 (~55 km) (上端0.1 hPa)
時間積分法	オイラー法	セミラグランジュ法
長波放射	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-タイプ及び P-タイプ
データ同化手法	3次元変分法 (インナー-T106)	4次元変分法 (インナー-T106)
背景誤差共分散	一定値	一定値だが1972年以前は一律1.8倍
バイアス補正 (ゾンデ)	Andrae <i>et al.</i> (2004)	RAOBCORE v1.4 (Haimberger 2007)
バイアス補正 (衛星放射輝度温度)	坂本 (2007)	変分法バイアス補正 (VarBC)
陸面状態の 推定	オフライン SiB (6時間間隔で大気から強制)	オフライン SiB (3時間間隔で大気から強制)
温室効果ガス	CO ₂ (375 ppmv の一定値)	H ₂ O, CO ₂ , O ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CFC-11, CFC-12, HCFC-22 (年平均値を日別値に内挿)
オゾン	日別 3次元データ (MRI-CCM1; T42L45)	(-1978) 月別気候値 (1979-) 新日別 3次元データ (MRI-CCM1; T42L68)
エアロゾル	海陸別年平均気候値	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 海陸別年平均気候値
海面水温/海水	COBE SST v1.2	COBE SST v1.5

期再解析推進委員会を設置し, 岩崎俊樹東北大学教授に委員長をお願いして JRA-55の進捗確認や事前評価のための取り組み等について議論しました。ここでの議論の中で, JRA-55のシステムを使いながら観測データの使用方法を変えて観測システムの変遷の影響を除いた再解析実施の提案があり, それが後述する気象研究所気候研究部の JRA-55C, JRA-55AMIP の実施につながっています。

また, JRA-55計算完了前に実施した計算終了期間の事前評価について, 「天気」2012年6月号で公募し, 14名の方から評価報告をいただきました。これらは早期の JRA-55の品質評価につながり, その特長を早い時点で把握することができました。

新しい再解析班の体制は分業と連携がうまく機能して JRA-55の計算は順調に進みましたが, それでも一

部期間の再計算を強いられました。マイクロ波放射計積雪域リトリバルの位置間違いのため5年強の再計算, 1970年代の VTPR 放射輝度温度データの雲域判別不具合のため5年半の再計算などです。再計算の年数分では JRA-25以上になりますが, モニターシステムを充実させたおかげで発見が早期だったのと, データ同化実行システムが優れていたため速やかに対応でき, JRA-25で慌てふためいたのと比べると落ち着いて対処できました。

(3) JRA-55 Family

再解析推進委員会の議論を踏まえて, 気象研究所で JRA-55 Family となるサブプロダクト JRA-55C (小林ちあきさん担当), JRA-55AMIP (遠藤洋和さん担当) を作成しました。いずれも JRA-55と同じデータ同化システムを使って観測データの使用方法を変更しています。JRA-

55C は衛星データを使わず, 期間を通して存在する従来型観測データを用いています。これにより衛星観測システムの頻繁な変更に伴う不自然な変化を排除し, 均質な気候プロダクトを作成しています。もちろん, 衛星データを使っている JRA-55に比べて品質は落ちますが, 気候プロダクトとしての一貫性, 均質性に優れています。ゾンデ観測データの同化だけでも熱帯成層圏の準二年振動 (QBO) が再現されるなど, 一定水準の品質を保持しています。JRA-55AMIP は観測データを一切使わない, つまりデータ同化サイクルに観測データを入れずに空回しして数値予報モデル部分の機能のみを用いて作成したプロダクトで, JRA-55システムのもつバイアスの特定ができます。JRA-55 Family のような取り組みは世界初で, 2012年5月に米国メリーランド州で開催された第4回 WCRP 再解

析国際会議（大野木ほか 2012）では高い関心を集めました。

（4）JRA-55のプロダクト

JRA-55の計算は2013年3月に終了しました。そのあと公開用プロダクトの作成作業を進めましたが、計算出力として作成していたプロダクトで極点での内挿処理に誤りが見つかり、それを修正した上で2014年2月から JRA-55プロダクトの提供を開始しました。

また、JRA-55は2013年以後もそのまま気候データ同化サイクルとして名称は JRA-55のまま準リアルタイムに継続して（約2日遅れでプロダクト作成）、JRA-25/JCDAS から代わるものとなりました。

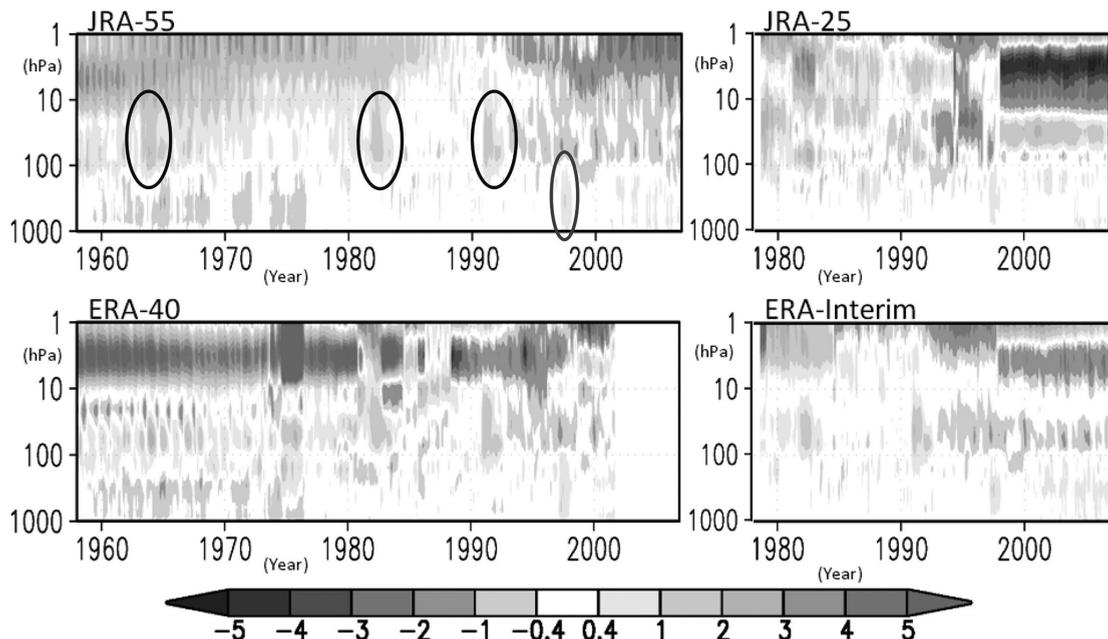
JRA-55プロダクト提供開始の代わりに2014年1月をもって JCDAS の計算を中止し、JRA-25/JCDAS のデータ提供は終了しています。JRA-25/JCDAS のプロダクトは合計35年1か月分（1979年1月～2014年1月）となりました。JRA-25/JCDAS プロダクトは NCAR の RDA (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds625.0/>, 2017年11月29日閲覧確認) から取得できません。

（5）JRA-55の品質

次に、JRA-55の品質について述べます。JRA-55は、過去半世紀以上を対象とする全観測システムを

使った再解析としては ERA-40 以来のものであり、十年規模変動や気候変化に関する研究への利用が期待されるため、時間均質性の評価は非常に重要です。

第4図は、JRA-55、JRA-25、ERA-40、ERA-Interim について、各指定気圧面のそれぞれの全球平均気温からの偏差を示しています。全球平均気温の期間はこれら4つの再解析に共通の1980年から2001年までの22年分としています。JRA-25では1998年に大きな不連続がありますが、衛星データが TOVS から ATOVS に替わった影響が出ています。これはモデルの成層圏にバイアスがあることが大きな原因で、観測データのバイアス補正が十分でないこともその理由です。ERA-Interim も同時期に成層圏上層に小さな不連続があります。また、ERA-40では、1970～80年代の成層圏に不連続が見られます。これらと比べると JRA-55は特に不連続がなく時間的に均質で、白黒の図ではわかりにくいですが対流圏の気温上昇と成層圏の気温下降という地球温暖化による鉛直構造の変化傾向が再現されています。また、この期間中の下部成層圏には1963年のアグン、1982年のエルチヨン、1991年のピナツポの三大火山噴火の影響による昇温が見られますし、対流圏には1997～98年の顕著なエルニーニョ現象に伴う昇温も見られます（第4図の○で囲ん



第4図 再解析の相互比較（気温の長期変動の再現性）（1981～2001年全球平均値（高度別）からの気温偏差（K））。

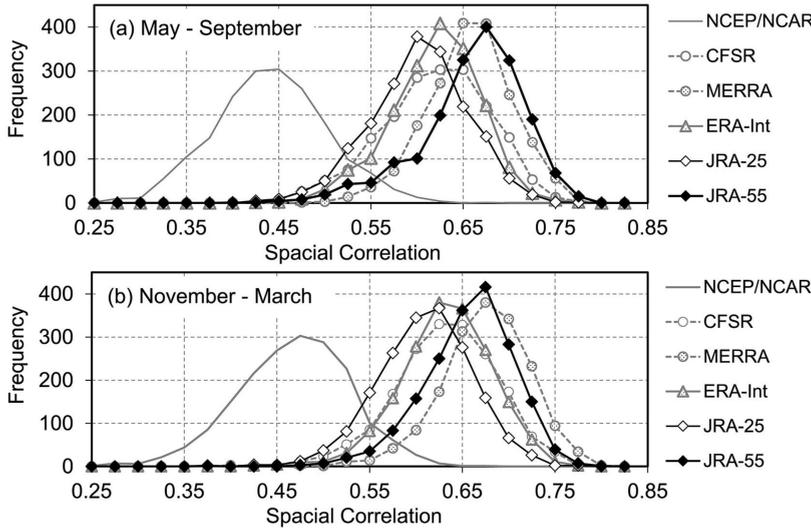
部分)。

第5図は、各再解析の熱帯降水量と TRMM 衛星の観測による降水量との相関を示します。これらの中

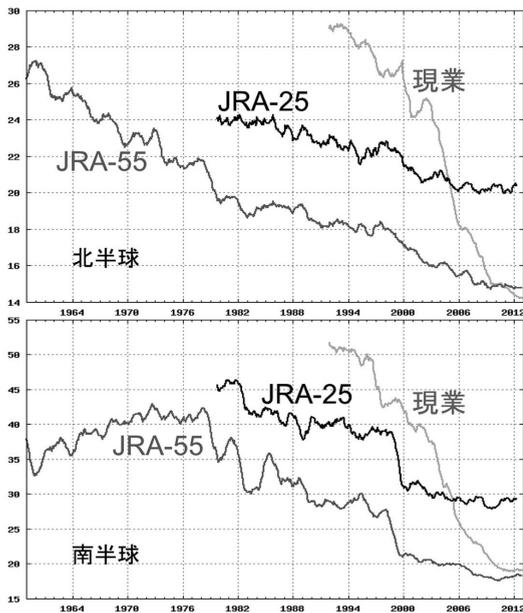
では JRA-55の相関が高く、降水量分布の再現性が優れていることがわかります。

第6図は、現業解析値、JRA-25、JRA-55、JRA-

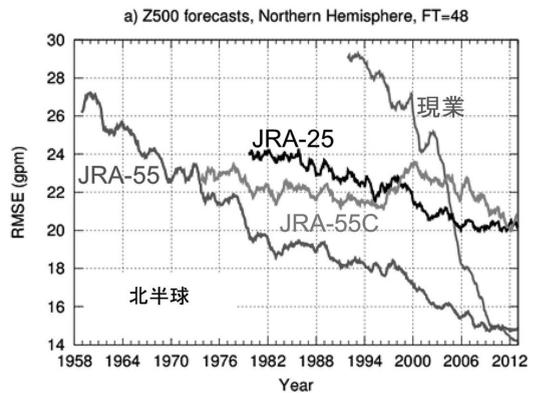
55Cのそれぞれの解析値を初期値とする48時間予報 (FT=48) の500 hPa ジオポテンシャル高度 (Z500) の平方根平均二乗誤差 (RMSE) の時系列です。これによってそれぞれの解析値の品質を評価できます。現業解析値は計算機の高性能化に伴うモデルの改良を反映して急速に誤差が軽減されています。JRA-25、JRA-55の2つの再解析では緩やかに改善しています。観測システムの変遷により年代とともに改善していますが、時間的な均質性は現業解析値に比べて優れているといえま



第5図 日降水量空間相関係数の出現頻度分布。1998~2009年期間の、熱帯域 (22S-22N) における各再解析の日別降水量空間相関係数の出現頻度分布 (対 TRMM)。 (Harada *et al.* 2016)



第6図 (a) 再解析値を初期値とする再予報北半球・南半球の成績。48時間予報の500 hPa 高度 RMSE (m) 時系列 (12ヵ月移動平均) を示す。



第6図 (b) 第6図 (a) の北半球に JRA-55C を追記したもの。

す。また、JRA-55はJRA-25よりスコアが大幅に改善していることから高い品質であることがわかります。1973年以後のJRA-55Cでは衛星観測システムの変化の影響を受けていないので期間を通してスコアはほぼ同程度ですが、その分、最近の年代になるほどJRA-55より品質は劣っています。なお、南半球でJRA-55の1950、1960年代の方が1970年代よりRMSEが小さいのは、観測データが非常に少ないためにデータ同化で第一推定値がほとんど修正されず、いわゆる「予報-予報サイクル」状態になっているためである、すなわち、本来予報値と独立であることを仮定した解析値に予報誤差が無視できないほど含まれた結果、過小評価になっているものと推測されます。

このほか、JRA-25で問題となったアマゾン域の乾燥は、JRA-25から陸面過程に抜本的な改良がない状態でしたが、地上気圧観測データの使用方法を工夫することによってそれを軽減しました。GNSS 掩蔽データ同化の改良バージョンの現業化は2012年12月からですが、JRA-55ではそれを2006年から適用しています。

以上のように、JRA-55の品質は、JRA-25から大幅に改善しています。ECMWFは、JRA-25の時は、「頑張ったね。完成おめでとう。でも品質には問題あるね。」というような感じの対応でしたが、JRA-55ではその品質の高さを認めて自らのERA再解析の検証用に使ってくれています。

JRA-55のシステムや詳しい品質については、2本のJRA-55総合報告論文 (S. Kobayashi *et al.* 2015; Harada *et al.* 2016) を参照ください。JRA-25の論文が大部だった反省から論文を分けて、JRA-55の作成方法と基本的な特性を第1部として前者に、詳細な品質評価を第2部として後者に記述しています。前者は2015年の気象集誌論文賞を受賞しています。なお、前者については日本語版が平成26年度季節予報研修テキスト (気象庁地球環境・海洋部、気象庁ホームページから閲覧可能) にあります。また、JRA-55CについてはC. Kobayashi (2014) をご覧ください。

JRA-55の品質で残念だったことが2つあります。ひとつは熱帯低気圧周辺風 (TCR) データに問題があり、特に期間後半で熱帯低気圧の強度が弱めに解析されていることです。JRA-25で使用したTCRは問題ありませんでしたが、JRA-55用に再提供されたTCRに問題が混入していたようで、これは計算終了直前に発覚しました。もうひとつは、積雪域の海岸付

近での内挿処理に不具合があったことです。この問題はJRA-55のプロダクト提供開始後に発覚しました。両方とも期間全体にわたる不具合のため計算のやり直しはできず、その原因と影響範囲を詳しく調査して、前者については論文に、後者については説明をJRA-55のホームページに掲載しています。JRA-25に比べてJRA-55では慎重に作業を進めてミスもかなり減りましたが、不具合を除去しきれなかったのは反省点です。積雪関係はこれまでも何度か不具合があって再計算をしましたが、JRAにとって積雪は鬼門なのかもしれません。今後は積雪の扱いには特に気を配る必要があることを痛感しています。

(6) 領域ダウンスケーリング DSJRA-55

JRA-55実行時に日本国内向けのプロダクトを作成することを目的として、JRA-55の本計算終了後に再解析用の計算機資源等を使って領域ダウンスケーリングを実行し、DSJRA-55を作成しました (計算の早期実行のため、期限付で数値予報課プログラム班からの配慮もいただいています)。DSJRA-55のシステムは2012年11月時点の現業メソモデルに準拠しています。システム構築は山田 崇さん、計算は萱場互起さんが担当しました。5 kmの解像度で1時間毎に計算値を出力したためプロダクトの総容量がJRA-55の約3倍の200 TBに及び、そのほとんどをテープ媒体に保存してディスク上には展開できない状態でした。

DSJRA-55のプロダクトは形式変換の後、東京大学が運営するデータ統合・解析システムDIASにお渡ししており、DIASから取得可能です。DSJRA-55の詳細や評価についてはKayaba *et al.* (2016) を参照ください。DSJRA-55の品質について、気温や降水量の再現精度について観測データと比較したところ、年々の気候変動は概ねよく再現されています。一方、特定の季節や領域でバイアスがあるなど問題点もあります。DSJRA-55によって期待される極端現象の再現性については概ね良好ですが、大雨発生回数や短時間強雨発生回数がやや少ない傾向がみられました。

DSJRA-55は解像度が5 kmと細かいですが、解析値ではなく予報値であることにご注意ください。解析では得られないような、予報を実行して初めて計算できる降水量などの地上の様々な気象要素や鉛直積算量のプロダクトは利用をお勧めできますが、JRA-55の解析要素、例えば気圧や風は、DSJRA-55ではなくJRA-55の利用をお勧めします。特に風の場合は、DSJRA-55の解像度が5 kmであっても現実の地形は

再現できないため、細かい風向・風速は実際とは異なる可能性が高いこと、予報値であるため実況と低気圧の位置などが微妙にずれていれば風向・風速が大きく変わっている可能性もあるからです。大気境界層付近の風ならば、JRA-55のモデル面解析値（解像度は55 km）の下層の風を利用するのが適切と考えられます。高層の気象要素については、解析値である JRA-55の利用をお勧めします。

(7) JRA-55の拡張

東京大学先端科学技術研究センターの中村 尚教授の研究室と気象研究所の釜堀弘隆さんが共同で、JRA-55 C のデータ同化システムを使い海面水温データを高解像度版に変更した計算をしています（JRA-55CHS, Masunaga *et al.* 2018）。大気に比べて解像度の粗かった海面水温データを高解像度に変更することで海上の大気現象の解析に改善が見られます。このように JRA-55の本計算終了後も大学等研究機関との連携が進んでいます。

7. JRA-55の利用促進

(1) 再解析プロダクト提供の窓口拡大

再解析プロダクトの容量は膨大なものになります。JRA-55では指定気圧面解析値などごく基本的なプロダクトだけで5 TB、標準的なプロダクトで20 TB、3次元物理量モニターを含む全プロダクトで70 TBに及びます。JRA 再解析プロダクトは、JRA-25の時から研究目的には気象庁データ提供システムから提供し、商用目的には（一財）気象業務支援センターから提供しています。

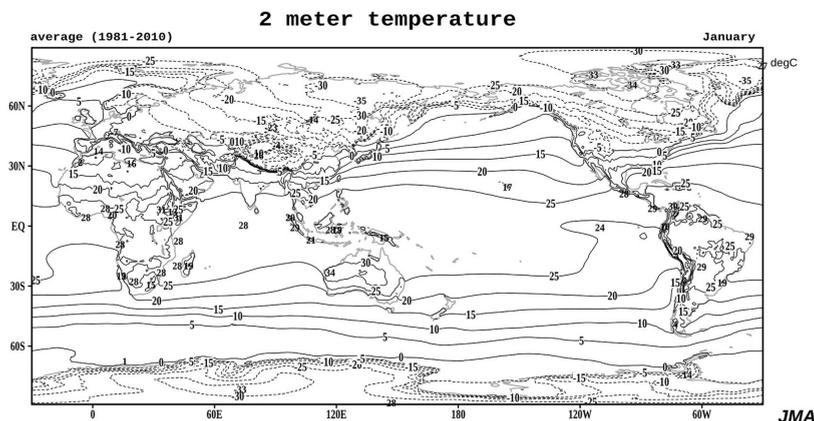
JRA-55では気象庁から標準プロダクトを提供していますが、利用が多いことから外部研究機関等と交渉しその協力を得て複数のサーバからプロダクトを提供しています。詳細は JRA-55のホームページ (http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_ja.html, 2017年12月6日閲覧確認) を参照ください。国内では東京大学が管理している DIAS, 筑波大学計算科学研究センター (CCS), 京都大学生存圏研究所 (RISH, NetCDF形式で提供) から、国外では米国 NCAR から提供しています。また、WCRP からの依頼により WCRP の気候データベースに指定されている NASA の地球システム格子点データベース ESGF にプロダクトを提供し、他の再解析などと形式を合わせるなど加工した上で提供されています。さらに、ECMWF から提供されることになっています（2017年8月現在、準備中）。この中で、DIASとNCARからは、JRA-55の全プロダクトと JRA-55C, JRA-55AMIP の全プロダクトが提供されています。海外機関からのプロダクト提供交渉に関しては企画課・国際室にたいへんお世話になっています。

(2) JRA-55アトラス

JRA-25でも気候図（アトラス）を作成しましたが、JRA-55ではそれをさらに充実させた JRA-55アトラスを作成しています。上口賢治さんが担当しました。JRA-55アトラスでは、内容の拡充のほか、色彩としてフルカラー、ユニバーサルカラー、白黒の3種類を用意して様々なユーザーや用途に対応しています (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/jra/atlas/jp/index.html>, 2017年12月7日閲覧確認)。白黒図の一例を第7図に示します。

(3) 国際宣伝 (JRA Go! Go!)

再解析は米国、欧州、日本で実施されています。米国の再解析は当初から利用目的無制限かつ無料でダウンロードできるようになっていて、その品質とは無関係に世界中で利用が進みました。一方、ECMWFは、ERA-15では有料販売していましたが次第に提供条件を緩めて、現在では利用目的無制限かつ無料でダウン



第7図 JRA-55アトラスの例。

ロードできるようになっています。ERAはその品質の良さから広く利用されています。JRA再解析もプロダクト提供の窓口を増やして非営利目的に提供していますが、その普及度は欧米の再解析に比べて低いのが実情です。

その理由としては、英語での情報発信が不利な点は否めません。それでも、JRA-25、JRA-55とも、中間報告の速報論文や、本計算終了後速やかに総合報告論文を発表するなどできる限りのことはしています。それと同時にJRA-55を売り込むことが重要と考え、海外の研究集会や国際会議の場ではJRA-55をJRA Go! Go!と呼んでとにかく名前を覚えてもらうことを重視しました。そういった努力の成果か？最近ではJRA-55の論文引用数の増加ペースも上がってきているようです。

8. 再解析の利用

(1) 気象庁業務への利用

気象庁では、地球環境・海洋部を中心に多様な業務でJRA-55再解析が利用されています。作成元の気候情報課ではそのほとんどの業務がJRA-55再解析を基盤としています。季節予報は平年値からの偏差を予報しますが、その平年値にはJRA-55が使われていますし、ガイダンス作成にも使われています。気候系監視でもJRA-55を基準としてそこからの偏差で評価します。異常気象情報センターの異常気象分析検討会のインタラクティブな気候解析ツールiTacsでは、JRA-55を使って様々な解析ができるようになっています。海外向けには異常気象情報センターがTCCとしてアジア太平洋諸国への技術支援の基礎資料にJRA-55を使用しています。季節予報モデル開発においてはハインドキャスト（過去事例の再予報）の初期値や季節予報の検証、気候学的な評価などに利用しています。また、エルニーニョ監視・予測のためにJRA-55からの大気強制力を利用した海洋再解析を実行しました。海

洋気象情報室では海面水温変動監視や海況解析・予測システムのモデル駆動などに使われています。環境気象管理監室では、オゾン解析や成層圏の監視、温室効果ガス解析に使われています。

地球環境・海洋部以外では数値予報課でアンサンブル予報の再予報の初期値や検証用に利用されています。気象研究所では様々な研究・調査・開発に、気象衛星センターでは過去の衛星データの再処理の参照値としてJRA-25が使われ、それが次のJRA-55用のデータとして提供されています。気象大学校では卒業研究の教材として、地方官署では過去の事例解析等に使われています。

気象庁の季節予報モデルはECMWFが主導するマルチモデルアンサンブルシステムEUROSIPに参加しています。EUROSIPではその品質を保持するため厳しい技術要件が課せられており、高精度の季節予報モデルのみが参加を許されています。2015年に導入した新しい季節予報モデルJMA-MRI/CFS2で応募して同年12月のEUROSIP運営委員会で参加が認められました（2016年7月のECMWF評議委員会でも正式承認）。その理由のひとつがJRA-55を利用して運用している現業予報とハインドキャストとの一貫性への高い評価でした。

(2) 研究利用と論文引用数

再解析プロダクトは、気象学・気候学等の研究の基盤データとして広く使われています。個別の研究者は

第3表 長期再解析論文引用数。

再解析名	論文	引用数
NCEP/NCAR R1	Kalnay <i>et al.</i> 1996	24731
NCEP/DOE R2	Kanamitsu <i>et al.</i> 2002	4120
CFSR	Saha <i>et al.</i> 2010	2454
MERRA	Rienecker <i>et al.</i> 2011	2564
MERRA-2	Gelaro <i>et al.</i> 2017	45
20CR	Compo <i>et al.</i> 2011	1746
ERA-40	Uppala <i>et al.</i> 2005	6608
ERA-Interim	Dee <i>et al.</i> 2011	9195
JRA-25	Onogi <i>et al.</i> 2007 Onogi <i>et al.</i> 2005 (中間報告)	1570 (968) 106
JRA-55	S. Kobayashi <i>et al.</i> 2015 Harada <i>et al.</i> 2016 Ebita <i>et al.</i> 2011 (中間報告)	600 (303) 28 276
JRA-55C	C. Kobayashi <i>et al.</i> 2014	17

引用数はGoogle Scholar (2017.12.7時点)による。

()内はJMSJ公式発表 (2017.7.27)。

もちろん、研究プロジェクトでも使われています。たとえば、WCRPのSPARCで実施しているS-RIPでは複数の再解析データを比較しながら成層圏の研究が進められています(Fujiwara *et al.* 2017)。また、海洋分野ではOMDP/CLIVARにおける海洋モデル駆動用リアルタイムデータセット構築にも利用されています。

再解析プロダクトの研究への利用は論文の引用数にも現れています。第3表に、世界の再解析論文の引用数を示します。これらの数はGoogle Scholarによるものです。JRA-25とJRA-55については、(公社)日本気象学会から半年ごとに公式に発表される気象集誌の論文引用数とともに記載しています。

見てわかるように、NCEP/NCAR R1の引用数は24000を超え、圧倒的な多さです。ECMWFのERA-Interimの引用数の伸びは速く、あっという間にERA-40を抜き去り、近いうちに10000に到達しそうです。米国のCFRSR, MERRA, 20CRも伸びていますが、ERA-Interimの増え方には及びません。JRA-25は約1570、JRA-55は600程度ですが、最近のJRA-55の伸び率は上がっており、遠くないうちにJRA-25を超える日が来るでしょう。

再解析論文は、その利用者の論文では確実に引用されますので、引用数は利用数に比例していると考えられます。通常の論文に比べると再解析論文の引用数は圧倒的に多く、再解析が研究の基盤データであることを認識するとともに、改めて高品質の再解析を作成する責任を強く感じています。

(3) 国際機関での利用

JRA-55はERA-Interimとともに、WMO State of Climate 2017の資料として使われています。

(<http://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2017/11/wmo-statement-on-state-of-climate-in-2017/>, 2017年12月6日閲覧確認)

(4) その他の利用

JRA-25は2006年10月～2007年2月にかけて開催された日本科学未来館の特別展「65億人のサバイバル」に提供され、日照分布と太陽光発電の可能性を示す展示パネルに使用されました。その後もJRAは同館の地球ディスプレイ装置であるジオコスモスの上映データとして使われています。

9. 再解析にまつわる話題

ここでは、再解析にまつわる様々な話題について述

べてみます。

(1) 再解析は国際協力

世界の主要な数値予報センターが再解析に取り組んでいますが、お互いに競争しながらも良好な協力関係をもって進めています。初期の頃は、観測データの相互提供体制ができていませんでしたが、再解析を実施してみて過去観測データの品質情報が非常に重要なことが認識され、その情報を相互に交換しています。特に衛星データのバイアスや品質不良期間に関する情報は重要で、低品質データを同化しないことで気候プロダクトとしての再解析の品質を保つよう努めています。また、JRA-55のラジオゾンデのバイアス補正には、再解析用のバイアス補正法であるRAOBCORE(Haimberger 2007)を使用し、全球平均気温の均質化に貢献しています。

WCRPは、WOAP(WCRP観測と同化に関するパネル)を設置して再解析の推進を議論してきました。その後、WOAPはWDAC(WCRPデータ委員会)に格上げされて再解析を強力に進める体制をとり、WCRPの気候データベースであるNASA/ESGFに既存の再解析プロダクトを集めて、気候予測モデルと同一の形式に変換して検証に利用しやすくするなどの便宜を図っています。

(2) 再解析は国際競争

一方で、再解析は国際競争です。再解析プロダクトを使ってもらうには、その品質が高いことは大前提です。利用者は複数の再解析値を比較しますので、品質が悪ければ使ってもらえません。その前段として、品質比較にもまず試しに使ってもらわなければ(比較の土俵に上げてもらわなければ)なりません。それには利用しやすさを工夫する必要があります。JRA-55では、プロダクトの気圧面(P面)の層数を増やし(JRA-25では23層⇒JRA-55では37層)、物理要素を拡充しています。また、7. や8. で述べたように、英語での情報発信が重要なことから、英語版ホームページの整備、論文の早期発表、国際会議でのプレゼンテーション、JRA Go! Go!として売りこんで名前を覚えてもらうことなどに努めました。さらに、新しい試みとしてJRA-55 Familyの構築を行い、プロダクトを取得しやすくするために複数の提供窓口を用意しました。JRA-55アトラスも利用促進の一環です。

(3) 計算機事情の変化

1990年代には、再解析を実行するための計算機資源の確保が非常に困難でしたが、計算機の高高速化とともに

に、最近ではデータ同化手法の高度化、全球・メソアンサンブル予報の拡充や局地モデルの毎時実行などによりこれらに必要な計算機資源が激増したため、全球再解析に必要な計算機資源（CPU 資源）の割合は相対的に低下しています。ストレージに関しては再解析の解像度増強や期間延長、プロダクト拡張により必要量は増加していますが、ストレージの大容量化も進んでいます。実際に JRA 再解析プロダクトが作成、利用されてその有効性、必要性が認識されたこともあって、20年前と比べると全球再解析実施のための計算機事情は良くなっていると言えます。

（４）再解析は使われてこそ価値がある

再解析の実施には多大な労力と計算機資源が必要です。そのようにして作成した再解析プロダクトは、使われて初めて価値があると言えます。使ってもらうには品質が良いことが前提で、品質の悪いものは淘汰されてしまいます。1990年代後半に、NCEP/NCAR、ERA-15と同時期に NASA DAO から GEOS1という再解析が公開されました。しかし地表面フラックスのバイアスが非常に大きいなどの問題が明らかになり、ほとんど使われませんでした。NASA GMAO (DAO を改組) はこの反省を踏まえて新たな再解析 MERRA を実施し、こんどは多くの研究者に使われています。

（５）再解析のネーミング

再解析の名称は、一見何でもよさそうですがとても重要です。ERA と JRA は、その後ろに対象とする年数をつけて ERA-15, ERA-40, JRA-25, JRA-55 としています。しかし実際には ERA-40は45年分を、JRA-25は26年分を計算しています。JRA-25, JRA-55は計算終了後に準リアルタイムに計算を継続して、年数の数値はあまり意味を持たなくなっている状況から、最近では再解析の対象年数を入れた名称は使われなくなっています。ERA-Interim は ERA-40のやり直しということで「暫定再解析」という意味の名称になっていますが、その品質が優れているために Interim という不利な名称にもかかわらず広く使われています。JRA-55が仮に JRA-Interim という名前だったら使われていなかったでしょう。次の ERA は ERA5という名前です。FGGE 再解析を含めて、ERA-15, ERA-40, ERA-Interim に次ぐ 5 代目の ERA という意味だそうですが、今後の再解析の名前はおのずと ERA6, ERA7となりそうです。

細かい話ですが、JRA では、JRA-55のように、

JRA と数字の間にハイフン“-”を入れています。「JRA-55」が基本名称で、JRA-55の全球データ同化システムを使ったサブプロダクトの計算には JRA-55 C, JRA-55AMIP, JRA-55CHS のように55の後に文字をつけた名称を付け、システム自体が異なる領域ダウンスケーリングには、JRA-55DSではなく DSJRA-55という名称にして区別するようにしています。

（６）再解析は研究なのか？役割分担のあり方

再解析の実際は、研究というよりもデータ同化を延々と続ける作業です。観測データの準備と年代に対応したデータ同化システムの構築にも時間が掛かります。計算を完了するのに数年かかりますし、その間に論文を執筆するのは困難です。このような点を考えると、研究とは言いがたい面があります。

再解析の実施には時間と労力が必要で、それには要員が必要です。実施主体となる現業機関が十分に要員をあてがえれば問題ないのですが、要員は限られていてなかなかそうはいきません。現業機関と研究機関が密接に協力して実施するのがよさそうです。

その場合の役割分担は、例えば、観測データの利用など現業のノウハウを持つ現業機関がデータ同化システムを構築して再解析の計算を行い、時系列を中心とするモニターシステムを整備します。研究機関にはできれば予備実験の段階から計算結果をそれぞれの専門分野の観点からモニターしていただき、結果を解析して再解析値の誤差特性の把握、不具合やエラーの早期発見ができれば、品質の良い再解析データの作成が期待できます。

（７）領域再解析と領域ダウンスケーリング

JRA-25, JRA-55は全球再解析ですが、領域再解析を行いたいという意見もありました。

領域再解析は研究目的に応じて多様な方法があります。北米領域を対象とした NARR (Mesinger *et al.* 2006) が既にあるほか、北極域を対象とする取り組み ASR (Bromwich *et al.* 2016) があります。これらは、高解像度の全球再解析だと大きな計算機資源が必要なため目的に応じて領域を限定するもので、比較的広い領域を対象に30 km 程度の解像度 (ASR には領域を狭めた解像度15 km 版 ASRv2もある) で計算しています。欧州でも、EURO4M, UERRA といった欧州の広域を対象とする領域再解析が取り組まれています。

国内では、東北大学と気象研究所により 5 km 格子

の高解像度による従来型観測データのみを用いた日本域再解析の研究が開始されています(福井ほか2016)。観測データが比較的多い日本域での細かい地形の影響を反映した再解析値の作成が期待されます。

一方、過去の顕著現象を高精度で再現することを目的とするならば、5 km 格子のような解像度の高いモデルを使うだけでなく、衛星データや、レーダーなどの降水観測データを同化することが必要です。ただし、レーダーデータのプロダクトは過去に頻繁に変更されているため、対象とする時期に適した方法が必要となります。この場合、長い期間を連続的に計算するより、短期間の集中的なデータ同化サイクルの実行が望ましいです。

気候業務への利用が目的であるならば、領域再解析は全球再解析よりも利用が限定されます。気候では全球の大気の流れやエネルギー収支等を見る必要があるからです。今後も解像度を上げながら高品質の全球再解析を作成していく必要があると考えています。

一方、領域ダウンスケーリングは領域再解析と異なり、データ同化を実施せずに再解析値からの予報を実行するだけです。予報実行システムを作成すれば、保存用ストレージの問題を別として、領域再解析よりは容易に実行できます。ストレージもプロダクトとして地上と2次元積算量に要素を限って保存すれば対応は可能でしょう。既に5 km 格子のDSJRA-55がありますので、6. (6)に留意しつつ地上や積算量などの2次元要素を利用いただきたいと思います。

10. 今後の再解析

(1) 再解析の必要性

JRA-55が完了し、それが気候データ同化サイクルとして準リアルタイムに運用されて多様な用途に利用されています。一方、現業数値解析予報システムはその間にもモデル開発が進められて性能が向上しています。JRA-55は2009年12月時点のシステムに準じているため時間の経過とともに現業モデルとの品質の乖離が進んで行きます。アンサンブル予報モデルの再予報の初期値や現業季節予報モデルの初期値として利用するには、現業モデルの進歩に応じた整合性のある再解析値を与える必要があります。また、JRA-55には解決すべき問題が残っており、モデルの更新とこれまでの再解析での問題点の解消を含めた新しい再解析を作成していく必要があると考えています。

(2) 過去の観測データの整備

再解析にとって過去の観測データの掘り起こしとデジタル化による整備は重要です。ECMWFは、欧州連合EUのプロジェクトとしてERA-CLIM(2011~2013)を実施し、再解析の実施と並行して過去の観測データの新たな発掘と整備(Data rescue)に取り組みました。ここで整備された観測データは再解析コミュニティで共有することになっています。1990年代のSSM/T-2衛星のマイクロ波水蒸気探査計データの長期再解析での利用のための開発には古林慎哉さんが2014年に3か月間ECMWFに滞在して携わっており、これを含む成果は次に述べるJRA-3Qに無償で提供されることになっています。

(3) JRA-3Q

気象庁は、JRA-55に続く第3次再解析JRA-3Q(Japanese Reanalysis for Three Quarters of a century)を準備していて、2022年の計算完了を計画しています。JRA-3Qは1947年以後を対象とする予定で、約75年間(4分の3世紀)をカバーします。

JRA-55が準拠している2009年12月時点から時間が経過し、その間に全球モデルの物理過程が2016年3月、2017年5月の2回にわたって大きく改良されていること、4次元データ同化手法が改善されていること、1980年代半ば以降には解像度を上げたSSTを使用することなどから、それらを取り込むことによりJRA-55からの品質向上が見込めます。

3Qはサンキューと呼んで、JRA利用に感謝する意味を込めています。ジェイラサンキューと呼んでもらえれば覚えてもらえるかと期待しています。

JRA-3QでのJRA-55からの主な改良点は次の通りです。なお、これは2017年9月時点の予定であり、今後の検討により変更される場合があります。

- 高解像度化
水平方向55 km⇒40 km,
鉛直方向100層, 上端は0.01 hPa
- 対象期間延長
JRA-55は1958年~, JRA-3Qは1947年~
- 新しいSST及び海水データ
1985年半ばまで: COBE-SST2(1度格子)
1985年半ばから: MGDSST(0.25度格子, 衛星データ使用)
- 新しい観測データセット
ERA-CLIMなどデータレスキューによりデジタル化された観測データの利用, JRA-55後に実施

された再処理により品質が向上した衛星データの利用

- 熱帯低気圧周辺風データ（ボーガス）を自主作成
JRA-55での TCR データ不具合の反省から、気象庁現業の台風ボーガス手法をベースとした方法で自主作成する。
- 物理過程の改良

JRA-55で使用したモデルが準拠している2009年12月以降に導入された物理過程全般の改良を取り込む。特に懸案だった陸面過程の改良は、南米アマゾン域での乾燥化の問題等の緩和につながると期待される。さらに、メタンの酸化を考慮することにより成層圏の水蒸気が不自然に減少していくことを防止できる。また、海水の取り扱ひの改善を含めて極域と寒冷域の精度向上にも努める。

JRA-3Q により、JRA-55からさらに改善された全球データ同化システムによる高精度の気候プロダクトで業務・研究に貢献するとともに、20世紀後半からの再解析として十年規模変動などの長期変化を含む気候解析に貢献できると考えています。

（4）将来の再解析の展望

再解析を過去に遡るには、過去の時点での観測データをどの程度使えるかが重要な問題となります。第二次世界大戦前の20世紀前半には地上観測データしかありません。

米国のコロラド大学 CIRES と NOAA は地上気圧データのみを使った100年以上の再解析20CR (Compo *et al.* 2011) を実施しています。また、ECMWF も同様の ERA-20C を実施しています。日本でも石井正好さんのグループが150年再解析を進めています。地上データのみでの再解析は研究利用には長期間の均質な気候プロダクトとして大きな意味がありますが、現業利用を目的とするならば、やはり高層観測データが存在する第二次世界大戦後の20世紀後半以後を対象とすべきと考えます。現業的に必ず必要なのは平年値に使う直近の30年分ですが、少なくとも多くの衛星データが使えるようになる1979年以降は再解析の対象とすべきと考えています。外国の現業機関の再解析もほとんどが1979年以後を必ず対象としています。それ以前の年代は観測データの整備状況やモデルの開発状況をみて総合的に判断することになるでしょう。

近年、海外では大気海洋結合再解析が取り組まれています。NCEP の CFSR は間欠的な結合を導入した初めての気象海洋結合再解析でした。ECMWF では、

ERA-CLIM 後継の ERA-CLIM2 (2014～2017) で、ERA-20C の大気海洋結合版 CERA-20C および、フル結合の大気海洋結合同化システムにより全ての観測データを使用した CERA-SAT (2008～2016年対象) 再解析を実験的に実行しています。今後の再解析の大きな流れは大気海洋結合再解析に向かうと思われま

す。これまでの JRA 再解析では、現業運用の実績があり品質が安定しているデータ同化システムに準拠し、研究段階のシステムの利用は極力避けています。作成後の再解析プロダクトを業務に使う以上、この方針は基本線として守りたいと考えています。大気海洋結合データ同化システムは気象研究所で開発中ですが現業化にはまだ時間が掛かると考えられます。JRA-3Q 後の再解析では、背景誤差情報を適切に与えられるアンサンブルデータ同化の導入が考えられますが、詳細はこれから検討することになります。

謝 辞

私自身は40歳を過ぎてから JRA 再解析に関わることになり、忙しい思いもしましたがやりがいのある仕事に従事できて充実していました。ECMWF 派遣をきっかけとして再解析を担当することになった幸運に感謝し、今後も再解析を支援していきたいと考えています。

再解析のデータ同化システムは数値予報現業の高解像度全球データ同化システムに準拠しており、多大な技術的助言を頂いている数値予報課には特に感謝の意を表したいと思います。冒頭にも述べましたとおり、JRA 再解析実施には多くの関係者のご支援と御協力をいただいています。本文中にお名前を載せられなかった方も数多くいらっしゃいます。JRA 再解析に関わった方、支援いただいた方すべてに心より御礼申し上げます。JRA 再解析が世界の多くの皆様に利用していただいていることはたいへんありがたいことです。これらユーザーの皆様にも感謝いたします。

略語一覧

20CR : 20th Century Reanalysis

3D-var : Three-dimensional variational assimilation method

4D-var : Four-dimensional variational assimilation method

ASR : Arctic System Reanalysis

- ATOVS : Advanced TOVS
 CDA : Comprehensive Database for Assimilation
 CERA : Coupled European Reanalysis
 CFSR : Climate Forecast System Reanalysis
 CIRES : Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences
 CLIVAR : Climate Variability and Predictability Project
 COBE : Centennial in-situ Observation-Based Estimates of variability of SST and marine meteorological variables
 DIAS : Data Integration and Analysis System
 DOE : Department of Energy
 DSJRA-55 : Dynamical Regional Downscaling Using the JRA-55 Reanalysis
 ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
 ERA : European Reanalysis
 ERA5 : 5th European Reanalysis
 ERA-15 : European 15-year Reanalysis
 ERA-20C : European 20th Century Reanalysis
 ERA-40 : European 40-year Reanalysis
 ERA-CLIM : European Reanalysis of Global Climate Observations
 ERA-Interim : European Interim Reanalysis
 ESGF : Earth System Grid Federation
 EUROSIP : European multi-model seasonal forecasting system
 FGGE : First GARP Global Experiment
 GARP : Global Atmospheric Research Program
 GCOS : Global Climate Observing System
 GEO : Group on Earth Observation
 GMS : Geostationary Meteorological Satellites of JMA
 GNSS : Global Navigation Satellite System
 GPCP : Global Precipitation Climatology Project
 iTacs : Interactive Tool for Analysis of the Climate System
 JCDAS : JMA Climate Data Assimilation System
 JMA : Japan Meteorological Agency
 JRA : Japanese Reanalysis
 JRA-25 : Japanese 25-year Reanalysis
 JRA-55 : Japanese 55-year Reanalysis
 JRA-55AMIP : JRA-55 AMIP run
 JRA-55C : JRA-55 using conventional data only
 JRA-55CHS : JRA-55C with high resolution SST
 MGDSST : Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperatures
 MRI : Meteorological Research Institute of JMA
 NAPEX : Numerical Analysis and Prediction Experiment system
 NAPS : Numerical Analysis and Prediction System
 NARR : North American Regional Reanalysis
 NASA : National Aeronautics and Space Administration
 NASA DAO : Data assimilation Office of NASA
 NASA GMAO : Global Modeling and Assimilation Office of NASA
 NCAR : National Center for Atmospheric Research
 NCEP : National Centers for Environmental Prediction
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
 NSF : National Science Foundation
 OMDP : Ocean Model Development Panel
 QBO : Quasi-Biennial Oscillation
 QC : Quality Control
 RAOBCORE : Radiosonde Observation Correction using Reanalysis
 RDA : Research Data Archive
 RMSE : Root Mean Square Error
 SPARC : Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate
 S-RIP : SPARC Reanalysis Inter-comparison Project
 SSM/I : Special Sensor of Microwave Imager
 SSM/T : Special Sensor Microwave - Temperature
 SST : Sea Surface Temperature
 TCC : Tokyo Climate Center of JMA
 TCR : Wind profile retrievals surrounding tropical cyclones
 TIROS : Television and InfraRed Observation Satellite
 TOVS : TIROS Operational Vertical Sounder
 TRMM : Tropical Rainfall Measurement Mission
 UKMO : United Kingdom Meteorological Office
 VarBC : Variational bias correction
 VTPR : Vertical Temperature Profile Radiometer
 WCRP : World Climate Research Programme
 WDAC : WCRP Data Advisory Council
 WOAP : WCRP Observation and Assimilation Panel

参考文献

- Andrae, U., N. Sokka and K. Onogi, 2004: The radiosonde temperature bias corrections used in ERA-40. ECMWF ERA-40 Project Report Series, (15), 34pp.
 Bengtsson, L. and J. Shukla, 1988: Integration of space and in situ observations to study global climate change. Bull. Amer. Meteor. Soc., **69**, 1130-1143.
 Bromwich, D. H., A. B. Wilson, L. Bai, G. W. K. Moore and P. Bauer, 2016: A comparison of the regional Arctic System Reanalysis and the global ERA-

- Interim Reanalysis for the Arctic. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 644-658.
- Compo, G.P. *et al.*, 2011: The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1-28.
- 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.
- Fujiwara, M. *et al.* 2017: Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 1417-1452.
- 福井 真, 岩崎俊樹, 齊藤和雄, 瀬古 弘, 国井 勝, 2016: 従来型観測のみを用いた日本域再解析システムの構築に向けた同化実験. *SENAC (東北大学大型計算機センター広報)*, **49(2)**, 5-11.
- Gelaro, R. *et al.* 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, **30**, 5419-5454.
- Gibson, J.K. *et al.*, 1997: ERA Description. ECMWF ERA-15 Project Report Series, (1), 71pp.
- Haimberger, L., 2007: Homogenization of radiosonde temperature time series using innovation statistics. *J. Climate*, **20**, 1377-1403.
- Harada, Y. *et al.*, 2016: The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 269-302.
- 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.
- Kalnay, E. *et al.*, 1996: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Kayaba, N. *et al.*, 2016: Dynamical regional downscaling using the JRA-55 Reanalysis (DSJRA-55). *SOLA*, **12**, 1-5.
- Kobayashi, C. and T. Iwasaki, 2016: Brewer-Dobson circulation diagnosed from JRA-55. *J. Geophys. Res.*, **121**, doi:10.1002/2015JD023476.
- Kobayashi, C. *et al.*, 2014: Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric reanalysis assimilating conventional observations only. *SOLA*, **10**, 78-82.
- Kobayashi, S. *et al.*, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- 小出 寛ほか, 2000: 第2回再解析国際会議参加報告. *天気*, **47**, 267-276.
- Masunaga, R., H. Nakamura, H. Kamahori, K. Onogi and S. Okajima, 2018: The JRA-55CHS: An atmospheric reanalysis constructed with high-resolution sea surface temperature. *SOLA*, **14**, 6-9.
- Mesinger, F. *et al.*, 2006: North American Regional Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 343-360.
- 大野木和敏, 1996: データ同化のための包括的データベース「CDA」. *気象庁測候時報*, **63**, 349-382.
- 大野木和敏ほか, 1998: 再解析に関する WCRP 第1回国際会議の報告. *天気*, **45**, 475-482.
- Onogi, K., 2000: The long-term performance of the radiosonde observing system to be used in ERA-40. ECMWF ERA-40 Project Report Series, (2), 77pp.
- Onogi, K. and N. Sokka, 2001: Radiosonde temperature bias correction in ERA-40. Workshop on Re-analysis, 5-9 November 2001, ERA-40 Project Report Series, (3). 59-70.
- 大野木和敏, 入口武史 2003: 数値解析予報実験システム NAPEX. *気象庁測候時報*, **70**, 171-187.
- Onogi, K. *et al.*, 2005: JRA-25; Japanese 25-year Reanalysis — progress and status —. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3259-3268.
- Onogi, K. *et al.*, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- 大野木和敏, 釜堀弘隆, 竹内綾子, 海老田綾貴, 筒井純一, 高橋清利, 2008: 第3回 WCRP 再解析国際会議報告. *天気*, **55**, 947-959.
- 大野木和敏ほか, 2012: 第4回 WCRP 再解析国際会議報告. *天気*, **59**, 1007-1016.
- Rienecker, M.M. *et al.*, 2011: MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *J. Climate*, **24**, 3624-3648.
- Saha, S. *et al.*, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015-1057.
- 坂本雅巳, 2007: 長期再解析における衛星データ同化. 数値予報課報告・別冊第53号, 気象庁予報部, 153-162.
- Trenberth, K.E. and J.G. Olson, 1988: An evaluation and intercomparison of global analyses from the National Meteorological Center and the European Centre for Medium Range Weather Forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **69**, 1047-1057.
- Uppala, S.M. *et al.*, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961-3012.

Implementation of the Global Atmospheric Reanalyses JRA-25 and JRA-55

Kazutoshi ONOGI*

* *Planning Division, Administration Department, Japan Meteorological Agency (Present affiliation; Meteorological Research Institute).*

E-mail: konogi@met.kishou.go.jp

(Received 2 October 2017; Accepted 8 December 2017)
