

特集Ⅱ

気象・環境セミナー「気候予測・再解析データ」

MSM を用いた日本域領域再解析 (RRJ-ClimCORE) と解析雨量の再処理について

Japan area regional reanalysis using MSM (RRJ-ClimCORE) and reprocessing the R/A analysis

隈 健一 *

1. ClimCOREについて

ClimCORE とは JST の COI-NEXT（共創の場形成支援プログラム）の本格型（十年間）として 2020 年に開始された「地域気象データと先端学術による戦略的社会共創拠点」である。拠点は東京大学先端科学技術研究センターに置かれ、中村尚教授をプロジェクトリーダーとして、日本域の領域気象再解析 (RRJ-ClimCORE) 等の気象データを作成するとともに、これらデータを活用した社会応用を推進している¹⁾。

拠点のビジョンとして、「気候変動・異常気象を読み解き、安全・安心で恵み豊かな共創社会の戦略的実現」を掲げ、キャッチフレーズは「過去を識り、今を理解し、未来を共に創る」となっている。この「過去を識り」に対応するのが、このプロジェクトで作成される日本域気象再解析データである。このキャッチフレーズにある通り、過去を識るだけではなく、その成果を現在、そして未来に生かすという部分が社会応用には重要である。このため、ClimCORE では気象データを作成するだけでなく、そのデータを活用した社会応用も研究対象となっている。

気象再解析は、日々計算されているコンピューターによる天気予報の技術（数値予報技術）を活用したものである。数値予報とは、ボールを投げるとそれがどの高度まで上昇し、どのような軌道を描いて地上に落下するかを予測するのと同じ考え方で天気を予測する手法である。すなわち、大気を支配する物理法則と大気の初期状態がわかれば、時々刻々とボールの軌道を追うが如く気象の予測ができるという原理に基づく。

この予測においては、物理法則をコンピュータで計算できるようにした数値モデルとコンピュータで

計算する格子での初期条件が必要である。初期条件を決めるのは気象観測であるが、各格子で観測がなされているわけではなく、北半球の陸上に多く存在する観測、レーダーや衛星等による電波を使ったりモートセンシング観測等、さまざまな種類の観測が偏在して実施されている。こうした偏在化した多様な観測データからコンピュータで計算する格子上の物理量を初期条件として与えることが必要である。単に観測点の値を格子の位置に内挿するだけでなく、物理法則に基づく数値モデルを使うなど、高度な技術で解析を実施することで精度の高い初期条件を作成できるようになってきた。観測データを数値モデルに同化する、という意味で、この解析技術はデータ同化と呼ばれている。

天気予報においては、最新の観測結果をデータ同化することで、初期条件を作成してそこから明日明後日等の天気を予測している。この観測結果について 10 年前等過去のものを使うと、過去のその時点での解析値が出力される。これをたとえば過去 30 年間についてそれぞれその時点での観測データを用いて解析を行うことで、過去 30 年間の日々の気象を再現することができる。これを再解析と呼んでいる。実は 10 年前、20 年前も数値天気予報は計算されているので、その当時のスペックで計算された解析値は保存されていることがあるが、その当時の数値予報技術相応の解像度や性能での解析値である。これに対して、最新の数値予報技術で改めて解析することで、最新の技術に基づいて、過去について高い品質の解析値が再現され、かつ同じ手法で長期間解析することから、均質な性能のプロダクトが長期間得られることが重要である。「再」解析の「再」にはそのような意味が込められている。

* 東京大学先端科学技術研究センター

地球全体の気象の再解析については、1990年代から本格化して、米国、欧州、そして日本の3極でプロダクトを作成・提供してきている。これまで、6回の再解析国際会議が開催されているが、第1回は米国、第2回は英国、第3回が日本、第4回が米国、第5回がイタリア、そして第6回は2024年10月に日本で開催された。このことからもこれまでの日本の再解析への大きな貢献がわかるであろう。第6回の国際会議では、初めて領域再解析のセッションが設けられた。地球全体の再解析では、欧州の最新のもので水平分解能が30km、日本の再解析では40kmであり、これまで気象学の研究には大いに貢献してきている一方、社会応用については、さらにきめ細かなスケールでの情報が必要である。水平分解能を向上させるには、格段の計算資源が必要であり、地球全体での解析ではなく日本の周辺領域に限定して解析を行う等の対応が必要であり、これを領域再解析と呼ぶ。

JSTのCOI-NEXTのプログラムとして立ち上がったClimCOREでは、気象庁と東京大学との共同研究により、2022年段階での気象庁の5kmメッシュのMSMと呼ばれる予報解析システムを用いて再解析(RRJ-ClimCORE)を作成中である。2018年7月から2022年12月までの4年半については、試験的なプロダクトも作成できており、これを使った社会応用研究も進めている。次節では、ClimCOREでどのようなデータを作成しているかを述べよう。

2. RRJ-ClimCOREの概要と解析雨量の再処理について

領域再解析は、水平分解能の高さという強みを生かして社会のニーズに対応することが再解析の重要な使命である。社会のニーズとしては、できる限り長期間の気候変動をモニターするニーズとなるべく精度の高い解析値を使いたいというニーズがある。

ここで押さえておきたいのは気象観測のこれまでの歴史である。宇宙からの気象観測を実施する気象衛星は1970年代後半から発展してきたものである。日本国内では、大雨防災や竜巻防災を目的として、21世紀に入ってからドップラーレーダーやウインドプロファイラーが整備されている。GNSSの電波遅延を利用した気象観測も1990年代以降に発展した技術である。こうした近年著しく発展した観測成果を活用することで解析精度は向上する一方で、長期間の再解析を実施しようとするとその間の観測の変化が大きく、実際の気候変動と観測手段の発展に

伴う変動とを区別するのが難しくなる。

このため、東北大学と気象研究所の共同研究により、従来型の観測データ（地上観測とラジオゾンデによる観測）のみを用いた長期間の領域再解析(RRJ-Conv)²⁾が作成されている。長期間、ほぼ変わらない従来型の観測データを用いて解析を行うため、長期間の気候変動を把握するニーズに応えるものとなっている一方で、衛星データ等を使っていないので解析精度の低下にはある程度の妥協が必要である。

これに対し、RRJ-ClimCOREでは日本列島の観測が充実し、さらに衛星による観測も現在とほぼ同等になった21世紀の期間を再解析する。そして、気象モデルやデータ同化システムについては、日々の天気予報で使われている気象庁のMSMと呼ばれる5kmメッシュの数値予報のシステムを用い、観測データとともに気象庁の計算機から東京大学の情報基盤センターの計算機に移植して再解析を実施している。

RRJ-ClimCOREの計算対象領域は図1のとおりで、水平5km分解能、鉛直層としては96層の2022年3月段階の気象庁の現業システムに準じている。側面境界条件としては、気象庁で作成された全球再解析JRA-3Q(40km相当の水平分解能)を使う。データ同化については、3時間間隔で4次元変分法を用いて解析しており、再解析データとしては、3時間間隔の解析値と1時間間隔の予報値を組み合わせて1時間間隔の出力値を解析値として提供する。さまざまな利用を想定して、モデル面出力による鉛直高解像データや地表面日射量などの物理モニター出力も利用可能としている。

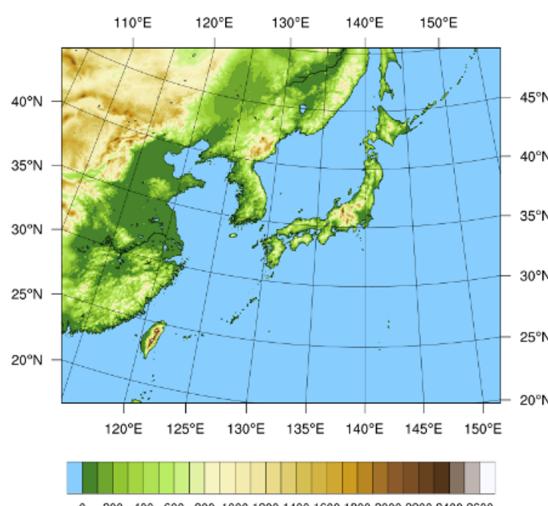


図1 RRJ-ClimCOREの計算領域（先端研宮坂特任准教授より）

RRJ-ClimCORE では、観測データについて、可能なものについては再処理されたものを利用している。気象衛星の雲画像での雲の移動等から風の情報が推定され、それを衛星風と呼んでいる。気象衛星機関では日々の天気予報のためにリアルタイムで処理をした衛星風を提供しているが、最新の技術で過去の衛星データから再処理された衛星風についても再解析では用いる。また、気象庁の MSM モデルでは、集中豪雨等の防災が主目的であり、強い雨の予測精度を高めることを重視している。そのため、MSM モデルの解析では降水量観測も初期値に反映することが可能な 4 次元変分法を同化手法として開発・導入し、そこに解析雨量と呼ばれる地上雨量観測とレーダー観測を組み合わせたメッシュ降水量値を取り込んで降水予測に活用している。

これまで、気象庁の数値予報現業では、防災や航空気象、そして日々の天気予報のために MSM は運用されてきている。21 世紀の当初は 10km 分解能の静力学モデルであり、その後、集中豪雨等の予測に適した非静力学モデルが導入された。データ同化手法も 4 次元変分法が導入されて解析雨量も観測データとして取り込むようになった。物理過程の改良や利用する観測データの拡大等の改良を進めつつ、現在では、水平分解能は 5km、鉛直層 96 層の高解像度モデルに発展してきている。過去の現業の数値予報の結果も保存されており、それを利用することは可能であるが、上記のような改良を毎年のように積み重ねており、21 世紀を通じて均質な品質のデータとして使うことは困難である。この均質なデータというのは、特に近年の人工知能や機械学習の発展により、その重要性が格段に増したということも指摘しておく。

大雨の予測精度向上のため、解析雨量を 4 次元変分法によりデータ同化すると述べたが、この解析雨量も過去を遡ると水平分解能等の改善が段階的に実施されている。2001 年 3 月までは 5km メッシュ、それ以降 2005 年 12 月まで 2.5km メッシュ、2006 年から今と同じ 1km メッシュである。こちらも 1km メッシュで統一して過去の再処理を進めている。RRJ-ClimCORE への利用だけでなく、過去の大暴雨事例について過去から同じ尺度で比較することの重要性があり、たとえば、線状降水帯の頻度分布等の長期変動等の知見も得られるであろう。このため、解析雨量については、RRJ-ClimCORE の対象となる 21 世紀だけでなく、1990 年代からの再処理を計画している。

近年の大暴雨の激化、高頻度化は気象庁の観測統計でも明らかになりつつあり、その背景には海洋を含めた温暖化に伴う水蒸気量の増加が指摘されることが多い。上空の水蒸気量を高い水平解像度で観測できる手段として、国土地理院がアメダスと同程度の密度で全国に展開している電子基準点による GNSS データがある。衛星から送信する電波が地上の基準点に到達するまでの時間を利用して地殻変動を監視するシステムであるが、水蒸気によって変動する電波の遅延を解析することで、鉛直積算水蒸気量を高精度で求めることが可能である。ClimCORE ではこの GNSS 観測による鉛直積算水蒸気量も過去の再処理を行ってそれを RRJ-ClimCORE への同化データとして使っている。RRJ-ClimCORE の鉛直積算水蒸気量について、GNSS 観測を通じて高レベルの精度で維持できることは、過去の大暴雨の評価、予測実験等においても重要である。

3. 過去の気象データをどう社会応用につなげるのか

天気や気候の研究においては、過去の気象データを用いて、さまざまな現象のメカニズムを解明する、気候変動のシグナルを検出する等、過去データが重要な役割を果たしてきた。地球温暖化の進行状況がどうなっているのか等、地球大気を診断するための基礎データとして、社会に大きく貢献している。一方、ビジネス等のエンドユーザーは再解析から何を得られるのであろうか？

再解析データを利用した社会応用研究を掲げて产学研連携で進めるプロジェクトを進める中で、この問い合わせていくことはきわめて重要である。再解析データという商品を手にして、エンドユーザーにどう売り込めばよいのだろうか。航空分野などを除く多くの産業界のエンドユーザーと再解析データとの間には確かに大きなギャップがある。このギャップを分析して、それをどう埋めていくのかを考えてみよう。

ギャップの一つは時間軸方向にある。多くのエンドユーザーにとって、これから大雨が降るのか、来週の気温や日射量はどうなるのか、今年の夏は平年より暑くなるのか、地球温暖化についてこの地域の農業にはどんな対策が必要なのかといった、いろいろなタイムスケールでの未来を知ることにニーズがある。しかし、再解析データが提供するのは過去のデータである。

もちろん、日射量や風車高度での風について、洋

上等観測のない地域について、過去の気象データをある程度の精度でその水平分布を含めて知ることができれば、発電立地についての貴重な資料になる、といった再解析データの利用は考えられる。しかし、このような利用においても、発電立地という地点ベースの情報にどう落とし込むのか、という課題があり、空間方向のギャップとして認識している。30km (ERA-5) や 40km (JRA-3Q) といった分解能の全球再解析と比べると 5km という RRJ-ClimCORE の分解能により確かに地域の気候特性の表現は改善される。しかし、社会の気象データへのニーズは地点ベース等の小スケールであることが多い。日本列島の骨格的な地形を反映した 5km メッシュは 40km メッシュからは大きく進歩しているので、これを基盤に小スケールを攻めていく必要がある。

こうしたギャップを埋めるためには、既存の他の気象・気候データあるいは小スケールのモデリング技術と組み合わせて過去の再解析データを利用するこれが基本的な方向性であろう。日々の天気予報のデータ、気候の将来予測のデータ等の利用の最適化を進めるため、過去データでの検証や機械学習等を活用する、というのが時間軸方向のギャップへの対応策である。たとえば、過去データを用いてリアルタイムの予報データの最適利用の仕組みを構築する、将来気候シナリオのモデル起因のバイアスについて過去データを用いた検証を通じて軽減する、過去事例を用いて防災やエネルギー運用の対応訓練を行う、といったことが考えられる。このうち、防災への対応訓練については、解析雨量の再処理データを熊本県の大気対応訓練に試験的に活用することでその効果を実証し、熊本市で開催された「ぼうさいこくたい 2024」でもそれを公開パネル討論で取り上げている。

<https://bosai-kokutai.jp/2024/s12/>

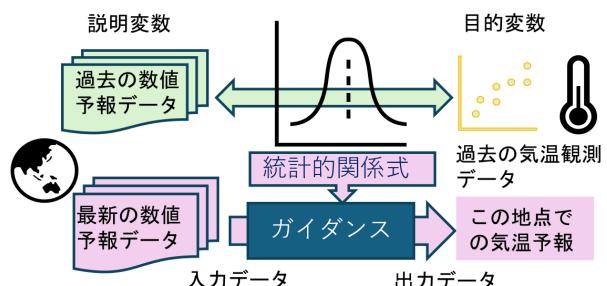
一方、空間軸方向のギャップについては、高精度の高分解能観測データとの組み合わせが一つの方向性である。1km の日射量や降水量については、観測ベースの高精度のデータがあり、これらの物理量については 1km スケールまでは何かできそうである。観測ベースの高精度のデータがあれば、再解析データの存在意義はないのではないかという印象を持たれるかもしれない。再解析データは物理法則に基づく 3 次元データセットであり、これを初期値、あるいは境界値としてモデルを動かすことで、予測が可能になるというのが重要なポイントである。

1km メッシュの日射量や降水量の観測ベースのデータは再解析よりも正確であろうが、そこから予測することはナウキャスト的なタイムスケール以外は不可能である。

デジタルツイン、デジタルアース、という最近しばしば耳にする用語がある。気象・気候データにおいては、リアル空間の地球大気について観測データ等を活用してデジタル空間に展開したものと認識している。このデジタルツインが威力を発揮するためには、これが単なる現実大気のデジタルデータではなく、時間軸方向にも展開できるデジタルデータであること、すなわち、そこから予測ができること、が社会応用としては重要であると考える。

一方、風については 1km メッシュの観測ベースのデータはない。また 1km でもまだ粗い、100m、10m スケールが必要という分野もある。これに向けていくつかの選択肢があり、社会応用側の持つ気象に関するデータを活用する方法、もう一つは、LES モデルなどの力学的ダウンスケールである。前者は数値予報関係者で古くから使われてきたガイダンスと呼ばれる技術の延長線上にある。

図 2 に数値予報ガイダンスの概念図を掲載した。過去の数値予報データを説明変数、過去のある地点での気象観測値を目的変数として機械学習させて、これらの統計的な関係を求める。この関係式を最新の数値予報結果に適用することで、その地点での高精度の気象予測データが得られる。この手法は、数値予報結果と観測結果との間に系統的なバイアスがある場合にその軽減に有効とされている。系統的なバイアスの要因としては、数値予報モデルの物理過程等の不十分さとともに、数値予報モデルの解像度の不十分さに起因する部分が大きい。特に地形が細かい日本列島では、地形に沿った風や盆地での朝の冷え込み等の表現が 5km 分解能でもまだまだ不



数値予報ガイダンス概念図

図 2 過去の数値予報結果のある地点での観測データで学習させて、その地点での高精度の予測を行うガイダンスの概念図

分である。地点観測値は 10m, 100m スケールの地形を反映した気象を表現しているので、このデータを機械学習させることで、こうした局地的な特性を取り込むことができるのである。

ガイダンスが適用できるのは、数値予報で予測されている気象要素に限らない。数値予報で出力される気象要素と何らかの相関がある要素について実測値があればそれも機械学習を通じて予測することが可能である。再生可能エネルギー関連で言えば、太陽光発電や風力発電の発電量はそれぞれ日射や風速などの気象要素との統計的な関係がかなりあるので、発電量の過去の実測値と数値予報結果を機械学習させることで、発電量の予測精度を上げることが可能である。気温の影響が強い商品の販売数について過去の実績と過去の数値予報結果との統計的関係から、販売量予測も可能であろう。

このように時間ギャップ、空間ギャップへの対応については、再解析データと他のデータとの組み合わせによる二次加工処理が鍵となる。再解析データについて、その重要性は理解していただいたとしても、それを具体的にどう利用したらよいのか、というエンドユーザーの声はプロジェクトを進めていく中でしばしば耳にする。2024 年 10 月に東京大学で開催された第 6 回 WCRP 再解析国際会議においても、エネルギー業界からの再解析データへのニーズについての議論がいくつかあり、その象徴的なものとして、太陽光発電のため 15 分間隔の出力が必要、という指摘があった。こうしたニーズに再解析作成側が応ずるのがよいのか、再解析データから二次加工するコミュニティが対応するのがよいのか、といった整理の必要性を再認識したところである。

4. 最後に

近年の異常気象の頻発について世界での認識が深まりつつあり、地球温暖化対策として緩和策、適応策の両輪をうまく回していくことの重要性が高まっているのは間違いない。ClimCOREにおいては、農業、地域気候シナリオや防災などの適応策に資する社会応用研究と太陽光発電、風力発電といった緩和策に資するような社会応用研究が再解析データの利用を軸に展開されており、こうした分野での再解析データの利用研究を推進していくことがまず重要であろう。

一方、このプロジェクトを開始した 2020 年末当初の想定をはるかに超えて機械学習・人工知能と再解析との関係は発展してきている。機械学習で用い

る学習データが高精度かつ均質な性能を持つことはきわめて重要である。ECMWF や Google では ECMWF の再解析データを機械学習させて、従来の物理法則に基づく時間発展方程式系による数値予報から機械学習を基盤とした AI 予報の研究が急発展しており、一部の評価軸では従来の数値予報を上回る性能も示すようになっている。

ガイダンスに代表されるように、過去データと数値予報データの組み合わせで過去データは現在・未来にも活かされる。再解析データを作成する数値予報システムとリアルタイムの予報を行う数値予報システムが大きくは異ならないことで、過去データでの経験が予報に活かされるという点が重要である。また全球再解析についても 10 年程度のサイクルで更新されており、全球再解析を側面境界値として利用する領域再解析では全球再解析の更新への対応という観点もある。

こうしたことから、RRJ-ClimCORE は現在のプロジェクト限りではなく、2030 年代以降にも日本列島の基盤的気象データとして最新の技術で更新していくべきものと考えている。それには、予算や人員も必要であり、まず現プロジェクトの中で RRJ-ClimCORE の価値について産業界を含めた多くの方々に評価していただけるよう、この小文で述べた時間・空間ギャップを補う活動の推進等を含めた研究を進めていくことが重要と考えている。なお、10 月に東京大学で開催された WCRP 再解析国際会議でも、機械学習の活用を含めて再解析の作成側と利用側との連携が重要であることが指摘されている。

謝辞

本研究は、東京大学先端科学技術研究センターを拠点として推進されている ClimCORE プロジェクトの一環として進められているものであり、プロジェクトリーダーである中村尚教授をはじめ当該プロジェクトに関わる関係者に謝意を表したい。なお、本研究は、JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2013 の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) H. Nakamura, K. Kuma, K. Ohnogi, T. Miyasaka, Y. Makihara, J. Ishida, M. Iida, 2022: Toward high-resolution regional atmospheric reanalysis for Japan: An overview of the ClimCORE

- project, Proc. 2022 IEEE International Conference on Big Data, 6153-6158, DOI : 10.1109/BigData55660.2022.10020656.
- 2) S. Fukui, E. Shirakawa, D. Soga, R. Ohara, K. Usui, K. Takiguchi, K. Ono, Taiga Hirose, S. Matsushima, J. Ito, T. Yamazaki, K. Saito, H. Seko, T. Iwasaki, 2024 : Long-Term Regional Reanalysis for Japan with Assimilating Conventional Observations (RRJ-Conv) J. Meteor. Soc. Japan, 102, 677-696

著者略歴



隈 健一 (ケマ ケンイチ)

東京大学先端科学技術研究センター
シニアプログラムアドバイザー。

1983年、東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、気象庁入庁。予報部数値予報課長、福岡管区気象台長、気象庁観測部長を経て2017年に気象研究所長、2019年に気象庁を退職。2020年から科学技術振興機構（JST）の共創の場形成支援プログラム（COI-NEXT）のもとで、ClimCORE（地域気象データと先端学術による戦略的社会共創拠点）を推進中。著書に「ビジネス教養としての気象学」（日本経済新聞出版）、監修書に「こども気象学」（新星出版社）