[共同研究成果]

更新されたベクトル機での日本域を対象とした長期領域再解析の実行

-1 -

福井真,曽我大輝,小原涼太,臼井健,瀧口海人,小野佳祐,廣瀬大河,松島沙苗, 白川栄一,伊藤純至,岩崎俊樹,山崎剛(東北大学大学院理学研究科), 斉藤和雄(気象業務支援センター/東京大学大気海洋研究所/気象研究所),瀬古弘(気象研究所)

日本域を対象とした過去の気象場を再現するアンサンブルカルマンフィルタと非静力学数値気 象モデルによる領域再解析を更新されたベクトル機(SX-Aurora TSUBASA)上で実行した。2018 年7月の1か月間を対象として、旧機(SX-ACE)による実行結果と比較したところ、正常に動作 することが確認できた。旧機と比べ、ノード数1/32で12%程度高速に実行できた。今後2年程 度で約60年の長期間の領域再解析が実行可能な環境が整った。今後は、近年の日本における地域 気候の変動の把握を目指し、長期領域再解析の実行を進めていく。また、更なる安定した領域再 解析のために、サンプリングエラー軽減が課題の一つである。

1. はじめに

我々は、日本域を対象とした気象場を長期間にわたり高解像度且つ精度良く再現することを目 標に、長期領域再解析に取り組んでいる。長期領域再解析を通じて、日本域における近年の気候 変動の実態の把握、過去のメソスケール極端気象の分析、防災や農業、エネルギー、水資源管理 などでの気象/気候情報の高度利用に向けた基礎資料の提供、数値気象予報/気候予測システムの 改良に資する知見の獲得などを目指す。

地上観測に加え、ラジオゾンデ高層観測網が全球的に整備されてから 60 年以上が経過した。その間に、数値気象予報モデルやデータ同化手法が、計算機の発展によって着実に向上してきた[1]。 こうした背景によって、蓄積された観測と高度化された数値予報技術を組み合わせ、観測できない量も含めた全球の大気の尤もらしい状態を長期にわたって推定する長期全球再解析が、世界の 主要気象機関によって実施されるようになり、研究から現業利用まで、気象・気候に関わる様々 な用途で活用されている。

しかし、複雑な地形の影響を受ける地域気候やメソスケール気象を対象とするには、全球再解 析では最新のもの(e.g. ERA5[2])でも水平解像度が 30–40km 格子相当であるため不十分である。 これまで、解像度の問題に対応するために、高解像度の領域気候モデルを用いた力学的ダウンス ケールが広く実施されてきた。しかし、積分時間が短いとスピンアップの問題が生じ、逆に積分 時間が長いとモデル領域内部の予測値が時間と共に境界値として与えた場から乖離してしまう問 題を抱えている。モデルによる時間積分だけではなく領域内部の観測の同化も行う領域再解析に よって、上述の問題が軽減できることが期待される。

これまでに、我々は日本域を対象とした水平格子間隔 5km の長期領域再解析のためのシステム を構築し、領域モデルのみによる力学的ダウンスケールや全球再解析に対する有効性を示してき た[3]。しかし、計算機の性能の限界によって、地域の気候変動を調査するために必要な長期間(数 十年以上)を対象とした領域再解析の実行は困難であった。2021年10月に東北大学サイバーサ イエンスセンター大規模科学計算システムが更新され性能が向上した。この更新に伴い、長期領 域再解析の実行が可能になることが期待できる。そこで、本稿では、これまで構築してきた長期 領域再解析システムの概要を紹介し、2018年7月を対象とした領域再解析を新機で実行した結果 を旧機で実行された結果と比較しながら記述する。

2. 領域再解析システム

用いた領域再解析システムは、全球再解析 JRA-55[4]を境界値に与えながら気象庁非静力学モ デル(NHM[5])によって時間発展を求め、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF[6])によ って観測データを同化する解析予報サイクルを実行する。水平格子間隔は、 NHM-LETKF を一 方向ネストさせることによって、25km で東アジア域を、5km で日本域を対象とするよう設定した。同化する観測は、長期間入手可能な地上気圧観測、ラジオゾンデ高層観測、及び海上にある 台風の中心位置に限定し、近年になって観測網が整備されたレーダや衛星による観測は利用しない。これは、気候変動シグナルを抽出するには、数値モデル及びデータ同化手法に加え同化する 観測も再解析の期間で一貫させることが有効であるからである[7]。本システムでは、時間発展を 解くNHM では1本の標準ランと30本の摂動ランを実行し、LETKF では標準ランの結果を第一 推定値として用い、その誤差共分散を摂動ランから評価するようにした。第一推定値として、 LETKF で一般に用いられる摂動ランのアンサンブル平均は利用しなかったのは、本システムでは 解析場が平滑化され現実的な変動が再現できなくなるのを回避するためである。側面境界摂動に ついて、25km 格子のNHM-LETKF の摂動ランには、JRA-55 を EOF 解析して得られた上位 30 モ ードをランダムに与えるようにした。実行は、6 時間を1サイクルとして、開始時刻を25km 格 子のNHM-LETKF は6月 20 日 12UTC、5km 格子のNHM-LETKF は6月 29 日 12UTC、5km 格子のNHM-LETKF は6月 29 日 12UTC からとした。 6 月中はスピンアップ期間として、比較には7月の再解析結果を用いた。

3. 結果

新機と旧機を用いて計算した領域再解析の再現結果を比較する。図1は、2018年7月の海面較 正気圧について、JRA-55、新機及び旧機の領域再解析間のRMSDを示している。JRA-55とのRMSD は、新機と旧機の領域再解析で共に期間の平均が0.7hPaで同程度だったのに対して、新機と旧機 の領域再解析間の違いは、平均0.4hPaとJRA-55のRMSDに比べ半分程度に収まった。新機にお いても概ね旧機での計算と同等の総観場を再現できており、領域再解析システムが新機において も旧機と同様の動作をすることが確認できた。なお、7月22日周辺でRMSDが大きくなった期 間があったが、この期間は領域内に解析された台風の位置にずれがあったことに起因していた。 台風は、それ自体がシャープな構造を有するために位置ずれがRMSDに反映されやすい。さらに、 観測の疎らな日本の南方海上から接近するため場の不確実性が大きいことを示唆する。また、本 システムのアンサンブルメンバー数は30と限られており、サンプリングエラーの影響を受けやす い。本システムでは、境界摂動をランダムに与えているので、新機の実験と旧機の実験とで摂動 が異なり、再解析の結果に違いをもたらしうる。このことは、特にアンサンブル数が少ない場合 において、成長する誤差モードを効率的に捉え領域再解析のより安定した再現性を確保するため に、側面境界摂動の与え方が重要である可能性を示唆する。

極端豪雨の事例として、平成30年7月豪雨の新機における再現結果を示す。図2は、2018年7 月5日からの72時間積算雨量を示したものである。地上レーダによる降水強度の観測を地上での 降水量の直接観測で補正した解析雨量によると、72時間積算雨量200mmを超える強雨域が九州 から中部山岳の東側にかけて伸びており、九州北部や四国の南側、岐阜県北部などでは500mm を超える地域が局所的に存在した(図2a)。水平格子間隔約50km相当の解像度の全球再解析JRA-55 では、西日本に強雨域が広がっていた様子は再現できているが、局地的な分布は十分捉えること ができていない(図2b)。一方、水平格子間隔5kmの領域再解析では、必ずしも観測と一致するわ けではないが、局地的な強雨域も含めて概ね再現することができていた。領域再解析では、高解 像度モデルを用いることで、細かい地形の影響やメソスケールの降水系に伴う強い降水の再現性 向上につながったと考えられる。なお、これらの特徴は、旧機での本事例の再解析結果[8]と整合 的であった。更新されたベクトル機上でも、本領域再解析システムが想定の動作することが確認 できた。

計算に要した資源量について、計算機の更新前後で比較する。1 サイクル (6 時間分の再解析)の 実行に要した時間は旧機では 32 ノードで平均約 1.9 時間に対して、新機では1 ノード(8VE)で平 均約 1.6 時間となった。計算機の更新に伴い、1/32 の資源量で 12%程度高速に実行可能となった。 これは、1 ノード当たりの演算性能の向上が主要因であるが、1 ノードに搭載されるメモリが増加 したことでノード間通信をせずに計算が可能になったことも一部寄与している。1 サイクルの時 間積分及び解析が少ない資源で且つ高速に実行可能となったことで、複数の計算ストリームを並 行した実行も現実的となった。これによって、近年の気候変動を捉えるための長期領域再解析実 行が今後数年間で可能な環境が整った。

4. まとめ

日本域を対象に 2018 年 7 月の1 か月分の領域再解析を更新されたベクトル機上で実行し、旧機 での実行結果と比較し、正常に動作することが確認できた。旧機と比ベノード数 1/32 で 12%程 度高速に実行できた。今後2 年程度で約 60 年の長期間の領域再解析が実行可能な環境が整った。 近年の日本における地域気候の変動の把握を目指し、長期領域再解析の実行を進めることが今後 の課題である。

また、より安定した再現性に向けた領域再解析システムの開発も重要な課題である。一つとし て、誤差共分散の推定の際のサンプリングエラーを軽減がある。そのために、アンサンブル数を 増やすこと、場に依存した側面境界摂動の導入が挙げられる。サンプリングエラーによる影響は 抑えられる一方、力学的整合性を崩してしまう局所化も緩和できれば、相乗効果として再現性向 上が期待できる。これらは、更なる計算資源を必要となるため、計算機の一層の性能向上も併せ て望まれる。

謝辞

東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータの令和2年度(第2期)共同研 究の一般課題として本研究は実施した。同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただい た。また、本研究は、東北大学と気象庁気象研究所の共同研究の一環として行った。東北大学(指 定国立大学)における災害科学世界トップレベル研究拠点による支援を受けた。

参考文献

[1] Bauer, P., A. Thorpe, and G. Brunet, The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, **525**, 47–55, 2015.

[2] Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey,
R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. de Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thépaut, The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 1999–2049, 2020.

[3] Fukui, S., T. Iwasaki, K. Saito, H. Seko, and M. Kunii, A feasibility study on the high-resolution regional reanalysis over Japan assimilating only conventional observations as an alternative to the dynamical downscaling. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 565–585, 2018.

[4] Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48, 2015.

[5] Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B, 271–304, 2007.
[6] Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A

local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112–126, 2007.

[7] Kobayashi, C., H. Endo, Y. Ota, S. Kobayashi, H. Onoda, Y. Harada, K. Onogi, and H. Kamahori, Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric reanalysis assimilating conventional observations only. *SOLA*, **10**, 78-82, 2014.

[8] 曽我大輝,日本域高解像度領域再解析の夏季における再現性に関する研究,東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士論文,2019.





図2 2018年7月5-7日における72時間積算雨量。(a)解析雨量、(b)JRA-55、(c)領域再解析。 (a)及び(c)の灰色域は各データの領域外を示す。