

1. はじめに

気象庁第3次長期再解析 (JRA3Q; Kosaka et al., 2024) は、その公開以降、さまざまな方法で気象庁 55 年長期再解析 (JRA55; Kobayashi et al., 2015) との精度比較がされてきた。例えば、Kobayashi and Iwasaki (2024) は、JRA3Q の Brewer-Dobson 循環の強度が、積雲対流の予報モデルの変更によって JRA55 より弱いことを確かめた。

このような評価手法は他のデータセットや観測といった比較対象が必要になるが、目的のデータのみから精度評価ができれば、より簡便に詳細な精度評価が可能となる。そのような解析には、保存量であるエネルギーが有効な指標となる。

今回、Iwasaki (2001) によって提案された質量加重付帯状平均 (MIM) のエネルギーサイクルを活用し、エネルギーバランスの観点から JRA55 と JRA3Q の精度を評価した。また、この解析手法が抱える問題点を指摘した。

2. 使用データ・手法

MIM 法によるエネルギーサイクルは、帯状平均有効位置エネルギー (A_Z) と帯状平均運動エネルギー (K_Z)、波動エネルギー (W) から成る 3box モデルで表される (Uno and Iwasaki, 2006)。このモデルでは、図 1 に示すように、非断熱加熱は Q_Z と

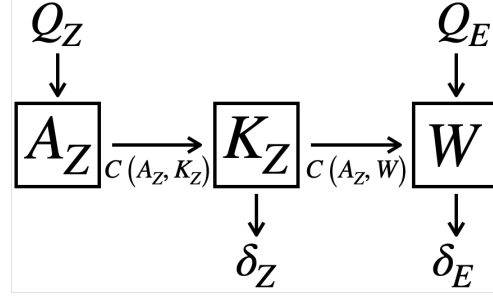


図 1: MIM の大気エネルギーサイクルを表す 3box モデル。 A_Z , K_Z , W はそれぞれ帯状平均有効位置エネルギー、帯状平均運動エネルギー、波動エネルギー。 Q_Z と Q_E は非断熱加熱による A_Z と W の生成、 δ_Z と δ_E は摩擦による K_Z と W の消散を表す。 $C(A, B)$ は A から B へのエネルギー変換。

Q_E によって A_Z と W の生成に寄与する。エネルギー変換は A_Z と K_Z 、 K_Z と W の間でそれぞれ起こり、 K_Z と W から摩擦によってそれぞれ δ_Z , δ_E として消散する。

全球平均した大気エネルギーの変化の時間スケールは非常に大きい。このため、実際の大気では、1 ヶ月程度の時間平均されたエネルギーサイクルで次の 2 式が成り立つ

$$Q_Z = C(A_Z, K_Z),$$

$$Q_E + C(K_Z, W) = \delta_E.$$

再解析データでは、データ同化によって解析場が修正されることでエネルギーバランスが乱れ、これらの等式が成り立たなくな

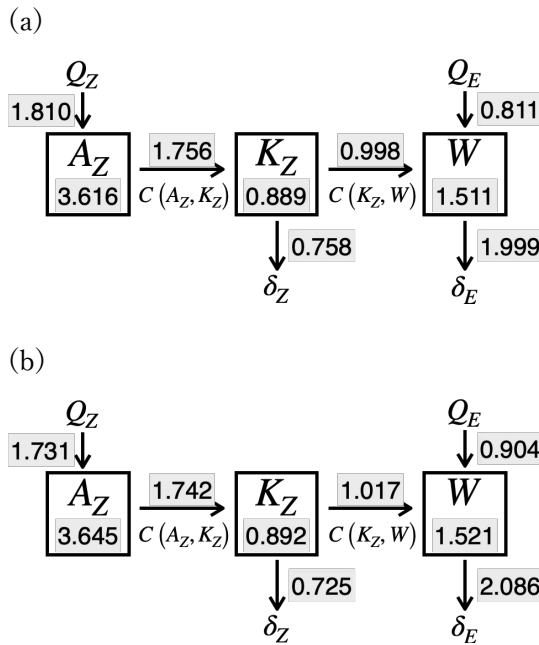


図 2 : DJF の大気エネルギーサイクル。

(a)JRA55, (b)JRA3Q。枠内の数字は大気エネルギー (10^6 J m^{-2})、枠外はエネルギーの生成・変換・消散 (W m^{-2})。

る。これらの左辺と右辺の差をそれぞれ Q_Z , Q_E で割った値をエネルギー収支の誤差として評価に使用した。

本研究では、1990 年 12 月から 2020 年 11 月までの JRA55 と JRA3Q を解析対象とした。非断熱加熱のデータは 6 時間平均で提供されている。エネルギーバランスの改善のため、非断熱加熱はあらかじめ等圧面上で時間方向の移動平均処理を施し、12 時間平均にしてから使用した。エネルギーとそれらの生成・変換・消散の 1 ヶ月ごとの気候値を計算して解析した。

3. 結果

3.1 冬のエネルギーサイクルの気候値

図 2 に両データセットのエネルギーサイクルの 12-1 月 (DJF) 平均を示す。エネルギーとエネルギー変換には、データセット間であまり大きな差がない。JRA3Q の非断熱加熱は、 Q_Z に対して約 4.6% 小さく、 Q_E に対しては約 10% 大きく作用した。 Q_Z の低下は、熱帯での積雲対流の表現が改善されたことによる変化である。一方、 Q_E の上昇は、積雲対流やラージスケール降水、長波放射の変更が大きく影響している。

δ_E は JRA3Q で 4.2% 増加した。この変化は、 W 内部の有効位置エネルギーと運動エネルギーの間のエネルギー変換が変化したことが原因であるが、今回は詳細に調べられていない。

3.2 エネルギー収支の誤差

1 ヶ月平均した気候値のエネルギー収支誤差を図 3 に示す。 A_Z に対する収支 (図 3.a) と W に対する収支 (図 3.b) とともに JRA3Q は誤差が JRA55 に比べ 0 に近く、エネルギーバランスが良い。DJF 平均したエネルギーサイクルでは、 A_Z の収支の誤差は JRA55 で 3.0%、JRA3Q で -0.64% だった。 W の収支の誤差は、JRA55 で -46%、JRA3Q で -34% だった。JRA3Q では非断熱加熱の表現が JRA55 に比べてより現実的となり、データ同化に伴うインクリメントが低下していることがわかる。

季節変化を見ると、どちらのデータセットでも北半球冬季は比較的エネルギーバランスが良いが、北半球夏季に誤差が非常に

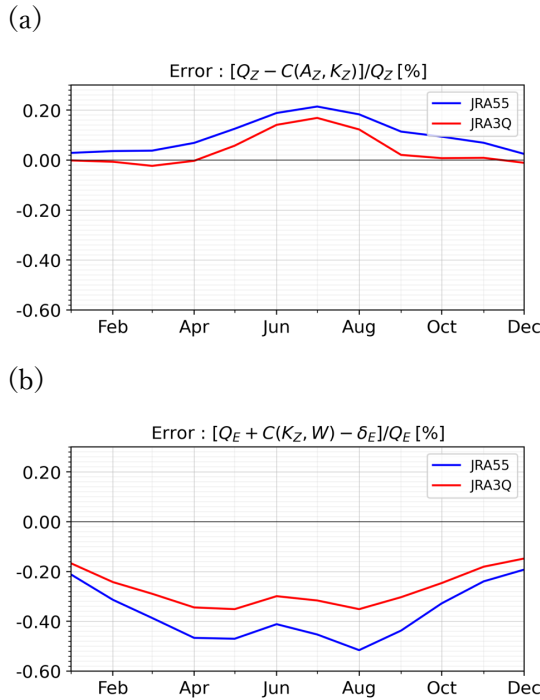


図3: 月ごとの(a) A_Z と(b) W に対するエネルギー収支誤差の気候値 (%). それぞれ Q_Z と Q_E で規格化した。

大きくなる。この傾向は A_Z と W どちらに対する収支にも表れた。この誤差は、データセットによるものではなく、MIMによる解析の問題によっていると推定される。次の3.3で詳しく議論する。

3.3 非断熱加熱の全球平均の日変化 北半球夏のエネ

ルギーバランスが悪く解析される原因を理解するため、JRA3Qの非断熱加熱の全球平均を調べた。図4では、非断熱加熱の全球平均を時刻ごと、季節ごとに平均し、パラメータごとの季節平均を引いた。短波放射とラージスケール降水による加熱は日変化が非常に小さいが、長波放射と積雲対流は6時から12時に最も大きく、18時から24時に最小になる。また、積雲対流は12時から18時に最大となり、0時から6時は小さい。総加熱率の日変化は、冬に比べ夏に非常に大きい。これらの日変化は、主に北半球において日射が時刻に応じて大陸および海面の加熱に影響を与えることで生じる。

JRA55とJRA3Qの非断熱加熱は6時間平均で公開され、平均の中心時刻は解析場に対して3時間の差がある。6時間平均の加熱率の場を使用してエネルギー生成を解析すると、この時刻差によって収支誤差が非常に大きくなる。この問題は、今回実施

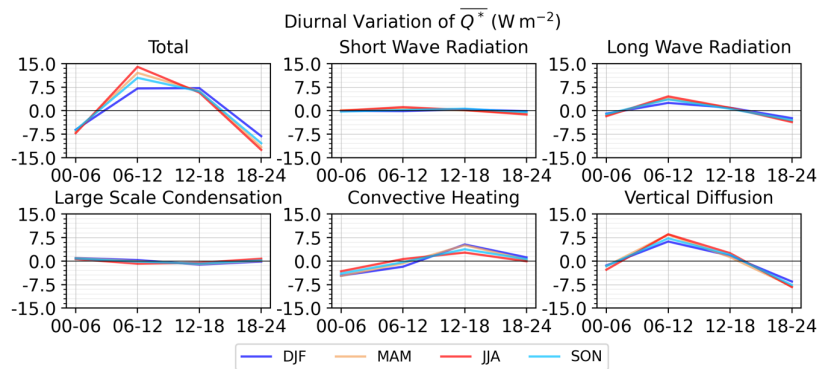


図4: 全球平均した非断熱加熱の日変化。JRA3Qの非断熱加熱過程を個別に解析し、時刻ごとの気候値を解析した。各パラメータの日平均を引いた。横軸は時刻を表し、ラベルの期間はデータの時間平均区間を表す。

したように時間方向の移動平均を施して平均の中心時刻を解析場に合わせることで大きく改善する。しかし、北半球夏季は加熱率の日変化が非常に大きいため、この誤差が完全には取り除けない。これにより、JJAではDJFに比べ A_Z 、 W ともにエネルギーバランスが非常に悪くなる。

4. まとめ

MIM法によってJRA55とJRA3Qのエネルギー収支を解析し、エネルギーバランスを評価した。エネルギーとエネルギー変換はデータセット間の違いが小さいが、 Q_Z はJRA3Qの方が4.6%小さく、 Q_E はJRA3Qで10%大きい。この変化により、DJFにおいて A_Z の収支の誤差はJRA55で3.0%に対しJRA3Qで-0.64%、 W の収支の誤差はJRA55で-46%に対しJRA3Qで-34%となり、JRA3Qで予報モデルの精度が改善していることが確かめられた。一方、JJAではエネルギーバランスが非常に悪い。これは、夏の非断熱加熱の全球平均が大きく日変化することで、6時間平均で公開されているデータでは正確な解析ができないことが原因である。この問題を解決するため、解析スキームの再検討が必要である。

参考文献

Iwasaki, T., 2001: Atmospheric Energy Cycle Viewed from Wave-Mean-Flow Interaction and Lagrangian Mean Circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(20), 3036–3052.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<3036:AECVFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<3036:AECVFW>2.0.CO;2)

- Kobayashi, C., & Iwasaki, T., 2024: The Brewer–Dobson circulation in the JRA - 3Q reanalysis and the impact of changes in model physical processes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(765), 5605–5620.
<https://doi.org/10.1002/qj.4896>
- Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa; T. Y. Tanaka, T. Tokuhiko, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 102, 49–109,
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-004>.
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., & Kiyotoshi, T., 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93(1), 5–48.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Uno, S., & Iwasaki, T., 2006: A Cascade-Type Global Energy Conversion Diagram Based on Wave-Mean Flow Interactions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63(12), 3277–3295.
<https://doi.org/10.1175/JAS3804.1>