

どんなソースコードにもバグはつきもの —WRF (Weather Research and Forecasting) の場合—

中西 幹 郎*

1. はじめに

WRF (Weather Research and Forecasting) モデルのソースコードをこれほど注意深く調べるのは、WRF モデルに MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) スキームを導入する際に助言をして以来であるから、10数年ぶりである。

計算機の能力の向上とともに、水平数 km の格子間隔でアンサンブル予報もできる時代になった。かねてから、そのような細かい格子間隔のもとで、放射伝達を平行平面近似に基づく鉛直 1 次元で計算することに疑問を持っていた。そうは言っても、半球にわたって積分するのは現在も困難であるので、鉛直 1 次元のままで工夫をして対処する方法を試行するため、WRF モデルのバージョン 4.3.1 を利用することにした。そこで目についたのは、勘違いに起因するバグではないかと思われる記述である。それをここに報告する。

この内容は、すでに作成者に報告済みであるが、むしろ筆者の勘違いである可能性もあるので、一部は審議中のようなのである。論文は査読されるが、ソースコードが査読されることはほとんどない。読者の方々も真偽のほどを確認してみたいかであろうか。

2. 放射計算の準備のソースコード

ファイル名は module_radiation_driver.F である。オプション icloud_bl=1 のとき、不審な箇所

$$qc = qc + qc_bl * cldfra_bl \quad (1)$$

を通過する。ここで、右辺の qc は雲微物理過程で得

られた凝結水量、qc_bl は部分凝結スキームで得られた凝結水量、cldfra_bl は統計的凝結率 (雲量と解釈) である。なお、それぞれの変数のインデックス (i, k, j) は省略した (以下同様)。

部分凝結スキームを Mellor (1977) に基づいて簡単に説明する。WRF モデルで予報される変数は、アンサンブル (転じて格子) 平均の統計量である。MYNN などの乱流スキームを使うと、格子ごとに平均温度、平均水分量 (= 水蒸気量 + 凝結水量)、それぞれの分散と共分散が得られる。格子内のローカルな温度、水分量の確率密度分布 G が決まると、雲量 $cldfra_bl=C$ と凝結水量 $qc_bl=\bar{q}_{cbl}$ は

$$C = \iint_{-\infty}^{\infty} H(q_t - q_s) G dq_t d\theta \quad (2)$$

$$\bar{q}_{cbl} = \iint_{-\infty}^{\infty} (q_t - q_s) H(q_t - q_s) G dq_t d\theta \quad (3)$$

で求められる。ここで、 q_t と q_s はそれぞれローカルな水分量と飽和水蒸気量であるので、その差はローカルな飽和超過量すなわち凝結水量である。 θ は温度、 H はヘビサイド関数

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (4)$$

である。明らかなように、(3) 式の \bar{q}_{cbl} は平均水分量に対する凝結水量 ((1) 式の右辺の qc に相当) に、サブグリッドの変動が加わった格子平均の凝結水量である。したがって、(1) 式の右辺のように qc を加える必要も、内包されている cldfra_bl を qc_bl に掛ける必要もない。(1) 式は qc_bl を例えば積雲対流パラメタリゼーションで見積もられる、サブグリッドの積雲層

* Mikio NAKANISHI, 一般財団法人日本気象協会,
nakanishi.mikio@jwa.or.jp
© 2022 日本気象学会

内のみ存在する凝結水量と解釈していると思われる。ただし、(1) 式は

IF(qc<1.E-6.AND.cldfra_bl>0.001)THEN (5)

で限定されているので、実際の計算ではほとんど通過しないのかもしれない。

実は、作成者に報告した際、Mass flux スキームを導入したときに、そのスキームに合わせて qc_bl は雲層内の凝結水量にしたという回答があった。ソースコードを見ると、確かに qc_bl はほとんどの箇所でも雲層内の凝結水量の扱いになっているが、部分凝結スキームの qc_bl は (3) 式の解のままであり、混乱が生じている。以下、qc_bl は、部分凝結スキームに合わせて格子平均の量として変更を進める。作成者の意図どおりに雲層内の量と考えたほうがソースコードの修正箇所は少なかったかもしれないが、qc_bl に cldfra_bl を掛ける演算が残って煩わしい。

3. 凝結水量の計算のソースコード

ファイル名は module_bl_mynn.F である。ここには明らかなバグが 1 つある。bl_mynn_cloudpdf=0 の場合に、qlk=q1 (k) の代入が行われていない。

先に述べたように、部分凝結スキームの qc_bl は (3) 式のままであるので、変更する必要はない。しかし、bl_mynn_cloudpdf=0 または 1 を選択したとき、浮力フラックスを算出する箇所

(qc_bllld+qi_bllld) * cldfra_bllld

は修正しなければならない。ここで、qc_bllld は凝結水のうち水の量、qi_bllld は氷の量、cldfra_bllld は雲量である。cldfra_bllld を掛けなければ、部分凝結スキーム本来の式に戻る。ほかにも同様の箇所が複数あるが、cldfra_bllld を掛けなければよい。

少し変更が面倒なのは、Mass flux スキームを利用する bl_mynn_edmf=1 を選択したときに通過する箇所

QCs=MIN(MAX(qc_bllld, 0.5 * qc_mf), 5E-4)
qc_bllld=(qc_mf * Ac_mf+QCs * Ac_strat)/
cldfra_bllld

である。qc_mf は Mass flux スキームから算出される

凝結水量、Ac_mf はその雲量、Ac_strat は qc_bllld の雲量である。QCs を求める式を見ると、qc_bllld は qc_mf と対等に扱われているので、雲層内の凝結量と考えているようであるが、雲層内の量にするには雲量で割らなければならない。また、qc_bllld に対する根拠不明の制限を思い切って外す (QCs=qc_bllld/Ac_strat)。さらに、雲層内の量に戻す目的の cldfra_bllld による割り算は不要なので、2 つの式は

qc_bllld=(qc_mf * Ac_mf+qc_bllld)

に変更できる。この式は (1) 式と同じ形である。

最後に、bl_mynn_cloudpdf=2 のときには、不可解な箇所

ql_water=sgm * qlk

ql_ice=MIN(80. * qv, 0.1) * sgm * qlk

がある。ql_water は Chaboureau and Bechtold (2002) に基づく凝結水量であるが、ql_ice はコードの作成者が追加した。ql_water はすべてが水としたときの凝結水量、ql_ice はすべてが氷としたときの量を想定していると思われるが、ql_ice の係数が謎である。qv は水蒸気の混合比で、乾燥空気に対する水蒸気の密度の比である。それを 80 倍していることから、雪の混合比に換算しているつもりではないだろうか。一方、雪の密度は水の密度の 0.1 倍程度である。したがって、ql_ice の係数は、sgm * qlk すなわち ql_water を、0.1 倍を超えない範囲で、雪に換算した混合比に応じて水を雪に変換していると想像する。しかし、ql_ice は氷の量である。氷の密度は水の 0.9 倍程度であるから、上記の変換で行うなら係数は 0.9 が妥当であろう。

しかし、疑問である。この変換は乾燥空気と凝結水の塊を別個に考えている。本来はすべてを包含する湿潤空気として考えるべきであろう。この場合、水の相変化に伴う膨張・収縮とともに湿潤空気も膨張・収縮する。湿潤空気内の乾燥空気と凝結水の質量は変わらないので、その水が氷であろうと雪であろうと ql_ice=ql_water でよい。事実、Chaboureau and Bechtold (2002) は、水と氷の状態での混合比の差別はしていない。

なお、この部分は、作成者の最新のコードでは削除、すなわち ql_ice=ql_water に対応するという回答を得ている。それならば、このような長い説明は不要で

あったが、推理しながらコードを読む楽しみが伝われば幸いである。

4. 放射計算の工夫

ソースコードを調べるきっかけとなった放射計算の工夫を説明し、試行した例を示す。

第1図はかなり極端ではあるが、大気鉛直断面のイメージである。例えば水平15kmの格子間隔では見えていた雲が、5km間隔では雲の間隙を縫って直上には雲が確認できないということもあり得る。つまり格子間隔が小さくなればなるほど平行平面近似が成り立たず、放射伝達を鉛直1次元で計算するのは危険であることを示している。太陽はいつも直上にあるわけではないので、直達光の算出への影響は深刻である。

そこで、最初の試みとして、放射過程の計算においてのみ、雲量、凝結水量ともに近接9格子点の単純平均の値を使った。これは module_radiation_driver.F で(1)式の代わりに実行される。もちろん(5)式の判定は不要である。

全国的に3日間概ね晴れた。

事例1：2020年11月14日21時～

と、低気圧が日本列島を通過した

事例2：2021年3月11日21時～

の2事例を対象に、78時間にわたって水平5km格子間隔で計算したWRFモデルの結果を示す。初期値と境界値はECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) のモデルの3時間ごと0.25°間隔のアーカイブ格子点データを利用した(中西2022)。WRFモデルの物理過程オプションは、

```
雲微物理過程：Thompson aerosol-aware
放射過程      ：RRTMG
陸面過程      ：Noah
乱流過程      ：MYNN レベル2.5+Mass flux
               ：icloud_bl=1
               ：bl_mynn_cloudpdf=2
```

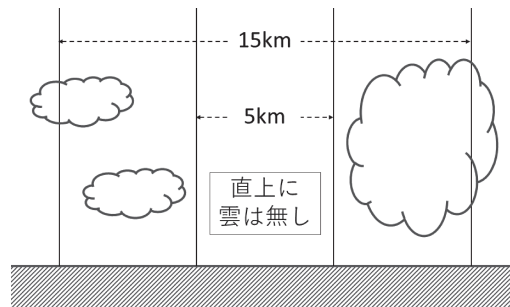
を使った。

計算値と比較する観測値は、気象官署16地点

稚内、札幌、秋田、仙台、新潟、つくば、東京
長野、静岡、名古屋、大阪、松江、広島、高知
福岡、大分

の全天日射量を収集した。

第2図は全天日射量の16地点平均値を表す。事例1(第2図a)は概ね晴れていたため雲の発生が少なく、ここで指摘した変更箇所の影響は小さかった。このた



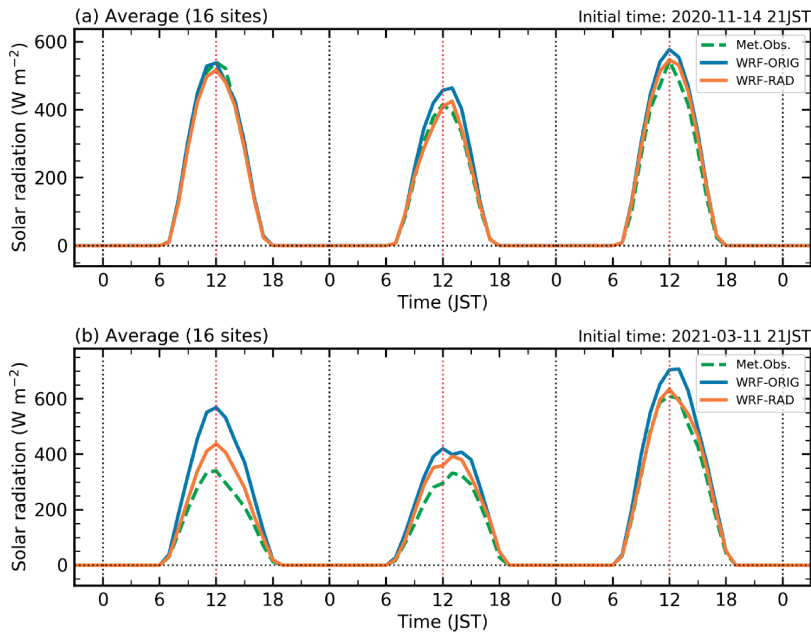
第1図 大気鉛直断面のイメージ。縦の実線は、数値モデルの格子壁を想定している。

め、変更前(WRF-ORIG)、変更後(WRF-RAD)ともに計算値は観測値とほぼ一致した。それでも全く雲が無かったわけではなく、2日目、3日目はWRF-RADのほうが観測値とよく一致した。

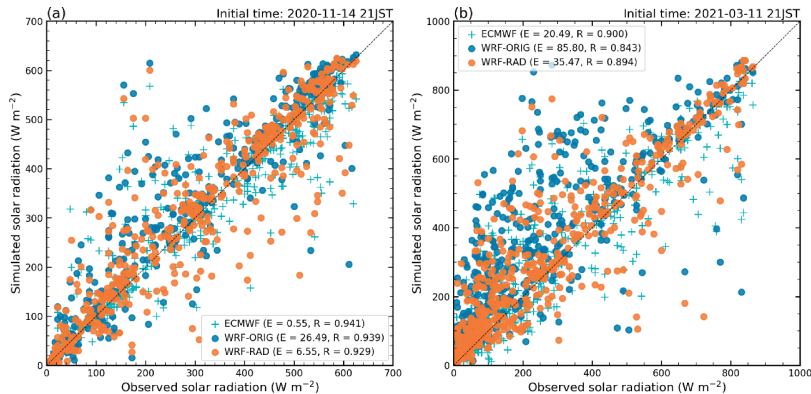
事例2(第2図b)は雨や曇りの地点が多かったため、最初の2日間の日射量は小さかった。その2日間はWRF-RADの日射量も小さくなり、観測値に近いが、依然、最大で100W m⁻²程度の超過がある。次第に晴れの地点が多くなり、日射量が大きくなった3日目はかなりよく一致している。

第3図に全天日射量の散布図を示す。事例1(第3図a)は45°のラインに比較的集中しているが、雨や曇りの地点が多く混じった事例2(第3図b)は観測値と計算値のばらつきが大きくなり、その大きさは相関係数Rの値に現れている。どちらの事例もWRF-RADのほうがWRF-ORIGよりも平均誤差Eをかなり改善している。ただし、ECMWFモデルが相関係数Rも含めて統計値は最もよい。モデルが全く異なるので単純な議論はできないが、ECMWFモデルの格子間隔は約9kmで、わずかながらここで設定したWRFモデルよりも大きく、第1図のような状況がECMWFモデルの結果をよりよくした原因の1つであることも考えられる。そうであれば、ここで行った方法をより工夫することで更なる改善が期待できる。

雲微物理過程や放射過程のスキーム自体の課題もあるが、意味不明のパラメータを調整するのではなく、バグの修正や物理的に望ましい工夫を行うことで、より効果的に予報精度が改善できることは示せたと考える。ちなみに、今回の事例で、全体の改善量を100%とすると、放射計算の工夫による改善量はおおよそ25%であった。



第2図 全日射量の16地点平均値の日変化。凡例のMet. Obs. は気象官署の観測値、WRF-ORIGは本報告の変更を行っていないWRFモデルの結果、WRF-RADはその変更を行った結果である。



第3図 全日射量の散布図。凡例のECMWFはECMWFモデルの結果、WRF-ORIGとWRF-RADは第2図と同じである。Eは平均誤差、Rは相関係数である。この統計には夜間のデータは除いてある。なお、ここに示すECMWFモデルの結果は1時間ごと0.125°間隔のデータである。

5. まとめ

人が作るものであるから、WRFモデルといえどもバグはつきものである。実行ファイルではなくソースコードを公開している理由の1つは、多くの目に触れさせることによって、バグの発見やモデルの改善を期待していると想像できるので、疑いもせずブラックボックスで使用するのにはリスクを伴う。できる限りソースコードには目を通し、WRF (2022) のサポートフォーラムなどを通してフィードバックして期待に応えたいものである。

謝辞

編集を担当して下さった田口晶彦氏をはじめ編集委員会の皆様には、貴重なご意見をいただきました。ここに深く感謝し、お礼を申し上げます。

参考文献

- Chaboureau, J.-P. and P. Bechtold, 2002: A simple cloud parameterization derived from cloud resolving model data: Diagnostic and prognostic applications. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 2362-2372.
- Mellor, G.L., 1977: The Gaussian cloud model relations. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 356-358.
- 中西幹郎, 2022: アーカイブ格子点データ (GPV) を利用する場合の注意. *天気*, **69**, 165-169.
- WRF, 2022: WRF Users Page. [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/\(2022.6.3閲覧\)](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/(2022.6.3閲覧)).