陸面過程 Noah multi-parameterization (Noah-MP) スキームの修正

中西幹郎*

1. はじめに

中西(2022)の第2弾である.

積雪のある地点の地上気温を精度よく予測すること を目指して、Weather Research and Forecasting (WRF)モデル (WRF 2022)を使用した.陸面過程 のスキームは複数のオプションの中から、Noahス キーム(Chen and Dudhia 2001)の改良版である Noah multi-parameterization (Noah-MP)スキーム(Niu *et al.* 2011)を選んだ.Noah-MPスキームは積雪深に応 じて積雪層を最大3層に分割して計算する.これは積 雪層を土壌層の一部とする Noah スキームよりも優れ た点の1つである.

Noah-MPスキームは Noah スキームよりも,深い積 雪がある地点で観測された地上気温を良好に予測する が,浅い積雪の地点では夜間に突然の大きな気温低下 を予測することがあった.その地点の気温と積雪深の 対応を調べると,突然の気温低下は計算上の積雪層が 生成されたときに起こっていることがわかった.これ がきっかけで,ソースコードにいくつかの修正すべき 点を発見した.その修正内容と改善効果がわかる1つ のシミュレーション結果を示す.

2. 計算の概要

WRFモデルのバージョン4.3.1を日本周辺に適用した(第1図).計算領域は東西・南北方向に5km間隔で455×503個の格子に分割し,鉛直方向は上端50hPaまで45層に分割した.Noah-MPを除く,採用した物理過程オプションは

• Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino $\lor \checkmark \lor 2.5 +$

Mass flux

· aerosol-aware Thompson-Eidhammer

・Rapid Radiative Transfer Model for GCMs である.

初期値・境界値は European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)のアーカイブ された予報値(ECMWF 2022)のうち,3時間ごと水 平0.25°間隔のものを使用した.計算は2022年2月20 日21時から78時間実行した.このときの日本付近は典 型的な冬型の気圧配置であった.

3. 問題の発覚とソースコードの変更

図は次節で示す.シミュレーションは、積雪のある



^{*} Mikio NAKANISHI, 一般財団法人日本気象協会. nakanishi.mikio@jwa.or.jp

^{© 2023} 日本気象学会

1つの地点で地上2mの気温が午前2時からの3時間 で約7℃低下すると予測した. もちろん, 観測とは一 致しない. 気温低下が始まる午前2時ごろ, 計算上の 積雪深は2.5cmを超えた.

3.1 サブルーチン SNOWFALL, THERMOPROP と DIVIDE

Noah-MP スキームは積雪深が2.5cm を超えると, 積雪層を生成して土壌層から独立させる(第2図).オ リジナルのソースコードは、その積雪層の温度 STC (0) にモデル最下層の気温を与えている.積雪層が生 成されたあと、STC (0) は土壌第1層の温度 STC (1) に代わって、雪表面でのエネルギーバランス方程式に おける積雪層内の熱フラックスを決定する.積雪層の 生成直前と直後で、この熱フラックスが変化してはな らないので、STC (0) は

$$K \frac{TG-STC(1)}{\underline{DZSNSO(1)}} + SNOWH = Ks \frac{TG-STC(0)}{\underline{SNOWH}}$$
(1)

の関係から与えられるべきである. ここで,変数の説 明は第2図を参照していただきたい. なお, ソース コードには, STC (0) にモデル最下層の気温を代入 するところで, "temporary setup"のコメントがある. 作成者も納得はしていなかったようである.

(1) 式の K は、雪表面と土壌第1層の中間レベルの 間で熱フラックスが一様であると仮定すると、雪と土 の熱伝導係数の調和平均で与えられる.オリジナル コードは、この K を熱伝導係数の配列 DF (1) に代入

している. DF (1) は土壌第 1層と第2層の間の熱伝導係 数として使われるので,正し くはKはDF(0) に代入され なければならない.

積雪深が5cmを超えると 積雪層は2つに分割される. このときにも、雪表面でのエ ネルギーバランスに気を付け ながらそれぞれの積雪層の温 度を設定しなければならない.

 3.2 サブルーチン VEGE_FLUXと BARE_FLUX
 オリジナルコードは、土ま

$$G = DF(ISNOW+1) \frac{TG - STC(ISNOW+1)}{DZSNSO(ISNOW+1)}$$
(2)

で与えている. ここで, *ISNOW*の絶対値は積雪層の 層数で, *ISNOW*=0は積雪層なし(*SNOWH*<2.5cm; 第2図左)を意味する.しかし, *DF*(1)が*DF*(0) であったのと同じように, *DF*(*ISNOW*+1)は*DF* (*ISNOW*)でなければならない.ただし, *DF*(*ISNOW*) は配列のインデックスをはみ出すので, 異なる変数で 与えるのがよい.さらに,積雪層なしのときの*G*は (1)式の左辺で与えられるので, (2)式と同じ形に書 き換えると



となる. これは雪表面での熱フラックスであるが, K が調和平均で与えられると(前節参照), 雪が乗ってい ても土表面での熱フラックスと一致する.

3.3 サブルーチン PHASECHANGE

オリジナルコードでは、深さが2.5cmよりも浅く、 積雪層を形成していない雪は土壌第1層の一部で、土 から雪への熱伝導は瞬時に起こるとみなし、土壌第1 層の温度が0℃よりも高いとき、その層から熱を奪っ



第2図 積雪層の模式図. 左図のように積雪深が浅いときには積雪層は生成され ず(Noah スキームと同じ扱い),右図のように積雪深が2.5cm を超える と最初の積雪層が生成される.変数の名前はソースコードに従っている. SNOWH は積雪深, DZSNSO(1)は土壌第1層の厚さ,TG は表面温度, Kは土と雪の合成した熱伝導係数,Ks は雪の熱伝導係数,STC(1)と STC(0)はそれぞれ土壌層と積雪層の温度である.

て解けるとしている. これは, しばしば土壌第1層の 温度を突然に低下させる. 修正コードでは, (1) 式か ら得られる *STC* (0) を雪の温度とし, その温度が0℃ 以上ならば, 雪が解けるように変更した. オリジナル コードには, "needs more work"のコメントがある.

3.4 サブルーチン COMBO

雪が解けてある程度層厚が薄くなった積雪層は、エ ンタルピー、ここでは0 °Cを基準にした顕熱と潜熱の 合計が保存するように、隣接する層と結合される.し かし、オリジナルコードでは、氷や水の物性値として 体積比熱 (J m⁻³ K⁻¹)を使っているために、それぞれ の物性値をそれぞれの密度で割らずに得た顕熱の単位 は、潜熱のそれと一致していない、次のタイムステッ プではあるが、サブルーチン PHASECHANGE で相変 化が計算されるので、修正コードでは簡単のために、 エンタルピーの保存ではなく顕熱の保存に置き換え た.この修正による結果の差はほとんど認められな かった.おそらく,密度で割っていないオリジナル コードの顕熱は過大評価されるために,ほとんど顕熱 の保存を計算する結果になっているからであろう.

4. シミュレーション例

4.1 気温,降水量と積雪深

第3図に、八戸における地上2mの気温、降水量お よび積雪深の時間変化を示す.オリジナルコードで予 測された気温は2月21日午前2時からの3時間で約 7℃低下した(第3図aの点線).この午前2時ごろ、 計算上の積雪深は2.5cmを超えた(第3図cの点線). ECMWF データが提供した初期の積雪深は0cmで あったが、たまたま実際には降っていない雪が降った



第3図 八戸における(a)地上2mの気温,(b)降水量と(c)積雪深の時間変化.破線、点線および実線はそれぞれ AMeDAS 観測値、オリジナル Noah-MPスキームの結果(WRF-ORIG)および修正 Noah-MPスキームの結果(WRF-MODI)である.なお、八戸における気温の観測高は地域 気象観測所一覧に記載がなかった.

ために(第3図b),積雪は 徐々に増加した.修正コード では突然の気温低下は現れな い(第3図aの実線).予測さ れた積雪深は観測のそれと一 致しないので,気温の予測精 度は問題ではない.

修正コードでも依然,夜間 に気温が短い周期で変動する 様子がうかがえる(第3図a の実線). 夜間は短波放射が なく、長波放射の変動が顕熱 フラックスに影響しやすい. 実際.予測された雲量.長波 放射の変動が小さくない時間 もあった (図省略). 中西 (2022) で説明した雲量. 雲水 量の空間平均に加えて、それ らの時間平均も検討してみた いと思う. これは、計算時間 短縮のために行う放射計算の 間引きの影響を補う意図が ある

4.2 表面温度と土壌温度 第4図に、松江における初 期から1時間ごとの表面温度 と土壌温度の鉛直分布を示 す.松江での初期の積雪深は およそ2cmであった.オリ



ジナルコードでは、サブルーチン PHASECHANGE (第3.3節)の処理のために、深さ5cm に定義された 土壌第1層の温度は、計算開始1時間後までに1.5℃ から0℃に低下した(第4図の点線).修正コードで は、そのような気温低下は現れない(第4図の実線).

なお,松江の例は初期の土壌温度であるので,モデ ルに合った初期化と考えることもできる.しかし,し ばらく計算が進んで積雪深が2.5cmを下回ったとき に,同様の現象が起こる地点もあった(図省略).

4.3 気温の散布図

第5図に、32の AMeDAS 地点における地上2mの 気温の散布図を示す.オリジナルコードでは、-3 °C 付近の観測気温の一部が-10°C以下に予測されている (青色の丸).修正コードでは、そのような極端に低い 気温の予測は減少しており(橙色の丸)、平均誤差や相 関係数も、わずかではあるがオリジナルコードよりも 改善されている.

しかし,修正コードにおいても,観測値よりも低す ぎる予測が散見される.この低温は,計算開始初期の ころの標高の高い地点に多い.その原因は初期化にも あり,陸面過程にばかりあるとは言えないが,引き続 きソースコードを調べてみるつもりである.

5. まとめ

夜間に突然の大きな気温低下を予測したことがきっ かけで、ソースコードに改善すべき点を発見した. ソースコードを確認したのは、その異常をもたらすと 考えられる箇所に限られ、すべてに目を通したわけで はない、今後も、特にソースコード内のコメントに注 意を払いながら、陸面過程以外の過程も含めて確認作



第5図 32の AMeDAS 地点における地上2mの 気温の散布図.ただし、AMeDASの気温 の標準観測高は地上1.5mである.青色お よび橙色の丸はそれぞれオリジナル Noah-MPスキームの結果(WRF-ORIG) および修正 Noah-MPスキームの結果 (WRF-MODI)である.参考として、1 時間ごとの ECMWF データを水色の十字 で示した.凡例のEとRはそれぞれ平均 誤差と相関係数を表す.

業を進めたい.ただし、多くの方と同じように、この 記事のような報告をする必要がないことを望んでいる.

謝 辞

編集を担当してくだ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

- Chen, F. and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Mon. Wea. Rev., 129, 569-585.
- ECMWF, 2022: IFS documentation. https://www.ecmwf. int/en/publications/ifs-documentation (2022.7.31閲覧)
- 中西幹郎, 2022: どんなソースコードにもバグはつきも の一WRF (Weather Research and Forecasting)の場 合一. 天気, 69, 537-540.
- Niu, G.-Y., Z.-L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero, M. Tewari and Y. Xia, 2011: The community Noah

land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. J. Geophys. Res. Atmos., 116,

D12109, doi:10.1029/2010JD015139.

WRF, 2022: WRF users' page. https://www2.mmm.ucar. edu/wrf/users/(2022.7.31閲覧)