

改良した陸面モデルによる地表面フラックスの検証とモデルの改良

草開 浩 (気象庁数値予報課)

1 はじめに

陸面過程のパラメタリゼーションや地表面の非一様性を適切に表現することは、下部境界条件として大気モデル与える地表面フラックスの精度向上につながり、混合層の発達や、時としてメソスケールモデルの主なターゲットである対流活動の発生要因にもなりうる。文科省創生プログラム・テーマ C-ii-b の領域気候グループでは、非静力学領域気候モデル (NHRCM) を用いた領域気候研究を行っている。NHRCM の陸面過程には、MSM・LFM で導入している平板モデル (以降、SLAB; 原 (2008)) に比べてより詳細な過程を扱うことができる MRI/JMA-SiB (MJ-SiB; 大泉・三浦 (2008)) を実装している。気象庁数値予報課においても、MJ-SiB をさらに発展させた陸面モデル eSiB (extended SiB) を開発し、より現実的な地表面フラックスの算出による大気予測再現性の向上、地上気象要素の予測精度向上を目指し改良を進めている。これまでに、eSiB の積雪モデルが持つ融雪期の積雪深誤差を積雪アルベド計算方法の改良により軽減できたことを示した (草開, 2013)。

現在、eSiB を MSM に導入することを目指して、大気モデルと結合して予測実験と検証を進めている。今回は、結合したモデルでの予測実験でわかったいくつかの問題に対するモデルの改良について報告する。

2 陸面モデルの改良

eSiB を大気モデルと結合して予測実験を数事例行った結果、予報時間の経過とともに下層風速の増大、比湿の減少といった誤差の拡大が見られた。これらについて、下層風速については運動量フラックス、比湿については潜熱フラックスの変化が原因であると推測し、誤差拡大を軽減する目的で、以降で説明する変更を施した。

2.1 運動量フラックスの改善に向けた変更

運動量フラックスは接地境界層の安定度や地表面粗度、参照高度の風速に応じて変化する。粗度について SLAB と eSiB を比較すると、eSiB のほうが全体的に 1 m 近く小さい (図略)。eSiB では格子内非一様性を表現するためにタイル法 (格子内をいくつかのカテゴリに分割してそれぞれで熱収支を計算する) を採用しており、モデル 1 格子の粗度は各タイルの粗度とその被覆率に依存する。これまでの eSiB では、植生の被覆率と粗度は Dorman and Sellers (1989) で作成された $1^\circ \times 1^\circ$ 解像度のデータを SiB の植生区分ごとに統計した値を用いており、MSM の解像度 (5 km) に適した値であるとは言えない。そこで、まず、植生被覆率は Broxton et al. (2014) で Terra 衛星 MODIS 観測データを元に作成された 1km 解像度の植生被覆率データをモデル格子に合わせて平均・内挿することにより作成した。この変更により、植生被覆率が全体的に増加し、粗度の小さい裸地タイルの被覆率が減るため、格子平均粗度が大きくなった。また、植生タイルの粗度については次の通りとした。一般に粗度は地表面構造物の高さや間隔に依存することが知られている。eSiB では植生キャノピーの高さ (h_{cnp}) を植生区分ごとに与えており、これを用いて Brutsaert (1982) で提案されている $z_{0m,v} = 0.136h_{cnp}(z_{0m,v}$: 植生タイルの粗度) という関係式を採用した。これにより、樹高が高い植生区分における粗度が従来の値よりも増加した。

2.2 潜熱フラックスの改善に向けた変更

潜熱フラックスは植生からの蒸散や裸地面からの蒸発の寄与が大きく、いずれも土壌水分量に強く依存している。これまで、土壌水分観測がある地点における eSiB の土壌水分予測結果を検証したところ、観測に比べて土壌水分減少の時定数が短いことがわかった。これは土壌内の水分移動が早すぎることに起因していた。eSiB における土壌内の水分移動は Darcy 則に基づく拡散モデルを用いている。透水係数の診断には Clapp and Hornberger (1978) の関係式を用いているが、van Genuchten (1980) で提案されている関係式の方が乾燥時の値が小さく、こちらを採用することにした。また、植生からの蒸散量を左右するパラメータの一つとして植生区分ごとに設定している植生根の長さを、Dorman and Sellers (1989) から Zeng (2001) に変更した。この変更により根の長さが長くなり、より深層の土壌水分を利用して蒸散を計算することができるようになった。

3 改良したモデルの検証

eSiB 単体での予測と大気モデルと結合した際の大気予測両方について検証を行った。

3.1 陸面単体検証 (オフライン実験)

eSiB 単体での精度を検証するため、オフラインモデル (大気モデルと結合せずに、入力となる大気強制力をオフラインで与えるモデル) を用いた。検証には FLUXNET プロジェクト (Baldocchi, 2001) のフラックス観測データを用いた。改良前の eSiB による実験を LAND-A、改良後の実験を LAND-B と呼ぶ。図 1 は FLUXNET プロジェクトの観測地点 Sylvania Wilderness の 7 月におけるフラックス観測と LAND-A、LAND-B のフラックス予測結果を比較したものである。LAND-B は LAND-A に比べて日中の摩擦速度が増加しており、やや過大ではあるものの運動量フラックスの増加は意図通りである。また、潜熱フラックスについても、LAND-B の方が大きく、観測によく合っている。顕熱フラックスについては LAND-A も LAND-B も過大であり、今後改善の余地があるが、今回の改良でわずかに減少した。ボーエン比 (潜熱フラックスに対する顕熱フラックスの比) で見ると、LAND-A は潜熱フラックスが過小であるためボーエン比を過大評価しているが、LAND-B では潜熱フラックスが増え、大幅に観測に近づいた。

3.2 大気モデルとの結合実験

2014 年の夏季 20 事例について大気モデルとの結合実験を行った。大気モデルには、結合における計算安定性の理由から、MSM への導入を目指し開発を行っている次世代非静力学モデル asuca (気象庁予報部, 2014) を用いた。基準実験として陸面モデルに SLAB を用いたものを CNTL、改良前 eSiB を用いたものを TEST-A、改良後 eSiB を用いたものを TEST-B とする。対ゾンデ観測で検証を行った結果 (図略)、TEST-B では TEST-A で見えていた下層風速の増大、下層比湿の減少は軽減され、前項と整合した結果が得られた。一方で、CNTL に対しては比湿や気温の要素でまだ大気下層の誤差が大きく、さらなる改善の余地がある。

3.3 SLAB と eSiB の予測比較 (夏季高温事例)

ここでは、夏季猛暑において、SLAB に比べて eSiB のほうが地上気象要素の予測が適切であった事例を述べる。MSM では夏季猛暑における日中の高温予測においてピーク値が過小となる傾向があり、これは潜熱フラッ

クスが過大であることが指摘されてきた(原, 2008)。図2は2015年8月4日におけるアメダス熊谷地点における各実験の予測時系列とアメダス観測を比較したものである。この日、熊谷では最高気温37.5°Cを記録した。CNTLでは地上気温予測は観測に比べて低く、逆に露点温度は高いことから顕熱フラックスが過小、潜熱フラックスが過大であることが推測できる。SLABでは潜熱フラックスのバルク係数に表層土壌水分に比例した蒸発効率をかけることにより、乾燥時の蒸発を抑制している。ここで、原(2008)の感度実験と同様に、土壌水分予測値に設けている下限値を下げた実験(CNTL-B)を行うと、確かに潜熱フラックスが減少し地上気温は上昇するが、逆に露点温度は大幅に減少して観測値から離れてしまう。CNTL土壌水分量を飽和度に換算すると約27%で、同日09時における熊谷周辺のASCAT土壌水分飽和度*1は35%であり、予測値はむしろやや少ないことがわかる。このことから、潜熱フラックスの過剰はSLABが予測した土壌水分量が過大ということではなく、陸面モデルの蒸発プロセスに要因があると推測する。一方、eSiBでは植生キャノピーの熱・水収支(キャノピー内部の乱流輸送や放射収支、葉面からの蒸散、など)を考慮してフラックスを計算している。植生キャノピーは土壌などに比べて熱容量が小さいので温度が上昇しやすく、実際、地表面温位はCNTLに比べて10K以上高く予想している。地表面温度が高くなると地表面比湿が増え潜熱フラックスが増大する方向に向かうが、eSiBでは大気条件や葉面積、深層土壌水分など様々な要素によって植生からの蒸散量をコントロールしている(気孔抵抗)。そのため、CNTLに比べてeSiBのほうが潜熱フラックスを100 W/m²近く抑制している。結果として、eSiBの予測では、地上気温は観測値近くまで上昇し、露点温度の上昇も抑えられている。この例における改善は陸面過程をSLABからeSiBへ高度化することのメリットの一つと考える。

謝辞

本研究の一部について、文科省の気候変動リスク情報創生プログラム・テーマCの支援をいただいた。

参考文献

- Baldocchi, D. D., 2001: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82(11)**, 2415–2433.
 Broxton, P. D., X. Zeng, W. Scheftic, and P.A. Troch, 2014: *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1996–2004.
 Brutsaert, W., 1982: *Environmental Fluid Mechanics*, Springer Netherlands, 302pp.
 Clapp, R. B. and G. M. Hornberger, 1978: *Water Resour. Res.*, **14**, 601–604.
 Dorman, J. L. and P. J. Sellers, 1989: *J. Appl. Meteor.*, **28**, 833–855.
 van Genuchten, M. T., 1980: *Soil Sci. Soc. America J.*, **44**, 892–898.
 Zeng, X., 2001: *J. Hydrometeorol.*, **2**, 525–530.
 大泉三津夫, 三浦大輔, 2008: 数値予報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 187–192.
 気象庁予報部, 2014: 数値予報課報告・別冊第60号, 気象庁予報部.
 草間浩, 2013: 第15回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集, 37–38.
 原旅人, 2008: 数値予報課報告・別冊54号, 166–186.

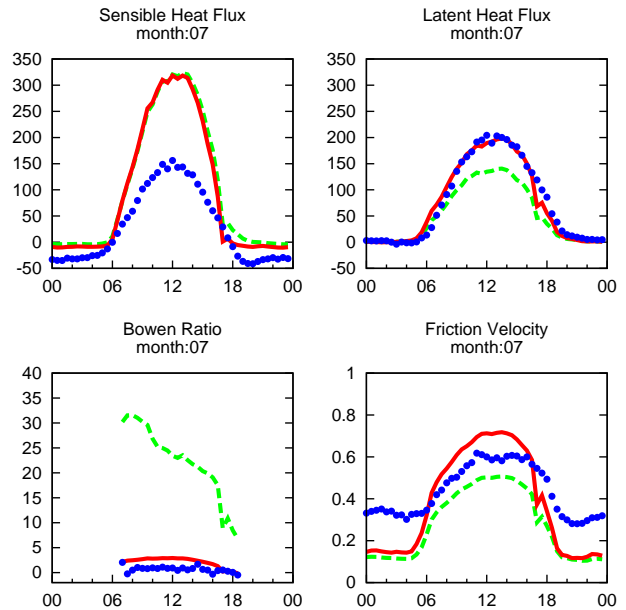


図1 FLUXNETプロジェクトの観測地点 Sylvania WildernessでのLAND-AとLAND-Bのフラックス予測比較。破線がLAND-A、実線がLAND-B、点線が観測データを表す。左上は顕熱フラックス、右上は潜熱フラックス、左下はボーエン比、右下は摩擦速度。2002年から2005年の7月について現地時刻別に平均した。

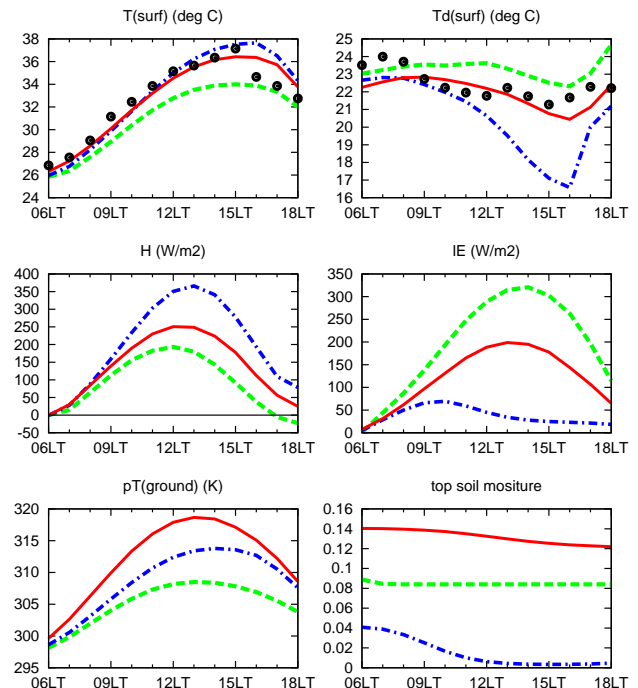


図2 アメダス熊谷地点におけるCNTL, CNTL-B, TEST-Bの地上物理量・フラックス予測の時系列(時刻はJST)。初期時刻は2015年8月3日03UTC。上段左から地上気温、露点温度、中段左から顕熱フラックス、潜熱フラックス、下段左から地表面温位、表層土壌体積含水率を表す。破線がCNTL、一点鎖線がCNTL-B、実線がTEST-B、点鎖線が観測データ(地上気温、露点温度)を表す。

*1 <http://navigator.eumetsat.int/discovery/Start/DirectSearch/DetailResult.do?f%28r0%29=EO:EUM:DAT:METOP:SOM012>