

メソ気象モデル WRF による日射計算の精度検証

Accuracy of solar irradiance simulation using the WRF-ARW model

嶋田 進¹ 劉 媛媛² 夏 慧² 吉野 純³
 Susumu SHIMADA YuanYuan LIU Hui XIA Jun YOSHINO
 小林 智尚⁴ 板垣 昭彦⁵ 宇都宮 健史⁵ 橋本 潤⁶
 Tomonao KOBAYASHI Akihiko ITAGAKI Takeshi UTSUNOMIYA Jun HASHIMOTO

Abstract

This paper discusses the accuracy and characteristics of solar irradiance simulated by the Advanced Research Weather Research and Forecasting (WRF-ARW) model, which is a fully compressible, non-hydrostatic mesoscale model developed by NCAR and NCEP. An annual WRF simulation with a 2 km grid resolution is performed in the year 2010, and the accuracy of simulated solar irradiance is examined using in-situ observations taken at 11 stations in the central Japan. The WRF-simulated Global Horizontal Irradiance (GHI) is found to have annual biases of +53.7 to 83.7 W/m² (+13.9 to 27.4 % of measured mean GHI), and Root Mean Square Errors of 165.6 to 204.2 W/m² (44.6 to 67.8 %). Comparison of occurrence ratio of clearness index from OBS and WRF shows that the positive bias in the WRF simulation might be attributable to the less cloud cover compared to the actual atmospheric conditions. Moreover the performance of three shortwave radiation schemes in the WRF model in a clear sky condition is also compared.

キーワード：日射計算, 数値気象モデル, WRF, 年間シミュレーション

Key Words : Solar irradiance simulation, Numerical Weather Prediction, WRF, Annual simulation

1. はじめに

政府の策定した「低炭素社会づくり行動計画」では、2020年時点の太陽光発電の導入量を2008年現在（総設備容量：約2.1ギガワット）の10倍、2040年時点では40倍にまで大幅拡大することを謳っており、現在その目標達成に向けた施策が次々に打ち出されている。さらには、東日本大震災を契機とし

て太陽光発電を含む再生可能エネルギー全般に対する期待が過去に例が無い程高まっている一方、出力変動の大きい太陽光発電システムが大規模導入された場合の電力系統への影響が同時に懸念されている。この解決策として、数時間から数日先の日射量の予測値から太陽光発電の出力を推定し、出力調整が可能な火力や水力発電と組み合わせることでその影響を緩和する技術の研究開発が国家プロジェクトとして始まっている¹⁾。

日射量の予測手法としては、(1) 時系列解析に基づく方法²⁾、(2) 衛星リモートセンシングに基づく方法³⁾ 及び (3) 数値気象モデルによる方法⁴⁻⁶⁾ 等がある。これらの手法の中で、任意の地点における面的な予測が可能であることから5、6時間先までの予測は衛星リモートセンシングに基づく方法、半日～2日先の予測は気象モデルに基づく方法が現在

¹ 岐阜大学工学研究科特任助教（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）
e-mail : sshimada@gifu-u.ac.jp

² 岐阜大学工学研究科大学院生

³ 岐阜大学工学研究科准教授

⁴ 岐阜大学工学研究科教授

⁵ 一般財団法人 日本気象協会

⁶ 独立行政法人 産業技術総合研究所
（原稿受付：2012年5月19日）

有力視されている⁷⁾。ここで数値気象モデルに基づく方法に関しては、日射計算値を直接利用する方法だけでは無く、雲量等の気象パラメータと過去の観測値を統計的に関連付けて予測する方法^{8,9)}や日射計算値の予測精度を誤差の統計解析から改善する試みも行われている。

著者らは、メソ気象モデルMM5を用いた愛知県及び岐阜県を含む領域の高解像度な局地気象予測システムを構築・運用し、36時間先までの日射量を含む気象要素（天気、気温、降水量、風向風速及び相対湿度）の予測結果をインターネット上で公開している¹⁰⁾。さらに現在、米国大気研究センターおよび米国気象局共同開発のWRF（Weather Research and Forecasting）¹¹⁾を用いて日射量の予測に特化した新システムを構築中である。本稿では、新たな予測システム構築の予備的な検討として、メソ気象モデルを用いた日射量計算に関する先行研究^{7,12,13)}の結果をレビューしつつ、WRFによる年間日射シミュレーション（再現計算）を行い、現場観測値を用いてその計算精度を検証するものである。

2. 計算条件と観測値

WRFは、熱力学を含む数値流体力学モデルに降水や大気放射等のあらゆる気象現象の物理過程を組み込んだ非静力学・完全圧縮の領域気象モデルである。さらには、柔軟なネスティングオプション及び4次元データ同化により高解像度で現実的な気象場の予測及び再現計算が可能であることから、近年では、日々の気象予測から風力や太陽光の発電量予測や資源量調査など幅広い用途で利用されている。

WRFの計算領域をFig. 1に示す。愛知県および岐阜県を含む領域を中心に、双方向ネスティングを用いて3つの領域で同時計算を行った。水平解像度はそれぞれ18、6及び2 km格子、鉛直層数は地表から100 hPaまで50層である。計算期間は2010年1月から12月までの1年間である。本研究では、WRFモデルそのものの日射量の計算精度に着目するため、初期値および境界値にはMM5の局地気象予測システムで用いている気象庁全球数値モデルの予測値ではなく、観測値を用いて再解析された客観解析値（20 km × 20 km、6時間毎）を用いた再現計算を実施した。海面水温データには英国気象局のOSTIA（0.05° × 0.05°、1日毎）、陸面モデルの入力値にはNCEP FNLデータ（1° × 1°、6時間毎）をそれぞれ用いた。また、四次元データ同化は風速、気温および混合比について第1領域の全層で適用し

た。計算条件の一覧をTable 1に示す。

計算精度の検証には、2 km格子の第3領域に含まれる気象庁の10地点（富山、長野、福井、名古屋、甲府、静岡、舞鶴、彦根、大阪および奈良）の日射量観測値に加えて、NEDOの技術開発プロジェクト「新エネルギー技術開発 太陽光発電システム共通基盤技術開発 発電量評価技術の研究開発」の一環で取得されている岐阜大学における全天日射量観測値¹⁴⁾を用いた。Fig. 2は観測地点の位置および周辺地形を示している。WRF計算値との比較には、気象庁の10分積算およびNEDOの1分間隔の観測日射量をそれぞれ前後30分間平均して算出した時間平均値を用いている。

3. 日射量の計算精度

Fig. 3は岐阜大学における2010年の観測値及び

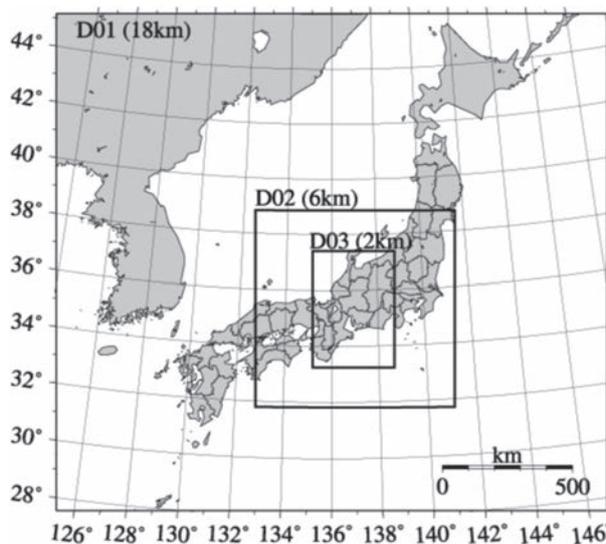


Fig. 1 Domains used in the simulation.

Table 1 WRF configurations

Period	Start: 00:00 UTC 1st JAN 2010 End: 23:00 UTC 31th DEC 2010
Input data	JMA GANAL (6-hourly, 20 km × 20 km) NCEP FNL (6-hourly, 1° × 1°) OSTIA (daily, 0.05° × 0.05°)
Domain	Domain 1 (18km, 119 × 109 grids) Domain 2 (6km, 129 × 129 grids) Domain 3 (2km, 159 × 228 grids)
Vertical layer	50 levels (surface to 100 hPa)
Physics options	Dudhia short wave radiation RRTM long wave radiation WSM 6-class graupel scheme Kain-Fritsch cumulus parameterization (Domain 1 and 2 only) Noah land surface model MYJ PBL parameterization
FDDE option	Domain 1 only

WRF 計算値の日積算日射量の時系列である。白丸は大気上端の日射量、赤線は観測値および青線は WRF 計算値をそれぞれ示している。まず、観測値の年間サイクルを追ってみると、元日から徐々に大きくなる日射量は6月中旬にピークを迎えそこから緩やかに減少している。大気上端の日射量と比べると、地表での日射量は天候の変化によって数日又はそれより短い周期で激しく変動していることがよくわかる。観測値と計算値の時系列を比較してみると、WRF 計算値では季節変化のような長期的な変動や数日周期の天候の変化による変動を概ね捉えられていることが見て取れる。しかしここで細部に注目してみると、両者の変動の傾向はよく似ているものの、計算値は観測値を上回っているケースが多いことに気が付く。本研究の先行研究として WRF の日射計算における鉛直層数および物理オプションの設定の

影響を調べた田村ら (2010)⁵⁾ の研究があるが、その全ての計算ケースの結果においても WRF 計算値は観測値を過大評価する傾向が確認できる。すなわち、WRF の日射計算の一つの特徴として、計算値は実際の日射量を過大評価し易い傾向があることがまず見えてくる。

次に統計的な指標を用いて計算値に含まれる誤差をより定量的に評価する。Fig. 4 は WRF による日射計算値の季節毎及び年間のバイアス (平均誤差) 及び Root-Mean-Square 誤差 (誤差の標準偏差) である。バイアス及び RMS 誤差の定義は以下の通りである。

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (GHI_{WRF} - GHI_{OBS}) \dots\dots\dots (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (GHI_{WRF} - GHI_{OBS})^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここでは一時間毎の観測値、は WRF 計算値、はそれぞれのデータ数である。バイアス及び RMS 誤差の算出には、夜間 (大気外日射がゼロの場合) を除いた一時間毎の観測及び計算値を用いた。ここで季節区分は、春は3~5月、夏は6~8月、秋は9~11月、冬は12~2月とした。また一般に平均値が大きくなるにつれてバイアス及び RMS 誤差は大きくなる傾向があるため、Fig. 4 (c) および (d) では各バイアス及び RMS 誤差を観測平均値で除した相対的な値を併せて示している。

まずバイアスから見てみると、WRF による日射計算値に含まれる年間のバイアスは + 53.7 ~ 83.7 W/m² (観測平均値比: + 13.9 ~ 27.4 %) である。岐阜大における時系列 (Fig. 3) から確認できるように、計算値に含まれる正のバイアスは冬季に比べると夏季に顕著で、さらに地域毎に比較してみると太平洋沿岸や盆地ではバイアスは小さく、日本海側では大きい等の地域差が確認できる。しかしここでより重要な点は、値の大小はあるものの、中部地

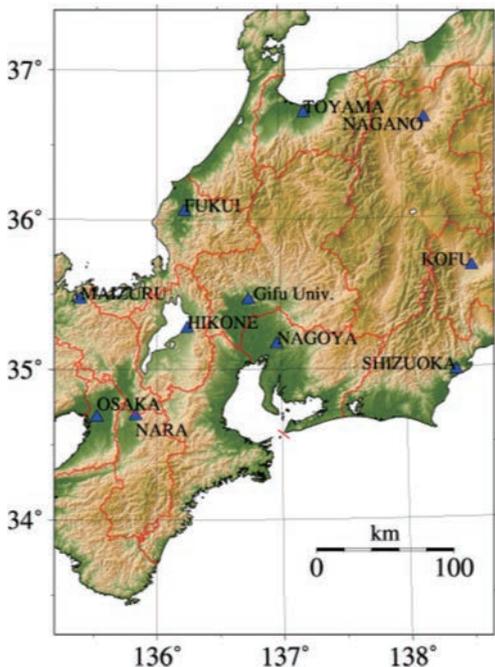


Fig. 2 Locations of the observational sites.

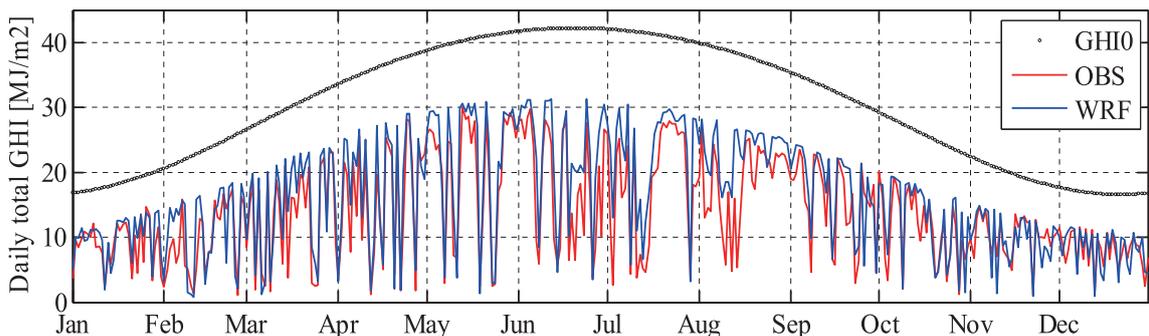


Fig. 3 Daily total global horizontal irradiance obtained from the ground observation and the WRF simulation at Gifu University in the year 2010.

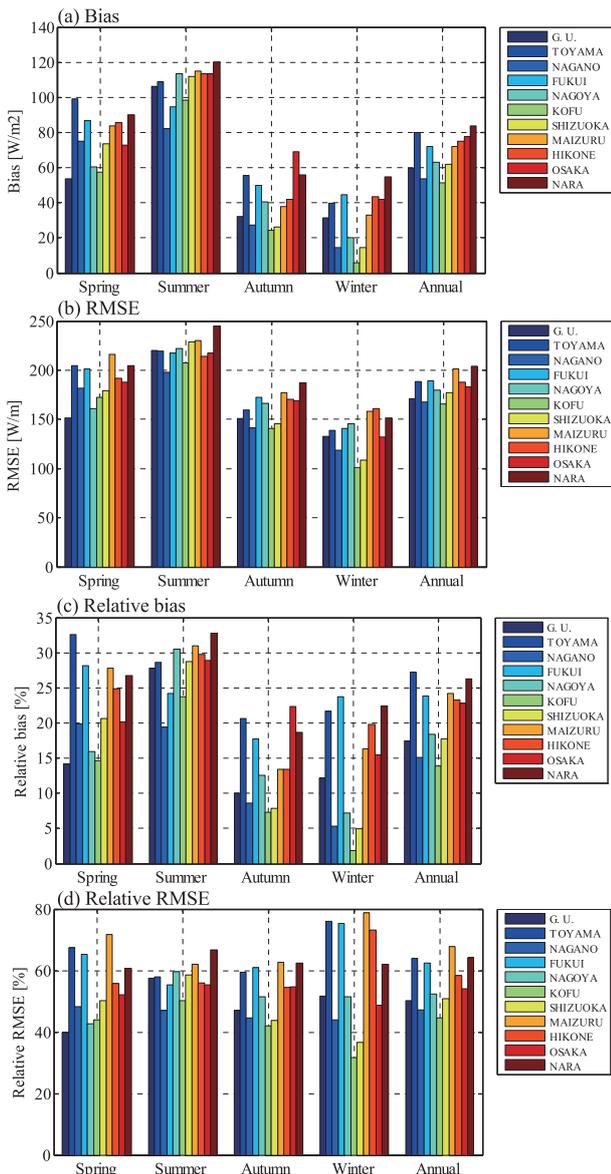


Fig. 4 Absolute and relative biases and RMSEs in the WRF-simulated GHI in the year 2010 and four seasons.

方における WRF による日射計算値には季節および地域を問わず正のバイアスが含まれるということである。つまり、WRF 計算値に基づいて長期間（例えば年間）の期待発電量を見積もる場合には、予め計算値に含まれるバイアスを差し引いておかないと最終的な発電量に換算した場合に過大に見積もる可能性があることを示している。

RMS 誤差については、WRF の年間 RMS 誤差は $165.5 \sim 204.2 \text{ W/m}^2$ (44.6 ~ 67.8 %) である。バイアスに比べると季節間の違いはそれほど明瞭ではないものの冬季日本海側の地域で RMS 誤差は目立って大きい。欧州での先行研究結果と比較してみると、ドイツ全土における MM5 の年間 RMS 誤差は 35 ~

50 %⁷⁾；スペイン・アンダルシア地方における WRF の RMS 誤差は約 30 %¹²⁾ であるから、RMS 誤差の値を単純に比較してみると中部地方における WRF による日射計算精度は欧州での事例に比べて 1.3 ~ 2.3 倍悪いことになる。また、今回は初期値及び境界値に客観解析値を用いた再現計算であるから、実際の予測計算同士で比較した場合には欧州との計算精度の差はより大きくなる可能性も十分ある。つまり Lorenz ら (2009)¹³⁾ も指摘している様に、気象モデルによる日射の計算精度は使用するモデル間の差と同様に対象とする地域間での差が非常に大きく、気象モデルを日射計算に利用する際にその地域差を把握するためには、現場観測値を用いた定量的な精度検証が必要不可欠であると言える。

続いて、WRF の計算値が年間を通して大きな正のバイアスを含む要因を日毎の晴天指数 (Clearness Index) を用いて考察してみる。晴天指数は大気外および地表面での日射量の比を用いて式 (3) のように定義した。

$$k_d = \frac{\sum_{i=1}^{24} I_i}{I_0 \cdot \sum_{i=1}^{24} (e_{0i} \cdot \cos \theta_{zi})} \dots \dots \dots (3)$$

ここでは各時刻の観測又は計算日射量、は太陽定数 (= $1,367 \text{ W/m}^2$)、は各時刻の地球・太陽間の距離補正係数およびは各時刻の天頂角である。Fig. 5 は日射観測値及び WRF 日射計算値から算出した晴天指数に基づき晴天、薄曇り及び曇天の出現頻度を観測地点毎に整理したものである。天候区分の定義は Lara-Fanego ら (2011)¹²⁾ を参考に晴天指数の場合は晴天、は薄曇り、は完全な曇天であると定義した。

11 地点の平均値同士で比較してみると、観測値では晴天は 2 割、薄曇りおよび曇天はそれぞれ 4 割であるのに対して、計算値では晴天は 4 割、薄曇りは 3 割 5 分および曇天は 2 割 5 分で晴天の出現頻度が観測値に比べて相対的に高いことがわかる。つまり、WRF の日射計算値が正のバイアスを含む理由としては、計算時にモデル内部で再現される雲量そのものが実際に比べて少ないか、又は雲量は適切に再現されているが日射に対する雲および大気の光学的厚さが過小評価されているという 2 つの理由が考えられる。ここで観測値および計算値の時間日射量の時系列を確認してみたところ、計算値は観測値に対して常に平均的に誤差を含むと言うよりは、実際に薄曇り・曇りであった天候を晴れと誤って再現する状況の方が圧倒的に多いことがわかった。つまり、WRF による年平均値および季節平均値が正のバイ

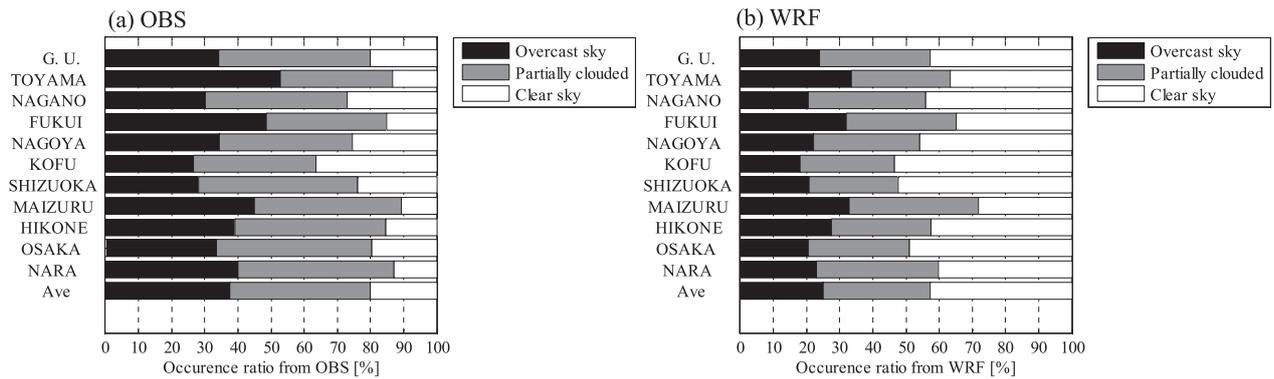


Fig. 5 Occurrence ratio of daily clearness index derived from the observed and the WRF-simulated GHI in the year 2010.

アスを持つ主な理由は上述した2点の理由の内、前者のモデル内の雲量が実際に比べて少ないことが主な理由であると考えられる。

4. 短波放射スキーム毎の計算精度

雲量が少なく日射量が過大評価されてしまう以前に、WRFによる日射計算は晴天時であっても若干過大評価する傾向がある。Fig. 6は11地点の観測値および計算値の相関図を示している。ここではプロットの集中している領域を分かり易く表示するため、 10 W/m^2 間隔で x-y 平面を細分化し各区画に該当するデータの個数をカラーコンターで表している。一対一を示す $y = x$ のラインとプロットのピークを注意深く観察してみると、 $0 \sim 600 \text{ W/m}^2$ の範囲ではピークはほぼ一対一のライン上にあるのに対して、 600 W/m^2 を超えた辺りからは直線から少しずつ上側へとシフトしていることがわかる。直線上にプロットされる場合の多くは晴天日で、またこの地域において時間日射量が 600 W/m^2 を超えるのはおおよそ2月から10月までの期間であるから、春

から秋にかけては WRF による日射計算値は晴天時であっても正のバイアスを持つ可能性があることがわかる。

これまでもメソ気象モデルではモデル内における短波放射計算における放射伝達過程の過度の簡略化や大気放射過程におけるエアロゾルの影響が無視されていることが要因で晴天時における計算値は観測値に対して1,2割過大評価する可能性があることが指摘されている¹⁵⁾。今回の年間計算では、短波放射計算スキームには WRF の初期オプションとして採用されている Dudhia スキーム¹⁶⁾を用いており、このスキームは放射伝達過程における詳細なプロセスは省略して、地表に到達する正味の日射量のみを診断的に算定する計算コストの軽いシンプルなスキームである。

それでは、WRF 計算値に含まれる晴天バイアスはより詳細な短波放射スキームを用いれば簡単に取り除くことができるのであろうか？この問いに答えるため、WRF バージョン3に実装されている Goddard スキーム¹⁷⁾ および CAM スキーム¹⁸⁾を用いて晴天日が継続した8月20日から25日の再計算を実施した。Goddard スキームは11の周波数帯に分割した日射スペクトルを直達及び散乱成分に分離して放射伝達過程を解くスペクトルバンドモデルの一つで、直達成分の放射伝達についてはビーア・ブーゲ・ランバートの法則、散乱成分については2流近似を採用している。また、CAM スキームは、Goddard スキームと同様のスペクトルバンドモデルで、オゾン取り扱いに特化した米国大気科学センターの気候モデルに採用されている短波放射スキームである。短波放射スキーム以外の計算条件は Table. 1 に示した条件と同様である。

Fig. 7は観測値および Dudhia, Goddard, CAM スキームをそれぞれ用いた WRF 計算値の時間日射

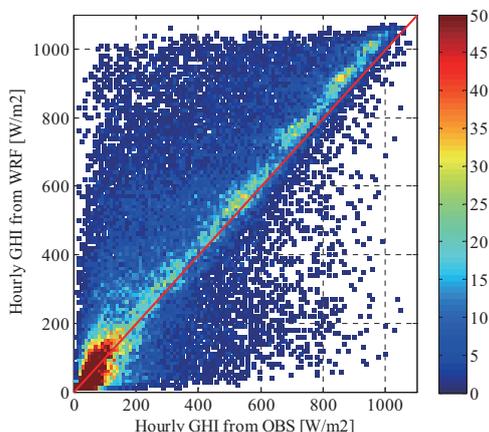


Fig. 6 Scatter diagram of OBS against the WRF-simulated GHI at all observational sites in the year 2010.

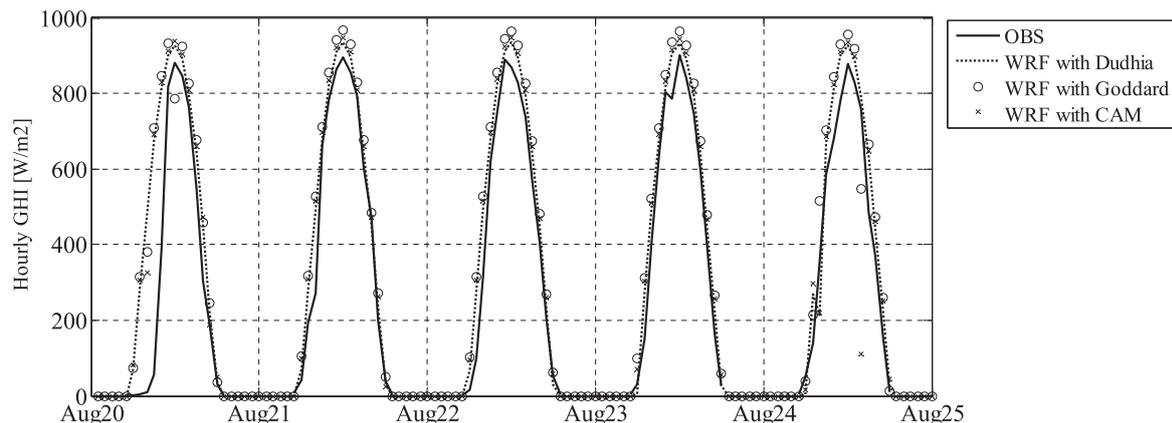


Fig. 7 Comparison of the WRF-simulated GHIs using three short wave radiation schemes at Gifu University for the period from August 20 to 25th, 2010.

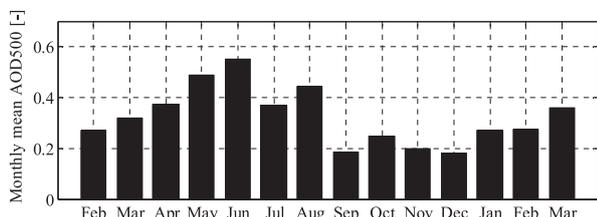


Fig. 8 Monthly mean Aerosol Optical Depth at 550 nm obtained from skyradiometer measurements at Gifu University for February 2011 to March 2012.

量の時系列である。まず、観測値と Dudhia スキームを比較してみると、正午付近のピーク値は Dudhia スキームの方が観測に比べて 50 W/m^2 程高い値になっていることがわかる。次に計算値同士の値を比較してみると Dudhia スキームに比較すると Goddard や CAM スキームの方が僅かながらピーク値は大きい。Goddard および CAM スキームは Dudhia スキームに比べれば放射伝達過程における簡略化が少ないスキームではあるが、晴天バイアスは改善されていないどころか若干悪化している。つまり、WRF に含まれる晴天バイアスはスキームを変更しただけでは改善されないことがわかる。

詳細な短波放射スキームを用いた場合でも晴天バイアスが改善されないと言うことであれば、先行研究¹²⁾¹⁹⁾でも指摘されているように、このバイアスを引き起こす主要因はエアロゾルの影響と言うことになる。Fig. 8 は、2011 年 2 月から翌年 3 月までのスカイラジオメータによる太陽直達および散乱光の観測結果（晴天時、5 分間隔）から得られた岐阜大上空における 550nm 帯のエアロゾルの光学的厚さの月平均値である。エアロゾルの光学的厚さは大気中でのエアロゾルの鉛直積分値を表す無次元パラメータで、特に 550nm 帯の値は大気濁度を示す指標として用いられている。

岐阜大での観測結果によれば (Fig. 8), エアロゾルの光学的厚さは夏季に大きく冬季に小さくなる傾向があり、観測期間中で最大値を示した 2011 年 6 月ではその値は約 0.5 であった。今回の年間シミュレーションで使用した Dudhia スキームは、米国ボルダールの内陸の澄んだ空気に調整されたモデルでボルダールの大気濁度をエアロゾルの光学的厚さに換算するとおおよそ 0.1 程度になる¹⁹⁾。つまり、WRF 計算値に含まれる晴天バイアスの問題は、WRF の放射過程で想定している大気の大気濁度が中部日本における大気の実態と異なっていることに恐らく起因している。地表に到達する日射量は大気を駆動する根本的なエネルギー源であるから、晴天バイアスを改善する試みは太陽光発電のための日射量予測という実用的な側面からだけでは無く、モデル全体の精度向上と言う面でも重要な課題であると言える。それ故、WRF による日射計算の精度改善の第一歩として、衛星リモートセンシングから得られるエアロゾルの面的な分布を短波放射スキームに反映出来るようにモデル改良を今後行う予定である。

5. 結語

本研究は、メソ気象モデル WRF による日射計算の精度を定量的に検証したものである。本研究で得られた主要な結果を以下にまとめ結語とする。

1. 中部地方における WRF の日射計算値に含まれる年間のバイアスは $+53.7 \sim 83.7 \text{ W/m}^2$ (観測平均値比: $+13.9 \sim 27.4 \%$) である。11 地点の全地点および全ての季節を通して計算値には正のバイアスが含まれる。
2. 年間 RMS 誤差は $165.5 \sim 204.2 \text{ W/m}^2$ ($44.6 \sim 67.8 \%$) である。先行研究結果と比べると、中部地方における WRF の計算精度は欧州での事例に比べ

て 1.3 ~ 2.3 倍悪い。

3. 晴天指数を整理した結果、観測値では晴天は 2 割、薄曇りおよび曇天は 4 割であるのに対して、WRF 計算値では、晴天は 4 割、薄曇りは 3 割 5 分および曇天は 2 割 5 分であった。WRF の日射計算値に含まれる正のバイアスの主な要因はモデル内部で再現される雲量が実際に比べて少ないためであると推測される。
4. WRF 計算値には晴天時であったとしても正のバイアスが含まれる。しかもその晴天バイアスは計算コストの高い詳細な短波放射スキームを用いたとしても改善することはできない。
5. スカイラジオメータの観測結果より、岐阜大学上空のエアロゾルの光学的厚さは WRF の Dudhia スキームが対象としているボルダーに比べると大きい値であった。WRF に含まれる晴天バイアスは Dudhia スキームで仮定している大気の大気汚染が中部日本地域における大気の実態と異なっていることにおそらく起因している。

謝辞

本研究は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「太陽エネルギー研究技術開発 / 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発 / 発電量評価技術等の開発・信頼性及び寿命評価技術の開発」の一部として実施された。また、スカイラジオメータの観測結果は独立行政法人宇宙航空研究開発機構との共同研究の成果である。ここに併せて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 大関崇, 加藤丈佳, 荻本和彦, 太陽光発電の発電量予測の現状と課題. 電気学会研究会資料, メタボリズム社会・環境システム研究会, **2011** (1) : p. 19-24.
- 2) 飯嶋彩, 若尾真治, 統計的パターン認識を用いた短期日射量予測に関する基礎的検討, 太陽 / 風力エネルギー講演論文集, 2009. **2009** : p. 119-122.
- 3) Hammer, A., D. Heinemann, C. Hoyer, R. Kuhlemann, E. Lorenz, R. Muller, and H.G. Beyer, *Solar energy assessment using remote sensing technologies*. Remote Sensing of Environment, 2003. **86** (3) : p. 423-432.
- 4) 橋本潤, 宇佐美景子, 小林智尚, 吉野潤, 安田孝志, 大気放射モデル SMARTS2 と局地気象モデル MM5 による全天候型分光日射推定モデルの提案. 太陽エネルギー, 2008. **34** (4) : p. 57-64.
- 5) 田村英寿, 平口博丸, 橋本篤, 気象モデル WRF による翌日の日射量予測特性の評価. 太陽 / 風力エネルギー講演論文集, 2010. **2010** : p. 335-338.
- 6) 大竹秀明, J.G. da Silva Fonseca, 高島工, 大関崇, 山田芳則, 気象庁数値予報モデルの短波放射量予測精度. 電気学会新エネルギー・環境 / メタボリズム社会・環境システム合同研究会. 2011.
- 7) Heinemann, D., E. Lorenz, and M. Girodo. *Solar irradiance forecasting for the management of solar energy systems*. in *Solar 2006*. 2006. Denver, CO (USA).
- 8) da Silva Fonseca, J.G., T. Oozeki, T. Takashima, G. Koshimizu, Y. Uchida, and K. Ogimoto, *Use of support vector regression and numerically predicted cloudiness to forecast power output of a photovoltaic power plant in Kitakyushu, Japan*. Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 2011.
- 9) 中野翔太, 高橋康人, 藤原耕二, 数値予報データを用いた日射量予測に関する検討. 太陽 / 風力エネルギー講演論文集, 2010. **2010** : p. 385-388.
- 10) 吉野純, 野村俊夫, 片山純, 木下佳則, 安田孝志, メソ気象モデル MM5 によるピンポイント降水量予測精度について. 水工学論文集, 2008. **52** : p. 325-330. 局地気象予報のホームページアドレス : <http://net.cive.gifu-u.ac.jp>
- 11) Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers, *A description of the advanced research WRF version 3*. Tech. Note TN-475 + STR, 2008 : p. 1-96.
- 12) Lara-Fanego, V., J.A. Ruiz-Arias, D. Pozo-Vázquez, F.J. Santos-Alamillos, and J. Tovar-Pescador, *Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain)*. Solar Energy in press.
- 13) Lorenz, E., J. Remund, S.C. Mueller, W. Traunmueller, Steinmaurer, D. G., J.A. Ruiz-Arias, V.L. Fanego, L. Ramirez, M.G. Romeo, C. Kurz, L.M. Pomares, and C.G. Guerrero, *Benchmarking of different approaches to forecast*

- solar irradiance*, in *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*2009.
- 14) 板垣昭彦, 宇都宮健志, 山田智久, 日射スペクトルデータベースの整備. 太陽/風力エネルギー講演論文集, 2010. **2010** : p. 137-140.
- 15) Stensrud, D.J., *Parameterization schemes : keys to understanding numerical weather prediction models*2007 : Cambridge University Press.
- 16) Dudhia, J., *Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model*. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989. **46** (20) : p. 3077-3107.
- 17) Chou, M. and M. Suarez, *An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models*, 1994.
- 18) Collins, W., P. Rasch, B. Boville, J. McCaa, D. Williamson, J. Kiehl, B. Briegleb, C. Bitz, S.-J. Lin, M. Zhang, and Y. Dai, *Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0)*, 2004, University Corporation for Atmospheric Research.
- 19) Zamora, R.J., S. Solomon, E.G. Dutton, J.W. Bao, M. Trainer, R.W. Portmann, A.B. White, D.W. Nelson, and R.T. McNider, *Comparing MM5 radiative fluxes with observations gathered during the 1995 and 1999 Nashville southern oxidants studies*. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2003. **108** (D2).