

# 気象モデルによる日射予測

## その1：予測システムの概要と精度検証

Solar irradiance forecasting using a mesoscale meteorological model

Part I: Forecasting system and the accuracy

嶋田 進<sup>\*1</sup>

Susumu SHIMADA

小林 智尚<sup>\*4</sup>

Tomonao KOBAYASHI

劉 媛媛<sup>\*2</sup>

YuanYuan LIU

和澤 良彦<sup>\*5</sup>

Yoshihiko WAZAWA

吉野 純<sup>\*3</sup>

Jun YOSHINO

### Abstract

The authors have developed a solar irradiance forecasting system using the WRF (Weather Research and Forecasting) model, which is a fully compressible, non-hydrostatic mesoscale meteorological model developed by NCAR and NCEP. Solar irradiance forecasting with a 2 km grid resolution for two days ahead in the year 2011 is performed and the accuracy of the simulated GHI (Global Horizontal Irradiance) is quantitatively examined using observations taken from 61 sites in Japan. The WRF-simulated GHI for one day and two days ahead is found to have annual biases of 75.4 and 75.9 W/m<sup>2</sup> (of the 61 sites average) and RMSEs (Root Mean Square Errors) of 189.2 and 199.7 W/m<sup>2</sup>. As well as the accuracy of the simulated GHI at the single sites, the effect of spatial smoothing to reduce the error in WRF is also investigated. It is found that an annual RMSE of 30 % at a single site is improved by averaging spatially the simulated GHI within a 100 km radius.

キーワード：日射予測，メソ気象モデル，WRF，空間平滑化

Key words: Solar irradiance forecasting, Mesoscale meteorological model, WRF, Spatial smoothing effect

### 1. はじめに

欧州では再生可能エネルギーの急速な拡大が続いている。例えば、太陽光発電の導入が盛んなドイツ・バイエルン地方では、快晴時における太陽光による総出力は電力システム全体の1割に達している。そのシステムに与える影響は既に無視できない状況にあるため、気象予報に基づく太陽光発電量の予測に関する研究が積極的に行われている<sup>1)</sup>。我が国においても、現状では太陽光発電の導入量が少ないためシステムへの影響は軽微であるものの、将来システムへ大量に連系された場合にその影響を如何に緩和するかが重要な課題であると認識されつつある。そのため、欧州各国での動向と同様に、日射予測に基づく太陽光発電の出力予測に関する研究が始まっている<sup>2)</sup>。

日射の予測手法としては、衛星リモートセンシングに基づく方法<sup>3)</sup>および数値気象モデルを用いる方法<sup>4), 5)</sup>がある。衛星リモートセンシングによる方法では、数シーンの雲画像から雲の移動ベクトルを推定することで現在から数時間先までの日射を面的に予測することが出来る。しかしこの方法は、予測時間の進行に伴って精度が急激に低下し、

予測開始から2時間経過した時点で単純に観測値を時間方向に外挿する方法と予測精度がほぼ等しくなることが報告されている<sup>3)</sup>。他方、数値気象モデルでは計算機内に三次元気象場を再現することでおおよそ一週間先までの予測が技術的に可能で、システム運用の計画立案で有益な一日二日先の予測にはこの数値気象モデルに基づく方法が有力視されている<sup>1)</sup>。

現在著者らは、米国大気科学研究センターおよび米国気象局共同開発のメソ気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting)<sup>6)</sup>を用いた当日および翌日日射量の予測システムを開発中である。本稿では、その予測システムの概要および中部電力が管区内で実施している高密度な日射観測ネットワークから得られた全天日射観測値を用いて WRF による日射予測精度を検証した結果について述べる。ここでは単一地点における予測精度のみではなく、空間平滑化による精度の改善効果についても併せて議論する。

### 2. メソ気象モデル WRF による日射予測システム

メソ気象モデル 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気象現象に関するあらゆる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。現業予報機関(日本なら気象庁)から配信される等間隔の格子状に配列された気象パラメータ(風速、温度、湿度、気圧)を回転座標における熱流体力学の方程式および各種物理過程の方程式の初期値および境界値として与え

\*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 中部電力株式会社 技術開発本部 電力技術研究所  
(原稿受付：2013年1月25日)

ることで、入力されたパラメータ以外に降水量や日射量などの新たな変数を数 km 格子間隔で出力することができる。

WRF の計算領域を Fig. 1 に示す。広域的な気象現象の影響を考慮するため日本全域を含む計算領域からスタートして、対象とする中部電力管内まで段階的に水平空間解像度を増加させる。水平解像度はそれぞれ 18, 6 および 2 km 格子、鉛直層数は地表から 100 hPa まで 50 層である。予測計算の実施期間は 2011 年 1 月から 12 月の 1 年間である。WRF ではユーザーは計算領域および期間の他に複数用意された物理過程オプションの中からそれぞれ一つのスキームを選択可能である。ここで日射を計算するため短波放射スキームには、雲微物理量や相対湿度の予報結果を元に大気外日射の透過率を診断して地表面に到達する日射量を計算する Dudhia スキーム<sup>7)</sup>を選択した。Table 1 はその他の計算条件の一覧を示している。

Fig. 2 は WRF による日射予測システムの予測サイクルである。日本時間 (世界標準時プラス 9 時間) の 21:00JST をサイクルの起点として、翌日 1:50JST までに、(1) 気象場の初期値および境界値として使用する気象庁の全球モデル予報結果 (20 × 20 km, 3 時間毎, 12UTC 初期値)<sup>8)</sup>, (2) 陸面モデルの入力値として与える米国環境予報センターの GFS

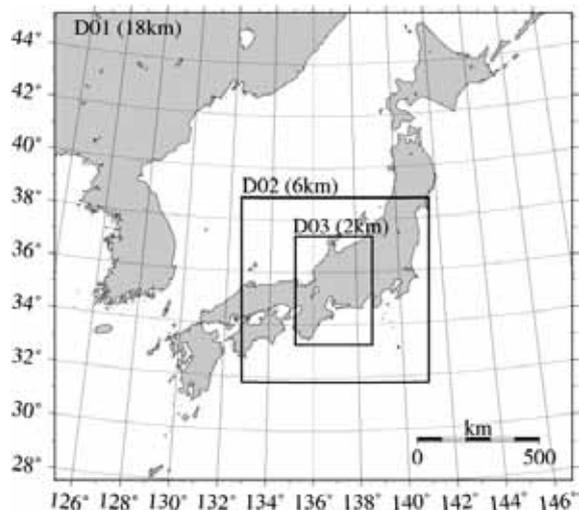


Fig. 1 Domains used in the simulation

Table 1 WRF configurations

Period	Start: 00:00 UTC 1st JAN 2011 End: 24:00 UTC 31st DEC 2011 48-hour forecast
Input data	JMA GSM (3-hourly, 20 km × 20 km) NCEP GFS (3-hourly, 0.5° × 0.5°) 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
FDDA option	Disable

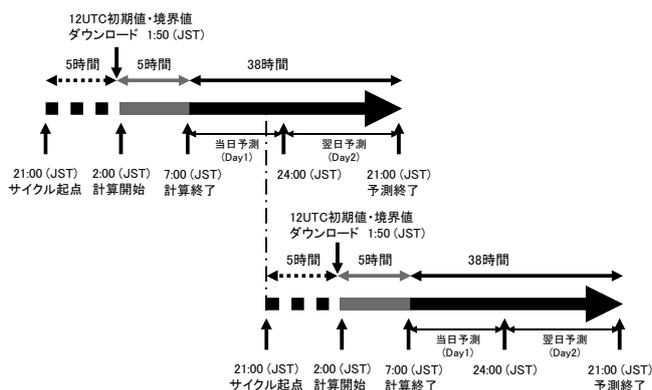


Fig. 2 Solar irradiance forecasting cycle using the WRF model

(Global Forecasting System) 予報結果 (0.5° × 0.5°, 3 時間毎)<sup>9)</sup> および (3) 海面温度データとして与える OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) (0.05° × 0.05°, 1 日毎)<sup>10)</sup> をそれぞれダウンロードする。

次に各データを WRF の計算グリッドに水平および鉛直内挿して初期値および境界値を作成した後、7:00JST までの約 5 時間で 48 時間分の時間積分を行う。当日予測の予測時間中 (21:00JST) に次の予測サイクルをスタートさせる。これらの一連のプロセスは並列計算機上で自動実行され、48 時間分の時間積分の内、予測計算の時間発展よりも実際の時間進行が速くなる 21:00 から 7:00JST まで 10 時間分を除いた 38 時間分の結果 (1 時間毎) が実際の予測値となる。つまり、日本時間午前 7 時にその日と翌日分の日射予測値が利用できる。計算精度の検証には、7:00 から 24:00 (10~27 時間分) を当日の予測結果 (Day1), 翌 1:00 から計算終了の 21:00 (28~48 時間分) までを翌日の予測結果 (Day2) とした。

### 3. 全天日射観測値

Fig. 3 は中部電力が実施している日射観測地点の位置を示している (白丸)。中部電力では、管区内の合計 61 地点 (愛知: 25 地点, 岐阜: 10 地点, 三重: 9 地点, 静岡: 6 地点, 長野: 11 地点) のそれぞれの観測サイトにおいて全天日射量を常時計測し 10 秒平均している (経済産業省補助事業)。毎正時前後 30 分間の値を平均し、生の観測値を時別値 (1 時間平均値) に換算して精度検証に用いた。また、Fig. 3 中の同心円はそれぞれ名古屋市内にある中部電力・電力技術研究所からの等距離の地域を示しており、4.2 節の空間平滑化効果を議論する際に詳しく説明するが、括弧内の数字はその円内に含まれる観測地点の総数を意味している。

### 4. 予測精度の検証

#### 4.1. 単一地点の予測精度

まず、61 地点におけるそれぞれの日射観測値を用いて単一地点における WRF の予測精度について検証する。Fig. 4

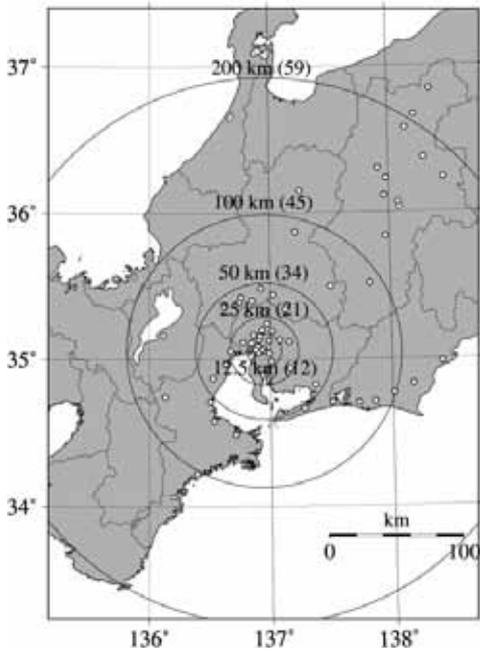


Fig. 3 Locations of observational sites

は WRF の当日および翌日予測の月毎および年間の (a) バイアスおよび (b) RMSE (Root-Mean-Square-Error) を示している。バイアスおよびRMSEの定義は以下の通りである。

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (WRF_i - OBS_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (WRF_i - OBS_i)^2} \quad (2)$$

ここで  $N$  はデータ個数、 $WRF$  および  $OBS$  は計算値および

観測値の特別値である。夜間のデータを含めると見かけ上の精度が良くなるため、夜間、日の出および日の入り付近を除く太陽高度が  $10^\circ$  以上 (大気外の水平面日射強度が約  $240 \text{ W/m}^2$  以上) の時間帯のみを対象とした。

図中の棒グラフは地点毎にそれぞれ算出したバイアスおよび RMSE の 61 地点平均値、エラーバーの上端および下端は 61 地点の最大値および最小値に対応している。Table 2 は棒グラフで示した 61 地点平均の値を示している。また、WRF のみのバイアスおよび RMSE では得られた統計値の意味を解釈することが難しいので、WRF の予測精度の善し悪しを議論するためのひとつの参考指標として前日の観測値を当日又は翌日の予測値とする持続 (Persistent) モデルのバイアスおよび RMSE を併せて示している。前日の観測値から当日を予測した値を Persistent (Day1) とし、さらに翌日を予測した値を Persistent (Day2) とした。

まず、持続モデルと WRF のバイアスを比較してみると、持続モデルは観測値をスライドするだけであるから、月および年平均値はほとんどバイアスを含まない。それに対して、WRF は当日および翌日予測とともに全体的に正のバイアスを含み、それらは夏季に大きく冬季に小さい傾向がある。この傾向は観測平均値や大気外日射量で絶対値を除いて規格化した場合でも基本的に変わらない。

先行研究<sup>11), 12)</sup>においても指摘されているように、この正のバイアスの要因としては、Dudhia スキームではエアロゾルの光学的厚さが季節を問わず一定とされていることや夏季に発達する積雲の再現性に問題があるものと考えている。加えて、現状の予測システムでは初期時刻には計算領域全体で雲が全く存在しない状態で計算がスタートするから、モデル内で雲を十分発達させるためには一定時間の経

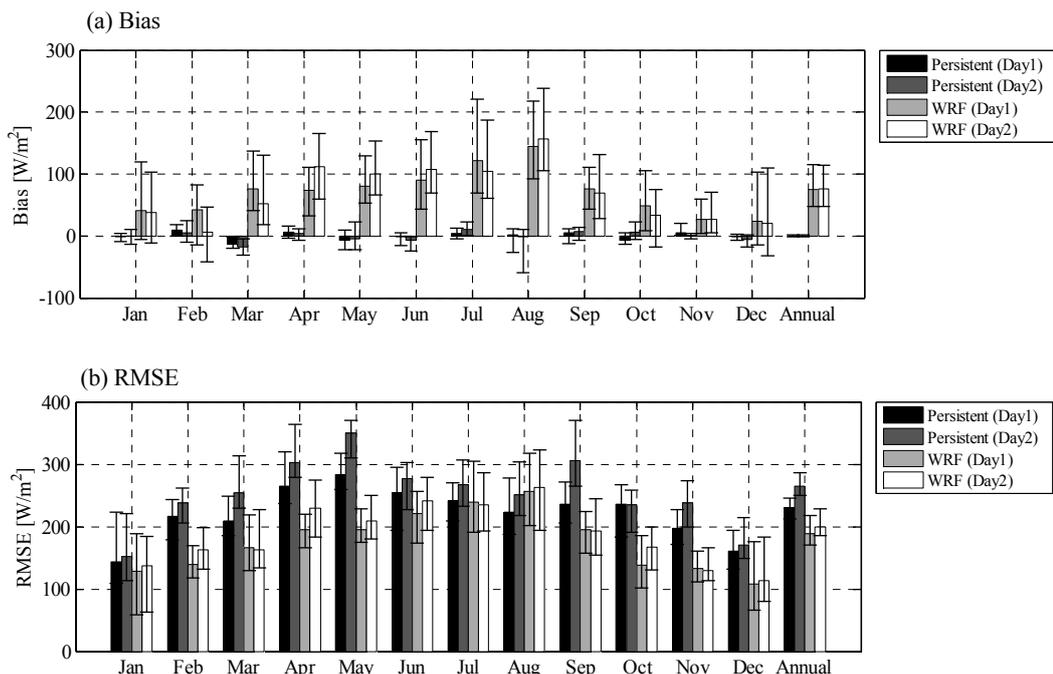


Fig. 4 Monthly and annual mean absolute biases and RMSEs of the persistent model and the WRF model in the year 2011. The bars show the average of 61 sites and the error bars show the maximum and minimum values of 61 sites

Table 2 Values of the 61 sites average of absolute biases and RMSEs

Month	Bias [ $W/m^2$ ]				RMSE [ $W/m^2$ ]			
	Persistent (Day1)	Persistent (Day2)	WRF (Day1)	WRF (Day2)	Persistent (Day1)	Persistent (Day2)	WRF (Day1)	WRF (Day2)
2011-01	-1.6	0.0	40.9	37.8	143.6	151.7	129.0	137.6
2011-02	9.1	5.2	42.0	6.2	217.2	237.9	139.1	163.0
2011-03	-13.1	-18.2	75.8	52.3	209.3	254.0	165.7	162.4
2011-04	6.1	3.7	73.6	112.2	265.6	302.9	195.0	229.6
2011-05	-7.0	-4.7	80.8	99.9	283.3	349.9	195.6	208.6
2011-06	-1.6	-7.2	90.0	108.0	254.3	276.7	220.9	241.5
2011-07	4.6	11.2	122.2	104.7	241.8	267.7	238.8	234.9
2011-08	2.1	-1.3	144.2	157.1	223.5	250.8	256.7	262.4
2011-09	5.1	7.1	76.1	70.0	236.2	305.7	195.2	193.0
2011-10	-6.7	6.4	49.0	33.7	236.5	234.7	137.8	166.8
2011-11	4.8	0.6	27.0	27.0	197.7	237.9	132.5	129.2
2011-12	-1.4	-5.8	23.4	20.7	160.5	170.8	108.4	113.5
Annual	-0.1	-0.1	75.4	75.9	231.0	265.0	189.2	199.7

過を待つ必要がある。今回の計算では雲を発達させるための助走時間として 48 時間の時間積分のうち 10 時間分を割り当てているが、その時間では雲の発達が不十分であることも可能性として考えられる。

続いて、RMSE を比較してみると、持続モデルの当日および翌日予測の年間 RMSE は 231 および 265  $W/m^2$  であるのに対して WRF は 189.2 および 199.7  $W/m^2$  である (Fig. 4 および Table 2)。月毎に詳しく見ても持続モデルの RMSE は WRF に比べて全体的に大きいだけでなく、春および秋の値が目立って大きい。これらの季節は高低気圧の移動に伴って日々の天気の変化が他の季節に比べて著しく、持続モデルはこうした季節の予測が不得手であることを示している。その一方、WRF では春および秋に予測精度が低下する傾向は特に見られず、夏季にバイアスの増加に応じて RMSE は大きくなる傾向はあるものの、一年を通しての予測精度の変動は持続モデルに比べれば相対的に小さい。つまり、より安定した予測精度が期待できると言える。

さらには、当日から翌日予測までの精度低下の割合を比べてみると、WRF の当日および翌日予測の精度の差はほとんどの月で持続モデルに比べて小さいことがわかる。前日の観測値をそのまま予測値とすること自体にそもそも大きな無理はあるものの、この過去の観測情報に基づいて未来を統計的に予測するという持続モデルの基本コンセプトは衛星リモートセンシングによる予測で用いられる手法と同様である。つまり、過去の観測値を回帰的に時間発展させる手法に比較すると物理方程式に基づく気象モデルによる予測は時間の経過に伴う予測精度の低下が相対的に小さい可能性が十分にあると言える。

#### 4.2. 空間平均値の予測精度

気象モデルによる日射予測について、電力会社での需給運用のための利用を想定した場合、単一地点の予測よりもむしろ領域平均での予測の方がより重要となる<sup>13)</sup>。本来、空間平均の予測精度を評価するためには衛星観測値などの面的に計測された観測値を使用することが望ましいが、ここでは、有限個数の地上観測値を重ね合わせることで代用する。Fig.5 (a) および (b) は単一地点および 61 地点平均

の観測値と WRF 当日予測の相関図 (時別値) である。単一地点の相関図に含まれるばらつきは地点毎の値を単純に平均することで著しく小さくなるが見て取れる。図中に示した年間バイアスおよび RMSE の値を見てみると、バイアスはほとんど変わらないものの、単一地点の RMSE は空間平均することにより 191.3 から 124.5  $W/m^2$  まで 67  $W/m^2$  減少し、その値は単一地点の RMSE を基準にすると 35 % 改善したことになる。

そもそも大気中における雲の発生・発達過程は極めてカオス性の強い現象であり、ある大気状態における雲の位置

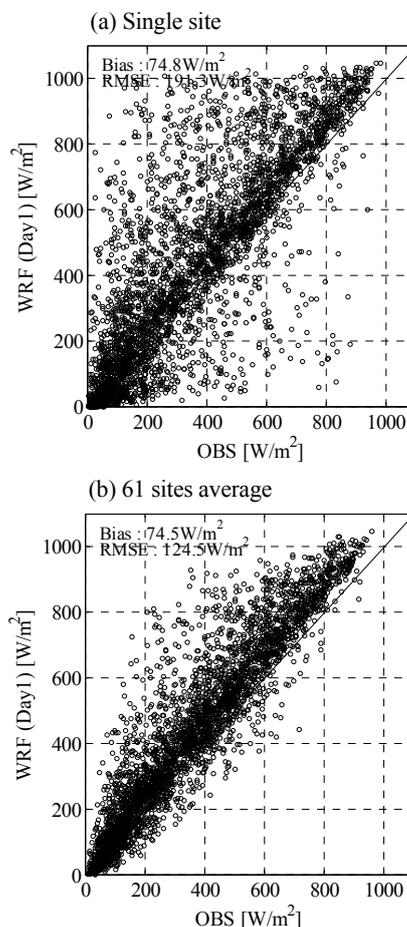


Fig. 5 Scatter plot of OBS vs. WRF (Day 1) with (a) a single site and (b) 61 sites average

や大きさは極めてランダムである。初期値に使用する GPV (Grid Point Value) が積雲スケールの細かな空間分解能を持たないことや雲微物理過程における大胆な近似を考えると、現状では個々の雲の位置や大きさをピンポイントで予測することは恐らく困難である。つまり、Fig.5 (a) の相関図のばらつきは、WRF における雲の再現性の悪さを反映した結果である。その一方、(b) の空間平均すると誤差が互いに相殺されるというのは、個々の雲の位置や大きさの予測精度には課題があるものの、雲の発生や発達に影響を及ぼす広域の大気環境場については概ね再現できることを示唆する結果である。

次に、空間平滑化によって個々の誤差が相殺され、結果的に RMSE が小さくなる理由とその効果について考察してみる。単純に時系列同士を重ね合わせるだけで精度が向上する理由は、統計学の中心極限定理<sup>14)</sup>によって説明することができる。時系列同士が互いに無相関な場合、母集団の持つ分散を  $\sigma^2$  とするとき、その時系列  $n$  個を重ね合わせた時系列の分散は必然的に  $\sigma^2/n$  になる。つまり、予測誤差の時系列 (予測値から観測値を引いた時系列) が互いに無相関である場合、重ね合わせる時系列が増えれば増えるほど誤差の標準偏差である RMSE (厳密にはバイアスを差し引かない誤差の標準偏差) は  $1/\sqrt{n}$  の関数に沿って減少することになる。

しかし実際には、地点間距離が短い予測値の時系列同士は互いに無相関ではないため理論上の重ね合わせ効果は得られることはない。Fig. 6 は観測地点間の距離と予測誤差の相互相関係数の関係を示したものである。まず、61 地点の中から 2 地点を抽出し、その地点間距離を算出する。さらに、その 2 地点における予測誤差の時系列 (計算値マイナス観測値) から相関係数を算出した。ここでは 61 地点の中から 2 地点を抽出する全ての組合せ (= 1,830 通り) について地点間距離と相関係数の関係をプロットしている。また、図中には相関係数を地点間距離の関数として表した式 (3) の近似曲線を挿入している。

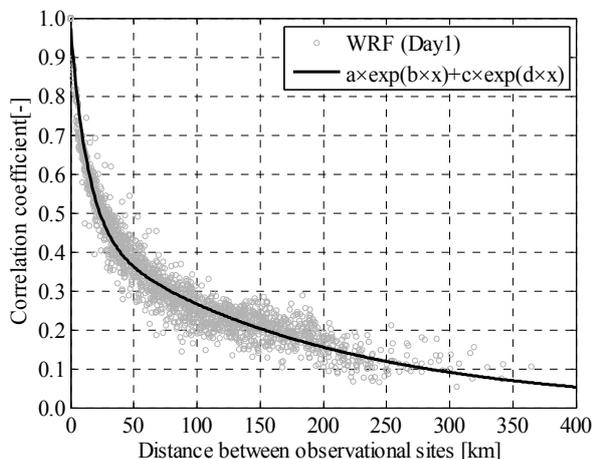


Fig. 6 Relation between site distance and cross-correlation coefficient of the forecasting error from WRF (Day1)

$$f(x) = a \times \exp(b \times x) + c \times \exp(d \times x) \quad (3)$$

ここで  $x$  は地点間距離および  $a \sim d$  は定数である。

予測誤差 (WRF 当日予測) の相互相関は地点間距離が増加するにつれて指数関数的に減少している。重ね合わせの効果は元の時系列同士が無相関であることが前提条件であるから、この結果は、より広い範囲に分布した時系列を重ね合わせることで精度改善には効果的であり、逆に、近い距離にあるもの同士を幾ら平均しても効果が小さいことを示している。ただし、地点間距離が 300 km 離れた時点でも完全には無相関になっていないことに加えて  $1/\sqrt{n}$  の関数形は  $n$  が大きくなるにつれてその勾配は徐々に緩やかになることから無数の時系列を重ね合わせたとしても無限に精度が改善されていくことを期待することは出来ない。

それでは実際には空間平均する範囲と予測誤差の関係はどうなっているのだろうか? Fig. 7 は持続モデルおよび WRF の空間平均する範囲 (横軸) と空間平均後の特別値の年間 RMSE (縦軸) の関係を示している。ここで 50 km 半径の場合を例にとってこの図の作成手順を説明する。まず、中部電力・電力技術研究所の観測地点を中心に考えるとそこから 50 km の範囲内には 34 地点の観測地点が含まれる。この 34 地点の観測値および計算値 (持続モデルおよび WRF) を地点平均して 50 km 半径における空間平均値の特別値を作成する。この観測値および計算値の空間平均値の特別値から年間 RMSE を算出し、さらに電力技術研究所一地点での RMSE でその値を規格化した。この操作を 0 から 240 km 半径まで 10 km 間隔で繰り返し行って各半径における単一地点と空間平均の RMSE の比率をプロットした。

まず、持続モデルと WRF の結果を比較してみると、持続モデルの RMSE は平均半径が増加するにつれて単調減少であるのに対して WRF のそれは指数関数的に減少していることがわかる。つまり、元の予測誤差の時系列同士が似通った傾向になりやすい持続モデルに比べると物理方程式に基づく WRF の予測は空間平滑化による改善効果をより

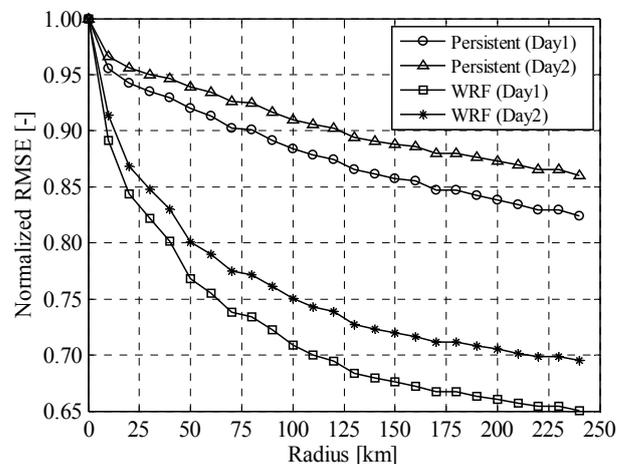


Fig. 7 Relation between averaging radiuses used for spatial smoothing and normalized RMSEs of the persistent model and the WRF model

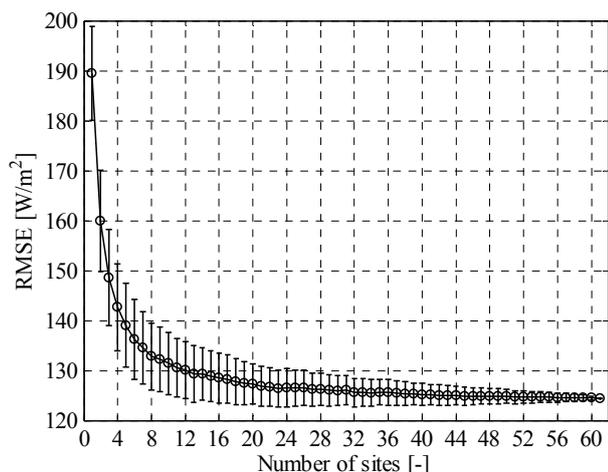


Fig. 8 Relation between number of sites and the WRF (Day 1) RMSE including the spatial smoothing effect with the sites

期待できることをこれは意味している。また、空間平滑化の効果はいずれ頭打ちになることについては既に述べたが、WRFの当日予測の結果を見てみると0から100 kmの間でRMSEは約30%改善するが、100から200 kmの間では約5%の改善にとどまる。すなわち、理論的な裏付けが示す通り空間平滑化による精度改善にはこの辺りに限界があるようである。

また、平均半径0~240 kmの範囲では平滑化する範囲を広げれば広げるほどRMSEは減少する傾向があることは確認出来るが、この方法に意味があるのは対象とする領域にほぼ一様に太陽光発電施設が分布していることが前提条件になる。半径240 km全体で考えた場合には太陽光発電の設置が難しい山岳などの地域が多く含まれるので、ここで名古屋市の中心から山岳を除いた平坦な地域のみを対象として平滑化する範囲を見直してみるとそれはおよそ50~100 km範囲程度に限定される。すなわち、現実的に意味のある空間平均の予測精度としては、単一地点に含まれるRMSEを約25~30%程度改善したものだと思われることができる。これを絶対値に換算すると、単一地点の予測に含まれるRMSEが約190 W/m<sup>2</sup>であるから (Table 2 参照), この地域における太陽光発電の設置が主に見込まれる領域での空間平均値の予測精度はおよそ130~140 W/m<sup>2</sup>程度になると推測される。

上記の解析では、有限個数の地上観測値および計算値の重ね合わせによって空間平均値の予測誤差を推定している。それでは空間平均値を算出するために使用するデータ数を増減させた場合、Fig. 7で得られた結果に大きく影響するのであろうか？この疑問に答えるために、最後に、WRF当日予測の240 km半径を一つの例として、平均する際に使用するデータ個数の影響について検討する。

Fig. 8は、240 kmの範囲において空間平均値を作成するために使用する地点数 (横軸) とそれらを使って作成した空間平均値の年間RMSE (縦軸) の関係を示している。この図の作成方法について地点数30のケースを例にとりて説

明する。まず61地点の中から30地点を無作為に抽出し、その30地点の観測値および計算値から地点平均の特別値を算出する。この地点平均した観測値および計算値の特別値から年間のRMSEを算出する。ここで得られるRMSEの値は地点の選択の仕方に依存するのでこの計算プロセスを複数回行ってその平均および標準偏差を図中にプロットしている。ここで、61地点から30地点を抽出する組合せは20京通り以上存在し、その全ての組合せについてRMSEを算出することは普通の計算機では不可能である。そこで、ここでは乱数発生器を用いてランダムに地点を選択するプロセスを1000回繰り返して行い、その抽出結果に基づいて各地点数毎に1000回RMSEを算出している。図中の白丸およびエラーバーは平均値および標準偏差 $\pm 1\sigma$ の範囲である。

61地点の全ての地点を使用した場合のRMSEは124.5 W/m<sup>2</sup>であり、使用する地点数を増やすにつれてRMSEの値は61地点での値に徐々に漸近していくことがわかる。幾つの地点を使用した時点でRMSEが収束しているかを確認してみると20以上の地点数を使用した場合のRMSEは最終的な値とほとんど変わらず、平均値で比べてみると、20地点と61地点の全地点を使用した場合のRMSEの差は5 W/m<sup>2</sup>以下である。つまりこの結果は、240 km範囲内の空間平均の精度を評価する際に61地点のデータを使用しているが、これ以上地点数を増やしたとしてもほとんど結果は変わらない可能性が高いことを示唆している。すなわち、仮に240 kmの範囲に含まれる平坦地形上の全ての計算格子点で観測値が得られているとして、それを使って評価した真の空間平均値の予測精度と61地点のみで推定した精度の間には恐らく大きな乖離が無いことが推測できる。ただし、中部電力の観測サイトは住宅地に近接する平坦な場所に設置されているため、山岳まで全て含めた空間平均値の精度と比較した場合には値が大きく異なる可能性は十分ある。

## 5. 結語

本研究は、メソ気象モデルWRFを用いた当日および翌日の日射予測システムを開発し、中部電力管内における61地点の日射観測値を用いて単一地点および空間平均値の予測精度を検証したものである。本研究の得られた主要な結果を以下にまとめ結語とする。

1. 中部電力管内における単一地点でのWRF当日予測の年間バイアスは75.4 W/m<sup>2</sup> (61地点平均値) およびRMSEは189.2 W/m<sup>2</sup>; 翌日予測のバイアスは75.9 W/m<sup>2</sup>およびRMSEは199.7 W/m<sup>2</sup>である。
2. 月毎のバイアスより、WRFによる日射計算では先行研究の結果と同様に、観測値に対して全体的に過大評価しやすい傾向があり、その絶対値は夏季に大きく冬季に小さい。また、月毎のRMSEより、持続モデルと比較すると一年を通してみた場合のRMSEの変化

が相対的に小さく、また予測時間が経過した際の精度の低下傾向も同じく小さい。

3. 予測誤差の相互相関は、地点間距離が離れるにつれて指数関数的に小さくなる。その値は、当日予測で約100 kmの距離がある場合の相関係数は約0.25、約300 kmの場合は0.1である。
4. WRFによる日射予測では空間平滑化することによりバイアスは変化しないものの、RMSEについては大幅な改善が期待できる。名古屋市内を中心とした100 km範囲で空間平滑化した場合、当日予測で単一地点に比べて約30%のRMSEの改善効果がある。
5. 空間平均を算出する地点数とRMSEの関係より、今回、使用している中部電力管内で61地点の予測値および観測値を使用すればこの地域における平坦地形での空間平均値の予測誤差を議論することが十分出来る。

#### 謝辞

本論文の改稿の際には匿名の査読者2名より有益なご指摘およびコメントを賜った。ここに感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) Lorenz, E., J. Hurka, D. Heinemann and H.G. Beyer, *Irradiance Forecasting for the Power Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems*. Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2009. **2**(1): p. 2-10.
- 2) 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. **2011**(1): p. 19-24.
- 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) 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*.
- 5) Lara-Fanego, V., J.A. Ruiz-Arias, D. Pozo-Vazquez, F.J. Santos-Alamillos and J. Tovar-Pescador, *Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain)*. Solar Energy, 2012. **86**(8): p. 2200-2217.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 気象庁全球数値モデル GPV, Available from: <http://www.jmbnc.or.jp/hp/online/f-online0a.html>.
- 9) 米国環境予報センター GFS, Available from: <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>.
- 10) Donlon, C.J., M. Martin, J. Stark, J. Roberts-Jones, E. Fiedler and W. Wimmer, *The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system*. Remote Sensing of Environment, 2012. **116**: p. 140-158.
- 11) 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).
- 12) 嶋田進, 劉媛媛, 夏慧, 吉野純, 小林智尚, 板垣昭彦, 宇都宮健史, 橋本潤, メソ気象モデル WRF による日射計算の精度検証. 太陽エネルギー, 2012. **38**(5): p. 41-48.
- 13) Lange, M. and U. Focken, *Physical approach to short-term wind power prediction 2006*: Springer.
- 14) 東京大学教養学部統計学教室, 統計学入門 1991: 東京大学出版会.