

気象モデル WRF による全国・全季節の翌日の 日射量予測誤差の特性評価

Estimation of characteristics for prediction errors in solar irradiance of next-day over Japan and seasons by the meteorological model WRF

田村 英寿^{*1}
Hidetoshi TAMURA

平口 博丸^{*2}
Hiromaru HIRAKUCHI

Abstract

The Meteorological model, WRF (the Weather Research and Forecasting) under the most appropriate conditions detected in our previous study is applied to the next day prediction of solar irradiances. By comparing the numerical results with field measurement data over Japan area through one year, it is found that the solar irradiances are overestimated in the summer and underestimated in the winter in most of areas. The most serious simulation error is found on summer cloudy weather days mistaken for fine weather days by the numerical simulation. That means we have some room for improvement in prediction accuracy of convective clouds. Furthermore, we estimated the difference in prediction errors between before and after spatial averaging of solar irradiances. We found that the difference in errors becomes larger in the summer in which uncertain weather conditions occur frequently.

キーワード：太陽光発電，日射量，気象モデル，WRF，翌日予測

Key Words： Photovoltaics, Solar irradiance, Meteorological model, WRF, Next day prediction

1. はじめに

化石燃料を消費せず発電時に CO₂ を排出しない自然エネルギー発電方式の一つとして、太陽光発電が注目されており、国の長期エネルギー需給見通し¹⁾では、最大導入ケースとして 2020 年時点で 2,800 万 kW という数値が掲げられている。我が国の太陽光発電の導入量はここ数年著しく増加しており、2001 年末に 45 万 kW であった累積導入量（設備容量）が、10 年後の 2011 年末にはその 10 倍以上の 491 万 kW となっている²⁾。さらに、2012 年 7 月に開始された固定価格買取制度により、メガソーラを中心に、今後加速度的に太陽光発電の普及が進むことが予想される。

太陽光発電は、気象の変動に発電量が左右されるため、

出力が時間的に不安定となることに加え、先の発電量が事前に分からないという問題がある。電力需給運用では、火力発電や揚水発電の運転方法を事前に判断する必要があるため、太陽光発電量の事前予測を精度よく行うことができれば、その知見を発電・蓄電設備の効率的な運用に活用することができる。

太陽光発電量や発電量に影響を及ぼす最も重要な気象要素である日射量を事前に予測するための方法としては、直前までの気象情報を用いて統計的に推定する方法^{3,4)}や複数時点の衛星画像データをもとに雲の動きを推定して予測する方法^{5,6)}があり、数時間程度の比較的短い時間先の日射量や雲の位置の予測に対してこれらの方法が有効であることが確認されている。その一方で、大型火力の発電機では、起動（コールドスタート）から定格運転に達するまでに数時間以上要する場合もあるため、電力需給運用では翌日以降の発電量や日射量の事前予測も重要視されている。しかしながら、上述した方法では、雲の複雑な変化（発生・発達・消滅・形状変化・不規則な動き）に関わる物理現象が重要となる翌日以降の予測を高い精度で行うことは一般的には難しいと考えられる。

*1 電力中央研究所地球工学研究所主任研究員
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
e-mail : tamtam@criepi.denken.or.jp

*2 電力中央研究所地球工学研究所研究参事
(原稿受付：2013 年 4 月 24 日)

翌日以降程度の比較的長い時間先の予測を行うための方法として有効と考えられるのが、雲の複雑な変化に関わる物理現象を直接模擬することができる三次元数値気象モデルを用いた予測である。日本の気象庁は、三次元数値気象モデルの計算結果をもとに天気予報を行っており、3時間毎の予報結果をもとに日射量の予測を試みた事例がある⁷⁾。また、最近では三次元数値気象モデルによる現業予報(日本の気象庁, 欧州の ECMWF, 米国の NCEP など)の結果や、それらの結果を初期・境界条件とした MM5⁸⁾、WRF⁹⁾といったコミュニティモデルによる局地気象予測モデルを用いて計算された日射量の予測精度を検証した事例が報告されている¹⁰⁻¹²⁾。しかしながら、日射予測において重要である雲を精度よく予測することは容易ではなく、とりわけ晴天か曇天かが明瞭でない薄曇りやまばらな雲が見られる日(以下、薄曇り)の予測が難しいことが既往の研究でも報告されており、精度の高い予測手法が求められている。

このため、筆者らは既報¹³⁾において、米国の NCAR (大気研究センター) などが開発した数値気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) により、関東地方の夏季・冬季各4日間を対象として、翌日の日射量予測を想定した計算を実施した。さらに、

- 1) 複雑な雲物理過程が考慮されたスキーム (Morrison two-moment microphysics) の採用
- 2) 大気鉛直格子の高解像度化 (標準的な層数 30~40 程度に対し 60 層を設定)

を行った結果、WRF の標準的な条件下で雲が過小に評価されやすい傾向が改善され、曇りの日の予測精度が大きく向上するとともに、薄曇りの日の予測精度もある程度向上した。

本報では、上述した予測手法を全国、1年間を対象とした翌日予測に適用し、国内 47 地点の気象庁の地上観測値をもとに予測誤差の特徴を明らかにすることを目的とする。具体的には、次の2章で予測手法の計算条件を述べた上で、3章では全国の通年予測の結果をもとに地域別・季節別の予測誤差の特性評価を行った結果を述べる。また、広い地域内に低密度に導入されることが多いという太陽光発電の特徴を踏まえ、4章では広い範囲の平均日射量の情報が必要とされる場合に、地点毎の日射量と較べてどの程度精度の高い予測が可能であるかを評価した結果を述べる。最後の5章は全体のまとめである。

2. 計算条件

北海道から九州までが含まれる 2,250km 四方、および南西諸島全域が含まれる 1,250km 四方の2つの水平領域に WRF を適用し、2010 年 9 月から 2011 年 8 月までの1年間を対象として上記の2領域それぞれについて計算を実施した。水平格子間隔は全領域で 5km の等間隔格子であり、大気鉛直方向には地上から高度 50hPa (約 20km) ま

で 60 層を設定した。物理モデルの条件は、既報の改良後のモデルに準じたものとしているが、計算や評価の条件の一部を見直している。具体的には、積雲パラメタリゼーションを使用しない (既報では使用)、30 分毎の平均日射量を評価対象とする (既報では 1 時間毎)、各対象日の翌日予測における計算初期の時刻を評価対象日前々日の 21 時とする (既報は前日 9 時) などの変更を行っている。さらに、既報ではモデル以外の誤差要因が極力少ない条件下でモデルの予測精度を評価する目的から初期・境界条件に気象庁の客観解析値を用いたが、本報では実際の予測に適用した際の誤差の評価を意図して、気象庁からリアルタイムに受信される予報値 (全球数値予報モデル GPS (GSM (日本域)) および北西太平洋海面水温予報格子点資料) を用いた。Table 1 に主要な計算条件をまとめたものを示す。

予測結果の精度を評価するための指標としては、30 分毎の予測誤差の程度を評価するための RMSE (二乗平均平方根誤差) と観測値に対する予測値全体の偏りを評価するための MBE (系統誤差) の2つを用いた。本報では、RMSE と MBE をそれぞれ式(1),(2)のように定義する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (SR_f - SR_m)^2}{N}} \quad \cdots (1)$$

$$MBE = \frac{\sum (SR_f - SR_m)}{N} \quad \cdots (2)$$

ここに、 SR_f , SR_m は 30 分平均日射量の予測値および観測値、 N は 8:30 から 16:00 までの前 30 分平均量の時点数 (=16) × 該当日の日数である。また、各地点・各対象日における天気の状態を表す指標として晴天指数を用いる。本報では、地上と上空 (大気や雲の影響を受ける前) の日の出から日の入りまでの日射量の比を日々の晴天指数と定義する。なお、予測誤差の評価対象時刻を日の出から日の入りまでではなく 8:30 から 16:00 に限定した理由は、特に RMSE の評価に際し、日射量が少ない朝夕の時間帯が含まれること

表 1 数値予測の計算条件
Table 1 Conditions for numerical prediction.

Horizontal domain (position of center)	1) 2,250km×2,250km (37°N, 135°E) 2) 1,250km×1,250km (26°N, 126°E)
Horizontal resolution	5 km
Vertical layers in atmosphere	60 layers from ground level to 50hPa
Time step	60 sec. (= maximum value) (depend on Courant numbers)
Microphysics	Morrison 2-Moment
Short wave radiation	Dudhia
Long wave radiation	RRTM
Radiation time step	5 min.
Land-surface	NoahLSM
Surface layer	Monin-Obkhov
Boundary layer parameterization	YSU
Convective schemes	(not used)

や、評価対象とする時間帯が地点や季節によって異なることによって、誤差の地域・季節差の特徴が解りにくくなると考えたためである。

3. 地域・季節別の予測誤差の特性評価

3.1 月平均日射量の予測誤差

Fig.1 は、気象庁で全天日射量（以下、日射量）の観測を行っている国内の地上観測地点（管区气象台、地方气象台、測候所）のうち、父島・南鳥島を除いた稚内（北緯 45.4 度）から石垣島（北緯 24.3 度）までの 47 地点（Fig.2）を緯度の順に並べ、偶数月における各地点の予測誤差を示したものである。なお、奇数月に関しては、地点毎にばらつきは見られるものの、概ね直前と直後の偶数月の中間程度の予測誤差となることが確認されている。ただし、5 月は 3 月よりも 4 月に、7 月は 6 月よりも 8 月にそれぞれ近い値となっている。

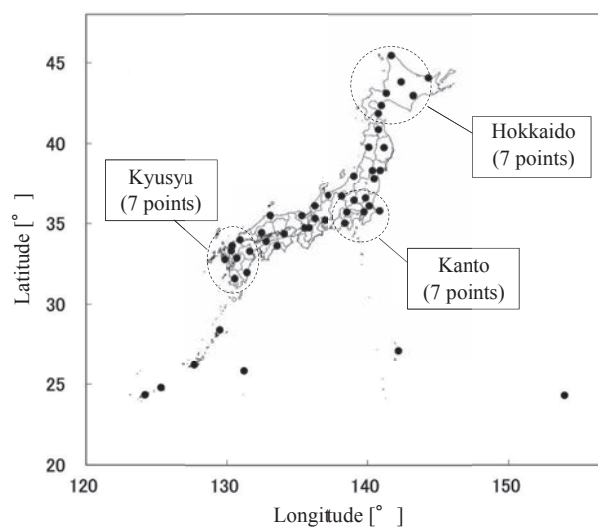


Fig.2 Distribution of 49 measurement points of global solar irradiance by JMA (at January 2012).

図 2 全天日射量の観測が行われている気象庁の観測地点（49 地点）の分布（2012 年 1 月時点）

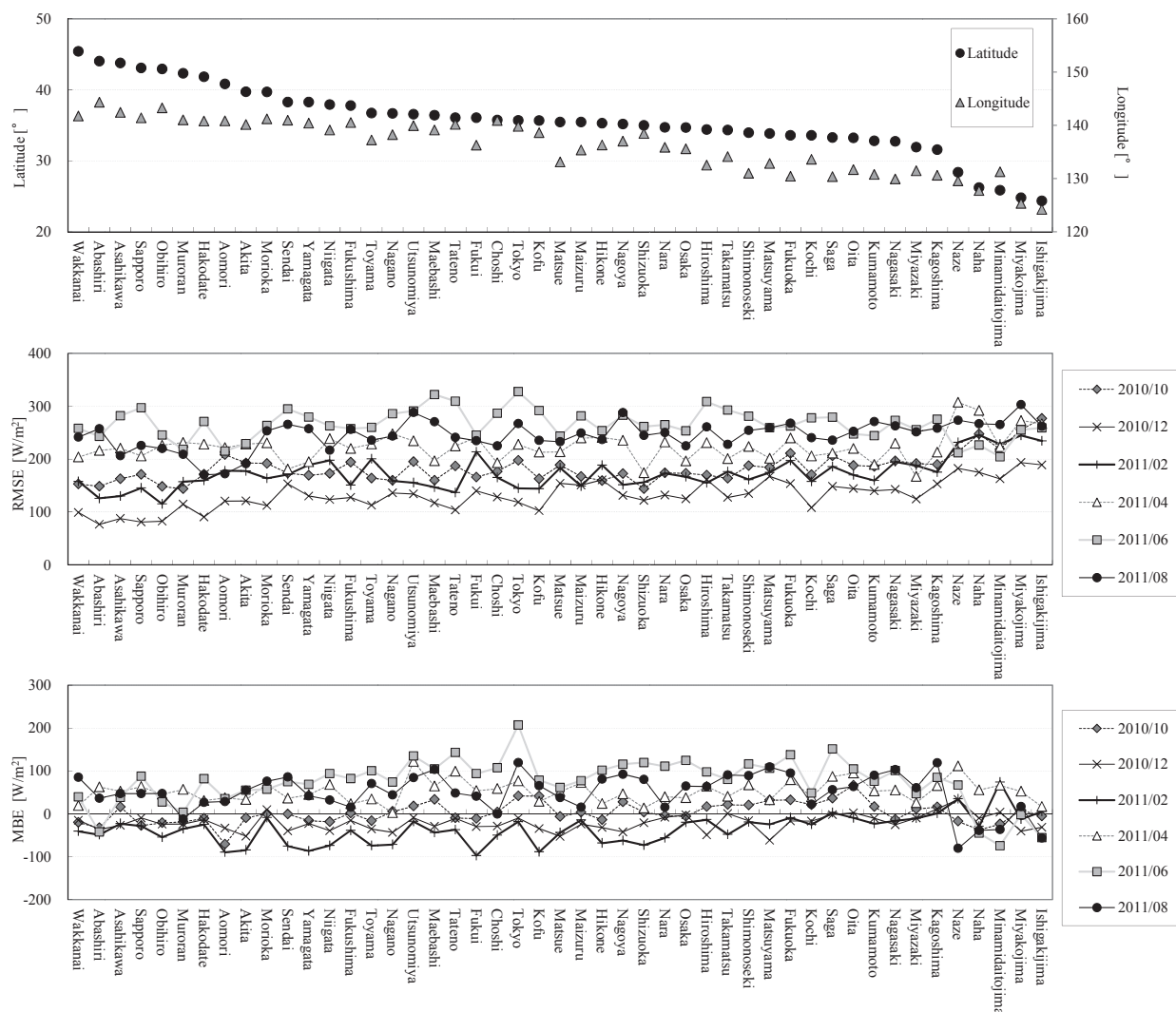


Fig.1 Simulation errors on even-numbered months at 47 measurement points by JMA.

図 1 気象庁の 47 地点における緯度・経度および偶数月の予測誤差（地点の並びは緯度順）

まず、RMSE の特徴としては、梅雨時から夏季(6, 8月)に大きく冬季(12, 2月)に小さい、低緯度(Fig.1の右側)の地点で冬季に大きく季節の違いによる差が小さいといった傾向が見られる。一方、MBE の特徴としては、夏季に正の値(予測が過大)、冬季に負の値(予測が過小)となる傾向が見られる。図は省略するが、全体的には過大評価の方が期間も長く絶対値も大きいので、通年では MBE が正の値となる地域が多い。全国的に RMSE および正の MBE が最も大きくなるのは 6 月であるが、南西諸島(名瀬から石垣島まで)では他の地点と較べて予測誤差が小さい。これは、南西諸島の梅雨明けの時期が他の地域よりも早く(気象庁の発表によれば、当概年の沖縄地方の梅雨明けは 6 月 9 日、九州以北は 6 月 28 日～7 月 11 日であった)、天気が他の地域と大きく異なっていたためと考えられる。梅雨のない北海道(稚内から函館まで)も、本州と較べて 6 月の MBE はやや小さいが、RMSE は同じ程度である。6 月の晴天指数は、全国平均が 0.39 であったのに対し、北海道平均は 0.42 であった(南西諸島平均は 0.50)。このため、北海道と本州とで 6 月の天気に大きな違いがなく、両者の予測誤差に明瞭な違いが現れなかったと推察される。梅雨時にあたる東日本(北海道以外)の 6 月中～下旬、西日本の 6 月上～中旬、南西諸島の 5 月中～下旬には、多くの地域で予測誤差が大きく、特に曇りの日が晴れと誤って予測されてしまうケースが多い。

なお、予測誤差に季節・地域差が見られた理由として、上空からの日射量(太陽高度)が季節・地域によって異なる影響も考えられる。そこで、2. で述べた上空の日積算日射量で除することで無次元化した RMSE の特徴を調べたところ、誤差が 12 月に最も大きくなることや、低緯度と高緯度の地域差がほとんど見られないことがわかった。本報では、発電出力の予測誤差の絶対値に着目した評価を行ったが、評価指標の考え方によって予測誤差の特徴が異なる点に注意が必要である。

また、系統誤差 MBE が冬季に負の値になるなど、上記の結果の一部には WRF を用いた既往の知見¹¹⁾と異なる傾向が見られる。この理由としては、WRF の物理モデルや格子解像度などの条件、初期・境界条件に用いた気象データ、対象年の違いなどの影響が考えられる。

3.2 天気と予測誤差との関係

Fig.3 は、天気と予測誤差との関係をより詳細に調べるため、47 地点の月平均 RMSE, MBE と晴天指数(2. で述べた日々の晴天指数の月平均値)との関係を示したものである。ここでは、冬季(12 月, 2 月)、および梅雨時から夏季(6 月, 8 月)の 4 か月間の結果をプロットしている。

冬季、特に 12 月には、晴天指数と RMSE, MBE との間に明瞭な関係は見られない。このことを裏付けるため、新潟(晴天指数 0.30)と銚子(晴天指数 0.54)における 12 月の 1 か月間の 30 分毎の観測・予測値を示したものが Fig.4 である。12 月の 8～16 時の平均日射量の観測値は、新潟 154.7 W/m²、銚子 296.7 W/m²であり、日本海側の新潟の日射量は太平洋側の銚子よりも 100 W/m²以上少ない。一方、予測結果は新潟 115.3 W/m²、銚子 268.0 W/m²であり、いずれも観測値より過小ではあるが、両地点の日射量の違いは予測によって正しく再現されている。

一方、梅雨時から夏季にかけては、晴天指数と RMSE, MBE との間に負の相関が見られ、晴天指数が小さい、すなわち曇りが多い地点では、予測結果が全体的に過大となり、逆に晴天指数が大きい、すなわち晴れが多い地点では過小となる傾向が見られる。これは、この季節における雲の予測が難しく、曇りの日に晴れ(日射量が過大)、晴れの日に曇り(日射量が過小)と誤って予測されてしまうケースが多いことによる。12 月と同様、梅雨時の 6 月について、新潟と銚子の 1 か月間の観測・予測値を調べたところ、新潟よりも銚子の方が曇りの日、および曇りの日の予

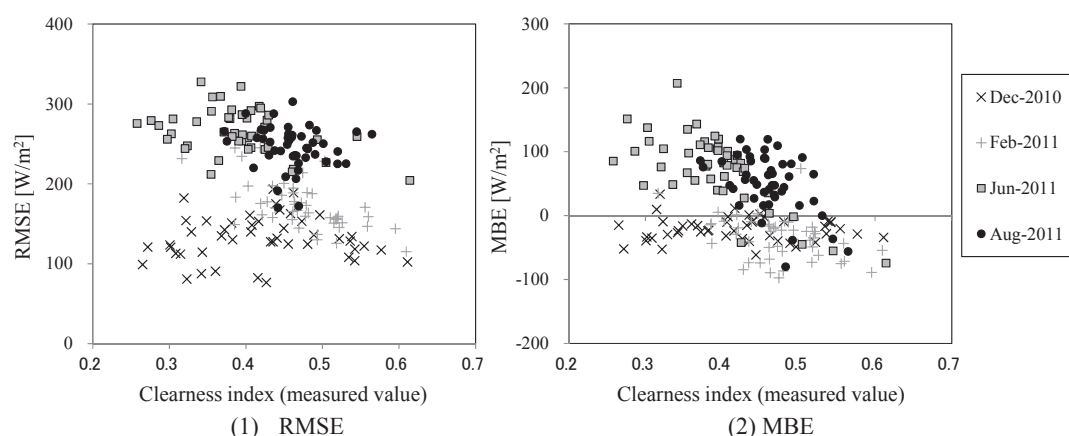


Fig.3 Relationship between clearness indices for measured values and simulation errors on December, February, June and August for 47 measurement points by JMA.

図3 12, 2, 6, 8月における気象庁47観測地点の晴天指数(観測値)と予測誤差との関係

測が過大に評価されるケースが多く、その結果、銚子の方が RMSE や正の MBE がやや大きくなることが確認された。Table 2 は、6 月と 8 月について、47 地点×30 または 31 日の天気を晴れ（日平均の晴天指数が 0.55 以上, Clear）、薄曇り（0.2 以上 0.55 未満, Cloudy）、曇り（0.2 未満, Overcast）に 3 区分し、観測と予測との対応関係を示したものである。これによれば、観測が晴れであった日（表の上段）のうち予測も晴れであった日（上段左）の割合が 6,8 月ともに 65% 以上であるのに対し、観測が曇りであった日（表の下段）のうち予測も曇りであった日（下段右から 2 列目）の割合は 50% 以下である。このことから、夏季には、曇りの日が晴れまたは薄曇りと予測されてしまったケースが特に多く、これが 3.1 で述べた、夏季に過大評価の傾向が特に強くなった一因と考えられる。

3.3 快晴日の予測誤差

前節までの結果からも示されるように、翌日の日射量の予測が難しいのは、主に雲を正しく予測することが難しいことによる。このため、観測・予測ともに雲の殆どない日の予測誤差はそれほど大きくないことが予想されるが、WRF を用いた既往の予測事例で、晴天日にバイアス誤差が見られるという報告もなされている¹¹⁾。このため、晴天日の予測誤差について検討を行った。

Fig.5 は、関東地方内陸部の前橋における 5 月と 12 月の快晴日 2 日間の観測と予測とを比較した結果である。12 月には両者はほぼ合致しているが、5 月には予測が観測より大きく、日射量が過大に評価されている。すなわち、快

晴日における日射量の予測結果が系統誤差を有し、その度合いが季節によって異なる可能性がある。

Fig.6 は、上述した晴天日の過大評価の傾向を関東全域・通年について調べるため、観測・予測ともに晴天指数

表 2 観測値と予測結果の天気と比較
(日数: 表中 () 内は予測結果の合計に対する%)

Table 2 Comparison of simulated weather with measured weather.

(1) June 2011				
Prediction results [number of days (%)]				
Measurement results	Clear	Cloudy	Overcast	Total
Clear	240 (66.3)	121 (33.4)	1 (0.3)	362 (100.0)
Cloudy	186 (24.9)	516 (69.2)	44 (5.9)	746 (100.0)
Overcast	5 (1.7)	150 (51.5)	136 (46.7)	291 (100.0)

(2) August 2011				
Prediction results [number of days (%)]				
Measurement results	Clear	Cloudy	Overcast	Total
Clear	379 (68.9)	171 (31.1)	0 (0.0)	550 (100.0)
Cloudy	239 (31.6)	497 (65.7)	20 (2.6)	756 (100.0)
Overcast	6 (4.1)	84 (57.5)	56 (38.4)	146 (100.0)

Clear :	0.55 ≤ Clearness index
Cloudy :	0.2 ≤ Clearness index < 0.55
Overcast :	Clearness index < 0.2

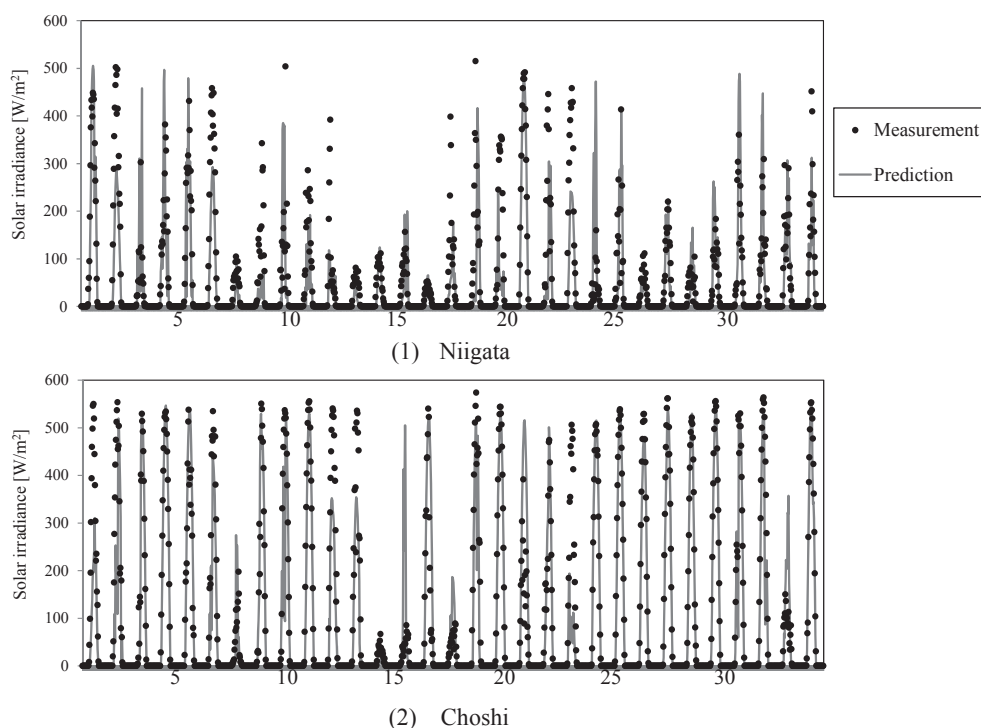


Fig.4 Time series variation of measured and predicted solar irradiances for 31 days on December, 2010.

図 4 2010 年 12 月 1 日～31 日の日射量の観測値と予測値の時系列変化

が0.6以上となった晴天日における関東地方4地点の月平均のMBEの推移を示したものである。これによれば、冬季の12～2月には予測誤差が小さいのに対し、3～5月には正の誤差、すなわち過大評価される傾向が見られる。この原因として、嶋田ら(2012)¹¹⁾も指摘しているように、本報で行った予測において、短波放射の伝達過程の計算に大気中のエアロゾルによる日射の減衰効果が考慮されていないことが考えられる。気象庁は、綾里(岩手県)でエアロゾルの光学的厚さの長期連続観測を行っており、過去

の観測結果から、大気中のエアロゾルが4～5月に多く、12～1月に少ないことが示されている¹⁴⁾。このことから、晴天日の過大評価の原因がエアロゾルである可能性が示唆される。このエアロゾルが計算に考慮されていない点も、3.1で述べた、夏季に過大評価の傾向が特に強くなった原因の一つに挙げられる。

本予測に用いたWRFでは、大気中の様々な発生起源のエアロゾルの輸送や化学変化の過程を計算することもできるようになっており、検討事例も報告されている¹⁵⁾。こうしたモデルを用いてエアロゾルの効果を考慮する方法が考えられる。また、国内のエアロゾル量の平年値を計算に考慮するような簡易的な方法でもある程度の予測精度の向上が期待できる。

4. 地域内の平均日射量の予測誤差の特性評価

太陽光発電の導入形態としては、大規模なメガソーラのような形態もあれば、各家庭に広く低密度に分散導入される形態もある。このため、前章で着目したような地点単位の日射量に加えて、広い地域内全体の平均日射量の予測も重要である。複数地点や広域の平均日射量の予測誤差が単地点の誤差をキャンセルして誤差を低減できるという既往の研究の知見^{16,17)}も踏まえ、ここではFig.2に示す概ね3～8万km²の国内3地域(北海道・関東・九州)を対象として、複数地点(気象庁7地点)の平均日射量の予測精度と各地点の日射量の予測精度の比較を試みた。

式(1)で定義される各地点のRMSEの7地点平均値(平均化前)に対し、 SR_f , SR_m に地域内7地点の平均日射量を用いたRMSE(平均化後)を定義した。Fig.7は、北海道において平均化前後のRMSEを比較した例である。RMSEは平均化後の方が小さく、夏季に両者の差は大きい。Fig.8は、平均化前後のRMSEの差を3地域について示したものである。北海道と関東において、6～7月のRMSEの差は12～1月の2倍以上である。この原因を調べるため、関東における6月と12月の平均化前後のRMSEと晴天指数との関係を示したものがFig.9である。なお、ここでの晴天指数は7地点の観測データの晴天指数の平均値である。12月は晴天指数が0.55以上の晴天日が多いのに対し、6月は0.2～0.55未満の薄曇りの日が多い。薄曇りの日には、地域内で部分的に発生する雲の位置・規模・移動経路などの予測誤差が複数地点の平均量を評価することで相殺されやすいと考えられ、これに伴い平均化前後のRMSEの差が大きく現れたと考えられる。

Fig.8によれば、関東は他の2地域と比べて平均化前後のRMSEの差がやや小さいことがわかる。例えば北海道では、太平洋側と日本海側とで気象条件が大きく異なることがあるのに対し、関東は地点の多くが同じ太平洋側の関東平野内にあったために平均化が働きにくかった可能性がある。気候区分を考慮した地域の設定なども含め、今後さらに詳細な分析が必要である。また、冬季において九州

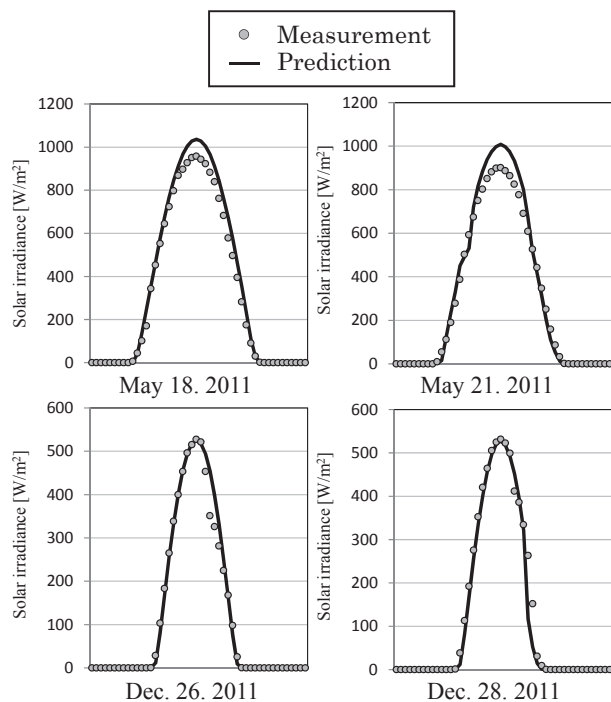


Fig.5 Time series variation of measured and predicted solar irradiance for clear sky days on May and December at Maebashi.

図5 前橋における5月と12月の快晴日の日射量の観測値と予測結果

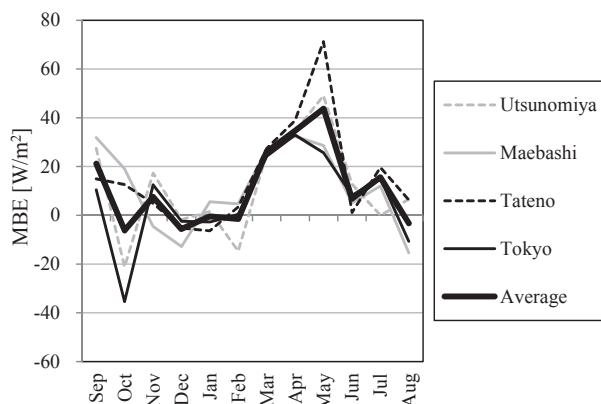


Fig.6 Monthly average errors in prediction of solar irradiance at 4 points in Kanto for fine weather days in which the clearness index is > 0.6 for both measurement and prediction.

図6 関東地方の4地点における観測・予測とも晴天指数0.6以上の晴天日の月平均予測誤差

の RMSE 差が他の地域よりも大きかった原因としては、冬季に晴天でない日が多かった（12 月に晴天指数が 0.55 以下であった日が、関東では 10 日であったのに対して九州は 22 日）という気象条件の違いの影響が考えられる。

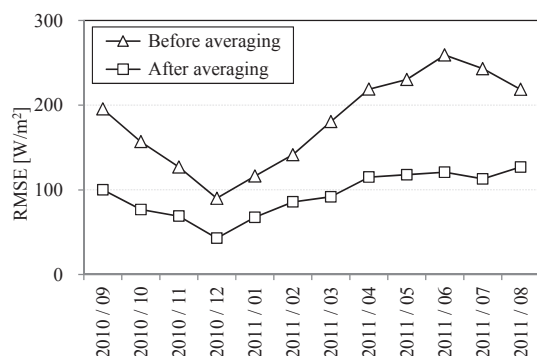


Fig.7 RMSE for before and after multi-point averaging in Hokkaido area shown in Fig.2.

図7 北海道(図2)における多地点平均化前後の RMSE

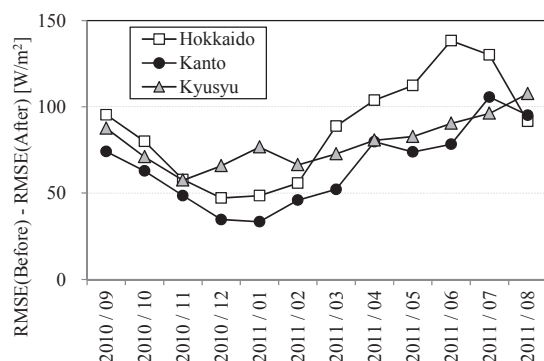
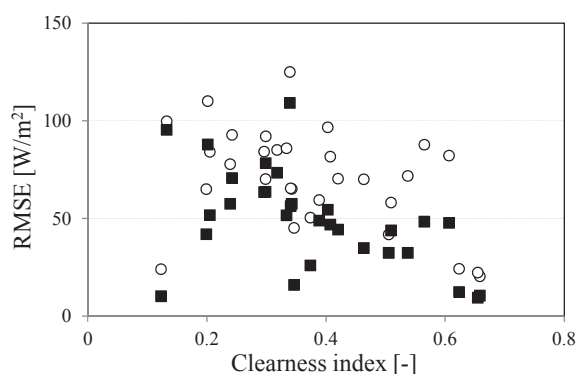
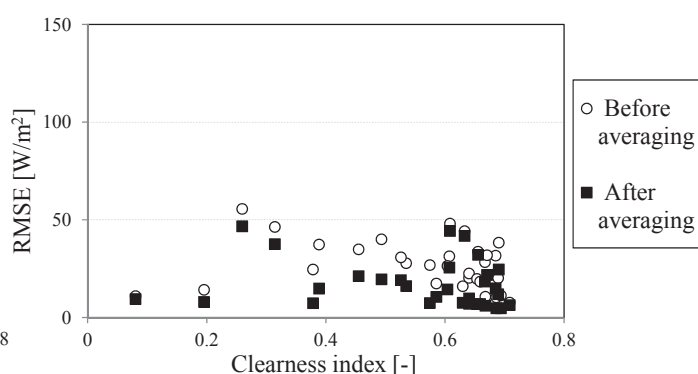


Fig.8 Difference in RMSE between before and after multi-point averaging in three areas shown in Fig.2.

図8 図2の3つのエリアにおける多地点平均前後の RMSE の差



(1) Summer (June 2011)



(2) Winter (December 2010)

Fig.9 RMSE of daily accumulated solar irradiances in Kanto area shown in Fig.2 for before and after spatial averaging related to clearness index.

図9 関東(図2)における平均化前後の日積算日射量の RMSE と晴天指数との関係

5. まとめ

本報では、既報で高精度化を図った数値気象モデル WRF を用いた予測手法を国内全体の通年計算に適用し、国内 47 地点の気象庁の地上観測値をもとに、二乗平均平方根誤差 (RMSE) や系統誤差 (MBE) により全日射量の予測誤差の特徴や問題点を明らかにした。得られた主要な結果は次の通りである。

- 1) 季節別の予測誤差の特徴として、RMSE は梅雨時から夏季にかけて大きく、冬季に小さい。MBE は多くの地域で夏季に正（予測が観測よりも過大）、冬季に負となりやすく、通年では正となる。
- 2) 地域別の予測誤差の特徴として、冬季には晴天日の予測誤差がやや大きいものの、大きな地域差は見られない。一方、夏季には曇りの日に日射量が過大評価されやすい傾向が顕著に見られるため、地域による天候条件の違いが予測誤差に現れる。例えば、梅雨の時期が他よりも早い南西諸島では、6 月の予測誤差が他の地域よりも小さい。
- 3) 雲のない快晴日にも日射が過大に評価されることがあり、その一因として、嶋田ら (2012)¹¹⁾ も指摘しているように、日射に及ぼす大気中のエアロゾルの効果が計算に考慮されていないことが考えられる。このことは、晴天日の過大評価傾向がエアロゾルの多い季節に顕著であることから裏付けられる。
- 4) 地域内における複数地点の平均日射量の予測誤差は単独地点の予測誤差よりも小さく、両者の差は夏季に大きい。これは、平滑化効果の大きい薄曇りの日が夏季に多いためと考えられる。

上の 2) で述べたように、本手法を用いた予測結果の特徴として、夏季の曇りの日に日射量が過大に評価される傾向が特に顕著であることが示された。夏季は地上と上空との温度差が大きく、積雲や積乱雲のような対流雲が発達しやすいことから、本手法でこのような雲の発生・発達過程が十

分に再現されずに過小に評価されやすくなっている可能性がある。その一方で、4)で述べたように、夏季において数万 km² 程度の地域内の複数地点の平均量の予測誤差が単独地点の誤差よりも小さかったことから、広い地域全体の天気が誤って予測されただけではなく、地域内における雲の発生場所などが正しく予測できていなかったケースも多かったと考えられる。

本論文の一部は、平成24年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会・Korean Solar Energy Society 合同研究発表会(平成24年11月)で発表したものである。

参考文献

- 1) 長期エネルギー需給見通し(再計算)(2009), 経済産業省.
- 2) Trends in photovoltaic applications -Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2011- (2012), Report IEA-PVPS T1-21:2012, International Energy Agency (IEA).
- 3) Mihalakakou, G., M. Santamouris and D.N. Asimakopoulos, The total solar radiation time series simulation in Athens, Using Neural Networks, *Theoretical and Applied Climatology* (2000), **66**, 185-197.
- 4) 桶真一郎・村田浩之・滝川浩史・榊原建樹, 日射量曲線の予測に基づいた予測日積算日射量の誤差低減, *太陽エネルギー*, **33-2** (2007), 53-58.
- 5) Hammer, A., D. Heinemann, C. Hoyer and E. Lorenz : Satellite Based Short-Term Forecasting of Solar Irradiance -Comparison of Methods and Error Analysis, *Proc. EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users Conf.* (2001).
- 6) 谷口浩成・黒川浩助・大谷謙仁, 気象衛星「ひまわり」画像から算出した雲移動ベクトルを用いた雲の自動推定, 写真測量とリモートセンシング, **39-6** (2000), pp.4-12.
- 7) 嶋田尊衛・黒川浩助, 天気予報と天気変化パターンを用いた日射予測, *電学論 B*, **127-11** (2007), 1219-1225.
- 8) Grell, G.A., J. Dudhia and D.R. Stauffer : A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) (1994), NCAR/TN-398 + STR, 121.
- 9) Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J.G. Powers : A description of the advanced research WRF version 3 (2008), NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 113.
- 10) Lorenz, E., J. Hurka, G. Karampela, D. Heinemann, H.G. Beyer and M. Schneider : Qualified Forecast of Ensemble Power Production by Spatially Dispersed Grid-Connected PV Systems, *23rd European PV Conference* (2008), 3285-3291.
- 11) 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*, **38-5** (2012), 41-48.
- 12) 大竹秀明・山下克也・山田芳則・JOAO Fonseca・高島工・大関崇, 太陽光発電量予測に向けた短波放射量予測の検証-メソ気象数値予報モデル(MSM)-, *日本気象学会 2011 年度秋季大会* (2011), pp.526.
- 13) 田村英寿・平口博丸・橋本篤・西澤慶一・和田浩治, 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), 335-338.
- 14) 大気・海洋環境観測報告第 11 号(平成 21 年観測成果)(2011), 気象庁.
- 15) Zhang, Y., Y. Pan, K. Wang, J. D. Fast, and G. A. Grell, WRF/Chem -MADRID: Incorporation of an aerosol module into WRF/Chem and its initial application to the TexAQs2000 episode, *J. of Geophysical Research*, **115-D18202** (2010), 32.
- 16) Lorenz, E., J. Remund, S.C. Muller, W. Traummuller, G. Steinmaurer, D. Pozo, 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, *24th European PV Conference* (2009), 4199-4208.
- 17) 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, *電気学会メタボリズム社会・環境システム研究会資料* (2011), 19-24.