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

- *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)

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

[&]quot; 岐阜大学工学研究科大学院生

[&]quot;。岐阜大学工学研究科准教授

[&]quot;4 岐阜大学工学研究科教授

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⁸⁹⁾ 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⁷¹²¹³⁾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



Table 1	WRF	configurations	
---------	-----	----------------	--

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

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

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)からも確認できる 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



g. 3 Daily total global horizontal irradiance obtained from the ground observation and the WRF simulatio 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 ~ 204.2 W/m² (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 間の差違と同様に対象とする地域間での差違が非常 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.

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

ここでは各時刻の観測又は計算日射量,は太陽定数 (=1,367 W/m²),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/m²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、0~600 W/m²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/m²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/m²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



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

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.

これまでに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、オゾンの取り扱いに特化した米国大気科学研究 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. 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/m²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 引き起こす主な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 ルダーの内陸の澄んだ空気に調整されたモデルでボ ルダー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+53.7~83.7 W/m²(観測平均 値比:+13.9~27.4%)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 ~ 204.2W/m² (44.6 ~
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濁度が中部 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

- 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.
- 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 カ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 カ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
- 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 Conference2009.

- 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.
- Stensrud, D.J., Parameterization schemes : keys to understanding numerical weather prediction models2007 : 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).