

大阪都市圏での通年・高密度日射観測にもとづく都市気象・太陽光発電量予測システムの検証

引地 裕基¹・亀卦川 幸浩²・加藤 晏明³・大橋 唯太⁴
重田 祥範⁵・井原 智彦⁶・鍋島 美奈子⁷

¹学 (工) 明星大学大学院 理工学研究科 環境システム学専攻 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

E-mail: 12mb006@stu.meisei-u.ac.jp

²博 (工) 明星大学 教授 理工学部 総合理工学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

E-mail: kikegawa@es.meisei-u.ac.jp

³明星大学 理工学部 総合理工学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

E-mail: 10t7010@stu.meisei-u.ac.jp

⁴博 (理) 岡山理科大学 准教授 地球環境科学部 生物地球学科 (〒700-0005 岡山市北区理大町1-1)

E-mail: ohashi@big.ous.ac.jp

⁵博 (理) 立正大学 助教 地球環境環境学部 環境システム学科 (〒360-0194 埼玉県熊谷市万吉1700)

E-mail: shigeta@ris.ac.jp

⁶博 (工) 東京大学大学院 准教授 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: ihara-t@k.u-tokyo.ac.jp

⁷博 (学) 大阪市立大学大学院 准教授 工学研究科 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: nabeshima@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

都市気象・太陽光発電量予測に適用可能な数値モデルの検証の為、大阪市域を対象に高密度・通年の多点気象観測を行い、観測地点間における日射量差異の解析を行った。加えて、上述モデルにおいて日射量予測を担う気象サブモデルWRFの雲微物理スキームに関する感度実験を行い、太陽光発電量評価において重要となる微物理スキームの同定を試みた。実測日射量を解析した結果、積算日射量には地点間で最大5%程度の差異が確認され、また瞬時値日射量のRSMEでみた地点間の統計的ばらつきは最大50%に達した。これらの地点間差異は晴天日より曇天日に増大する合理的傾向が確認された。一方、WRFの雲微物理スキームの内、4種のバルク型微物理モデルを対象とした感度実験の結果、上述の実測日射量にみられた地点間差異の傾向は概ね再現可能であったものの、特定のスキームの優位性を検証するには至らなかった。

Key Words : urban climate, PV power generation, numerical prediction system, Osaka

1. はじめに

現在、わが国では原発停止に伴う電力不足を補うため、環境負荷が必ずしも小さくない火力発電所がフル稼働している。このような電力不足への対処に加え、気候変動緩和に向けた温室効果ガスの削減を同時に実現する手法の一つとして、再生可能エネルギーを組み込んだ電源システムへの移行が検討されている。しかし、再生可能エネルギーによる主要電源として導入が推進されつつある太陽光発電は出力が必ずしも一定ではないため制御が難しく、発電が小規模で分散しやすいため、エネルギーマネジメントが難しい等の問題点も指摘されている^(例えば1)。

そのような問題に対しては気象条件に応じて変動する電力需要や日射量により左右される太陽光発電量を特に需要が集中する都市域において高精度に予測可能な都市気象・電力需給の統合予測システム（以降、統合予測システム）の運用が有効と考えられる。

ここで電力需要についてみると、従来の予測手法で使われる説明変数としての気象要素は気温のみの場合が多いが²⁾、電力需要にはその地点の日射量・風速・湿度等の気象要素も関係していると考えられる。そのため、気温以外の気象要素も高密度に測定し、電力需要予測に用いる必要がある。

一方、太陽光発電量は支配的因子である日射量が雲の分布によって狭域でも差が生じ、発電量が安定しないデメリットがあり、日射量を高精度に予測することが太陽光発電量評価には必要不可欠である。しかし、日射量を都市域において高密度かつ長期的に測定した例は少なく、統合予測システムの検証に使用できる日射量データが必要である。

よって本研究では大阪都市域を対象に日射量を中心とした高密度・通年観測を行ってデータを取集し、収集した日射量データの統計的解析を行う。日射量の都市域における高密度・長期実測データはほとんど存在しない

ため、この解析を通じ、高密度の観測地点間における差異がどの程度あるかを明らかにする。加えて、統合予測システムへの適用ポテンシャルを有する都市気象・建物エネルギー連成数値モデル（以降、WRF-CM-BEM³⁾）について、その太陽光発電評価における性能検証へ向けた基本的な検討として、日射量の予測を担うメソ気象モデルWRF⁴⁾の雲微物理過程について最適なオプションを明らかにすることを目的とした。

2. 大阪都市域における観測

(1) 観測地点と期間

前述の通り、太陽光発電評価には地点間の日射量のばらつきを表現することが必要であり、高密度で長期的な実測データを得ることが重要と考えた。そこで、本研究では、2013年3月14日より、大阪都市圏において通年の気象観測を開始した。観測地点等の概要を以下に述べる。

観測では、大阪都市圏において日射量の高密度データを得るため、概ね5~10km程度の間隔で計14地点に観測地点を設定した（図-1）。これらの観測地点では、概ね3~4階の学校施設屋上に全天日射計（Kipp&Zonen社製CMP3）を設置し、全天日射量を5分間隔で計測している。これに加え、自作の自然通風式放射シールドにおんどとりTR-73U（T&D社製）を組み込み、気温・相対湿度・大気圧を10分間隔で計測している。また、大阪管区気象台（K1）の北側0.9kmに位置する観測地点であるA2地点に放射収支計（Kipp&Zonen社製CNR1）を設置し、上向き下向き長短波放射を5分間隔で測定している。以上の観測システムの外観を図-2に示す。全天日射量の測定値に対しては器差補正を施し、5分平均値のRMSEでみて5~20W/m²の精度が確認できた。またK1とA2の日照時間10時間以上の晴天日における全天日射量を比較した結果、RMSEが約13W/m²となり、概ね測器の誤差範囲内であったため、A2を基準器とし日射データの解析を行った。

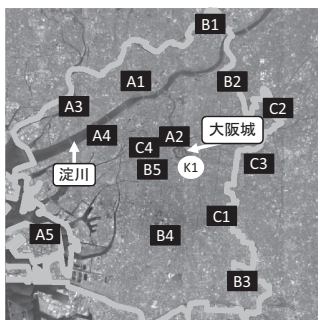


図-1 観測地点の分布（衛星画像出所：Google Earth）（黒四角の数字は観測地点番号，白丸は大阪管区気象台を指す）



図-2 屋上に設置した気象観測システム

3. 数値モデル

(1) メソスケール気象モデルWRF

Weather Research & Forecasting (WRF) モデルとは、実用的な天気予報とそれに関連する研究のために米国のNCEP/NCARで近年開発された数値モデルである。数kmから数千kmの幅広い領域にも対応できる。完全圧縮性の非静力学流体を対象とする気象モデルである。本研究では、WRF-ARW Ver3.2を使用した。

(2) 都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルCM-BEM

CM-BEMとは、多層都市キャノピーモデルCM⁵⁾と、ビル・エネルギー排熱解析モデルBEM⁶⁾の2つを結合したモデルである。CM-BEMは、人工排熱を介した都市気象と建物空調エネルギー需要の相互作用過程を表現することが可能なモデルであり、都市格子の陸面過程を計算するサブモデルとして、WRFに双方向接続してある³⁾。なお、本研究では前章で述べた通り、WRF単体での日射量予測精度の解析に限定してモデルを運用している。CM-BEMについては今後の研究において利用を予定している。

(3) 数値実験における計算条件

大阪都市域を対象としたWRFによる数値実験について、その計算条件を以下に示す。計算領域は図-3に示す通り、d01, d02, d03の3つの領域であり、大阪都心部を中心とした3重ネスティングに依り設定した。計算格子の水平間隔は、d01が4.5km, d02が1.5km, d03が0.5kmと内側領域に向かって解像度が向上するように設定した。WRF上での大気・海面・土壌に対する温度等の初期・境界条件の設定は、表-1中の外部データにもとづく。加えて、陸面の地形・土地利用についても、同表内の格子別データにもとづき設定した。解析期間は2013年4月の1ヶ月間とした。その他、放射計算や大気境界層の乱流スキームといったWRF上の物理オプションについては、

表-2の通り設定した。また、雲微物理過程のオプションについては最適なオプションの探索を行うべく、表-3に示す複数ケースの設定を行った。

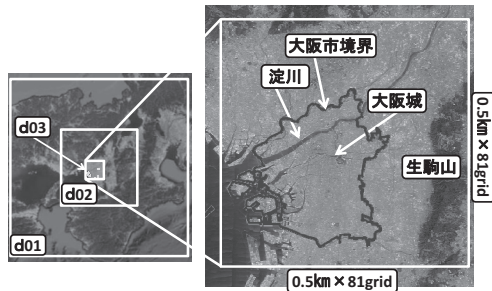


図-3 計算領域（衛星画像出所：Google Earth）

表-1 WRF計算条件（初期・境界条件）

Item	Setting
1. Initial conditions & boundary conditions (time-varying)	
- Atmosphere (temperature, relative humidity, wind)	JMA/MANAL (Meso-Scale objective analysis data) Resolution: 5km(horizontal), 20 isobaric levels, 3hour
- Soil (moisture & temperature)	NOAA / NCEP / FNL (Global final analysis data) Resolution: 1deg.(horizontal), 4 depth levels, 6hour
- Sea (surface temperature)	NOAA / NCEP / RTG-SST (Real-time, global, sea surface temperature analysis data) Resolution: 0.5deg. (horizontal), 24hour
2. Boundary conditions (static geographical data)	
- LULC (Land Use and Land Cover)	GSI LULC data Resolution: 10-100m(horizontal), 17category
- Topographic	USGS/GTOPO30 Height and slope Resolution:30s

表-2 WRF計算条件（物理オプション）

Physics option	Adapted Option
Longwave Radiation	RRTM scheme ⁷⁾
Shortwave Radiation	Dudhia scheme ⁸⁾
Cumulus Parameterization (only for domain-1)	Kain-Fritsch scheme ⁹⁾
Planetary Boundary layer	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme ¹⁰⁾
Surface Layer	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme ¹¹⁾
Land Surface Model	Noah Land Surface Model ¹²⁾

表-3 WRF計算条件（雲微物理過程オプション）

Case number	Physics option	Adapted Option
Case1		Lin et al. scheme ¹³⁾
Case2	Microphysics	WSM 3-class scheme ¹⁴⁾
Case3		WSM 6-class scheme ¹⁵⁾
Case4		Thompson graupel scheme ¹⁶⁾

4. 解析結果

(1) 全日射量の日照時間別地点間差異

日射量の予測手法としてアメダスの日照時間等から予

測する手法 ¹⁷⁾ が存在する。そこで本研究においても全日射量の解析を行うに当たり、日照時間別の解析を行った。表-4 に示す通り、観測データを日照時間にもとづき G1～G4 の4つのグループに分け解析を行った。

表-4 解析期間及び条件

（日照時間は大阪管区気象台10分毎の測定値にもとづき解析）

解析期間	2013年3月14日～2013年7月24日
解析時間	7:00～17:00
G1	日照時間10時間以上
G2	日照時間7時間以上10時間未満
G3	日照時間4時間以上7時間未満
G4	日照時間4時間未満

全観測期間に渡る積算全日射量を地点別に比較した結果を図-4に示す。

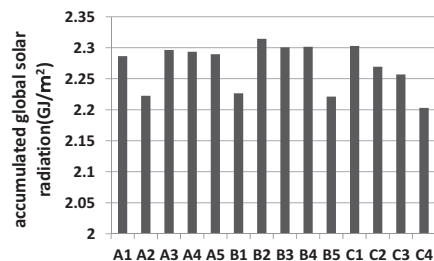


図-4 観測期間内の積算全日射量の地点別比較

約4ヶ月間の積算全日射量の地点間差異は最大で0.1GJ/m²程度であった（基準地点A2の積算日射量の約5%に相当）。さらに、地点A2での観測値を基準として、各観測点におけるmean biasおよびRMSEを日照時間別のG1～G4について算出した。その結果を図-5に示す。

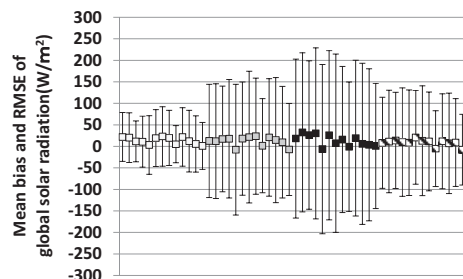


図-5 日照時間・地点別日射量のA2観測値を基準としたMean biasおよびRMSE（白四角はG1、灰色四角はG2、黒四角はG3、斜線入り四角はG4。同グループ内は左からA1・A3・A4・A5・B1・B2・B3・B4・B5・C1・C2・C3・C4の地点に対応）

快晴日であるG1ではRMSEが平均で約60W/m²であったのに対し、G2では約130W/m²、G3では約180W/m²となり、

快晴日とやや雲のある日とではグループ毎のRMSEに2～3倍の差が生じている。また同一グループ内でも地点間の全天日射量のばらつきは快晴日と比べやや雲の多い日は大きい。高精度な太陽光発電シミュレーションを行うためには曇りの日の日射量の地点ごとのばらつきと地点間の差異を十分に表現することが重要である。この他、曇天もしくは雨天であるG4はRMSEの平均値が110W/m²とG2よりもばらつきが小さくなったが、この条件の日は広範囲で曇りや雨となっており地点間差異が小さくなったためであると考えられる。

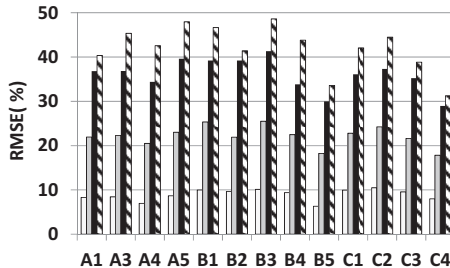


図-6 日照時間別・地点別のRMSE

(白棒はG1, 灰色棒はG2, 黒棒はG3, 斜線入り棒はG4. パーセント値は図-6のRMSEの基準点A2平均日射量に対する比率を示す)

地点A2での観測値を基準としてRMSE (パーセント値) を算出したところ、G1の平均で約8%, G2で約20%, G3で約35%, G4で約40%であった(図-6)。G1のように広範囲が良く晴れている日は地点間の差異が小さいく、地点ごとのばらつきも小さいが、日照時間が短くなると雲の影響により地点間差異や地点ごとのばらつきが大きくなるため、太陽光発電シミュレーションにおいてこのような地点間差異や地点ごとのばらつきを十分に表現することが電力需要予測の高精度化につながると考えられる。

(2) WRFの日射量再現性

WRFを用いて、都市スケール程度の局地的な日射量空間分布の再現性に対する雲微物理モデルの影響感度を検討した先行研究は存在しないものの、降水現象の再現性に対する同種の感度解析を行った先行研究¹⁸⁾などを参考に本研究では表-3に示す4つの微物理モデルを対象に数値実験を行った。選択した4つの雲微物理モデルは、ビンモデル(粒径別に雲粒の振る舞いを扱うモデル)ではなく、雲粒全体での質量(混合比)や数密度を予測するバルクモデルであり、雲粒の質量(混合比)のみを予測する1モーメントモデルとして、Case1～3を選択した。更に雲粒の数密度まで予測する2モーメントモデルとし

て、Case4を選択した。Case1・3・4は雲を解像する高分解能シミュレーションに適したモデルである。

1ヶ月間のシミュレーションを行い、全天日射量(瞬時値)についてグループ別・ケース別に計算値と観測値間の相関係数を算出した。その結果を図-7に示す。

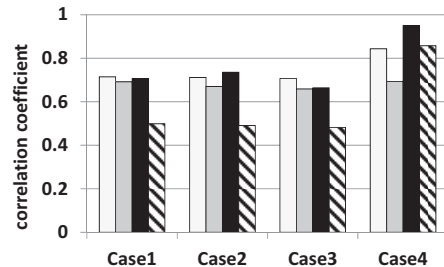


図-7 日照時間別にみた全天日射量の観測値と計算結果の相関係数(白棒はG1, 灰色棒はG2, 黒棒はG3, 斜線入り棒はG4)

快晴日であるG1はCase1～Case3では相関係数が約0.7となったがCase4は約0.8と他のケースと比較すると1番良い結果となった。Case4は曇天日もG2を除き、G3・G4において他ケースよりも高い相関係数を示している。特にG4の相関係数は他のケースの約2倍の結果となり、相関係数だけみるとCase4が最良となった。次に、計算期間1ヶ月間の積算日射量の差異を解析した。なお、Case1～3は相関係数においてそれほど差がみられなかったため、全グループの相関係数が1番良かったCase1とCase4の比較を行った。その結果を図-8に示す。

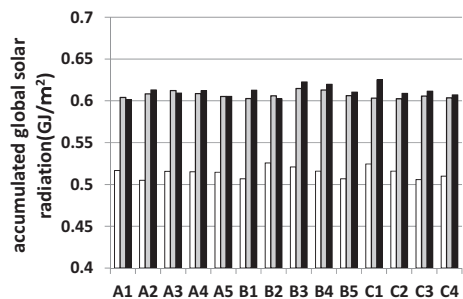


図-8 計算期間内の積算全天日射量の地点別比較

(白棒は観測値, 灰色棒はCase1, 黒棒はCase4を指す)

Case1の地点間差異は最大で0.012GJ/m²(Case1のA2の積算全天日射量の約2%に相当)、Case4の地点間差異は最大で0.024GJ/m²(Case4のA2の積算全天日射量の約4%に相当)となり、Case1とCase4の積算全天日射量の地点間差異には最大で2倍程度の違いが見られた。観測値の地点間差異は最大で0.021 GJ/m²(観測値A2の約4%)であり、地点間差異はCase4の方が再現性が高かった。し

かしながら、実測にみられる個々の観測地点間での積算日射量の大小関係については、Case1・Case4ともに再現性は不十分であった。続いてCase1とCase4の各ケースのA2地点の計算値を基準として、各観測点におけるmean biasおよびRMSEを日照時間別のG1～G4について算出した。その結果を図-9、図-10に示す。

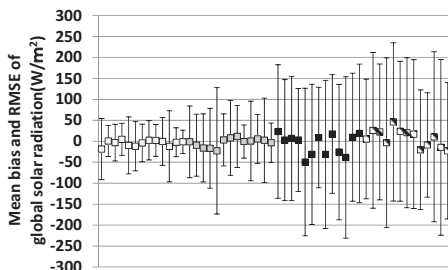


図-9 Case1のA2計算値を基準とした日照時間別・地点別日射量Mean biasおよびRMSE (白四角はG1, 灰色四角はG2, 黒四角はG3, 斜線入り四角はG4. 同グループ内は左から順にA1・A3・A4・A5・B1・B2・B3・B4・B5・C1・C2・C3・C4の地点に対応)

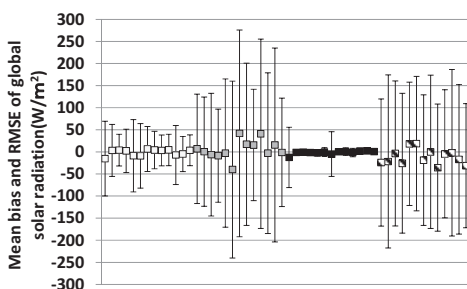


図-10 図-9と同様、但しCase4についての解析結果

相関係数の高かったCase4はG3のRMSEの値が小さく、実測日射量における日照時間別・地点別のRMSEを示した図-5と比較するとその振る舞いを十分に表現できていなかった。この観測値にみられたRMSEの傾向は、Case4以外のCase1～Case3において再現できており、さらにRMSEの絶対値 (A2地点日射量を基準とした地点間での日射量のばらつき) も概ね実測と整合していた。

5. まとめ

本研究では大阪都市域を対象に日射量を中心とした高密度・通年の気象観測を行ってデータを取集し、観測地点間における日射量の差異がどの程度であるか解析を行った。加えて、統合予測システムへの適用ポテンシャルを有する都市気象・建物エネルギー連成数値モデル

(以降、WRF-CM-BEM) について、その太陽光発電評価における性能検証に向けた基本的な検討として、日射量の予測を担うメソ気象モデルWRFの雲微物理過程について最適なオプションを明らかにすることを目的とした。その主な成果は次の通りである。

- ・大阪市域で通年で観測しているデータのうち2013年3月～7月の約4ヶ月を解析した結果、積算日射量でみた地点間差異は最大で約 0.1GJ/m^2 (基準地点A2の積算日射量の約5%に相当) であった。また、日照時間別にグループ分けして解析したところ快晴日であるG1とやや雲の多い日であるG2・G3では全天日射量のグループ毎の平均RMSEに2～3倍の差異がみられた。一方、同一グループ内でも全天日射量の地点間差異はG1よりG2・G3の方がばらつきが大きい傾向が見られた。
- ・WRFの雲微物理過程のオプションを変更し、4つの微物理モデルを対象に数値実験を行った。その結果、日照時間別にみた瞬時値日射量の相関係数ではCase4が他のケースより実測との相関係数が高く、特にG4では約2倍の相関係数を示した。また、積算全天日射量でみた地点間差異もCase4の方が観測値の表現が現実的であった。しかし、RMSEでみた日照時間別の瞬時値日射量の地点間差異はCase4において他ケースより再現性が低下する結果となった。これらのことから、実験対象とした雲微物理モデルの基本性能を概ね把握できたものの、最良なモデルの同定には至らなかった。

以上の結果を踏まえ、今後は他の雲微物理オプションの解析も行うとともに、都市域の地表面・大気熱収支をより現実的に表現する陸面モデルとしてCM-BEMも用い、これらの物理オプションが日射量の再現性に与える影響をより詳細に解析する予定である。その後、WRF-CM-BEMによる太陽光発電評価における性能検証も実施する予定である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究 (B) (代表：亀卦川幸浩, 24360218) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 大関崇・高島工・大谷謙仁・菱川善博・興水源太郎・内田恵久・萩本和彦, 太陽光発電の広域的ならし効果に関する分析・評価, 電気学会論文集 B, 130 巻 5 号, pp.491-500, 2010.
- 2) 塩谷正樹, 電力需要調整のための電力需要予測手法に関す

- る研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.
- 3) Kikigawa Y., A. Tanaka, Y. Ohashi, T. Ihara, Y. Shigeta : Observed and simulated sensitivities of summertime urban surface air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese Major Cities, Tokyo and Osaka, *Theor. Appl. Climatol.*, DOI 10.1007/s00704-013-0996-8, 2013.
 - 4) Skamarock, W. C. et al. : A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR/TN.475+STR, 2008.
 - 5) Kondo H., Y. Genchi, Y. Kikigawa, Y. Ohashi, H. Yoshikado, H. Komiyama : Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance, *Bound.-Layer Meteorol.*, Vol.37, pp.395-421, 2005.
 - 6) Kikigawa Y., Y. Genchi, H. Yoshikado, H. Kondo : Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban building's energy-demands, *Applied Energy*, Vol.76, pp.449-466, 2003.
 - 7) Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, S. A. Clough : Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), pp.16663-16682, 1997.
 - 8) Dudhia, J. : Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, pp.3077-3107, 1989.
 - 9) Kain, J. S., J. M. Fritsch : Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, pp.246, 1993.
 - 10) Janjic, Z. I. : Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, No. 437, pp.61, 2002.
 - 11) Monin, A.S. and A.M. Obukhov : Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci., USSR*, (151), 163-187 (in Russian). 1954.
 - 12) Chen, F., J. Dudhia : Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, pp.569-585, 2001.
 - 13) Lin, Y.L. R. D. Farley, H. D. Orville: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1065-1092, 1983.
 - 14) Hong, S.Y., J. Dudhia, S.H. Chen.: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103-120, 2004.
 - 15) Hong, S.Y., J.O. J. Lim : The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129-151, 2006.
 - 16) Thompson, G., R. M. Rasmussen, K. Manning : Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 519-542, 2004.
 - 17) 山岸良雄・藤井康正, 気象庁地域気象システムデータを用いた任意地点日射量推定手法の精度検証, 電気学会論文誌 B 電力・エネルギー部門誌, 132 (1), pp.65-70, 2012.
 - 18) Seigele, Z. T., L. M. Leslie, P. J. Lamb: Weather Research and Forecasting Model simulations of extended warm-season heavy precipitation episode over the US Southern Great Plains: data assimilation and microphysics sensitivity experiments, *Tellus Series A*, Vol.65, 19599, 2013.

(2013. 7. 19 受付)

VALIDATION OF NUMERICAL MODELS FOR PREDICTION OF URBAN CLIMATE AND PV POWER GENERATION BASED ON YEARLONG METEOROLOGICAL OBSERVATION IN OSAKA AREA

Yuki HIKICHI, Yukihiro KIKEGAWA, Yasuaki KATO, Yukitaka OHASHI
Yoshinori SHIGETA, Tomohiko IHARA and Minako NABESHIMA

In order to validate authors' numerical simulation system in the prediction of urban climate and PV power generation, a yearlong and multisite meteorological observation is being conducted in Osaka urban area. As a result of preliminary analyses of observed solar radiation, it was found that 4-month accumulated radiation has site-by-site differences up to 5% and instantaneous one of 50% at maximum. This spatial inhomogeneity of observed solar radiation was able to be roughly and statistically reproduced by the meteorological model WRF which is a sub-model of the simulation system, suggesting a promising performance of the system in the projection of urban PV power generation. The accuracy of the above reproduction of solar radiation by the model was also found to be dependent on the microphysics schemes in WRF indicating no single scheme excels in all aspects.