

## 第37回メソ気象研究会の報告

### —再生エネルギーとメソ気象との関わり—

#### 1. はじめに

コンピーナー：加藤輝之（気象研究所）

大関 崇（産業技術総合研究所）

2011年度春季大会前日に行われた第35回メソ気象研究会「メソ気象研究の将来展望・構想」（加藤ほか2011）では、メソ気象研究の今後の発展のためには①気象庁の役割が重要、②人材育成も含めた研究の継続が課題、③一般社会に対するアウトリーチが必要、④他分野との連携強化が必要だという議論がなされた。今回の研究会では、その議論の中での④へ向けた取り組みとして、昨年の大震災以降に脚光を浴びている再生エネルギーの活用に対してメソ気象学がなせる役割について多分野との連携も念頭において考えることにした。

太陽光や風力発電などの再生エネルギーを効率よく活用するためには、事前に日射量や地表風をできるだけ正確に予測するとともに予測誤差の見積りも必要であり、その予測技術を向上させるためにはメソ気象学の知見が強く求められている。そこで、「再生エネルギーとメソ気象との関わり」をテーマとし、春季大会前日の2012年5月25日（金）にメソ気象研究会を気象庁講堂で開催し、気象学会や気象庁関係者以外からの参加者約50名も含めて150名を超える参加があった。ユーザー側からの要求もふまえ、現状の問題点および解決すべき課題について話題を提供していただき、今後の連携についても議論したいと考え、コンピーナーから5名の方に講演を依頼し、総合討論では3名の方にコメンテーターを務めていただいた。

#### 2. 再生エネルギーの大量導入時のエネルギーシステムの計画・運用に必要な情報

荻本和彦（東京大学生産技術研究所）

電力システムでは、経済、産業、社会生活の高度化とともに、規模が拡大し、設備が多様化する中、経済

性、信頼性、運用性を確保するために、計画、運用を階層化してその機能を向上させてきた。有効電力のバランスについては、回転機の慣性、発電機のガバナーフリー運転（回転機の入力を調整して回転速度を一定に保つための制御装置（ガバナー）により周波数の変動に対して自由にガバナーを応動させて運転すること）、負荷周波数制御、経済負荷配分、発電ユニットの起動停止、補修と燃料調達という多層の階層が相互に補完し合って、電力システムの毎日の運用を成立させている。

日本で大きな供給量が期待されている再生可能エネルギーである太陽光発電と風力発電は、いずれも時刻、天候により発電量が変動する電源であり、その最大活用に向けては、電力システムにおける有効電力のバランスを随時確保するという、需給調整が難しい課題となる。この需給調整の課題解決には、従来行われてきた翌日や週間の需要予測同様、毎日の運用計画および運用そのものに太陽光発電や風力発電の発電予測を取り込むことが必須である。

発電予測は、一定の時間、空間の分解能における発電量の予測である。電力システム全体の運用においては、電力システム全体における太陽光発電や風力発電の合計の発電量とその変動幅を毎時あるいは30分毎に、さらにそれより細かい時間解像度で、一定の精度を確保して予測することが必要となる。また、コミュニティなどの規模の小さい範囲での需給運用やメガソーラー（大規模太陽光発電所）、ウィンドファーム（大規模風力発電所）の1サイト、複数サイトの運用においては、その地点での発電量の予測に求められる時間分解能と精度で必要となる。精度の高い発電予測や需要予測を、個別システム、建物、地域のシステムの需給運用あるいは発電所の運用に組み込むことで、それぞれの経済性、信頼性、安定性を維持向上させることが可能となる。

再生可能エネルギーの導入あるいは電力事業の構造の変化などの必要に応じて、電力システムの運用も

徐々に変化する。新しい形態の運用においては、発電予測に求められる要件も変化するとともに、発電予測の精度が電力システムの運用、ひいては将来に向けての設備計画に大きく影響すると考えられる。今後の数値予報を基盤とした発電予測の発展が期待される。

3. 気象庁数値予報モデルにおける放射過程

長澤亮二（気象庁気候情報課）

数値予報モデルを用いた日射量予測には、主に

1. 放射計算に入力する雲情報  
(雲分布・雲量・雲水量・雲粒有効半径等)
2. 放射計算での雲の効果の取り扱い  
(雲放射スキーム)

の2つが重要となる。

本発表では、気象庁メソモデルによる日射量予測に注目が集まっていることに鑑み、気象庁の数値予報モデルの放射スキーム（特に日射量予測に関連する部分）について説明した。

気象庁の数値予報モデルは、天気予報作業に用いられる現業モデルであることから計算コストに厳しい制約があり、放射計算も計算精度とコストの兼ね合いを考慮しつつ様々な近似や簡略化がはかられている。

気象庁全球モデルの短波放射スキームの概要を第1表に示す。気象庁メソモデルの短波放射スキームもほぼ同じと考えてよい（長澤 2008）。

近年得られている放射過程の知見と全球モデルの短波放射スキームを比較すると、特に雲の効果の扱いについて全球モデルでは大幅な簡略化がはかられていることがわかる。引き続き、計算コストを考慮しつつ放

射スキームの精緻化を進めていく必要がある。

4. 太陽光発電量予測に向けた気象庁メソモデルの日射量検証

大竹秀明（産業技術総合研究所）

太陽光発電電力量の予測・推定や他の発電システムと連帯した電力システムの安定化を図るためにも日射（短波放射）量の予測誤差の把握が現在求められている。今後大量に太陽光発電（Photovoltaics; PV と略す）システムが導入されることが検討されている中で（PV2030に関する見直し検討委員会 2009）、気象庁メソモデル（MSM）を用いた翌日の太陽光発電量の予測が期待されている。近年ではMSMのGPVデータを用いた工学的な手法による発電量予測に関する研究もある（たとえば、da Silva Fonseca Jr. *et al.* 2011）。MSMの予測値を用いて、翌日の発電量予測を行うためには、予測値が地上の観測値に比べてどの程度の予測誤差を含むのかを把握する必要がある。ここではMSMの日射量の予測値の予測誤差特性について報告する。

全国の各気象官署（約50地点）の全天日射量データを用いた観測値からの予測誤差について平均誤差（ME）と平方根平均二乗誤差（RMSE）の2008年から2010年にかけての月毎の時系列を調べると、MEでは $\pm 50 \text{ Wm}^{-2}$ 以内であり冬季の過大と夏季の過小傾向が顕著であった。また、RMSEでは $90\text{--}180 \text{ Wm}^{-2}$ の範囲で梅雨期の6、7月付近での予測誤差が大きくなっていった。関東地方から西日本にかけて、特に南西諸島から日本の南海上では夏季の予測された日射量の過少傾向が顕著であることなど日射量の予測精度に地域・季節特性があることがわかった。

天候別にみると快晴日では予測された日射量は特別値レベルでも観測値にほぼ一致しており、これはモデルの晴天放射過程は非常に高精度であることを示している。一方、低気圧などに伴う光学的に厚い雲が生じる場合でも予測された日射量は観測値に近かった。

さらに、日射量の日積算値をもとに予測値の観測値からのずれが大きい81事例（2008年–2010年）について雲のタイプの出現頻度を調べると、下層雲では積雲と層積雲の割合が同程度に見られた。上層雲では概ね巻雲が観測され、また中層雲では高積雲が観測されている場合が多かった。層状性の雲の場合、もしくは降水を伴わないような雲が出現する場合において予測値の観測値からのずれが大きくなる傾向がある。

第1表 気象庁全球モデルの短波放射スキームの概要。

短波放射領域の分割数	22バンド ( <i>k</i> -分布法)
放射伝達方程式の解法	two-stream approximation ( $\delta$ -エディントン法)
考慮する水物質の形態	雲水と雲氷のみ
放射計算に入力する雲情報	湿潤過程で計算した雲 (雲量、雲水・雲氷量)
雲粒有効半径	雲水有効半径は、海陸分布に従い固定値 雲氷有効半径は、雲氷量と気温から診断
雲の光学特性	光学的厚さ・一次散乱アルベド・非対称因子を雲水・雲氷量と雲粒有効半径から診断
雲のオーバーラップ	ランダムオーバーラップを仮定

今後、予測誤差の解析結果をもとに日射量予測及び発電量予測の精度向上に向けた MSM の雲-放射過程の改良が求められている。

また、近年気象分野とエネルギー分野の連帯に向けた国際会議も開催され活発な議論がなされているので合わせて紹介しておきたい (大竹ほか 2012)。

## 5. 気象情報を利用した風力発電出力予測について

早崎宣之 (伊藤忠テクノソリューションズ)

風力発電の導入促進上の阻害要因の一つとして、風の変動に伴う出力変動に起因する電力系統の周波数変動問題がある。この問題を解消するための電力系統安定化対策に係る基盤技術の一つに、気象予測に基づく風力発電出力予測システムの導入があり、風力発電先進地域のスペインなどでは、風力発電出力予測がすでに実用レベルとして利用され、導入量の拡大並びに系統運用コストの削減に大きく貢献している。

一方、風力発電出力予測システムは一部で実用化されているが、十分に利用が進んでいない現在の日本では、出力変動の大きい風力発電による電力は電力系統を安定に保つ際の阻害要因となっており、日本における風力発電の導入促進に向けた課題の一つとなっている。

電力会社における風力発電出力予測技術開発の取り組みや、NEDO 技術開発機構の委託事業で開発された電力系統制御エリアを対象とした風力発電出力予測システムの技術開発成果の概要について紹介をおこなうことで、我が国における気象予測を用いた風力発電出力予測技術の現状について報告をおこなった。風力発電出力予測は一般に、数値予報モデルの計算結果がベースになっており、風力発電出力の予測結果に大きな影響を与える。数値予報モデルにおいて、強風を伴う低気圧の進路予測に誤差が発生した場合、風力発電出力予測に大きな位相誤差が発生することになり、風力発電出力予測の大外れの原因となる。今後、風力発電等の再生可能エネルギーの導入が進んでいくと、風力発電出力予測に大外れが発生した際には、電力系統運用に大きな影響を与えることが認識されており、再生可能エネルギーの大量導入時における安定的な電力系統運用のためには、数値予報モデルの更なる精度向上が期待されている。

## 6. 大気境界層内の乱流と数値モデルが表現する風速

伊藤純至 (東京大学大気海洋研究所)

大気境界層の風速変動をより精緻に捉えるため、水平解像度を 1 km 程度に高めた数値予報モデルの運用が現実的になりつつある。一方で、水平解像度が境界層のスケールと近づくと、大気境界層のモデル化時の水平一様の仮定が揺らいでしまい、従来の境界層モデルの利用は正当化されない。このような解像度では今のところモデル化の有力な指針がなく、「Terra Incognita (未知の領域)」とされている。

Large Eddy Simulation (LES) によって対流混合層を再現し、計算結果に水平の Terra Incognita スケールのフィルターをかけたものは、乱流モデルの計算結果の正解とみなせる。乱流クロージャとして MYNN (Improved Mellor-Yamada) Level 3 モデル (Nakanishi and Niino 2009) を利用する気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) で、水平解像度を Terra Incognita スケールとした計算を実行し、比較した。JMA-NHM では、乱流変動は本来境界層モデルのフラックスとされるべきだが、Terra Incognita のある水平解像度以下になると、グリッド上で表現される乱流フラックスと、MYNN Level 3 による乱流フラックスが共存するようになる。水平解像度を小さくしていくと、徐々に前者が卓越し、LES とみなせるようになる。Terra Incognita において、温位の鉛直分布など、平均量はレファレンスと比較してそれ程大きな違いは表れなかったが、変動成分に関しては、温位、風速ともに大きな違いがみられた。

## 7. 総合討論

加藤輝之 (気象研究所)

原 旅人 (気象庁数値予報課)

日下博幸 (筑波大学計算科学研究センター)

大関 崇 (産業技術総合研究所)

コメンテーターとして原 旅人氏、日下博幸氏、大関 崇氏の 3 名にお願いして、以下にまとめたコメントの内容に沿って総合討論を行った。その内容からは数値予報モデルの開発者側と利用者側で立場は変わるものの、数値予報モデルの精度向上が両者で望まれていることがわかり、そのためにも今回のような情報交換の場は非常に有意義であったと考えている。

原は「数値予報モデルにおける放射と雲」についてコメントした。数値予報モデルにおける雲がない場合

の放射過程は非常に精度が高く、完成度の高いものになっている。その一方で、雲がある場合には、雲の放射特性の評価、さらには雲の出現そのものの予報など、まだまだ改善の余地が多く、放射過程だけではなく境界層、雲物理、さらには力学や初期値の作成手法などが密接にかかわっている。そのため、放射量予測には、放射過程だけではなく、雲を中心としたモデルの総合的な性能が問われる。数値予報モデルは、現象の理解を元に構築された“モデル”であり、その開発や性能向上のためには現象の理解とそのモデル化が必要である。また、モデルの問題点を見出すための検証も重要である。モデルのコードを修正するという直接的なモデル開発だけでなく、未知の現象を解明する、または検証に有用な観測データの利用方法を示すといったことも、モデル開発にとって非常に有益であると同時に、モデル開発者にはなかなか手が回らないところでもある。このように、モデルの性能向上のためには、さまざまな気象の専門家が連携して取り組むことが必要であり、太陽光発電のための放射予測のような社会的に重要なテーマをきっかけにその連携を深めていきたい、との見解を表明した。

日下は「日射量・風速予測に対する気象学分野と計算科学分野の連携」という題目で、日射量・風速の短時間予測の課題と、それに対する分野間の連携についてコメントした。日射量の短時間予測の課題の一つは、雲の変動予測であり、もう一つは、雲と放射の関係式の精度向上であろう。とりわけ後者については、短時間予測だけでなく翌日予測にとっても大きな課題だと思われる。

風速の短時間予測の課題は、風速変動の予測であろう。現在のメソモデルの多くは、乱流をアンサンブル平均しているため、例えば時間分解能を高くしても、得られる風速は10分平均値のようなものである。時間平均やアンサンブル平均を施さないLESモデルであれば、時々刻々と代わる風速変動を表現することはでき、少なくとも乱流統計量の予測が精度良くできると期待される。ただし、流入境界条件の問題や計算時間の問題など克服しなくてはならない課題は多い。

以上のような日射量予測や風速予測の問題に対しては、気象学分野はもちろんのこと、画像・データベース・大規模高速計算機などの計算科学分野の果たす役割も大きいと思っている。雲の短時間予測についてはパターンマッチングや柔軟移動物体追跡法などの情報工学分野、LESに関わる諸問題の克服には数値流体

力学分野の知見が大いに役立つと期待している。太陽光発電量予測ならびに風力発電量予測に対する気象学分野と情報工学・数値流体力学分野の連携を推進していくことで、新たなステージに進めると個人的には考え、現在日下らはそのようなチーム作りを行っている。

大関は「太陽光発電の発電電力推定のための期待」についてコメントした。発電予測では、数値予報モデルをベースとした物理モデルと、バイアス調整など工学的なモデルの組み合わせで構成される。基本的に「予測」というのは数値予報モデルの出力であるため、後段の工学モデルは、数値予報データから発電電力への「変換、推定」を意味する。そのためここでは、「発電電力推定のため」とした。当面は物理モデル、工学モデルの両面において研究開発が必要であり、このような研究会は非常に重要である。

現在、太陽光発電、電力運用という面では、前日に翌日の30分単位の発電予測がもっとも重要視されている。当面は予測誤差がどの程度統計的にあるかを把握することが重要である。しかしながら、予測には当然限界があるため、次の段階として大外れの可能性を予測することが期待される。工学的な手法においても統計的に信頼性区間を推定することは可能であるが、物理モデルにおいてもアンサンブル予測を利用した信頼性区間の縮小に期待している。

最終的に必要なのはピンポイントよりも広域エリアでの合計発電電力の予測であるので、放射（日射）を変動させる現象のスケール間（雲の大きさ）位置ずれや時間遅れが起こる空間的なスケール間の程度、エリア全体（電力管内）で大幅に外れる可能性が雲の再現度どの程度想定されるのか等々、気象学からの知見や情報の共有が重要である。また、最近では電力会社を中心に太陽光発電の変動特性の分析が進んだ。その結果として、短時間予測（1～3時間先）のニーズが今後高まることも予想されている。現状、約6時間先までは衛星画像を利用した予測などの推定技術の方が有利とされるが、数値予報を用いた短時間予測の可能性、数値予報と衛星画像による推定を組み合わせた手法の開発なども今後期待したい。

## 謝辞

今回のメソ気象研究会を開催するに当たって、会場の準備・運営をしていただいた気象庁数値予報課、気象研究所予報研究部の有志の方々ならびに筑波大学連

携大学院（気象研究所）の学生のみなさまに感謝します。

#### 参 考 文 献

- Da Silva Fonseca Jr., J.G., T. Oozeki, T. Takashima, G. Koshimizu, Y. Uchida and K. Ogimoto, 2011: Use of support vector regression and numerically predicted cloudiness to forecast power output of a photovoltaic power plant in Kitakyushu, Japan. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Early View, doi:10.1002/pip.1152.
- 加藤輝之, 新野 宏, 吉崎正憲, 石原正仁, 藤吉康志, 斉藤和雄, 坪木和久, 2011: 第35回メソ気象研究会の報告—メソ気象研究の将来展望・構想—. *天気*, **58**, 819-824.
- 長澤亮二, 2008: 放射過程. 数値予報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 149-165.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895-912.
- 大竹秀明, 嶋田 進, 2012: 第1回エネルギーと気象学の国際会議 (ICEM) への参加報告. *天気*, **59**, 351-355.
- PV2030に関する見直し検討委員会, 2009: 太陽光発電ロードマップ (PV2030+) 「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) に関する見直し検討委員会」報告書. 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 125pp. <http://www.nedo.go.jp/content/100116421.pdf> (2012.6.11閲覧).