

2016年度秋季大会スペシャル・セッション

「気象予測・観測技術の再生可能エネルギー分野への応用」報告*

大竹 秀明^{*1}・宇野 史睦^{*2}・嶋田 進^{*3}
宇田川 佑介^{*4}・中島 孝^{*5}

1. はじめに

日本気象学会2016年度秋季大会の初日（2016年10月26日（水）、名古屋）において、スペシャル・セッション「気象予測・観測技術の再生可能エネルギー分野への応用」が開催された。2015年に引き続き2回目の開催であったが（大竹ほか 2016）、100名程度の聴衆が来場され活発な質疑・意見交換が行われた。セッションは大きく3つのパートに分け、前半は太陽光発電関連、次に風力発電関連、最後にEMS関連の話題提供がなされた。

本稿では、日本気象学会会員の皆様に気象データが再生可能エネルギー（以下、再エネと略す）、エネルギーマネジメント（Energy Management System, 以下EMSと略す）の分野において、どのように利活用が検討されているのか情報共有することは重要と考え、当日の研究発表やその質疑・議論の内容を記載す

る。また、関連情報として、海外の再エネ分野における気象データを活用した最新の研究動向、プロジェクト研究やシステム開発などのトピックについても報告する。（大竹秀明）

2. 太陽光発電

本スペシャル・セッションの最初に日射量・太陽光発電の発電電力量（以下、発電量）の推定、その予測に関する講演が行われた。発表件数は4件（口頭3件、ポスター1件）と多くはなかったが、地上観測・衛星観測・気象予報モデルと取り扱われるデータ・手法は多彩であった。日射量予測を利用したEMSに関する講演は4節で述べる。

はじめに、田中氏（慶応義塾大学）より、日射量の時系列データの非類似度を用いたクラスタリング手法に関する講演が行われた。日射変動の近い地点をまとめることで、日射量予測モデル（機械学習）の計算コスト削減、延いてはモデルの高精度化につながることを述べた。クラスタリングの結果から、関東と中国地方が同じクラスに属し、また中部地方の内陸部で1つのクラスができるなど特徴的な分布を示した。田中氏は講演の最後に上記の結果と気象現象との関連性について会場へコメントを求めたが、質疑の時間が短く十分な議論ができず残念であった。しかし、他分野の研究を気象分野の中で議論することは両分野の融合発展にとっても重要な機会である。

竹中氏（宇宙航空研究開発機構）は、気象衛星ひまわり8号を用いた衛星推定日射量に関するプロダクト（太陽放射コンソーシアム 2014）の紹介とそれを発展させた短時間予測技術に関する講演を行った。同氏は多パターンのベクトル解析により確率予測として日射

* A report of the special topic session “Application of meteorological prediction & monitoring technologies for renewable energy field” at the 2016 Autumn Meeting.

^{*1} (連絡責任著者) Hideaki OHTAKE, 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター, hideaki-ootake@aist.go.jp

^{*2} Fumichika UNO, 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター.

^{*3} Susumu SHIMADA, 産業技術総合研究所再生可能エネルギー研究センター.

^{*4} Yusuke UDAGAWA, 東京大学生産技術研究所/株式会社構造計画研究所.

^{*5} Takashi Y. NAKAJIMA, 東海大学.

量の短時間予測値を算出した。これは、従来の雲の移動ベクトルを用いた決定論的な予測手法と異なる点でも興味深い。このような高い時間・空間解像度の日射量や太陽光発電による発電量データが均一な品質で提供されることは、太陽光発電研究の発展に重要であり、地球科学分野から電力分野への技術の橋渡しの一つの成功例であろう。

筆者（宇野）は、太陽光発電予測の極端な誤差事例において、複数の予報機関による全球アンサンブルスプレッドを利用することで、気象庁メソモデルの日射量予測の大外しを事前に予見できる可能性を示唆した。気象分野で開発が進むアンサンブル予測など気象予測技術の再エネ分野への適用可能性について調査することは重要であり、学際的な研究を推進する上で必要な議論であると考えられる。（宇野史睦）

3. 風力発電

風力発電のセッションについては、NEDO 風力発電予測事業（事業名：電力系統出力変動対応技術研究開発事業；参画機関：東京大学、早稲田大学、筑波大学、日本大学、電力中央研究所、一般財団法人エネルギー総合工学研究所、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社、一般財団法人日本気象協会、その他）（NEDO 2015）の関連発表2件、同じくNEDOの洋上風況マップ事業（事業名：洋上風況観測システム実証研究；参画機関：産業技術総合研究所（以下、産総研と略す）、神戸大学、アジア航測株式会社、風力エネルギー研究所、海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所、フグロジャパン株式会社）の関連発表2件、合成開口レーダおよび領域気象予報モデル（WRF）の解析結果に基づく海上風推定に関する発表1件の合計5件の口頭発表があった。

まず、加藤氏（日本大学）より、NEDO 風力発電予測事業において進めているランプ（風の急変事象）予測に関する発表がなされた。WRFによる風の予測値と過去の気象官署で得られている海面気圧の主成分分析により、75時間先までのランプ発生確率を予測する試みについて報告がなされた。質疑応答では、海面気圧を介した方法ではなく、直接気象予報モデルによる風の予測値を使う方法もあるのではというコメントがあった。先行研究では、数時間から数日先までの風速そのものの期待値とその不確かさの幅を推定する事例は多いが、ランプの確率予報に関する試みは、特に日本国内を対象とした研究としては新しい印象があっ

た。

これに続き、永松氏（日本気象協会）より、同じくNEDO 予測事業の一環として行われている新島（東京都）における太陽光発電および風力発電の出力予測に関する発表があった。研究対象の新島は、東西方向の長さが約3 km および南北方向が約11 km の伊豆諸島に位置する離島で、この新島の非常にローカルな日射や風を予測する試みが行われている。その一つとして、通常、日本気象協会でも運用しているWRFベースの予測システムよりも水平解像度が高い1 km 格子の予測結果について報告があった。地形再現性の向上に応じて風向風速の予測結果が改善されたという結果に対して、質疑応答では、1 km 格子よりさらに高解像度化した場合の精度改善の可能性に関して質問が及んだ。

さらには、島田氏（弘前大学）より、合成開口レーダおよびWRFの解析結果に基づく北日本における地形性強風の発生メカニズムに関する発表があった。夏季の宗谷海峡から東北地方にまで至る広い範囲で強い東風が発生するときの状況として、北太平洋上の大気境界層下層における冷氣と強い関連があること等が示された。質疑応答では、今回示された北日本の例と紀伊水道や伊勢湾などで見られる中部日本の海峡付近での地形性強風の発生メカニズムには関連があるか等、関連な議論がなされた。風力発電の研究および実務の分野でも日本全国の局地風の存在自体はよく知られているが、そのメカニズムまで踏み込んだ議論はなされず、日本気象学会ならではの発表と感じた。

また、大澤氏（神戸大学）より、NEDO 洋上風況マップ事業におけるWRFによる海上風シミュレーションの精度検証結果について報告があった。風車ハブ高さ相当（≒海面80 m 高）でのWRFの年平均風速推定誤差は±5%以内に収まることや、WRFの海上風シミュレーションにおいて海面水温データの精度やナッジングの設定方法が結果に大きなインパクトを与えることなどが示された。発表の結びには、洋上風力発電に関連した今後の気象学分野への研究の方向性として、海上風の実測をいかに低コストでしかも正確にできるかが実用化に向けた重要な要素であることが説明された。

最後に、嶋田（産総研）より、茨城県波崎海岸の観測栈橋で実施中の鉛直ライダー（光波による風向風速観測装置）を用いた海上風観測に関する研究発表を行った。海岸線上と400 m 長の観測栈橋先端に設置さ

れた2台のライダーの風速比より、吹走距離に応じて風速が増速される効果（フェッチ効果）がどの程度であるか発表した。

全体の感想として、2015年のスペシャル・セッション同様に、大型プロジェクトの研究動向を公に発表する場として非常に重要なセッションであると同時に、それ以上に、これまでの研究成果を風力発電研究へ新たに展開しようとする試みについての発表が含まれたことにこのセッションを開催する意義・価値を感じた。

海外に目を向けてみると、2016年の欧州風力エネルギー会議では、長期再解析値の利用方法が一つのセッションで集中議論されるなど、気象学と風力発電研究との関わりはこれまで以上に加速している印象がある。こうした国際的な動向を意識しながら、国内での気象学と風力発電研究とのブリッジとしての役割を担う活動を継続していきたいと考えている。

（嶋田 進）

4. エネルギーマネジメントシステム

4.1 電力システム

我が国の再エネ電源は風力発電と太陽光発電が主流であるが、これらの再エネ技術の導入推進、有効活用に必要なのが、蓄電池といった需要家側技術、そしてそれらの制御を司るEMS技術である。本セッションでは、5件の研究発表があり、気象学を機軸とした視点でのEMS技術、蓄電池活用、予測技術評価などについて議論を行った。

中島氏（東海大学）は現在、推進中のプロジェクトの紹介を行い、気象学と需要科学・電気工学のコラボレーションを通じた研究分野の学際的な融合について議論を行った。当プロジェクトは、地球科学とエネルギー需要科学とのデータ・インターフェースを果たしており、EMSの可用性をHindcastデータで確認するなど、地球科学データによってエネルギー需要は如何に影響を受けるのか？という視点が先鋭的であった印象を受けた。

南波氏（首都大学東京）は、日射量予測の修正・変更に合わせた蓄電池の充放電制御手法について発表を行った。電力システムの運用では、供給力としてエネルギーが必要だが、時々刻々と変動する供給力と需要をバランスするためには調整力としてのエネルギーも必要になる。そういった調整用の電源としての蓄電池の活用は近年着目されており、南波氏は、天候の変化

に対応できる蓄電池の運用手法、特に、運用計画の変更を含めた蓄電量の目標値の切り替えを考慮したモデル予測制御法について研究成果の講演を行った。日本気象学会でも蓄電池に関する発表が行われている点は、学会に対する社会のニーズの変化を感じたという意味でも印象に残った。

益田氏（名城大学）からは、日射量予測を活用した電力システムにおける需給制御への適用について発表が行われた。日々の電力システムの運用においては、ユニットコミットメントと呼ばれる発電機の運用計画の策定が行われるが、今後、再エネの導入に伴い、その影響をどのように考慮するべきか、その影響はどのくらいあるのかが大きな論点となっている。益田氏は、講演の中で、電力システムの基礎ではあるが、気象学をベースとする人達にとって理解が難しいユニットコミットメントの基本から丁寧に説明され、気象学と電気工学のコラボレーションが進んでいることを実感した。

続いて、筆者（宇田川）からは、気象学（特に、予測技術）は、電力システムにとってどのくらいの価値があるのか？という視点で発表を行った。電力システム運用シミュレーションを行い、太陽光発電の翌日予測の精度が電力システムの振る舞い（信頼性）、発電コスト（経済性）に与える影響について評価し、その報告を行った。

本セッションの最後には、野本氏（中部電力株式会社）から、実際に気象予測情報を利用して、電力システムの運用を行っている事業者としての貴重な発表を頂いた。中部電力エリアでの再エネの9割（水力発電を除く）が太陽光発電から構成されており、そのような状況下では、低気圧や前線の通過などのように広範囲に渡って雲が移動する場合、日射のならし（平滑化）効果が働かず、広域の日射量を足し合わせても変動が残ってしまう、という状況について報告がされた。また、実際に気象予測を用いる際の課題としては、予測値に対し実績値が入ると想定される幅（信頼度）などの付加情報の活用が挙げられた。

（宇田川佑介）

4.2 エネルギー需要

本セッションではさらに気象学とエネルギー需要の関係についての議論が行われた。太陽光発電量や風力発電量の把握など、気象学がエネルギー供給に強く関係していることは明らかである。一方で、近年では気

象学とエネルギー需要との関係もクローズアップされつつある。例えば、気温や日射（放射）によって建物の冷暖房負荷や給湯負荷が変化し、エアコンやヒートポンプの効率が決まる。さらに生活行為の時間配分や機器操作などの人間行動が気象要素によって変化する可能性がある。エネルギー需要における気象の影響を解明し、モデル化する作業はこれからの研究課題である。（中島 孝）

5. 総合討論

今回の講演タイトルからキーワードを挙げると、太陽光では日射量、発電量推定や予測（短時間予測、当日・翌日予測など）、風力発電分野では風況マップ、ランプ変動があり、また EMS の分野では、予測などのデータが電力システムにおいて需給制御や蓄電池などの制御にも使われ始めていることが述べられた。

会場からは、住宅のルーフトップの太陽光発電やメガソーラーなどからどの程度発電量が出ているのかを把握するために、実際どのように観測、データ収集を行っているのかという趣旨の質問があった。これに対して、メガソーラーなど大きな設備においては発電量がどの程度出ているのかをモニターする仕組が導入されているところもあるが、住宅などは自家消費する、または売電する場合もあるうえ、送電線の潮流データを計測・分析したとしても需要家側で使用する電力も含むため、発電量を正確に把握・推定することは難しい課題でもあることが回答された。また、実際にどの程度の発電量が出ているのかモニターすることは現在でも課題となっていることも述べられた。

そのような実測データが把握できていないところをカバーするように、例えば CREST 中島チームの TEEDDA (JST CREST TEEDDA 2017) が公開している気象衛星から地上の日射量を推定したデータはこれを補足するデータとして重要になることが述べられた。（実際には、発電量を推定するためには太陽電池モジュール（パネル）の設置分布、設備容量、傾斜角・向きなどの詳細な設備情報も必要。）

また、これまで多く議論されている雲の変動（発生、移動、発達、消散）が地上の日射量の変動に与える影響だけでなく、黄砂時などにおいても大気中のエアロゾルが直達日射量を減少させることで太陽光発電の出力低下を引き起こしている可能性があることも電力会社などから指摘されている。さらに、降雪による太陽電池システム上への積雪や融雪が出力変動に与え

る問題や、国内では最近すでに現象が確認されている火山灰による発電出力の低下の問題は、広域エリアを対象とした太陽発電の出力推定、予測に影響するため、今後そのような視点に向けた議論も必要となってくるということが指摘された。（大竹秀明）

6. 海外における出力予測の取り組み

本スペシャル・セッションに関連する話題として、欧州・米国における再エネ及び EMS を取り巻く研究や気象データを活用したアプリケーション開発に関する話題について紹介する。

6.1 欧州の事例

本節では、近年の欧州における再生可能エネルギーの研究動向を紹介する。主な内容は筆者（宇野）が2016年9月に5日間開催された欧州気象学会年次大会 (EMSAM) と欧州応用気候会議 (ECAC) の合同開催の会議における内容が中心である。この大会は5つのセッションに分かれており、最も大きな会場で丸二日間 Energy Meteorology というセッションが開催された。発表件数は太陽光・風力共に同程度であった。

気象予測手法のみで太陽光・風力発電の予測精度を評価している研究は少なく、様々な機械学習を用いた Post-process による補正まで含めた議論が多かった。日本の再エネ分野における気象予測の利用は決定論的予報の利用が主であるが、本会議ではアンサンブル予報の再エネ分野への活用方法についても多くの議論が行われていた。特に興味深かった講演では水平解像度 1 km として1000個の領域アンサンブルを実施し、全球予測・領域予測のどの段階でどの程度のアンサンブルサイズを確保すべきか、またアンサンブルメンバーのリサンプリングをどう決定すべきかといった議論が行われていた。この講演のように再エネの予測を焦点としながらも、気象予測手法に関する細かな議論が活発であったことが印象的であった。もちろん、静止気象衛星を利用した日射量分布の Nowcast や、ライダー観測を利用した風力発電施設における風の場の評価など、観測を中心とした研究も盛んに行われていた。これらの研究では短時間予測に変分法などのデータ同化手法や機械学習など様々な手法が利用され、その精度が議論されていた。

欧州の気象予測を利用した再エネへの応用に関する研究を見渡すと、太陽光・風力発電予測は予測値の信頼度、確率情報を含めて議論が行われている。一方

で、日本では予測の確率情報を踏まえた利用に関する議論は始まったばかりである。また、大規模な予測システムを構築している研究機関や民間企業が多く、地上観測・リモートセンシング・気象予測など様々な手法を併用し、機械学習等を用いて系統的なバイアスを除去することで予測精度を改善している。最終的には電力分野が利用しやすい電力量の情報などを提供することも試みている。米国でも独自の予測統合システムが構築されており、その詳細は次節を参照頂きたい。

(宇野史睦)

6.2 米国の事例

米国における気象予報・観測技術を利用した再生可能エネルギー分野への応用について紹介する。米国気象学会(AMS)の年次大会では、“Conference on Weather, Climate, Water and the New Energy Economy”といったエネルギー関連セッションが開催されている。このセッションは、関連する20弱程度の小セッションで構成され、出力予測・把握技術の向上やシステム開発、EMSへの応用利用に至るまで幅広く議論が行われている。

米国エネルギー省(DOE)ではシステムオペレータや送電事業者、配電事業者などの電力需給の安定化をめざして、出力予測に向けたプロジェクト“SunShot Initiative”(DOE 2017)を進めている。その中で、太陽光発電予測の精度向上のために、2012年12月には“Solar Forecast Improvement Project(SFIP)”(DOE 2012)が開始され、その予算規模は約9億円(2016年1月のレートにて換算)であった。NOAA/ESRLやNCARが共同で研究開発を実施している。2016年12月には、その後継プロジェクトSFIP2がアナウンスされ(DOE 2016)、その予算規模は約11億円である。風力発電予測の精度向上に対しては、Wind Forecast Improvement Project(WFIP)が実施され(DOE 2014)、現在はその二期目でWFIP2が継続されている。2017年1月に開催されたAMS年次大会においてもWFIP2に関する小セッションが開催されている。

これらのプロジェクトの研究成果を受けて、NOAAではSun4Cast(Haupt *et al.* 2016)と呼ばれる予測統合システムを構築している。その中の一部として、WRFを太陽光発電予測に特化、改良したモデル、WRF-SOLAR(Jimenez *et al.* 2016)の開発も進められている。Sun4Castでは天空画像や衛星画像

から雲移動ベクトルを利用した4、5時間先までの出力予測を行う短時間予測システム、数時間から翌日予測までを複数の気象予報モデルを利用したブレンド手法、予測値の不確実性を考慮した区間予測の各種プロダクトを出力するシステムを開発している。さらに、太陽光発電の出力へ変換した予測プロダクトを提供するシステムの構築が行われている。気象予報モデルの精度向上のほか、機械学習を利用したガイダンスモデルの構築など様々な取り組みが行われている。

(大竹秀明)

7. おわりに

今回のスペシャル・セッションは、講演申込みも多く、総合討論の時間が十分確保できなかった。そこで、議論の場として意見交換会をセッション開催当日の夜に企画した。気象分野と電力分野の交流を目的とし、当日に会場からも参加者を募り、計14名の方に参加頂いた。研究者だけでなく電力会社や民間企業からも参加があり、良い交流の機会となった。今後もスペシャル・セッションを企画した際は、このような場を積極的に設け、再生可能エネルギーの研究を直接実施していなくても、研究者・民間企業・学生など立場に関係なく、興味を持っている者同士が気軽に参加し、意見交換できる場を提供できればと思う。

欧州や米国でも気象と電力エネルギー分野の議論が地球科学や気象学を専門とする学会の中でも気象学者、民間企業、電力会社(新電力を含む)、電力市場関係者、DOE関係者らが一堂に会して行われている。また、様々なコラボレーションセッションがセッティングされ、新しい研究分野の探求なども進められている。

最近ではCMIP5の予測結果を利用した気候変動による全球の日射量変動に関する議論も行われてきているが(Wild *et al.* 2015)、将来気候も含めた電力需要に関する課題などはまだ議論されておらず、短期から長期の様々な時間スケールでの気象-気候-電力システム間の議論ができることが望ましい。

(宇野史睦・大竹秀明)

略語一覧

AMS: American Meteorological Society 米国気象学会

CMIP5: 5th phase of the Coupled Model Intercomparison Project 第5期結合モデル相互比較計画

CREST : Core Research for Evolutionary Science and Technology 戦略的創造研究推進事業
 DOE : U. S. Department of Energy 米国エネルギー省
 ECAC : European Conference on Applied Climatology 欧州応用気候会議
 EMS : Energy Management System エネルギーマネジメントシステム
 EMSAM : European Meteorological Society Annual Meeting 欧州気象学会年次大会
 GPV : Grid Point Value 格子点値
 JST : The Japan Science and Technology Agency 国立研究開発法人 科学技術振興機構
 NCAR : National Center for Atmospheric Research アメリカ大気研究センター
 NEDO : The New Energy and Industrial Technology Development Organization 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術研究開発機構
 NOAA/ESRL : NOAA Earth System Research Laboratory 米国海洋大気庁地球システム調査研究所
 WRF : Weather Research and Forecasting model

参 考 文 献

DOE, 2012 : Solar Forecasting, <https://energy.gov/eere/sunshot/solar-forecasting> (2017.3.3閲覧).
 DOE, 2014 : The Wind Forecast Improvement Project (WFIP). <https://energy.gov/eere/wind/downloads/wind-forecast-improvement-project-wfip-public-private-partnership-improving-short> (2017.3.3閲覧).
 DOE, 2016 : Funding Opportunity Announcement: Solar Forecasting 2, [https://energy.gov/eere/sunshot/funding-opportunity-announcement-solar-forecasting-](https://energy.gov/eere/sunshot/funding-opportunity-announcement-solar-forecasting-2)

2 (2017.3.3閲覧).
 DOE, 2017 : SunShot Initiative, <https://energy.gov/eere/sunshot/sunshot-initiative> (2017.3.3閲覧).
 Haupt, S. E. et al., 2016 : The Sun4Cast[®] Solar Power Forecasting System: The result of the public-private-academic partnership to advance solar power forecasting. NCAR Technical Note NCAR/TN-526+STR, 307pp.
 Jimenez, P. A., J. P. Hacker, J. Dudhia, S. E. Haupt, J. A. Ruiz-Arias, C. A. Gueymard, G. Thompson, T. Eidhammer and A. Deng, 2016 : WRF-Solar: Description and clear-sky assessment of an augmented NWP model for solar power prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1249-1264.
 JST CREST TEEDDA, 2017 : TEEDDA 「ていだ」, <http://www.nkj.ds.u-tokai.ac.jp/~teedda/> (2017.3.3閲覧).
 NEDO, 2015 : 電力系統出力変動対応技術研究開発事業, http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100069.html (2017.3.3閲覧).
 大竹秀明, 宇野史睦, 嶋田 進, 宇田川佑介, 中島 孝, 2016 : 2015年度秋季大会スペシャル・セッション「気象予測・観測技術の再生可能エネルギー分野への応用」報告. 天気, 63, 255-259.
 太陽放射コンソーシアム, 2014 : 太陽放射コンソーシアム. <http://amaterass.org/> (2017.3.3閲覧).
 Wild, M., D. Folini, F. Henschel, N. Fischer and B. Müller, 2015: Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. Sol. Energy, 116, 12-24.