

報告番号	甲 第 12317 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 ベータ回帰を用いた確率的日射量予測手法
 の構築
 (Development of probabilistic solar
 irradiation forecast based on beta
 regression)

氏 名 志賀 孝広

論 文 内 容 の 要 旨

1. 本論文の背景と目的

エネルギー保障や CO₂ 削減等の観点から太陽光発電(PV) や風力発電などの再生可能エネルギー（再エネ）の普及が強く促進されている。それに伴い、不確実性を持つ再エネ発電が大量に導入された電力システムを安定に効率的に活用するため、高精度・高信頼の出力予測の必要性が高まっている。また、需要家側においても、電気自動車(EV) やプラグインハイブリッド自動車(PHV)、定置型バッテリーや電気温水器などの蓄電・蓄エネ型の設備を PV と組み合わせて最適に運用するため、PV の出力予測は重要である。

このような PV 出力予測ニーズの顕在化にともない、2017 年 12 月から気象庁により日射量の予測値が公開されることとなった。しかし、予測には誤差が伴うことから、予測値だけでなく時々刻々変化する不確実性についての情報が必要である。特に、観測値が予測から大きく外れる「予測の大外れ」を事前に予見することは、リスク管理の観点から極めて重要である。

このような背景の下に本論文では、蓄エネ型設備の運用に資することを念頭に、PV 出力予測の基となる日射量についてその不確実性を定量的に予測する「日射量の確率的予測モデル」の構築を目指すこととした。

これを実現するための技術的課題として、変動する不確実性のモデル化に加え、日射量が下限と上限を持つためガウス分布で不確実性を表すことが難しく、「非ガウス性」を考慮する必要があることや、充電制御にとって重要である日積算日射量の不確実性をモデル化する

るために、日射量の時間相関の考慮が求められる点が挙げられる。

上記のような背景と技術課題を踏まえ、本論文では、以下のように達成目標を設定した。

- 《1》日射量の非ガウス性、及び、時々刻々と変化する不確実性を考慮し、予測の大外れを予見できる確率的予測モデルを構築する
- 《2》電気自動車などの充電を想定し、分単位や 10 分単位など短時間の日射量ではなく、時間積算日射量、及び、日積算日射量を予測する
- 《3》時間相関を考慮することにより、前日に立てた予測を当日の観測データを用いて更新できるようにするとともに、日積算日射量の確率的予測を実現する
- 《4》深夜時間帯が始まる前に判断できるよう、前日 22 時頃までに 20 時間先（翌日の日没）までの時間積算日射量の予測を立て、期待される発電量が少ない場合は深夜電力で充電するなどの制御計画を立案できるようにする

2. 本論文の内容

本論文は 5 つの章で構成される。各章の内容は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、前述の背景と技術課題を述べた上で研究の目的を定義し、関連する既往研究をノンパラメトリック及びパラメトリックアプローチに分けて紹介した。その中で、大外れを予見する点に優れると期待され、かつ意味のあるパラメータによりモデルを構築できる「パラメトリックアプローチ」、その中でも有限区間の確率分布である「ベータ分布を用いたモデル化」を用いることを説明した。

第 2 章では、後続の章で共通に用いられるデータと評価手法について説明した。データには、MSM-GPV と呼ばれる数値気象予報データとエアマスを説明変数に、地方気象台で観測された水平面全天日射量データを応答変数に用いることを解説し、説明変数に含まれる雲量、相対湿度、降水量、エアマスのそれぞれが、日射量に及ぼす影響に特徴的な違いがあることを述べた。また評価手法においては、「確率的予測モデルの良さ」には「予測分布が観測値の分布を正しく表していること(reliability)」と「予測分布がなるべく狭いピークを持っていること(sharpness)」の 2 つが重要であることを述べ、それぞれを図示によって評価する手法である reliability diagram と sharpness diagram を説明した。

第 3 章では、応答変数の不確実性をベータ分布によって表現し、かつその分散(dispersion)を可変とする「分散可変ベータ回帰(variable dispersion beta regression, VDBR; Ferrari ら、及び Simas らにより開発された手法)」を用いた確率的日射量予測手法を提案した。その際に、回帰関数が説明変数の影響を柔軟に表現できる関数形を選ぶことで、説明変数毎の特徴をモデルに取り入れた。VDBR による手法(model VDBR)を、ガウス分布に基づくモデル(model N) および分散固定ベータ回帰モデル(model BR) と比較した結果、model VDBR は予測分布の非対称性が顕在化する状況でも正しい分布を示すことが reliability diagram により確認できた。また、model VDBR に含まれる precision parameter $\phi(x)$ の値は、大外れの起こりやすさを示す指標として非常に有用であることが示された。このように分

布パラメータに意味を持たせることが出来る点は、パラメトリックモデルの特長であり、日射量予測に活用することができた。さらに、大外れを予見する性能を Threat Score, Precision, Recall 等の指標を用いて評価した結果、model N → BR → VDBR の順に、性能が高いことが確認された。

第4章では、第3章で構築したモデルを時間相関を考慮した物へと拡張した。各時刻の日射量の予測分布はベータ分布によりモデル化されているが、隣接時点間の日射量の同時分布をコピュラ（接合関数）により定式化する copula-based Markov process (Darsow らにより開発された手法)を採用することで、時間相関をモデル化した。その際に、「晴天は持続しやすいが、曇天は変化しやすい」という日射変動の時間相関の特徴を、Gumbel コピュラによりモデルに反映させた。その結果、観測値を用いて数時間先の予測の不確実性を減少させる得ることを sharpness diagram によって確認した。また、確率的に日射量シナリオを生成することで日積算日射量の確率的予測を行う手法を開発し、その予測分布の正確さを reliability diagram により確認した。これにより、充電機能を持つ設備を再エネと組み合わせ運用する際に、前日に翌日充電量のリスクを定量的に評価した上で計画を立て、さらに当日の観測値で予測を更新しつつ数時間先の運用を変更していくことが可能となった。

第5章では、上記の成果を総括するとともに、今後の課題をまとめた。課題としては、さらなる reliability や sharpness の向上などのモデル改良に加え、EV 等の充電制御や、電力市場におけるリスク管理・動的プライシングなどへの応用研究が挙げられる。