

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 12317 号
------	---------------

氏 名 志賀 孝広

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)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	加藤 丈佳
委員	名古屋大学	客員教授	舟橋 俊久
委員	名古屋大学	教授	早川 直樹
委員	名古屋大学	准教授	吉川 大弘
委員	名古屋大学	教授	鈴木 達也

論文審査の結果の要旨

志賀孝広君の論文「ベータ回帰を用いた確率的日射量予測手法の構築」は、近年急速に普及が進む太陽光発電の出力予測の基となる日射量について、その期待値だけでなく不確実性を定量的に予測するため、有限区間の確率分布であるベータ分布を用いたパラメトリックな手法を用いることに着目し、大外れの予見や時間相関の考慮による日積算値の確率的予測などを可能とする確率的予測モデルを構築するものである。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景として、電力システムにおいて太陽光発電などの再生可能エネルギー発電の大量に対応するため高精度・高信頼の出力予測の必要性が高まっていること、需要家側においても電気自動車などを太陽光発電と組み合わせて最適運用するには太陽光発電の出力予測が不可欠であること、一方で、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り、特に、リスク管理の観点からは観測値が予測から大きく外れる「予測の大外れ」の予見が極めて重要であることなどを述べている。また、確率的予測を構築する際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にガウス分布で不確実性を表すことが難しいこと、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ためには日射量の時間相関の考慮が求められることなどを挙げ、本論文の目標を整理している。

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ている。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ている。また、確率的予測の結果を評価するための手法に関して、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、それぞれの評価の概念を図示によって説明している。

第3章では、ベータ分布に着目した理由として、 $[0,1]$ 有限区間を持つこと、平均値や分散などを解析的な関数で表せるため実用性が高いことを述べ、「分散可変ベータ回帰(variable dispersion beta regression、VDBR)」を用いた確率的日射量予測手法(model VDBR)を構築している。model VDBRは、各種気象要素 x を説明変数として mean parameter $\mu(x)$ と precision parameter $\phi(x)$ を予測するものである。その高精度化・高信頼化には様々な気象要素の中から適切なものを説明変数として用い、日射量との関係性を考慮して $\mu(x)$ と $\phi(x)$ を定式化することが重要である。そこで本論文では、雲量等の各種気象要素と日射量との関係に関する気象学の知見を踏まえ、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ており、提案手法における創意と工夫がみられる。提案手法による確率的予測の結果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、特に予測値が小さい場合において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をreliability diagramによって明らかにしている。また、 $\phi(x)$ の値と大外れの起こりやすさとの関係性を評価し、 $\phi(x)$ が小さくなるほど大外れが急増し、 $\phi(x) < 6$ の状況では1時間日射量で 0.1 kWh/m^2 を超える外れが50%以上の確率で発生することを明らかにしている。このことは予測手法の利用者が大外れする可能性を予見するのに有用な情報であり、実用性の高い予測手法であることを示唆するものである。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、model N \rightarrow BR \rightarrow VDBRの順に性能が高いことを確認している。

第4章では、第3章で構築したモデルを拡張し、時間相関を考慮した確率的予測手法を構築している。ベータ分布のような非ガウス分布に従う複数の確率変数の同時分布は自明ではないため、本研究ではコピュラと呼ばれる接合関数の利用に着目し、1時間単位で見れば「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に関する知見を踏まえ、様々なコピュラの中からGumbelコピュラを採用している。その結果、reliabilityを維持しつつ、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によって確認している。さらに、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によって確認している。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ることを述べている。

第5章では、上記の成果を総括するとともに、今後の課題としてreliabilityやsharpnessの更なる改善が必要なこと、モデルに含まれるパラメータを自動更新するadaptive modelの構築が必要なことなどを述べている。また、電気自動車等の充電制御や電力市場におけるリスク管理・動的プライシングが期待されていることなど、確率的予測の応用における課題を整理し、本論文のまとめとしている。本論文で構築したベータ回帰を用いた確率的日射量予測手法は非常に有用性・実用性の高い手法であり、太陽光発電と電気自動車/プラグインハイブリッド自動車を中心としたエネルギーマネジメントに関する実証試験に適用される予定である。以上のことから、本論文の提出者である志賀孝広君は、博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。