

京都大学	博士 (工学)	氏名	長屋 太樹
論文題目	再生可能エネルギー電源の普及に伴う デマンドレスポンスを活用した電力需給調整に関する研究		
<p>本論文は、再生可能エネルギー（再エネ）が大量導入される時代において、従来の需給調整手法に Demand Response (DR) を組み込んだ合理的な需給調整手法の構築や地域経済循環分析に必要な域際収支の定量化方法を提案したものをとりまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、温室効果ガス排出量削減の国内外の動向を踏まえ、日本の電源構成の変化や再エネ増加に伴う課題について言及しており、加えて、電力の需給調整に求められる DR の役割を述べ、再エネ普及時に求められる地域経済循環分析について言及している。</p> <p>第2章では、京都大学における消費電力量を、高い時間分解能及び感度で定量している。再生可能エネルギーによって生じた電力を最大限活用するためには、施設間の電力の融通や、電力需要ピーク時間帯のシフトが必須となる。そこで、桂キャンパスにおける施設ごとの稼働状況を把握し、設備の稼働による消費電力量の変化を経時的に評価した。またこれにより、需給逼迫時などの緊急時に求められる消費電力量の抑制及び、設備の使用時間帯の変更などによる DR ポテンシャルを、電力量として定量評価するに至っている。当該キャンパスに設置された 1,652 個の電力メーターから取得した 30 分毎の消費電力量を用いて、1 日当たりの波形をクラスタリングすることで、各クラスターの DR ポテンシャルを試算した。DR のポテンシャルとして、施設の使用時間帯は変更できないものの、1) 使用電力量を減らすことができる需要抑制グループと、2) 使用電力量は減らすことができないものの、使用時間帯をずらすことができるピークシフトグループ、に分類することで定量化を図った。その結果、電灯、空調、圧縮機、フリーザーなどにより、当該キャンパス全体で 2,850 MWh の消費電力が制御抑制可能であり、4,900 MWh が消費のピーク時間帯からシフトが可能であると推定された。常に稼働している超低温フリーザーの節電可能性や、ヘリウム液化機に付随する圧縮機の運転時間を夜間時間帯にピークシフトすることで、消費電力量の削減効果が明らかとなった。なおこの削減効果の経済的価値は、年間 276 万円程度であった。</p> <p>第3章では、蓄電池の充放電制御による DR の検討を実施した。周波数調整などに用いられる、応答時間及び入出力電力的に高精度な DR を実施するためには、高速な Feed Back (FB) 制御が求められている。蓄電池によるこのような高精度 DR に必要となる、高速 FB 制御を実施するに際し、スマートメーターから取得できるパルス値の分解能が、蓄電池への FB 制御指示値及び制御指示量に対して、どのような変化を与えるかを定量することとした。50,000 pulse/kWh のパルス定数から 72 倍の高分解能性を有する、1,000 pulse/kWh の計器定数に変更することで、充放電指示量の絶対値の積算値が、3 日間平均で 19.0 %低減することを認めた。また放電指示量の積算値は、3 日間平均で 13.6 %低減し、充電指示量の場合は 3 日間平均で 31.1 %低減していた。この結果より、蓄電池への充放電量は減少することを認め、蓄電池容量を減少させることで、DR に必要となる蓄電池費用の削減に寄与できる可能性が示唆された。また、周波数調整に用いられるような制御精度（滞在率）についても検討した結果、パルス数の分解能向上により、12～15 時の時間帯で滞在率が 83.7～99.6 %に上昇し、15～18 時においても 85.0～93.2 %に上昇した。実際に系統運用者 (TSO) が周波数調整に利用するためには、滞在率が 90 %を超える必要があり、パルス数の分解能を向上させることで要件を満たす可能性を見出すことができた。</p>			

第4章では、DRにおけるベースライン (BL) の定め方を検討した。わが国では、DRのBLには、当日需要実績を踏まえた平均化法 (High 4 of 5) が利用されている。この平均化法によるBLをBL1とし、当日調整を実施した平均化法によるBLをBL2とし、比較することとした。加えて、従来手法であるBL1と、実際の需要電力との誤差を算出し、実際の電力需要と誤差量にLong Short-Term Memory (LSTM) を適用することで、当日調整の補正量を学習させ、BL1に補正量を加算したのとしてBL3を提案した。BL2とBL3の予測精度を比較するために、各BLの平均誤差 (ME) 及び平均絶対誤差 (MAE) を用いた。評価期間において、BL2とBL3の30分毎のMEには、大きな差は検出されなかった。一方、BL2とBL3の30分間毎のMAEは、それぞれ11.2 kW、8.1 kWとなり、BL3の方がBL2より3.1 kW小さい値を示した。さらに、これらの信頼区間を推定するために、各BLを実測値から差し引くことで誤差を算出し、その誤差分布の $\pm 3\sigma$ 相当を算出した。その結果、BL3の信頼区間はBL2の信頼区間より ± 9.2 kW低いことを認めた。BL2とBL3の誤差分布のF検定の結果、 p 値は極めて小さな値を示し有意であった。これにより、LSTMを適用した当日補正值と平均化法を組み合わせたBL3は、BL1及びBL2のような従前から利用されている平均化法よりも予測精度を向上させることが明らかとなった。

第5章では、自然変動電源のアグリゲーションによる発電予測誤差の低減を定量的に評価した。6拠点の太陽光発電施設を対象として、発電量の予測タイミングを実際の電力需給に近づけることにより、予測値と実績値それぞれのMAEの積算値の変化を比較した。いずれの拠点においても、発電予測タイミングが120、60、30、5分前と実需給に近づくとつれ、MAEの積算値が減少する傾向を認めた。その上で、空間的に偏在した複数拠点の太陽光発電量の予測に関し、発電予測タイミングを30分前から5分前へと実需給に近づけた際の、発電量の予測誤差量の変化を定量評価した。地点間距離が6 km以内の場合は、1拠点の日平均絶対誤差が0.45 kWh低減し、50 km離れた場合は0.23 kWhとなり、予測タイミング及び地点間距離に対する予測誤差量の関係性を明らかにした。

第6章では、再生可能エネルギー (以降、再エネ) 及び調整力を活用した需給運用における、地域経済循環分析の域際収支を試算した。再エネ普及に伴い必要となる調整力を活用した域際収支について、太陽光発電設備と蓄電池の有無による4つのモデルに分類の上、脱炭素化目標の達成に必要な各シナリオのすべての取引を図式化し、かつこれら取引を数式化した。また、複数の需要家の電力量及び複数の発電所の発電量に加え、蓄電池の充放電制御による需給調整を実測した値を用い、脱炭素化目標達成時の、モデル別域際収支の定量分析を試みた。電力調達費用、非化石証書調達費用、託送料金費用、インバランス精算金額、容量拠出金の費用、容量確保契約金額対価、三次調整力②の対価、プレミアム交付金の獲得、再エネ賦課金、太陽光発電設備導入費、蓄電池設備導入費を考慮した、域際収支の定量化モデルを開発した。欠測や設備の故障日などを除く77日の計測値から、再エネと蓄電池を共に保有しないシナリオ1と、共に保有するシナリオ4との間では、356百万円の域際収支の改善が見込まれた。

第7章は結論であり、今後の課題についても言及し、本論文で得られた成果について要約している。

本論文は、供給バランスに影響を与える、再生可能エネルギー電源が大量に導入された際の、需要側におけるデマンドレスポンス (DR) を活用した、新たな電力需給調整方法を提案し、ベースライン (BL) 設定をはじめとする当該方法の課題を定量的に評価することで、地域経済循環分析に必要な域際収支の定量化方法についても提案するものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

- 1) 京都大学桂キャンパスに設置された 1,652 個の電力メーターから取得した 30 分毎の消費電力量を用い、1 日当たりの波形をクラスタリングすることで、各クラスターの DR ポテンシャルを推定した。同時に、消費電力量の多い施設もしくは機器リスト群から、DR ポテンシャルを試算した。その結果、電灯、空調、圧縮機、フリーザーなどにより、キャンパス全体で 2,850 MWh の消費電力が制御可能で、4,900 MWh が消費のピーク時間帯からシフトが可能であると推算された。
- 2) 特定卸供給事業者であるアグリゲーターが、高速 Feed Back (FB) 制御に利用するスマートメータのパルス値について、電力量当たりの発信パルス数を変化させることにより、蓄電池への FB 制御指示値である充放電出力値及び充放電量がどのように変化するかを定量評価した。放電指示量は 3 日間平均で 13.6 %、充電指示量は 31.1 % 低減することを認め、三次調整力①の要件を満たす制御精度を得た。
- 3) DR を行う際は、BL を予測し需要設備を制御する必要がある。当日の需要実績を踏まえた平均化法 (High 4 of 5) と Long Short-Term Memory (LSTM) により、当日の調整値を加算した方法とを比較した。LSTM により算出した BL は、信頼区間が $\pm 9.22\text{kW}$ 低減し、両手法の誤差について F 検定した結果、P 値は極めて小さく有意であることを認めた。従前より用いられている平均化法と比較すると、LSTM による BL 予測方法が、より精度が高いことが明らかになった。
- 4) 太陽光発電設備間の距離が近くなる現状で、複数点の太陽光発電量の予測値に関し、発電予測タイミングを 30 分前から 5 分前へ実需給に近づけた場合の、発電量の予測誤差量の変化を定量評価した。6 km 以内の場合は 1 拠点の日平均絶対誤差が 0.45 kWh 低減し、50 km 離れた場合は 0.23 kWh となり、予測タイミング及び地点間距離に対する予測誤差量の関係性を明らかにした。
- 5) 出力抑制が頻発する中、再生可能エネルギー及び蓄電池などの調整力を活用した需給運用における、地域経済循環分析の域際収支を試算した。設備の故障日などを除く 77 日の計測値から、再エネと蓄電池を共に保有しないシナリオと、共に保有するシナリオとの間では、356 百万円の域際収支の改善が見込まれた。

本論文は、自然変動電源が大量に導入された際の、新たな電力需給調整方法を開発し、その精度などを定量評価したものである。今後のエネルギー管理及び、都市における計画的な再生可能エネルギー電源の普及に大きく貢献するものと判断されることから、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 1 月 29 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。