

風力発電等の再生可能エネルギーの最大活用に向けた取り組み

Approaches to maximize the use of wind power and other renewable energy

占部千由*

1. 「再生可能エネルギー分野で活躍する女性たち」のひとりとして

再生可能エネルギー(再エネ)分野で活躍する方々には、工学を学び、再エネ分野の専門性を身に着けた方が多いのではないと思う。筆者は物理学分野で博士号を取得し、応用数学や数理工学といった分野を経て、現在のエネルギー工学分野の研究をするに至ったので、異色の経歴と言えるかもしれない。

これまでの研究内容は、物体の破壊が進行する仕組みを調べる物理に関わるものや、感染症の流行を抑制するための方法を探る公衆衛生に関わるものなどを含み、分野横断的なものが多くあった。どの研究テーマも、とても奥が深く、全く分野の異なる研究テーマの間に思いもよらない共通点を発見することもあり、どれも楽しく研究をすることができた。

このような多種多様な研究テーマに取り組むことができたのは、筆者自身の好奇心の強さもあるが、現象をシステムとして捉え、ターゲットとする現象・対象から関係が相対的に薄い枝葉の部分の一旦切り落として、情報を整理する「数理モデリング」を基礎としてきたためであると考えている。

2. 数理モデリング

数理モデリングは、現在の研究テーマである再エネや電力工学のみならず、幅広い分野の課題解決の基盤となりうる。例えば、感染症の流行のような対象を研究する上でも有用である^{1,2)}。詳細は割愛するが、ワクチンという感染予防のための資源が限られている状況を想定し、罹患者数を抑えるための効果的なワクチン接種戦略を、数理モデルに基づいて検討した。感染拡大は、実世界で実験をすることは困難だが、数理モデリングを用いれば仮想的に実験を行うことができる。

数理モデリングの使い方の例を図1に示す。まずは、データサイエンスの手法を用いて「①データ解析」を行う。感染症の例では、罹患者の報告数やワクチン接種情報等を用いた解析となる。次に、「②数理モデリング」を行い、その「③数値シミュレーションと解析」を行う。ここで、現実とかけ離れたモデルになっていないか検証を行い、適宜数理モデルを修正する。検証をクリアすれば、その数理モデルを用いて、数値シミュレーションにより仮想実験を行う。様々な状況を想定して比較することで、より望ましい状態を実現するための条件を特定することができる。その結果から、「④対策の提案」を行うことができる。

3. 再生可能エネルギー分野へ

筆者は2014年に初めて風力発電に関わる研究に携わるようになった。当初は、この分野の予備知識を得るため、風力等の再エネ全般と電気工学等の情報を収集する必要があった。情報収集の過程で、OECD加盟国の31カ国が参加し、電力だけでなく

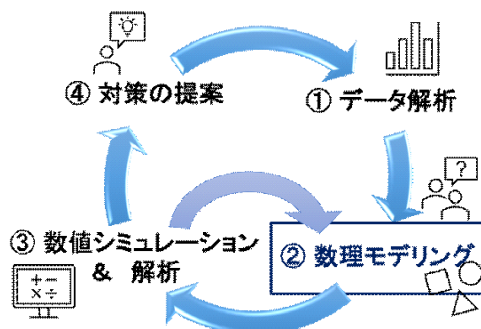


図1 数理モデリングの使い方の例

*名古屋大学大学院工学研究科，東京大学生産技術研究所

エネルギー全般に関する諮問機関である国際エネルギー機関（IEA）から出版された再エネに関する書籍3冊の翻訳に、監訳者のひとりとして参加させていただいた³⁻⁵⁾。

最初の書籍「The Power of Transformation（電力の変革）³⁾」は、2014年にIEAから出版され、再エネの導入が進む欧州での事例紹介や将来展望等が語られている。その2年後に出版された「Repowering Markets（電力市場のリパワリング）⁴⁾」では、低炭素化を推進する電力市場のあるべき姿について詳細に分析されている。さらに、その2年後に出版された「System Integration of Renewables - An update on Best Practice（再生可能エネルギーのシステム統合-ベストプラクティスの最新情報）⁵⁾」では、風力・PV発電を既存の電力システムに統合する際の導入段階別の課題について、事例を挙げて述べている。これらの3冊の書籍は新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）のウェブサイトで無料配布されている³⁻⁵⁾。

翻訳を通して、再エネ導入拡大とその課題が顕在化した2014年～2018年の欧州の情報を収集することができ、現在に至るまでどのような過程を経て再エネが導入されてきたかを知ることができた。

翻訳においては、当時まだ和語が存在しない専門用語もあったため、監訳者・訳者で議論をしながら翻訳を進めた。その過程においても、各自の専門からの意見があり、大変勉強になった。

また、書籍から情報を得るだけでなく、実際に現地に赴いて、海外の電力会社や国内外の風力発電所の視察を行ったことも良い経験であった。特に、2018年にアイルランドの電力会社における、日本の中央給電司令所にあたる施設を見学した際には、そこからオンラインで風力発電の出力制御が行われていると知り、電話での出力抑制依頼が主であった日本との違いに驚かされた。

4. 再生可能エネルギー大量導入における課題

著者が現在取り組んでいる再エネ導入の課題について述べたい。風力発電の導入量は年々増大し、2020年に世界では736.5 GW、日本では4.5 GW導入されており、将来の推定では、導入加速ケースで2026年にそれぞれ1408.5 GW（主ケース1269.8 GW + 加速分138.7 GW）と14.9 GW（主ケース12.9 GW + 加速分2 GW）とされている⁶⁾。仮に導入加速ケースが実現すれば、2020年から2026年という短い期間に、世界では風力発電導入量は約2倍にな

り、日本では約3倍に達することとなる。

また、太陽光発電（PV）についても、2020年に世界では738.1 GW、日本では71.9 GW導入されており、2026年には導入加速ケースでは、世界で2066.5 GW（1826.6 GW + 239.9 GW）、日本で117.0 GW（主ケース107.4GW + 加速分9.6 GW）と推定されている⁶⁾。この導入加速ケースが実現すれば、2020年と比べて2026年には、世界では3倍弱、日本ではおよそ2倍弱の導入量となる。

再エネ導入によりCO₂排出量が減ることで、電力分野から環境問題への貢献ができるが、再エネ導入拡大に伴う課題も存在する。気象条件によって出力が増減する風力やPVといった再エネが、有効な策もなく電力システムに導入されれば、電力システムの不安定化を招くことにつながる。そのような事態になれば、電力を安定して使用できない場面が発生し、生活や人の生命にも関わる問題へと発展する可能性がある。そのため、再エネの導入拡大には、長期的視点から検討を進める必要がある。

4.1 調整力の確保

再エネ大量導入に伴う課題の一つとして、需給バランス維持に必要な出力の増減能力である調整力の確保の問題が挙げられる。従来の電力システムでは需要の変動に対して、火力発電や揚水発電といった大規模な発電設備で出力を調整することで、需要と供給のバランスを維持してきた。需要は比較的精度高く予測することが可能であり、その予測外れ等を考慮して、火力・揚水発電で上げ代・下げ代として、調整力を準備した。しかし、風力・PV発電が再エネとして大量導入されることで、電力システム運用の状況は一変する。

風力・PVは天候によって出力が変動し、電力システム運用者が再エネ出力を上げるといったコントロールは基本的にはできない。そのため、風力・PVが大量に導入された電力システムでは、需要の変動に加えて、風力・PVの出力変動に対しても、需給バランスを維持するように調整力を提供する必要がある。

4.2 調整力の供給源

図2に示すように、全発電量に占める再エネのシェアが拡大すれば、従来は調整力を提供してきた火力発電の稼働率が低下し、調整力の提供可能量を減らすこととなる。一方で、再エネの発電量が増えることから、再エネの出力変動に対応するための調整力は多く必要となる。再エネのシェアが高い状況で、現状考えられる調整力の提供源には、再エネの

出力制御・蓄電池の活用・需要側技術の活用・電力システムの高度な運用などが挙げられる。

4.3 時間スケール別の調整力

調整力は時間スケールによって分類できる。図2では、縦軸を超短周期・短周期・長周期の調整力としており、表1には、現在考えられる時間スケール別の電力システム側の対応と調整力の確保方法などを示した。

時間スケール別の調整力について、要求される応答の時間が異なるため、対応する方法も異なる。再エネが大量に導入された電力システムにおいては、需給バランスを様々な時間スケールで維持するために、変動周期別の緻密な制御が求められる。

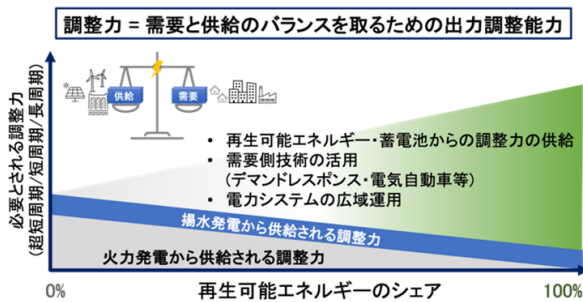


図2 再生可能エネルギー導入拡大に伴う課題

表1 変動周期と対応

変動周期	超短周期(VSTF) : 1分以下 短周期(STF) : 1分~数十分 長周期(LTF) : 数十分~
電力システム側の対応	VSTF : 火力発電の運転種切り替え
	VSTF&STF : 電力システムの広域運用
	STF : 火力機の出力調整速度と量の増加
	STF<F : 電力貯蔵設備(揚水)の活用 変電所設置蓄電池システムの活用
調整力の確保方法など	LTF : 気象予測システムの活用 火力機の最低運転可能領域の低減
	VSTF : 需給調整市場の活用(一次調整力)
	STF : 需給調整市場の活用(二次調整力①・②、三次調整力①)
	LTF : 需給調整市場の活用(三次調整力①・②) デマンドレスポンスの活用

5. 再生可能エネルギーからの調整力提供

調整力確保の問題に対して、まずは対象となる現象を明らかにするために、再エネの変動の特徴について把握する(図1の「①データ解析」にあたる)。

5.1 再生可能エネルギー(風力発電)の出力変動

北海道・東北・九州エリアの変動解析⁷⁾を例として用いる。東北エリアの風力発電出力合計値の時系列を超短周期変動・短周期変動・長周期変動に分離する。超短周期変動と短周期変動はゼロ点を中心に、揺れ動くものであり、長周期変動は出力のトレンドを示すものとなる。短周期変動について、ゼロ点を横切る隣り合う時刻の時間間隔を τ 秒、その間の最大の変動を Δp p.u.とすると、その関係は図3のようになる。単位のp.u.は、風力発電設備容量を1 p.u.として規格化したものである。例えば、(τ , Δp) = (1200秒, 0.1 p.u.)の点があれば、それは20分以内に風力発電の設備容量の1割にあたる短周期変動が発生したことを意味し、表1にある電力システムの広域運用や火力発電・揚水発電・蓄電池等で、その出力変動を相殺するように調整することになる。

東北や北海道といった日本の北部地域では、短周期変動の大きさに季節性がある。図4に東北エリアの月別の短周期変動の大きさ(最小, 1%値, 10%値, 90%値, 99%値)を示す。この図からも冬季に短周期変動が大きくなる傾向が見て取れる。

5.2 再生可能エネルギー(風力発電)の大幅な短周期変動事例

図4では、特に11月に大きな変動が発生している。これは、低気圧が接近し、複数の風力発電所が一斉にカットアウトしたためである。カットアウトとは、

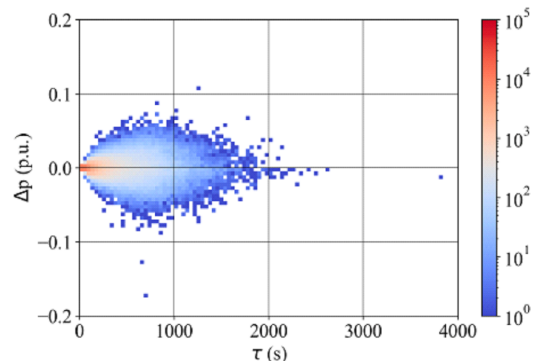


図3 2012年度の東北エリアの風力発電出力の変動特性：半周期 τ (秒)と変動の大きさ Δp (p.u.)⁷⁾(CC-BY 4.0ライセンス)

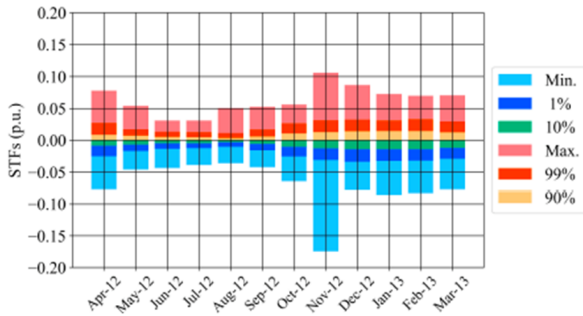


図4 2012年度の東北エリアの風力発電出力の月別の変動の大きさ⁷⁾ (CC-BY 4.0 ライセンス)

風が非常に強い時に、風力発電設備の故障を避けるために、ブレード（羽部分）の傾きを変えて、風を受け流すようにして衝撃を抑える制御である。最新の風力発電機では急峻な変動を引き起こすカットアウトを回避するためにストーム制御が採用されている。ストーム制御とは、風が強くなっても緩やかに出力を減らし、一定の風速以上で出力をゼロにする制御である。

また、急峻な出力変動を避けるための方法としては、風力発電所を広域に分散させて設置するという事も考えられる。それは、広い地域で同時に風が強くなる確率は低いため、仮にどこかでカットアウトが発生するような風の状況であっても、次節で述べるようにエリア全体での風力発電の合計出力に及ぼす影響を緩和できるためである。

5.3 再生可能エネルギー（風力発電）の ならし効果

風力発電所1地点では、個別の風力発電機の空間的設置エリアも限られるため、局所的な風の強弱によって、風力発電所からの発電出力は大きく変動する。一方で、広い地域に風力発電所が点在している状況では、どこか1地点で風が強くても、他の地点では風いでいる場合には、発電出力の増加と減少が一部相殺され、エリア全体での風力発電出力の合計値の変動は小さい範囲に収まる。また、このことから極端な地理的集中がなければ、一般的に風力発電の導入容量が大きいほど、全体での発電出力の変動は、ならされる。このような現象は、ならし効果と呼ばれる。

5.4 再生可能エネルギー（風力発電）の短周期 変動の季節性とならし効果

風が強い季節には短周期変動も大きくなる傾向があることから、実際に何が起きているのか調べるために、月別の長周期変動と短周期変動の関係を図5に示す。長周期変動は数十分以上の変動周期をもち、

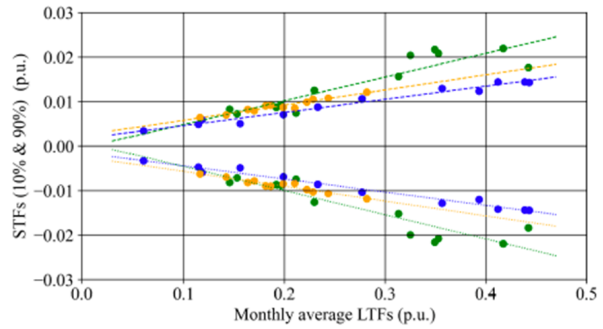


図5 月別の風力発電出力短周期変動の10%値と90%値
2012年度、北海道・九州・東北エリア7)
(CC-BY 4.0 ライセンス)

各時間での平均的な風力発電出力を表す。月別で比較するため、長周期変動は平均値を用い、平均値がおおよそゼロとなる短周期変動については、10%値と90%値を用いることとした。

図5の北海道・東北・九州のどのエリアにおいても、長周期変動が大きくなるにつれて、短周期変動の幅（10%値～90%値の幅）が大きくなっている。点線で各エリアのデータの直線フィットを示す。点線の傾きが急な順に、北海道・九州・東北となっている。

傾きが急であるということは、長周期変動がそれほど大きくないにもかかわらず、短周期変動が大きくなることを意味する。最も傾きが大きい北海道は、2012年時点では導入量が最小で、傾きが最も小さい東北エリアは、導入量が最大であった。導入量が多いエリアでは、ならし効果によって短周期変動が緩和されたと考えられる。

5.5 再生可能エネルギー（風力発電）の短周期 変動抑制制御

風力発電出力は日本の北部地域では冬季に増加し、短周期変動も大きくなることがわかった。また、より多くの風力発電所からの発電出力をまとめることで、ならし効果によって合計出力の短周期変動が抑制される。

電力システムの安定的な運用を難しくする可能性のある短周期変動を抑制するためには、より多くの風力発電所を束ねて、出力変動を管理することが有効である。さらに出力変動抑制を行うためには、北部地域の冬季の大幅な短周期変動にも対応可能な出力変動緩和策が必要である。

そのため、各エリアの風力発電出力の合計値の短周期変動を緩和する制御手法の検討を行っている。

新しい風力発電設備には、出力変化率制限運転や最大出力抑制運転といった機能が備わっており、これらを活用できれば、追加設備も不要で、短周期変動を抑制することを通して、風力発電設備側から電力システムへの貢献が可能と考えられる。

すでに予備段階の検討を進め、最適な制御によって、数%のエネルギー損失で、短周期変動を大幅に削減できることが示されている^{8),9)}。

5.6 再生可能エネルギー（風力発電+ PV）の相乗効果

風力発電設備だけでなく PV 設備にも、出力変化率制限運転や最大出力抑制運転の機能が備わっており、それらを活用することで、風力と同じように短周期変動の緩和が可能である。また、広域で風力と PV の出力が一斉に急増・急減する可能性は低いため、複数の風力発電所だけでなく PV 発電所も数多く束ねることで、ならし効果がより働くことになる。風力・PV を組み合わせれば、電力システムに影響を与える再エネ由来の短周期変動を、大幅に抑制することが可能である。

6. 再生可能エネルギーに期待されること

環境対策の一環として、CO₂ 排出量削減のため再エネの導入が推進されている。再エネは制度的にも導入をサポートされ、実際に導入量が増え続けている。再エネの導入量が少ない従来の電力システムでは、大規模火力や水力といった集中電源が主流であった。しかし、現在では気象条件により出力が変動する再エネの導入量が多くなり、それに伴い、既存の集中電源の出力調整だけでは、需給バランスを維持できないケースがあり、九州では再エネの出力制御が必要な状況が年数十回も発生している。

現時点では、需給バランス維持のために積極的に再エネから調整力を提供するという仕組みにはなっていない。仮に再エネから 100% の電力を供給する場合を考えると、設備利用率は最大でも風力で 27% 程度、PV で 17% 程度であるため¹⁰⁾、平均的には最大電力需要の数倍の設備容量の再エネを導入する計算となる。その場合には、需要が大きい時以外のほとんどの時間帯で再エネからの余剰電力が発生し、余剰分は抑制・蓄電・水素製造等に使用されると考えられる。それら 3 つの選択肢はどれもエネルギー損失を伴う。

そのため、再エネのシェアが非常に大きい電力システムでは、一定のエネルギー損失を伴っても、電力システムに調整力を提供することは、再エネの有

効活用になるとも考えられる。

また、電力システム側も、調整力も提供できる再エネを受け入れるための準備を、技術・制度の両面から行う必要がある。

7. 再生可能エネルギーの導入と女性の活躍

再エネの大量導入が進み、需要変動や再エネの出力変動に対応するため、蓄電池や再エネ以外にも多種多様な分散型電源が導入された電力システムは、従来型の集中電源を主体とした電力システムからは、大きく異なったものとなる。集中電源はシステム運用者が出力の増減を制御できていた、一方で多種多様な分散電源には、風力・PV といった気候条件で出力が変動するものや、蓄電池のような容量制限はあるが充放電ができるものがあり、それぞれの特性に合わせてうまく活用する必要がある。

電力システム運用者と電源の関係を、会社と働き手の関係になぞらえて考えると、再エネの大量導入の推進と女性の活躍には似た部分があるようにも考えられる。従来は、同じように働くことができる男性が大半を占めていると想定されていたが、近年になって男女共にプライベートと仕事のバランスが重視されるようになり、女性の活躍の場も増えつつある。そのため、働き方も画一的なものから、個人々の状況に合わせたフレキシブルな働き方を許容する会社が増えつつある。会社の利益を最大化するためには、多様な働き方をするメンバーをうまく活用する必要がある。一方で、多様なニーズを持つ個人々人であっても、自分の都合だけで一緒に働く人のことを考えなければ、うまくいかない。そういう意味では、会社は多様な働き手に配慮し、働き手も会社のことを考えるという、相互の協力関係が必要になる。これは、再エネの導入とのアナロジーでは、電力システム側は再エネを受け入れるようにシステムを整え、再エネ側は電力システムに調整力を提供するという協力関係と考えられる。

多様な働き手を受け入れることの理想的な形はどのように考えられるが、実現するためには再エネ同様に様々な課題がある。それは会社等のシステムの変革を伴うものであるため、変革が可能だけのエネルギーが必要となる。そのため、十分な行政等のサポートがなければ、体力のある会社等でなければ、そのシステム変革に取り組むことが難しいのではないだろうか。

また、女性の活躍と再エネ導入には、大きく異なる点もある。女性の活躍が進むかどうかについては、

文化的な慣習やものの見方が大きく影響しているという点である。近年、よく聞かれるようになった言葉に、「アンコンシャスバイアス」がある。本人自身も気づかない偏見や先入観のことを意味する。これは、誰にでもあり、それが原因で女性の活躍を意図せず阻むこともある。特に筆者が参考とした書籍として、クリアド＝ペレス（著）「存在しない女たち」¹¹⁾とサイド（著）「多様性の科学」¹²⁾を参考文献として挙げておく。

8. おわりに

数理モデルを用いた社会的課題解決から、再エネ導入の課題とその取り組み、最後に女性の活躍について述べた。それらを通して、人々が幸せに暮らせる社会のために、貢献できればと考えている。

今後は再エネ導入にかかわる課題解決のための研究をさらに進めるとともに、どうすれば社会をよりよくできるか考え・行動する人を育成することができれば幸甚である。

謝辞

これまで研究において、様々なチャンスを与えてくださった皆様に感謝申し上げます。

文献7に関して、下記の通りCC-BY 4.0に基づき、図3-5を引用している。

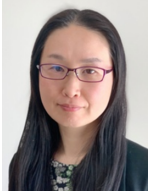
© 2022 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

参考文献

- 1) C. T. Urabe, G. Tanaka, T. Oshima, A. Maruyama, T. Misaki, N. Okabe, K. Aihara, Comparing catch-up vaccination programs based on analysis of 2012–13 rubella outbreak in Kawasaki City, Japan, *PLoS ONE*, **15** (8), e0237312 (2020).
- 2) 三崎貴子, 大嶋孝弘, 根津甫, 丸山絢, 占部千由, 田中剛平, 合原一幸, 金子幸江, 小泉祐子, 平岡真理子, 瀬戸成子, <国内情報>風疹流行に伴う川崎市の緊急ワクチン接種事業, 病原微生物検出情報 (IASR), **37** (10), 20–22 (2016).
- 3) 国際エネルギー機関 (著), 荻本和彦, 占部千由, 岡本浩, 岩田章裕 (監訳), *The Power of Transformation (電力の変革)*, (2015), 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 4) 国際エネルギー機関 (著), 荻本和彦, 占部千由, 大橋弘, 岡本浩, 戸田直樹, 矢部彰, 吉川信明 (監訳), 荻本和彦, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 占部千由, 宇田川佑介, 小林直樹, 今中政 (訳), *Re-powering Markets (電力市場のリパワーリング)*, (2017), 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 5) 国際エネルギー機関 (著), 荻本和彦, 占部千由, 戸田直樹 (監訳), 荻本和彦, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 小林直樹, 小林広介, 出野賢一, 今中政輝 (訳), *System Integration of Renewables - An update on Best Practice (再生可能エネルギーのシステム統合 - ベストプラクティスの最新情報)*, (2018), 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 6) IEA (2021), *Renewables 2021 Data Explorer*, IEA, Paris (accessed Sep. 2 2022), <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-2021-data-explorer>
- 7) Chiyori T. Urabe, Tetsuo Saitou, Kazuto Kataoka, Takashi Ikegami, and Kazuhiko Ogimoto, Positive Correlations between Short-Term and Average Long-Term Fluctuations in Wind Power Output, *Energies*, **14**, 1861 (2021).
- 8) 占部千由, 齊藤哲夫, 荻本和彦, 風力発電出力の短周期変動と変動抑制制御, 電気学会電力・エネルギー部門 新エネルギー・環境/高電圧合同研究会 (2018年6月), 京都.
- 9) C. T. Urabe, T. Saitou, K. Kataoka, K. Ogimoto, and T. Ikegami, Active Power Control for Mitigation of Short-term Fluctuation of Wind Power, 16th Wind Integration Workshop (Oct. 2017), WIW17-96, Berlin, Germany.
- 10) 経済産業省エネルギー資源庁, 第73回 調達価格等算定委員会 (accessed Sep. 27 2022), <https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/073.html>
- 11) キャロライン・クリアド＝ペレス (著), 神崎朗子 (翻訳), *存在しない女たち: 男性優位の世界にひそむ見せかけのファクトを暴く*, (2020), 河出書房新社, 東京.
- 12) マシュー・サイド (著), *多様性の科学 画一的で凋落する組織, 複数の視点で問題を解決す*

る組織, (2021), ディスカヴァー・トゥエンティワン, 東京.

著者略歴



占部 千由 (うらべ ちより)
名古屋大学大学院工学研究科 助教/
東京大学生産技術研究所 協力研究員
2006年京都大学大学院人間・環境学
研究科博士後期課程修了 (博士 (人間・

環境学)).

京都大学, 大阪大学, 明治大学, 科学技術振興機構
の研究員等および東京大学生産技術研究所の特任助
教を経て, 2022年7月より現職. 現在は再生可能
エネルギーの発電出力の変動特性解析および出力変
動抑制制御等, 再生可能エネルギーの電力システム
への統合に関する研究を行っている.