

1 研究目的、研究方法など

本研究計画調書は「小区分」の審査区分で審査される。記述に当たっては、「科学研究費助成事業における審査及び評価に関する規程」（公募要領参照）を参考にすること。

本研究の目的と方法などについて、4 頁以内で記述すること。

冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述し、本文には、(1) 本研究の学術的背景、研究課題の核心をなす学術的「問い」、(2) 本研究の目的および学術的独自性と創造性、(3) 本研究の着想に至った経緯や、関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ、(4) 本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか、(5) 本研究の目的を達成するための準備状況、について具体的かつ明確に記述すること。

本研究を研究分担者とともに行う場合は、研究代表者、研究分担者の具体的な役割を記述すること。

（概要）

電力系統への再生可能エネルギー電源の導入増加などを背景に、電力系統における電力需給バランスや電力系統の電圧変動を調整するといった、電力系統への貢献能力が求められている。その対策の一つとして、需要家側が所有する需要家エネルギーリソース（**需要家リソース**）が着目されるが、複数の地点に多数で分散的に設置されている需要家リソースを電力系統運用するためには、これらを群として統括する必要がある。申請者はこれまでに、需要家リソースの活用能力評価技術の開発および最適な運用手法の確立を行ってきた。需要家リソースの中でも電気自動車に代表される**モビリティ**は、容量規模が大きく、自身が移動することから、**貢献能力として機能する**といった効果が期待される。しかしながら、**モビリティを最大限活用させるために、全ての系統の情報を把握し、最適な運用を決定するには膨大な計算量が必要となる**といった課題がある。本研究では、これまで行ってきた需要家リソースの活用能力評価技術および最適な運用手法を拡張させ、複数地点の電力系統におけるモビリティの活用能力を評価できるようするための技術開発を行うとともに、電力系統に貢献するための需要家リソースを群としてアグリゲート手法に基づく電力系統運用手法を検討する。さらに、需要家リソースの系統貢献能力によって、本来必要な長距離送電容量などの電力系統設備の容量削減が期待できることから、電力系統の設備形成の在り方も確立する。これらの検討によって**電力システムの維持に必要な電力設備容量を削減でき、社会コスト低減**といった恩恵を得ることが期待される。

（本文）

（1-1）本研究の学術的背景

太陽光発電や風力発電などの再エネ電源が電力系統に大量導入されつつあるが、この電源の出力は気象条件によって時々刻々と変化するため、電力需給の不均衡を調整する能力が不足することが懸念されている。これを解決するために、**需要家側のエネルギーリソース（需要家リソース）を活用した電力系統の運用**が注目されている。需要家リソースは、電力系統設備とは異なり、「系統へ貢献したい時間に利用できない」といった本来用途による時間的な制限や、「その調整を継続的に行うことができない」といった貯蔵エネルギー量に対する制限が顕著である。このような性質があるため、申請者はこれまで、最適化技術を用いて、需要家リソースの本来用途の利用や、貯蔵エネルギー量に対する制約を考慮した、需要家リソースの貢献度を評価する手法の開発および、電力系統運用に必要な設備の容量削減に関する評価を実施している。この需要家リソースの出力を電力系統運用状況に合わせて調整することで、電力系統運用の設備容量を低減できることが期待される。

1. “配電線スリム化を目的としたダイナミックレーティング適用時の蓄電池設備容量評価”，**中村勇太**，他，電気学会論文誌 B 143, 379-388 (2023)。

需要家リソースは、蓄電池、コジェネレーションシステム（コジェネ）、水電解装置といった据置型リソースの他、電気自動車（EV）や燃料電池車などモビリティも含まれる（図1の点線枠内）。

また、EVの導入に伴い、普通充電器・急速充電器といったEV用充電器も電力系統に広く分散的に設置されることが予想される。このことから、モビリティは、据置型リソースと同様の時間

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

的な調整に加えて、自身の移動により、空間的な電力需給の調整も可能である。そのため、モビリティの時空間的な調整能力の活用によって、電力系統運用の設備容量削減効果を向上させることが期待される (図 2)。ただし、モビリティが空間的な調整を最大限活用するためには、モビリティが移動する全系統の状況を把握し、据置型リソースや既存設備との制御を分担する必要がある。最適化計算が膨大となる。そのため、系統側で必要な貢献能力とモビリティが提供する時空間調整能力を効率的にマッチングさせる技術が求められる。

また、個々需要家リソースは、電力系統に対して容量が小さく、地理的に分散して電力システムに偏在している。そのため、需要家リソースの活用に関しては、多数の需要家リソースを群として統括 (アグリゲーション) する必要がある。アグリゲーション技術としては、Virtual Power Plant (VPP) が注目を集めており、申請者も据置型リソースでの時間的な調整能力に準じたアグリゲーション技術について検討している。しかしながら、モビリティの時空間的な調整能力を電力系統運用に活かすための検討はなされていない。

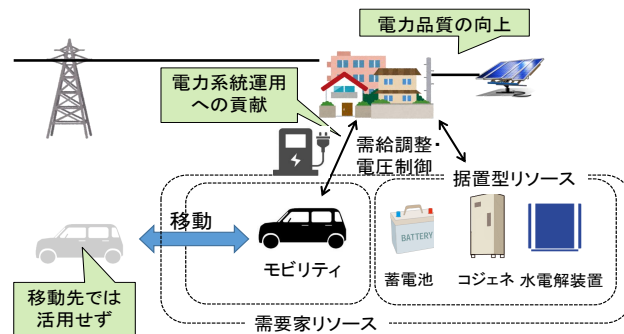


図 1: 需要家リソースとの時間的な調整の活用イメージ

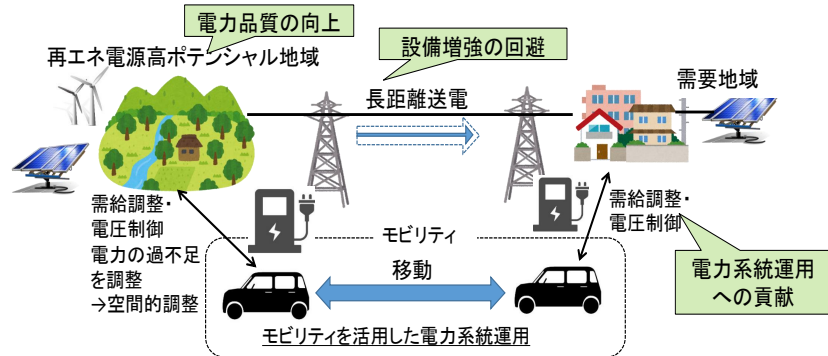


図 2: モビリティの空間的な調整の活用イメージ

2. “需給調整力提供を目的としたアグリゲーション”

により統括されるコージェネレーションシステムの最適運用”, 中村勇太, 他, 電気学会論文誌 B **139**, 56-65 (2019).

また、我が国の電力システムにおいては、(1) 高度経済成長期に構築された設備の老朽化、(2) 田舎部をはじめとする人口減少地域における電力需要の減少、(3) 自然変動電源の大量導入された地域での電力余剰と電力消費が大きい都市部での電力不足といった空間的な電力需要の不均衡の増大、等の要因から、電力系統設備形成は大きな変革が求められている。従来、電力設備形成は対象エリアの需要の大きさに対して、系統運用者側の設備が十分かといった観点で行われるが、需要家リソースをはじめとする、需要家側の制御は想定されていない。

我が国の目標として、EV は 2030 年までに全自動車のうち 30% 程度の販売数、EV 充電器は 2030 年までに 15 万基 (急速充電器 3 万基) の設置が見込まれており、EV の電力需要量 (kWh) および EV 用充電器 (kVA) が電力系統全体に占める割合は、最大 10% 程度とされている。一方、一般的な電力系統の運用において、需給調整に必要な能力量は総電力需要量の 7% 程度、電圧制御に用いられる静止型無効電力補償装置の容量は系統容量の 10~20% とされている。モビリティの時空間調整により需要の不均衡を低減させることが可能であり、電力系統運用に必要な電力系統設備の容量削減といった、社会コストがより削減されるといった恩恵を得ることが期待できる (図 2)。そのため、モビリティの電力系統運用貢献能力の大きさは電力系統の運用に必要な調整の大きさと同程度であり、モビリティの活用により電力系統の最適な設備形成の在り方も変容することが

【1 研究目的、研究方法など（つづき）】

予想される。

(1-2) 研究課題の核心をなす学術的「問い」

- モビリティの時空間的調整能力の両者を電力系統運用の能力として評価するための、最適なアルゴリズムはどのようなものか？。
- モビリティの時空間的調整能力の両者を効果的に電力系統運用に活用させるための最適な運用方法はどのようなものか？
- 需要家リソースの時空間的調整能力を効果的に活用した電力系統の最適な設備形成はどのようなものか？

(2-1) 本研究の目的

本研究では、(1) で述べた事項を踏まえ、下記を確立することを目的とする。

- [項目 1] モビリティが有する空間的な調整を正確に評価する方法
- [項目 2] モビリティを最大限活用するためのアグリゲート手法
- [項目 3] 需要家リソースの時空間的な調整を活用した電力系統の設備形成の在り方

(2-2) 学術的独自性と創造性

据置型リソースは、時間的な需給調整能力をその機器容量や電力の調整幅として評価することができるが、モビリティによる空間的な調整は、据置型リソースと同様の時間軸方向の制約に加えて、電氣的・地理的位置および各地点の再エネ電源や負荷需要といった系統状況により変化するため、単純に評価することはできない。また、関連する検討では、系統全体として電力系統運用に必要な調整に対して、需要家リソースが提供する調整が十分かといった観点で取り扱われてきた。しかしながら、モビリティは、系統の地点で異なる電力系統運用に必要な調整能力に対して、調整能力を柔軟にマッチングさせることが可能である。

このように、電力系統および需要家リソースの間で調整能力のマッチングを積極的に行う事例はなく、これ自身が独自性・創造性の高い内容であるといえる。

(3-1) 本研究の着想に至った経緯

申請者はこれまで、据置型リソースを対象に、電力系統運用に貢献する手法について検討してきた。据置型リソースの多くは制御性に優れており、電力系統の運用において一定の貢献が期待できるものの、据置型リソースの多くが設備容量が小さく、導入量はまだ限定的であることから、電力系統運用に与えるインパクトは依然として小さい。その中で、近年ではモビリティである電気自動車をはじめとするモビリティが飛躍的に普及している。モビリティは据置型リソースよりも大容量のものが多く、据置型リソースと同様の活用に加え、移動により電力需要バランスおよび各地点における電力系統運用への調整能力を空間的に調整できるなど、電力系統運用に対してより柔軟かつ効果的に貢献できることが期待される。しかしながら、モビリティを電力系統運用として検討されているほとんどが据置型リソースと同様の活用であり、モビリティが特定の系統に連系されたときにしか活用されていない。

また、モビリティに関しては自動運転技術が飛躍的に進んでおり、将来的に無人で荷物を運搬することが当たり前となってくることが予想される。その自動運転時に、人や荷物の運搬といった本来用途に加えて、電力系統に貢献するリソース活用を融通することで、系統全体の運用や系統設備形成が最適化されるのではないかと着想した。

【1 研究目的、研究方法など（つづき）】

(3-2) 関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

電力系統運用に対する需要家リソースの活用は欧米を中心に検討・導入され、近年は、再生可能エネルギーの大量導入による余剰電力対策としても注目されている。最近では、IT との融合を目指したスマートグリッド技術の一要素として、系統側の状況に合わせて需要を能動的に制御する考え方は浸透しつつある。我が国においても、需要抑制量を発電機の発電量に見立てて取引するネガワット取引や、電力需給調整市場取引などが注目を集めており、**需要家リソースは従来電源とともに、これらの取引の中心的な役割を担うことが期待されている。**

その一方で、検討されている需要家リソース活用は、電力需給といった系統全体としては最適な運用や制御がなされるものの、系統単位といった観点では、空間的調整が十分活用されていないため、モビリティの活用能力を最大限に引き出せていない。モビリティが接続されている系統を逐次把握し、全体として最適な運用や制御を行うといった、需要家リソースの活用能力評価や運用・アグリゲーションに関する研究事例(図 2) はなく、本研究で先駆けて提唱するものである。

(4) 本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか

[項目 1] **モビリティの時空間的な調整能力評価（2024 年度）**：各種リソースを有する需要家のエネルギーフローおよびモビリティの移動の起点・終点の位置や移動時間を考慮した上で、出力調整の大きさと調整時間から需給調整能力を評価する。この評価のため、電力系統における電圧や電力潮流量に関する制約を主問題、各需要家・各需要家リソースにおけるエネルギーフローや調整幅に関する制約を副問題とする多レベル最適化問題として定式化・求解する。

[項目 2] **モビリティを効果的に活用した電力系統運用（2025 年度～2026 年度前半）**：[項目 1] の活用能力評価を元に、モビリティを効果的に活用した電力系統運用を開発する。実際の電力系統運用を想定した場合、電力系統運用者が、需要家の需要に関する情報を全て把握し、電力系統設備や需要家リソースの運用を決定することは現実的ではない。そこで、[項目 1] の最適化問題を緩和し、電力系統運用者と需要家の間で時空間的調整能力をマッチングさせ、実用的な計算量で可搬型および据置型リソース群をアグリゲートする、電力系統運用手法を開発する。

[項目 3] **モビリティを効果的に活用した電力設備形成の在り方（2026 年度～2027 年度）**：[項目 2] で確立した電力系統運用手法において、自然変動電源・需要家リソースの個数・容量や、電力系統運用に関する制約（電圧制御や潮流量制約）の上下限値をパラメータとして変化させ、需要家リソースの活用および電力系統内の電圧機器や調相の制御に関する感度解析を行う。この感度解析結果から得られる需要家リソース活用による経済的恩恵、および電力系統の設備構成の設置や維持に関する費用から、据置型および可搬型リソースを効果的に活用した電力設備形成の在り方について明確化する。

(5) 本研究の目的を達成するための準備状況

[項目 1] および [項目 2] について、据置型リソースに関する調整能力評価および活用手法に関する研究は、これまでの検討により一定の成果が得られている。また申請者は本学の学内研究推進経費（2023 年度）に採択され、モビリティである EV に着目し、単独の系統において、系統運用の必要な調整能力とモビリティの調整能力をマッチングさせるための概念に関する検討を行っている。配電系統における配電線をなくし、エネルギーの自給自足を行う「電力系統のオフグリッド化」を実現するための各種設計といった、電力設備形成に関する検討も行っている。そのため、[項目 3] についても、電力系統のオフグリッド化にあたり得られた知見を本研究に活かすことで、可搬型および据置型の両者の需要家リソースを対象とした電力設備形成の在り方も確立できると考えている。

2 応募者の研究遂行能力及び研究環境

応募者（研究代表者、研究分担者）の研究計画の実行可能性を示すため、(1)これまでの研究活動、(2)研究環境（研究遂行に必要な研究施設・設備・研究資料等を含む）について2頁以内で記述すること。

「(1)これまでの研究活動」の記述には、研究計画に関連した国際的な取組（国際共同研究の実施歴や海外機関での研究歴等）がある場合には必要に応じてその内容を含めること。また、研究活動を中断していた期間がある場合にはその説明などを含めてもよい。

(1) これまでの研究活動

申請者はこれまで、電力系統運用に貢献する需要家リソースの活用に関する検討を行ってきた。以下に、本研究の各項目に対応させて示す。

[項目 1] モビリティの時空間的な調整能力評価

据置型リソースである蓄電池を用いた需給調整提供に関する検討 [1] では、蓄電池の時間的な制約を考慮した、需要家リソースを有する需要家単位で最適化問題を解くことで、時間的な調整能力を評価する手法を開発した。この手法は、事前に調整の継続時間を決め、その時間にしながら調整した際のエネルギー量の制約を考慮しつつ、調整の大きさを最大化する手法である。

水電解装置を用いた需給調整提供、電圧制御を考慮した運用手法 [2] について検討した。検討した手法は、単独の系統において、需要家のエネルギー需要や本来の用途（水素生成）を考慮し、需給調整力提供および電圧制御のための無効電力供給による報奨金（対価）を含めた、運用コスト（費用）が最小となるような運用を最適化計算によって決定する手法である。この手法により、複数の電力系統運用への貢献能力を評価でき、据置型リソースを最適に運用することが可能となる。

また、電圧制御に貢献する運用手法に関する検討 [3] では、単独の電力系統における単独の蓄電池・充電器を対象に、時間的な調整を電力系統電圧制御に最大に活用するための運用手法を開発した。この手法は、電力系統に関する制約として、電力系統内の潮流量制約や潮流方程式を考慮し、電圧変動を最小化するように蓄電池の出力を決定する手法である。EV 用急速充電器による配電系統の電圧制御手法 [4] を開発した。この手法は、充電器の空き容量を電力系統の電圧制御に活用するための運用手法であり、本研究では、電力系統に接続されている充電器はこの手法を前提として運用されることで、電力系統運用に貢献する。

さらに、蓄電池やコジェネ、水電解装置、燃料電池といった複数の需要家リソースを有するマイクログリッドを想定し、マイクログリッドの運用手法 [5] について検討した。この検討では、マイクログリッドの運用を策定するにあたり最適化問題を解いているが、その最適化解法のアプローチは、厳密解ではないが、効果的に解を近似的に探索する MILP (Mixed Integer Linear Programming) の最適化と、時間がかかるが厳密解を求めることができる粒子群最適化 (PSO: Particle Swarm Optimization) を組み合わせたハイブリッド手法であり、[項目 1] や [項目 2] での最適化問題を効果的に解く、計算技術の基盤となる。

1. “Study on Operation in Power System Utilizing Customer’s Resource for Providing Demand and Supply Regulation”, Y.Nakamura, et al., 2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), 66-70 (2020).
2. “電力系統運用に貢献する水素供給設備を含むマイクログリッドの運用に関する検討”, 中村 勇太, 青木睦, 加戸良英, 壹岐浩幸, 電気学会論文誌 B **141**, 56-66 (2021).
3. “Optimal Charging Method for Batteries in Distribution System to Supply Demand in Remote Area”, Y.Nakamura, et al., CIGRE 2022 Kyoto Symposium **19-4**, 111 (2022).
4. “配電系統における電気自動車用急速充電器を用いた電圧制御”, 中村 勇太, 原亮一, 北裕幸, 田中英一, 電気学会論文誌 B **138**, 107-115 (2018).
5. “マイクログリッドシステムの運転における MILP と PSO を用いたハイブリッド手法の実用性評価”, 棚橋優, 小林浩, 中村 勇太, 青木睦, 電気学会論文誌 D **142**, 897-906 (2022).

【2 応募者の研究遂行能力及び研究環境（つづき）】

[項目 2] モビリティを効果的に活用した電力系統運用

文献 [6] ではコジェネ群を VPP とみなし、全体としてどのようにアグリゲートするかといった運用手法について検討した。検討した手法は、コジェネを統括するアグリゲータ（系統側）が各コジェネ（需要家側）に対して、必要な調整能力（上限）を提示し、各コジェネからその能力を受け取ることで、全体として必要な能力を確保する手法である。[項目 1] に関する手法 [2] において、対象となる系統が複数になる点が、本研究の [項目 2] における系統運用手法に相違点となる。

パワーアカデミー研究助成 [7] において、需給調整を目的としたリソース活用時に需要家の本来用途の変化（不確実性）が与える影響を考慮した系統運用手法について検討した。この不確実性の考慮は、本研究の [項目 2] における系統運用手法においても必要となる。

6. “需給調整力提供を目的としたアグリゲータにより統括されるコージェネレーションシステムの最適運用”, 中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 武田清賢, 電気学会論文誌 B **139**, 56-65 (2019).
7. “需要家リソースを活用したスマート型電力システムの確率的系統運用手法”, 中村勇太, パワーアカデミー研究助成萌芽研究博士課程卒, (2017).

[項目 3] モビリティを効果的に活用した電力設備形成の在り方

電力設備形成に関連して、文献 [8] では無効電力補償装置、文献 [9] では配電線の容量削減や増設回避に関する検討を行っている。これらの検討では、需要家リソースの活用能力を特有の時間的な制約を考慮した無効電力補償装置や配電線の等価的な容量として評価している。また、文献 [10] では、需要家リソースの容量を変化させた際の活用能力評価・容量設計を行っている。配電系統を対象に、EV による空間的な調整を活用した電力設備形成に関する検討 [11] を行っており、電力系統の配電線撤去に必要な EV の台数や、その経済的効果について試算を行った。

[項目 3] モビリティによる時空間的調整を考慮した電力系統設備および需要家リソースの容量設計といった電力系統設備形成を検討するにあたり、これらの検討で得られた知見が欠かせない。

8. “電圧制御機器のタップ切替動作削減に貢献する蓄電池群の運用および必要容量評価に関する検討”, 中村勇太, 青木睦, 金沢由樹, 上西宏和, 電気学会論文誌 B **140**, 474-483 (2020).
9. “配電線スリム化を目的としたダイナミックレーティング適用時の蓄電池設備容量評価”, 石田匠輝,中村勇太, 青木睦, 彦山和久, 野々山公亮, 電気学会論文誌 B **143**, 379-388 (2023).
10. “需給調整に貢献するコージェネレーションシステムの設備設計に関する検討”, 中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 武田清賢, 電気学会論文誌 B **140**, 219-228 (2020).
11. “配電系統における最適充電制御される電気自動車を用いたオフグリッドの経済性評価”, 中村勇太, 青木睦, 彦山和久, 野々山公亮, 電力系統技術研究会 **PSE-22-017**, (2022).

なお本研究は、重要な社会インフラである電力インフラにおける最適形成を構築することであるため、電力会社などの企業との共同研究ではなく、**社会全体がステークホルダー**となる研究であると考えている。

(2) 研究環境（研究遂行に必要な研究施設・設備・研究資料等を含む）

本研究を遂行するにあたり、モビリティのモビリティデータ・需要データが必要であるが、そのデータは国土交通省で実施された道路交通センサスでの調査結果をもとに作成する予定である。本研究は、比較的大規模な最適化計算を行う必要があるため、計算機の性能が重要であるが、本学にある既存の計算機に加えて、本研究助成で購入した計算機を併用利用することで、研究遂行に必要な計算機環境を確保する。加えて、共同研究で取り扱ってきた各種需要家に関するデータの利用に関する許可が得られており、本研究を遂行することが可能であると考えている。

さらに応募者の所属機関は、PHIL（Power Hardware-in-the-Loop）環境があり、本研究で検討した手法を PHIL 環境に実装させ、シミュレーションに加えて試験を行うことも可能である。

3 人権の保護及び法令等の遵守への対応（公募要領参照）

本研究を遂行するに当たって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など指針・法令等（国際共同研究を行う国・地域の指針・法令等を含む）に基づく手続が必要な研究が含まれている場合、講じる対策と措置を、1 頁以内で記述すること。

個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査・行動調査（個人履歴・映像を含む）、提供を受けた試料の使用、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となる。

該当しない場合には、その旨記述すること。

該当なしではあるが、研究計画の見直し等により対応が必要となった場合は、学内ルールに則り、適切に取り扱うこととする。

4 研究計画最終年度前年度応募を行う場合の記述事項（該当者は必ず記述すること（公募要領参照））

本研究の研究代表者が行っている、令和6（2024）年度が最終年度に当たる継続研究課題の当初研究計画、その研究によって得られた新たな知見等の研究成果を記述するとともに、当該研究の進展を踏まえ、本研究を前年度応募する理由（研究の展開状況、経費の必要性等）を1頁以内で記述すること。

該当しない場合は記述欄を削除することなく、空欄のまま提出すること。

研究種目名	課題番号	研究課題名	研究期間
			令和 年 度～令和 6 年度

当初研究計画及び研究成果

前年度応募する理由