

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04098

研究課題名(和文) デマンドレスポンスの需給調整能力評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of Flexibility Assessment of Demand Response

研究代表者

原 亮一 (HARA, RYOICHI)

北海道大学・情報科学研究院・准教授

研究者番号：80361872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では需要家による電気の使い方を直接的・間接的に制御するデマンドレスポンス(DR)の持つ需給調整能力を評価する手法を開発するとともに、複数の需要家側リソースを集約(アグリゲーション)する手法を開発した。その有効性を、ある仮想的なエネルギー供給会社を想定した計算機シミュレーションにより検証した。

需要家側リソースの活用は、リソースの提供者である需要家、そしてそれを束ねて活用するアグリゲータの双方にとってコストメリットのある枠組みであることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在進行している電力システム改革においては、電力系統の需給バランスを維持するための調整力を広く公募する調整力市場の本格活用に向けて動いている。本研究で開発した需要家側リソースの活用は、こうした調整力を調達する範囲を家庭レベルまで行き届かせる技術であり、重要な社会インフラである電力システムをより安定かつ低コストで運用することに大きく寄与すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The flexibility in electric power system (ability to maintain demand and supply balance) provided by the demand-side resources is evaluated in this research. Furthermore, detailed framework of aggregation for multiple demand-side resources is developed in this research. Availability and effectiveness of the proposed framework are numerical revealed through computer simulations. Employment of demand-side management would bring the economic merits to both the resource provider (demands) and aggregator.

研究分野：電力システム工学

キーワード：デマンドレスポンス 電力需給調整力 CGS

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギー発電の導入拡大に伴い、電力システムにおいて需給調整力をどのように確保していくかが問題となりつつある。このような状況に対して、当時の我が国における検討の方向性は、高性能な蓄電池を主たる新たな調整力として活用していくことが検討されていた。一方で蓄電池の導入コストは高く、また電気エネルギーそのものを生成する訳では無く、むしろエネルギーの損失を伴うものであり、その利用は必要最低限に止めることが国民経済的には好ましいと考えられる。そこで本研究では、電気の使い方を需要側で調整する、Demand Response (DR) に着目した。

2. 研究の目的

一方で、DR は活用できるタイミングや継続可能な時間が限定されるという、従来の火力電源等による需給調整とは本質的に異なる特徴を有する。本研究ではそのような DR 特有の性質を ΔkWh 能力として定義し、具体的にその評価方法を明らかにする。また、北海道地域を対象とした代表需要データに基づいて ΔkWh 能力を定量的に評価することで、DR の有用性に対する支配要因を分析するとともに、DR 活用により再生可能エネルギー発電の導入可能量がどの程度拡大できるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ΔkWh 能力の評価手法開発

研究代表者らが提唱した、コージェネレーションシステム (CGS) とヒートポンプ (HP) を併用した熱併給システムを例題として、そのエネルギーフローを定式化するとともに ΔkWh 能力を演繹的に評価する手法を開発する。

(2) 小規模リソース群のアグリゲーション方法の開発

個別住宅に設置されている CGS による DR 実施を想定し、多数台の CGS 群を包括的に制御するためのアグリゲーション方法を開発し、その効果を計算機シミュレーションにより検証する。

(3) 北海道を対象とした暖房機器を活用した DR の有用性評価

北海道における暖房機器の使われ方を模擬するとともに、その需要を DR として活用することで再生可能エネルギー電源の導入可能量をどの程度拡大できるのかを定量的に評価する。

4. 研究成果

(1) ΔkWh 能力の評価手法開発

研究代表者らが提唱した CGS/HP システムのエネルギーフローを図 1 に示す。本システムでは、CGS であるバイオガス発電機 (BG) を利用することで熱と電気を同時に発生することができる一方、HP を活用することで電気から熱に変換することもできるため、CGS と HP とを協調的に運転することで、電気の発生・消費をしながら安定した熱供給が実現可能なシステムである。そのため、電気の流れだけに注目すると、あたかも蓄電池のように双方向の調整が可能となるものである。本システムを対象に、(i) Exclusive Heat Supply Mode (EHSM), (ii) Thermal Demand Following Mode (TDFM) という二つの運転モードを開発し、それぞれの等価蓄電池容量 (ΔkWh 能力) を求めた。CGS 容量 50kW, HP 容量 30kW, 貯湯槽容量 8t の場合、EHSM の ΔkWh 能力は 164kWh, TDFM の ΔkWh 能力は 103kWh であり、前者の方が約 1.6 倍の能力を持つことが分かった。また、この ΔkWh 能力は CGS 容量, HP 容量, ガスホルダー容量, 貯湯槽容量, 熱需要の影響を強く受けることを明らかにした (図 2~5 参照。図中の実線と破線は、熱需要の違いで、破線の方が熱需要が少ない)。

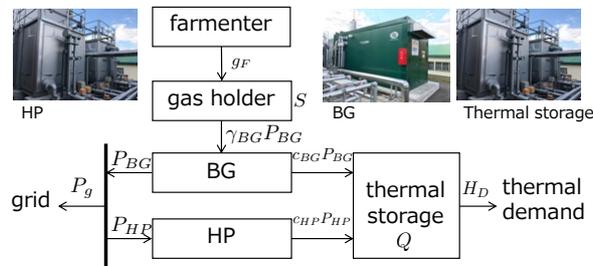


図 1 CGS/HP システムのエネルギーフロー図

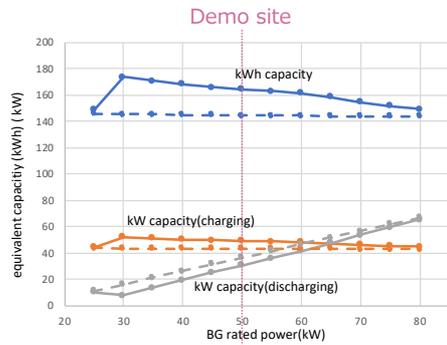


図2 横軸：CGS (BG) 容量／縦軸： Δ kWh 能力・ Δ kW 能力

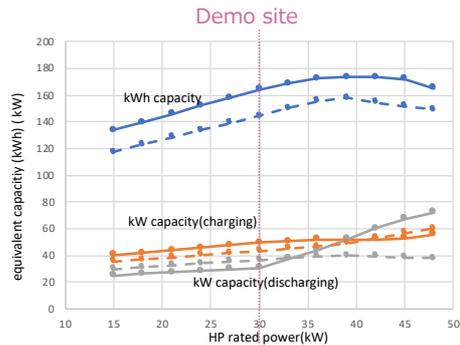


図3 横軸：HP 容量／縦軸： Δ kWh 能力・ Δ kW 能力

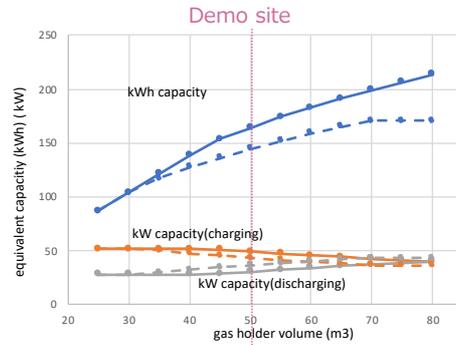


図4 横軸：ガスホルダ容量／縦軸： Δ kWh 能力・ Δ kW 能力

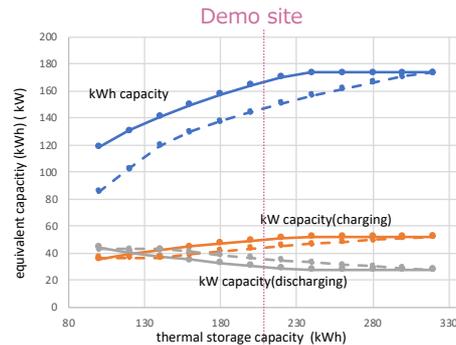


図5 横軸：貯湯槽容量／縦軸： Δ kWh 能力・ Δ kW 能力

(2) 家庭用 CGS 群のアグリゲーション方法の開発

家庭用 CGS は主に設置者（住人）のエネルギーコスト削減を目的として設置されているものであり、その運用に際しても設置者の経済性に着目したモデル化が必要であると考えた。そこで本研究では、調整力を調達仕様としているアグリゲータが調整力待機量に対する報奨金単価を需要家に提示し、需要家の方は反対に提示された報奨金単価とその他のエネルギーコストとを勘案して最適化問題を解くことにより実際の機器の運用方法を決定するスキームを開発した（図6）。

提案したスキームが有効に機能することを、北海道で実測された一般住宅 20 軒分のデータ（データ間隔 10 分、1 軒あたりの最大電力需要 3.6kW、最大給湯需要 56.0kW）を計算機上にモデル化し、実際に CGS 群から調整力を調達できるかを評価した。

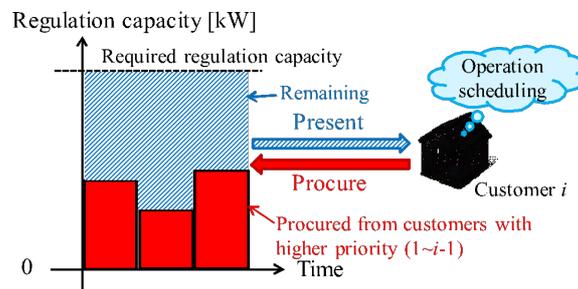


図6 需要家の行動モデル

(3) 北海道を対象とした暖房機器を活用した DR の有用性評価

北海道においては家庭における冬季の暖房需要がエネルギー消費量に占める割合が大きく、需給調整力としての活用代も大きいと考えられる。そこで本研究では、住人の快適性を考慮しつつ需給調整力としてどれだけ活用できるかを試算した。快適性の評価基準としては、1300 人の被験者による予測平均温冷感申告（Predicted Mean Vote, 以下 PMV）の調査結果に基づき、冬季室温基準を 22℃、調整幅を $\pm 5^{\circ}\text{C}$ に設定した（PMV 基準で 8 割の住人が不快に思わない範囲）。この DR 活用により、電力システムの運用コストを 2~3%削減できるポテンシャルを有している（ただし冬季限定）ことを数値計算により明らかにした（図7）。

また、太陽光発電と風力発電を対象に暖房需要の DR 活用によりシステムの導入可能量がどの程度拡大できるかを、必要調整力の観点から評価した。その結果、DR 活用により一定の導入可能量拡大効果があることを明らかにした（図8）。ただし、再生家産エネルギー電源の導入可能量の評価に当たっては調整力の観点以外の系統制約（送電線の熱容量、電圧制約、安定度制約、等）も加味して検討する必要があることには留意が必要である。

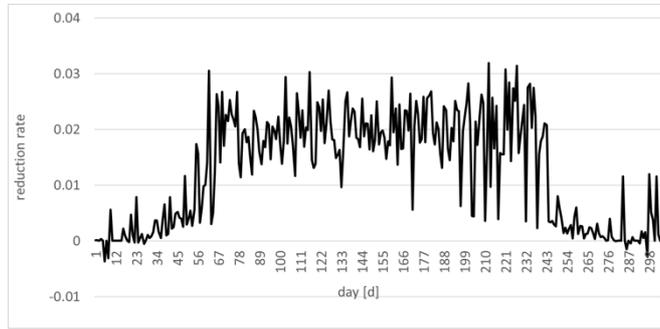


図7 日別発電コスト削減率

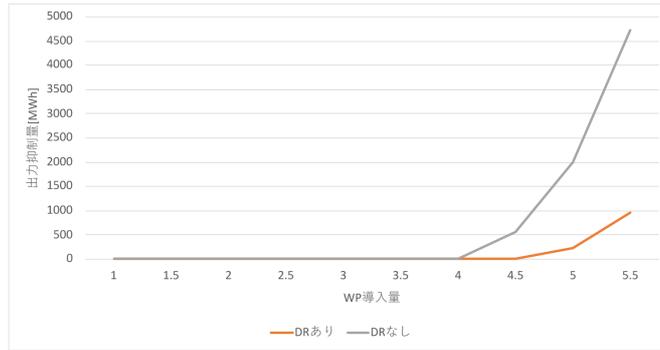


図8 風力発電の導入量（横軸）と必要出力抑制量（縦軸）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakamura Yuta, Hara Ryoichi, Kita Hiroyuki, Takeda Kiyotaka	4. 巻 139
2. 論文標題 Optimal Operation of Co-generation System Coordinated by Aggregator for Providing the Demand and Supply Regulation Capacity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power and Energy	6. 最初と最後の頁 56 ~ 65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.139.56	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Yuta, Hara Ryoichi, Kita Hiroyuki, Takeda Kiyotaka	4. 巻 140
2. 論文標題 Study on Installation Design of Cogeneration Systems Contribute to Provide the Demand and Supply Regulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power and Energy	6. 最初と最後の頁 219 ~ 228
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.140.219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hara Ryoichi, Kita Hiroyuki, Ishikawa Shiho, Hirase Takayuki	4. 巻 138
2. 論文標題 A Method for Determining a Scheduled Generation of Wind Farms by HP/BG Heat Supply Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power and Energy	6. 最初と最後の頁 521 ~ 528
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.138.521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 横山凌, 石川志保, 原亮一, 北裕幸
2. 発表標題 乳牛ふん尿のバイオガス化による総合的利用システムの開発 -実測出力データに基づくBG制御手法の提案-
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久井智晴, 原亮一, 北裕幸, 酒井誠二, 西島栄伺, 平尾宏明
2. 発表標題 配電系統における需要家側リソースの利用可能量評価に関する基礎検討
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本崇弘, 原亮一, 北裕幸
2. 発表標題 寒冷地における家庭用暖房機制御による需給調整能力の試算に関する基礎検討
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久井智晴, 原亮一, 北裕幸
2. 発表標題 配電系統における分散型エネルギー資源の利用可能量評価に関する基礎検討
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山凌, 石川志保, 原亮一, 北裕幸
2. 発表標題 乳牛ふん尿のバイオガス化による総合的利用システムの開発 現地調査に基づく運用方法の基礎検討
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小牧祐太, 原亮一, 北裕幸
2. 発表標題 コージェネレーションシステムと蓄電池の協調による需給調整力提供能力評価
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山凌, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -実機試験による計画発電の有効性検証-
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小牧祐太, 原亮一, 北裕幸
2. 発表標題 需給調整への貢献を考慮した家庭用CGSと蓄電池の最適容量設計手法
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石丸啓吾, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-必要蓄電池容量削減効果の検証-
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山凌, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -年間シミュレーションによる計画発電の評価-
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita, Shiho Ishikawa
2. 発表標題 Equivalent Energy Storage Capability of Combined Heat Pump and Biogas Engine Generator System
3. 学会等名 20th Power System Computation Conference (PSCC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 バイオガス発生量を与える変動抑制能力への影響力の評価
3. 学会等名 平成30年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会,
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 武田清賢
2. 発表標題 電力需給調整に貢献するコージェネレーションシステムの運用に関する検討 需要の不確実性を考慮した調整能力評価
3. 学会等名 平成30年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小牧祐太, 中村勇太, 原亮一, 北裕幸
2. 発表標題 電力需給調整に貢献する蓄電池を有するコージェネレーションシステムの最適容量設計に関する検討
3. 学会等名 平成30年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 武田清賢
2. 発表標題 電力需給調整に貢献するコージェネレーションシステムの最適構成に関する検討
3. 学会等名 平成30年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋岡竜太, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 変動抑制能力と経済性を考慮した最適なプラント設計
3. 学会等名 平成30年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山凌, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-機器特性を考慮した計画発電の制御手法開発-
3. 学会等名 平成30年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-実証試験による制御手法の評価-
3. 学会等名 平成30年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 武田清賢
2. 発表標題 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
3. 学会等名 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋岡竜太, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 ガスバッグ・蓄熱槽容量増設によるシステムのパフォーマンスへの影響
3. 学会等名 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-HP/BGの起動停止特性を考慮した制御手法-
3. 学会等名 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川翼, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討-実証設備による変動抑制効果の検証-
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村勇太, 原亮一, 北裕幸, 武田清賢
2. 発表標題 需給調整市場に参加するアグリゲータに統括されるコージェネレーションシステムの運用 - 調整実績に基づく市場の入札戦略の検討 -
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山凌, 原亮一, 北裕幸, 石川志保
2. 発表標題 HP/BG併用熱供給システムによる風力発電出力ランプ変動抑制の検討 -実証設備による計画発電の検証-
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------