

Academic Year 2021 DISSERTATION

需要家側蓄電システムの
運用制御技術に関する研究

Advanced operation strategy for demand side battery energy storage systems

湯浅 一史



九州工業大学 大学院 生命体工学研究科 生命体工学専攻

福岡県北九州市若松区ひびきの2番4号

概要

太陽光発電の世界全体の累積設置容量は、2008年から2018年の10年間で約35倍になった。太陽光発電のみならず、風力発電やバイオマス発電などの再生可能エネルギーの社会実装が急激に進み、その導入コストは従来の化石燃料由来の火力発電と同等水準以下になりつつある。こうした状況から、電力システムは従来の集中型から分散型に大きくシフトしつつある。このドラスティックな社会システムの変化は、低炭素化・脱炭素化を促進し、持続可能な社会を実現する点において歓迎すべき変化といえる。ところが、再生可能エネルギーの大量導入は電力の安定供給という側面では課題も見え始めている。出力が変動的な再生可能エネルギーの割合が多くなることで、電力の需要と供給のバランスを維持するのが難しくなりつつあり、大規模停電のリスクなども顕在化し始めている。

日本政府は、このような状況を鑑み、電力の安定供給を維持するため需給のインバランスリスクに対する調整力（供給区域における周波数制御、需給バランス調整その他の系統安定化業務に必要な発電機等の能力）や予備力（供給区域の調整力以外の発電機の発電余力と上げ調整力（供給区域の余剰インバランスの発生に対応するための調整力）を足したもの）を、一般の事業者から広く安定的に、かつ、安価に調達するため新しい電力取引市場の創設を進めている。新しい電力取引市場では調整力、予備力、環境価値などの従来の電気が様々な経済的価値に分離され取引可能となる見込みである。こうした市場環境の変化を踏まえ、需要家にエネルギーサービスを提供する多くのエネルギーサービスプロバイダーが、新市場への参入を狙い需要家側に設置されるエネルギーリソース（Demand Side Energy Resource, DSR）の獲得や技術開発を進めている。中でも、定置型リチウムイオン蓄電池や電気自動車などの蓄電システムはその出力安定性や応答性から最も期待の高いDSRの一つである。

しかしながら、これらの蓄電システムが電力の安定供給や地球環境問題に貢献し、新しい電力インフラの中核を担うエネルギーリソースとして社会実装されるためには、その導入コストがボトルネックである。このため、蓄電システムの性能や特性を十分把握した上で、効率的かつ効果的に運用し、長期的視野で経済合理性を確保するための運用制御技術の確立が最重要課題である。本研究の目的は、需要家の受電点以下（Behind-the-Meter）に接続される蓄電システムを対象に、蓄電システムのDSRとしての性能評価や適用可能性を分析し、多様な電力価値に対するエネルギーサービスプロバイダーの効率的かつ経済的な新しい運用戦略を提案し、その有効性を確認することである。

本論文は、上記目的を達成するため、下記に示す三つの研究から構成される。

- I. 電気自動車（Electric Vehicle, EV）のDSRとしての性能と適用可能性に関する研究
- II. 太陽光による正味負荷の長期変動性を考慮した自家消費型運用戦略に関する研究
- III. 金融工学のポートフォリオ理論を適用した多目的運用戦略に関する研究

研究 I では、双方向コンバータを介して EV と建物間で電力の授受を行う、Vehicle to Building (V2B) 技術を活用し、EV の DSR としての性能と適用可能性を実証実験により確認した。結果、EV に制御指令を与えた場合の応動時間、出力安定性を実験的に確認し、2021 年から段階的に開始される需給調整市場の各商品要件に対して DSR として適用可能な見通しを確認した。

研究 II では、太陽光併設型の蓄電システムにおいて、長期的な正味負荷の変動性を考慮した運用戦略を提案し、需要家内の再生可能エネルギー比率 (Renewable Energy Ratio, RER) の期待改善効果を数値解析により導出した。結果、提案戦略を適用することで、従来戦略に比べて RER が最大 16.7%改善することを確認し、2025 年度の市場環境下では電力コストが最大 48.0%の低減する可能性を示した。

研究 III では、単一の蓄電システムを複数の電力取引市場で運用する多目的運用戦略を提案した。本運用戦略では、金融工学のポートフォリオ理論の一つである資本資産価格モデル (Capital Asset Pricing Model, CAPM) を適用することで、運用面の負担の低減を実現しながら、長期的リスクやリターンを定量的に評価することを可能にするとともに、長期間にわたって安定的なパフォーマンスが期待できることを確認した。さらに、提案する運用戦略にアンサンブルアプローチを適用することで、リスクとリターンの予見性を改善した。

本論文の第一章では、再生可能エネルギーの急激な導入に伴い、電力システムが従来の集中型から分散型にシフトしている状況や、電力市場環境の変化の見通しについて説明した。このパラダイムシフトに伴い、電気の価値が、発電に対する価値としてだけでなく、発電できる能力に対する価値や、何を原資として得られたエネルギーかを示す環境価値などの多種多様な価値観に分離され複雑化する見通しを示した。

第二章では、第一章で説明した電力を取り巻く環境変化の中で、エネルギーサービスプロバイダーに要求される運用制御技術の課題分析を行った。具体的には、DSR の①多様化、②運用効率化、③適用領域拡大、④制御の高精度化、⑤絶対量の増加が必要であるとした。その上で、本研究で取り扱うべき最も重要なテーマとして①多様化、②運用効率化、③適用領域拡大であると説明した。

第三章では、①の多様化に関して、新しい蓄電システムとして期待が高い電気自動車 (Electric Vehicle, EV) の DSR としての適用可能性を検証した。本検証は、株式会社 NTT ファシリティーズ協力の元、400V 級の直流給電方式を採用した新しい Vehicle to Building (V2B) 技術の活用により、電気自動車が DSR として将来創設される新市場に適用可能である見通しを実験的に確認した。

第四章では、②の運用効率化に関して、需要家の Behind-the-Meter に太陽光発電と蓄電システムを有する低圧需要家を対象に、天候による正味負荷電力の長期的変動性を考慮した新しい運用戦略を提案し、需要家内における再生可能エネルギー比率の期待改善効果を数値解析により導出した結果を確認した。

第五章では、③の適用領域拡大に関して、エネルギーサービスプロバイダーが保有する

単一の蓄電システムを、電力卸取引市場の複数のサービス（商品）を対象に電力供給し、対価を得る多目的運用戦略を提案し、一年間のパフォーマンステストを数値解析を行うことでその有効性を確認した。

第六章では、第一章から第五章に論じた内容を基に、電力を取り巻く将来の環境条件を考慮した上で、新しい DSR の適用可能性を明らかにしたこと、運用面における効率化や適用領域拡大に資する運用制御技術の提案と有効性を確認したことについて総括した。

本研究では、将来の電力システムや電力市場環境下での新しい DSR の適用可能性を明らかにするとともに、運用面における効率化や適用領域拡大に資する運用制御技術の提案を行った。今後、再生可能エネルギーの導入促進に伴い大いに貢献すると期待される。

目次

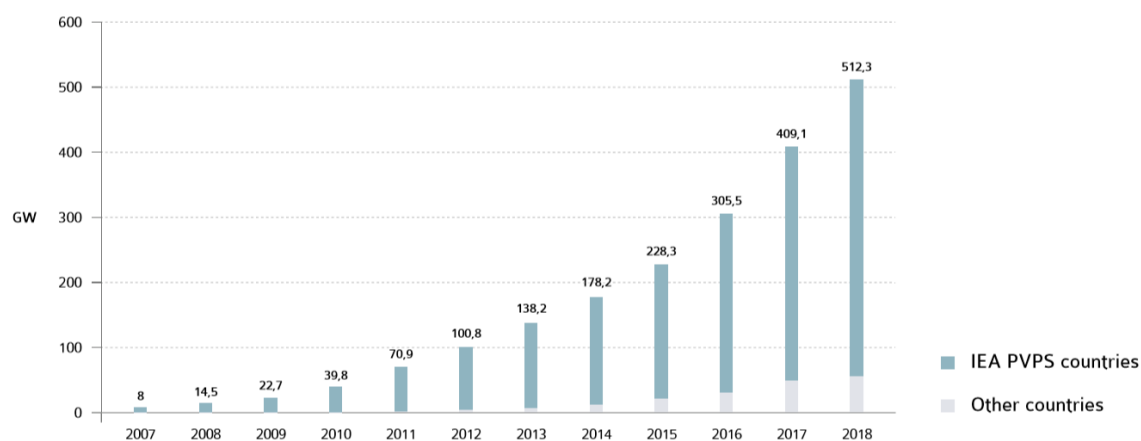
第1章	背景	1
1.1	集中型から分散型へ転換する電力システム	1
1.2	電力市場環境の変化と電力価値の多様性	4
1.3	需要家側エネルギーリソース (DSR) の運用制御技術高度化の重要性	7
第2章	目的	8
2.1	DSR の運用制御における技術課題	8
2.2	本研究で対象とする運用制御技術課題	10
2.2.1	DSR の多様化	10
2.2.2	DSR の運用効率化	10
2.2.3	DSR の適用領域拡大	10
第3章	直流 V2B(Vehicle to Building)による EV の DSR 適用可能性 (多様化)	11
3.1	電気自動車の普及と DSR としての期待	11
3.2	直流 V2B 技術の特徴と新規性	13
3.3	直流 V2B 給電技術	17
3.3.1	実証給電システムの概要	17
3.3.2	双方向 EV 充電器	18
3.3.3	実証給電システムの動作	19
3.4	試験及び結果	21
3.4.1	総合動作試験	21
3.4.2	充電及び放電特性試験	22
3.4.3	適用可能性評価試験	25
第4章	太陽光併設蓄電システムの自家消費型長期運用戦略 (運用効率化)	28
4.1	グリッドパリティにおける自家消費型運用の重要性	28
4.2	自家消費型運用戦略の特徴と新規性	30
4.3	自家消費型長期運用戦略	32
4.4	数値解析及び結果	36
4.4.1	前提条件	36
4.4.2	問題の定式化	41
4.4.3	数値解析結果	43
4.4.4	電力コスト低減効果の評価	48
第5章	資本資産価格モデルによる蓄電システムの多目的運用戦略 (適用領域拡大)	51
5.1	マルチユース運用の重要性	51
5.2	多目的運用戦略の特徴と新規性	54
5.3	多目的運用戦略	56

5.3.1	CAPM に基づく多目的運用戦略.....	56
5.3.2	多目的運用戦略の定式化.....	57
5.4	数値解析.....	62
5.5	数値解析結果.....	66
第 6 章	結論.....	72
	謝辞.....	73
	参考文献.....	74
	図一覧.....	79
	表一覧.....	81
	用語一覧.....	82
	記号一覧.....	83
	論文目録.....	85

第1章 背景

1.1 集中型から分散型へ転換する電力システム

世界規模の脱炭素化への要求の高まりから、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの社会実装が急激に進んでいる。太陽光発電を例に挙げると、2018年における世界全体の太陽光発電システムの累積設置容量は500 GWを超えた。この数字は世界全体の電力需要に対して僅か2.9%に過ぎない [1]。一方、2008年における世界全体の累積設置容量が15 GW程度であったことを考慮すれば、10年間で約35倍もの爆発的な成長率であり驚異的な数字であるともいえる。この10年間の急激な導入に伴い、太陽光発電の世界の均等化発電原価（Levelized Cost Of Electricity, LCOE）は従来の火力発電と同等以下の水準に達している [2]。太陽光発電だけでなく、風力発電、バイオマス発電、地熱発電などの他の再生可能エネルギーも同様にコストの低下傾向が進んでいる。



SOURCE IEA PVPS & OTHERS.

図 1.1.1 世界の太陽光発電システムの累積設置容量の進展 [1]

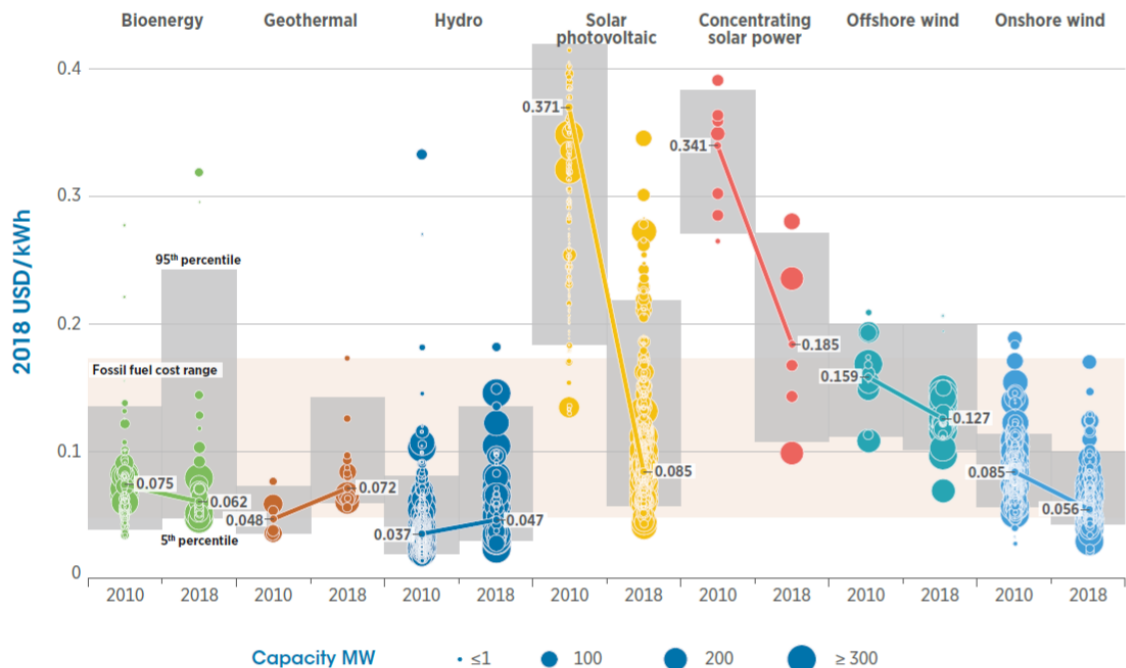


図 1.1.2 ユーティリティー規模の再生可能エネルギー発電技術の LCOE [2]

2015年12月に開催された第21回気候変動枠組条約国際会議（COP21）では世界全体の温室効果ガス（Greenhouse Gas, GHG）の総排出量のうち推計で少なくとも55%を占める55か国以上の国によりパリ協定が採択された。日本では、GHG排出の約90%はエネルギー起源CO₂が占めており、エネルギー分野でのCO₂削減に向けた対応が重要と考えられている。このような課題認識のもと、2018年7月に閣議決定された第五次エネルギー基本計画では、2030年のエネルギーミックス実現に向けた強化と2050年のエネルギー転換・脱炭素化への挑戦をするとされており、2030年度に非化石比率を44%まで拡大する高い中期目標が掲げられている [3]。第五次エネルギー基本計画を踏まえ、電力システムが従来の上流（大型発電所）から下流（需要家）に電気を供給する集中型から、上流と下流の双方向で電気を授受する分散型にシフトする方向性が日本政府からも示されている [4]。

脱炭素化・低炭素化の世界的潮流と LCOE 低下に伴うグリッドパリティやストレージパリティの実現により、再生可能エネルギーの導入が加速度的に進んでいくことは容易に想像できる。今後、従来の集中型電力システムから分散型電力システムへの転換が進んでいくことは間違いないと言っても良い。

		足元 (2016)	2030
GHG削減目標 (2013年比)		-7%	-26%
エネルギー起源CO2 ※GHG全体の92%			
供給側			
電力 ※エネルギー起源CO2の50%			
	再エネ	16% (2017)	22~24%
	原子力	3% (2017)	22~20%
	石炭	35% (2017)	26%
	天然ガス	39% (2017)	27%
需要側	消費効率改善 (最終エネルギー消費量/GDP) (2012年比)	8% (改善)	35% (改善)

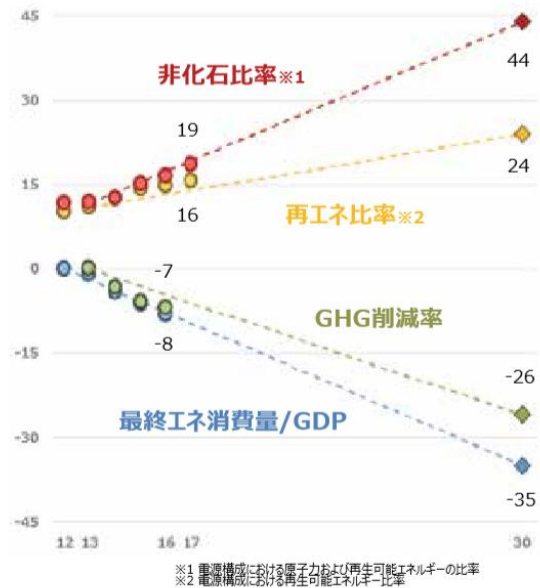


図 1.1.3 日本の中期目標とその推移 [3]

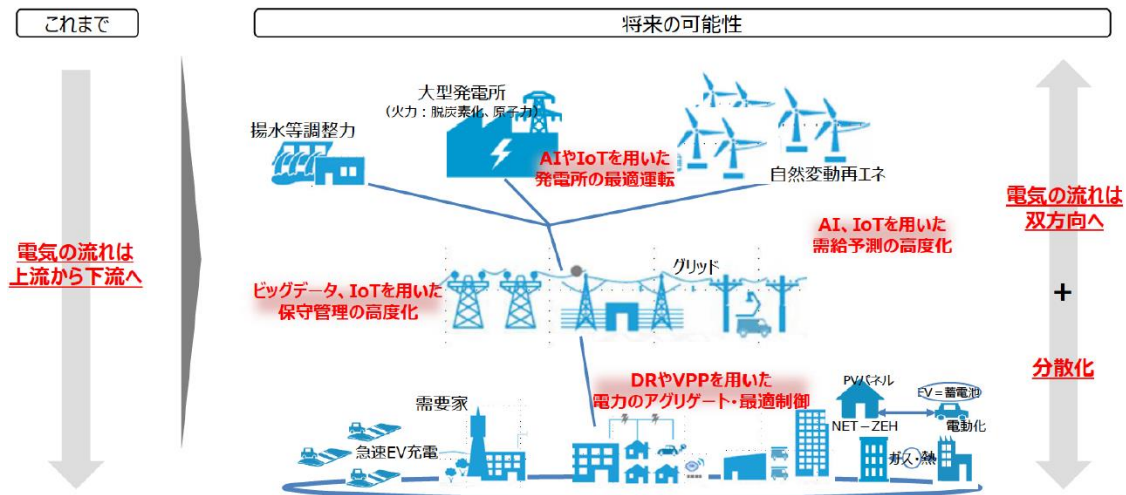


図 1.1.4 電力システムの将来の可能性 [4]

1.2 電力市場環境の変化と電力価値の多様性

脱炭素化・低炭素化の実現に貢献する再生可能エネルギーの急激な導入により、いくつかの課題も顕在化し始めている。太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの多くは季節や天候により出力が左右される変動型の再生可能エネルギー（Variable Renewable Energy, VRE）である。電気の安定供給のためには電力の需要と供給を絶えず一致させる必要がある。この需要と供給のバランスが崩れると、大規模停電などが発生する恐れがある。例えば、春季や秋季などの電力需要が低い季節に、昼間の太陽光発電の出力が大きい場合、調整可能な電源の出力を抑制しても供給が需要を上回り、電力余剰が発生するなどして、系統周波数変動による停電を誘発する恐れがある。米国カリフォルニア州の独立系系統運用者（CAISO）では、太陽光発電により昼間の正味の電力需要が減少した後、日没による太陽光発電の出力低下に伴う急峻な正味電力需要の増加（いわゆる、ダックカーブ問題）が生じており、負荷配分可能な従来電源の調整力が不足し始めている [5]。このダックカーブによる調整力不足の問題は、日本の九州地方でも起き始めている [6]。

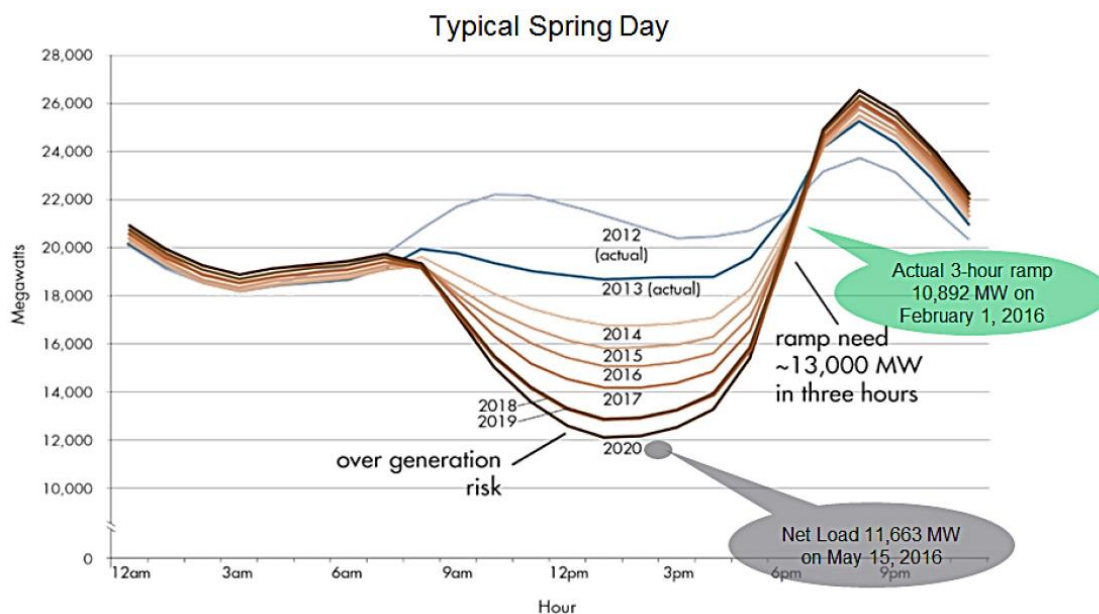


図 1.2.1 CAISO のダックカーブ問題 [5]

〔2017年4月30日の需給運用の状況〕

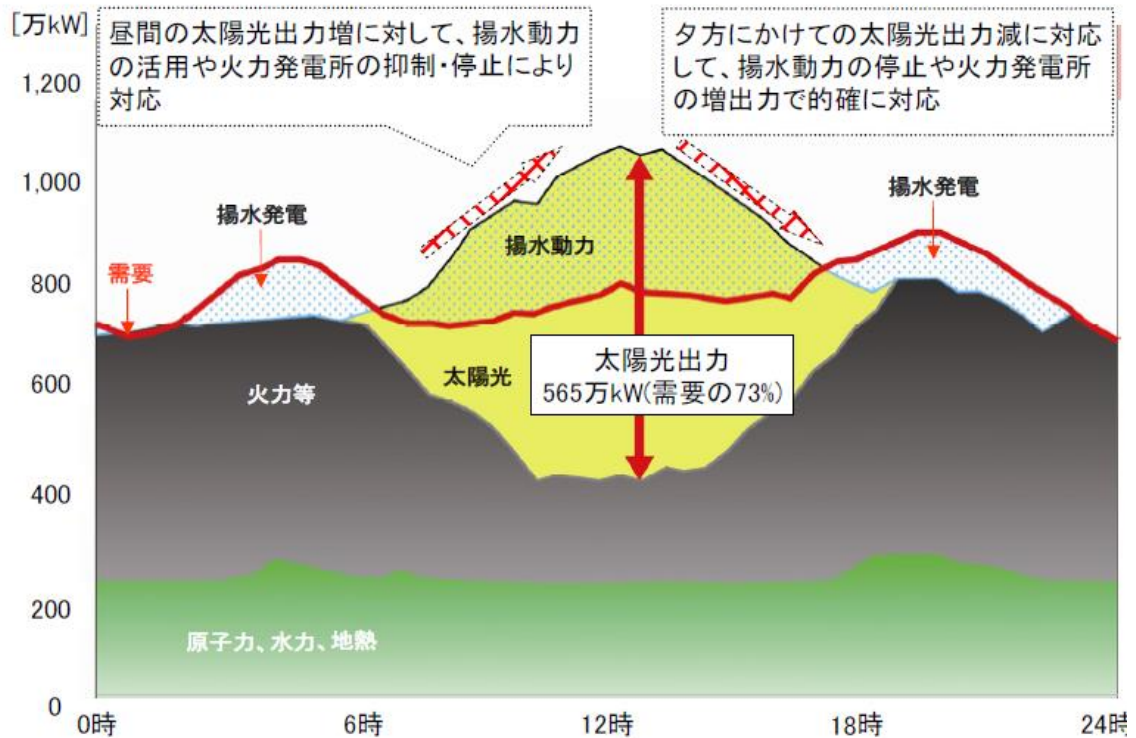


図 1.2.2 九州電力管内の需給運用状況 [6]

以上のような課題を踏まえ、日本政府は「電力の安定供給の確保」、「電気料金の最大限の抑制」、「電気利用の選択肢や企業の事業機会の拡大」の三つの目標を掲げて電力システム改革 [7]を推進しており、これにより日本の電力市場環境は大きく変化している。特に、2016年4月に開始された電力小売全面自由化以降、様々な業界から650以上の事業者(2020年5月17日時点)が参入し、市場が活発化している [8]。加えて、更なる競争力の強化などを目的に、新しい市場整備も進められている。電気の価値は、従来までの実際に発電された電気の価値【kWh 価値】だけでなく、発電することができる能力の価値【kW 価値】、短時間で需給調整できる能力の価値【 Δ kW 価値】、非化石電源で発電された電気付随する環境価値【環境価値】などに分離され、個別の経済的価値を有する商品として取引できるようになる見通しである [9]。

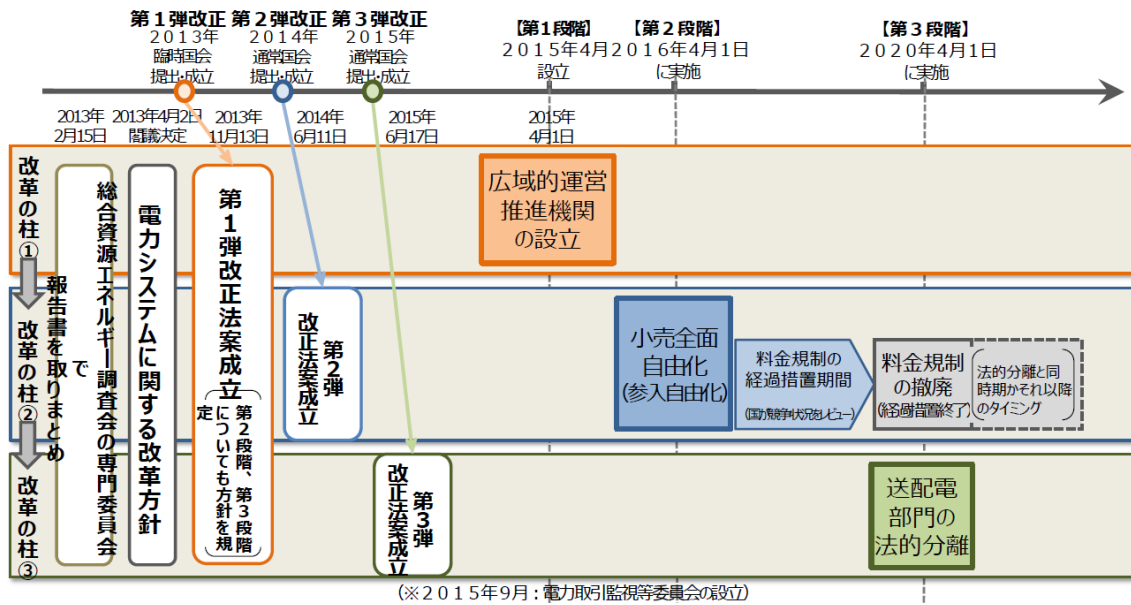
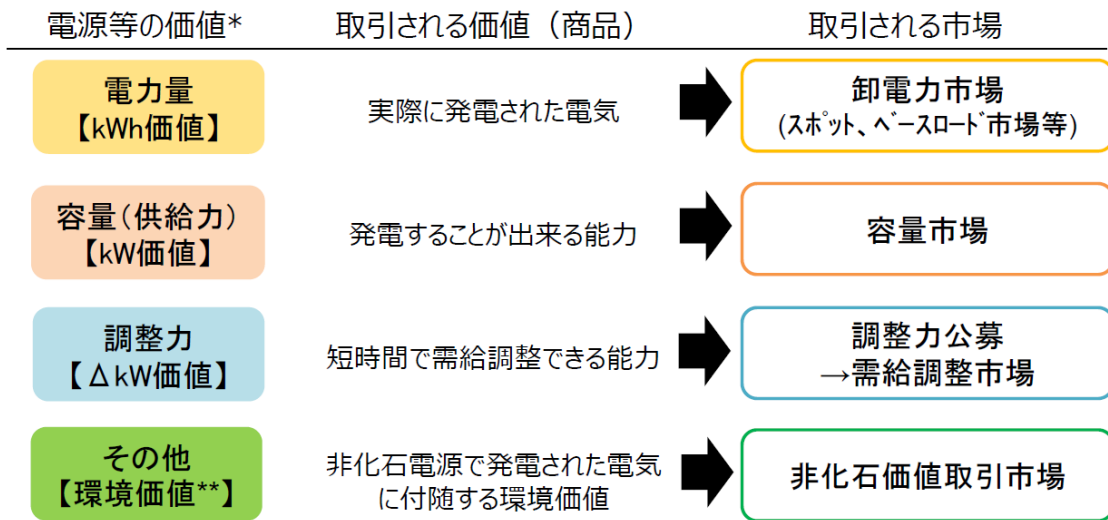


図 1.2.3 電力システム改革の全体像 [7]



(*) 上図は電源を想定して記載しているが、ネガワット等は需要制御によって同等の価値を生み出すことが可能。また、一つの市場において、複数の価値を取り扱う場合も考えられる。
(**) 環境価値は非化石価値に加えて、それに付随する様々な価値を包含した価値を指す。

図 1.2.4 今後の市場整備の方向性 [9]

1.3 需要家側エネルギーリソース (DSR) の運用制御技術高度化の重要性

これまで述べたように、電力システムそのものだけでなく、電力の市場環境や電気の価値観が大きな変貌を遂げようとしている。本研究では、DSR を運用して、kWh 価値、kW 価値、 Δ kW 価値、環境価値などの多様な価値を提供し、その対価を得るエネルギー事業者をエネルギーサービスプロバイダーと定義する。エネルギーサービスプロバイダーは、Behind-the-Meter の DSR を運用し、受電点以降 (Front-of-Meter) の各取引市場に kWh 価値、kW 価値、 Δ kW 価値を提供し、対価を得る。他方では、DSR を保有する需要家内の再生可能エネルギー比率の調整や、有事の電源バックアップを行うなどのエネルギーマネジメントサービスを提供し、対価を得る。これらの多様なサービスの経済的価値のそれぞれは、季節や時間帯によりダイナミックに変動する。このため、エネルギーサービスプロバイダーは、限られた DSR を効率的かつ効果的にそれぞれのサービスに対して利用する運用制御技術の獲得が必須となる。

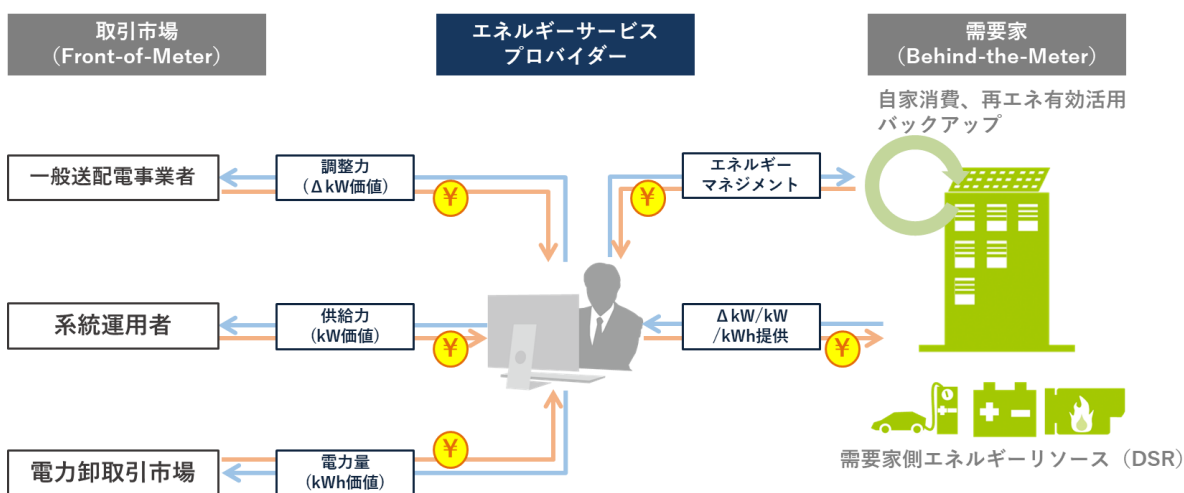


図 1.3.1 エネルギーサービスプロバイダーを取り巻くサービスの全体像

第2章 目的

2.1 DSRの運用制御における技術課題

エネルギーサービスプロバイダーは有限の需要家側エネルギーリソース（Demand Side Energy Resource, DSR）を運用して、多様な電力価値を提供することで対価を得る。エネルギーサービスプロバイダーには大別して、①多様化、②運用効率化、③適用領域拡大、④制御の高精度化、⑤絶対量の増加の五つの技術課題が要求される。

① 多様化

DSRとして扱えるリソースの種類を拡張する。サービスごとの電力価値は時間的にダイナミックに変動するため、発電や制御可能時間帯の異なるDSRを保有することで、柔軟に対応できるようになる。発電装置としては、太陽光発電、風力発電、バイオマス発電、蓄電装置としては、定置型蓄電池、EV、消費機器としては、照明機器、空調機器などが挙げられる。

② 運用効率化

DSRをサービスの特性に合わせて効率的に運用する。高い応答性が要求されるサービスでは出力応答性の高い定置型蓄電池を用いる、需要家内の再生エネルギー比率を高めたい場合は、太陽光発電や風力発電を用いるなど、保有するDSRを特性や目的に応じて適切に配分する。また、取得した実績データの収集・分析などを通じて、効率的な運用計画を決定するなどの運用面での効率化を図る。

③ 適用領域拡大

DSRを多様なサービスに適用する。DSRを特定の用途に限定して利用するのではなく、時々刻々と変動するサービスの経済的価値に応じて都度用途を変化させるマルチユース運用により経済効率改善を図る。

④ 制御高精度化

DSRの制御目標量に対する応答量の精度を高める。太陽光発電の発電電力変動や、消費機器の負荷変動、EVユーザの行動変容などの影響による制御誤差を低減するため、予測技術の改善や補正手段の充実を図る。

⑤ 絶対量増加

DSRの保有設備容量の絶対値を増加する。外乱による制御量の誤差の影響をならし効果により低減する。

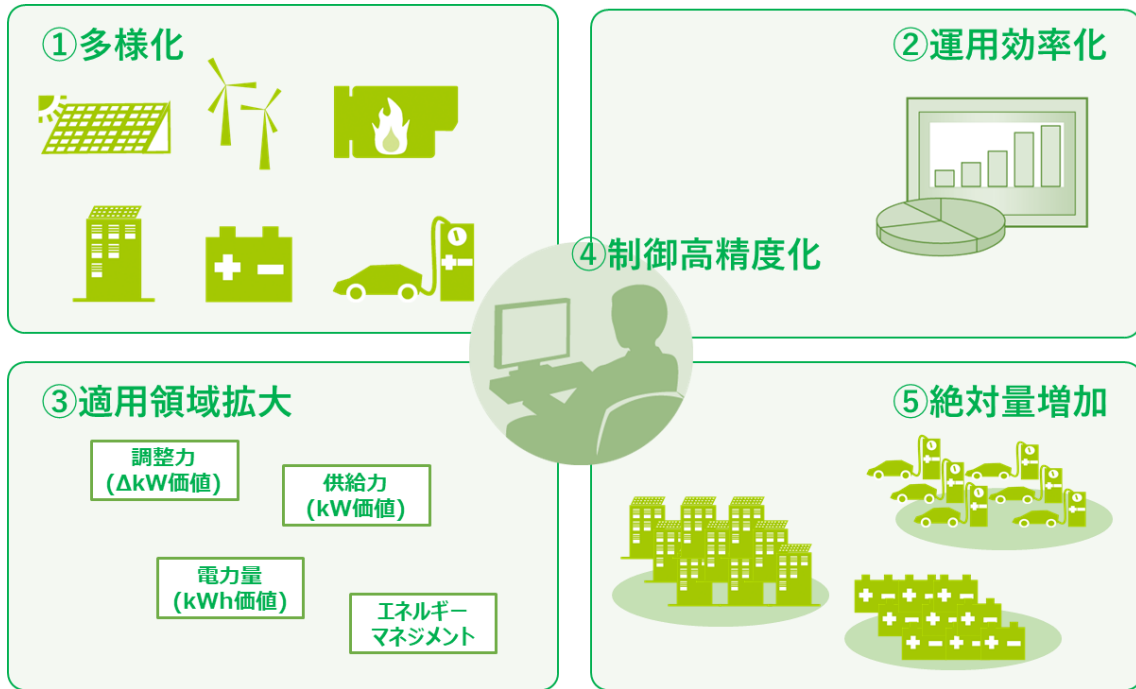


図 2.1.1 DSR の運用制御における技術課題のイメージ

2.2 本研究で対象とする運用制御技術課題

本研究では前項で挙げた五つの技術課題の内、エネルギーサービスプロバイダーの運用面における最も重要な技術課題として、①多様化、②運用効率化、③適用領域拡大の三つを取り上げる。これらの技術課題に対し、実験的手法や数値解析手法を用いて、将来の電力システムや電力市場環境下での新しい DSR の適用可能性を明らかにするとともに、経済性や適用領域拡大に資する運用戦略技術の提案、有効性確認を行うことを目的にする。各技術課題における、具体的な研究目的は下記の通りである。

2.2.1 DSR の多様化

新しい蓄電システムとして期待される電気自動車の DSR としての性能を実験的に確認し、将来の電力市場に対する適用可能性を評価する。

2.2.2 DSR の運用効率化

将来の電力市場環境を考慮し、需要家の Behind-the-Meter に太陽光発電と蓄電システムを有する低圧需要家を対象に、天候による正味負荷電力の長期的変動性を考慮した新しい運用戦略を提案し、効率的な運用を実現する。提案した運用戦略を適用した場合の需要家内における再生可能エネルギー比率の期待改善効果を明らかにする。

2.2.3 DSR の適用領域拡大

更なる経済性改善のため、エネルギーサービスプロバイダーが保有する単一の蓄電システムを、電力卸取引市場の複数のサービス（商品）を対象に電力供給し、対価を得る多目的運用戦略を提案し、数値解析を行うことでその有効性を明らかにする。

第3章 直流V2B(Vehicle to Building)によるEVのDSR適用可能性(多様化)

3.1 電気自動車の普及とDSRとしての期待

近年、電気自動車(Electric Vehicle, EV)やプラグインハイブリッド車(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)などの電動車両普及が進展している。2018年末でEV/PHEVの普及台数は全世界で510万台となっている[10]。特に、2017年から2018年の一年間に全世界で200万台増加しており、この数年で著しく普及が進んでいることが分かる。牽引しているのは中国や欧米諸国であり、政策的な側面も強いのは事実だが、何れにしても温室効果ガス排出抑制に寄与する可能性の高いEV/PHEVの普及が進むこと自体は歓迎すべき潮流であるといえる。

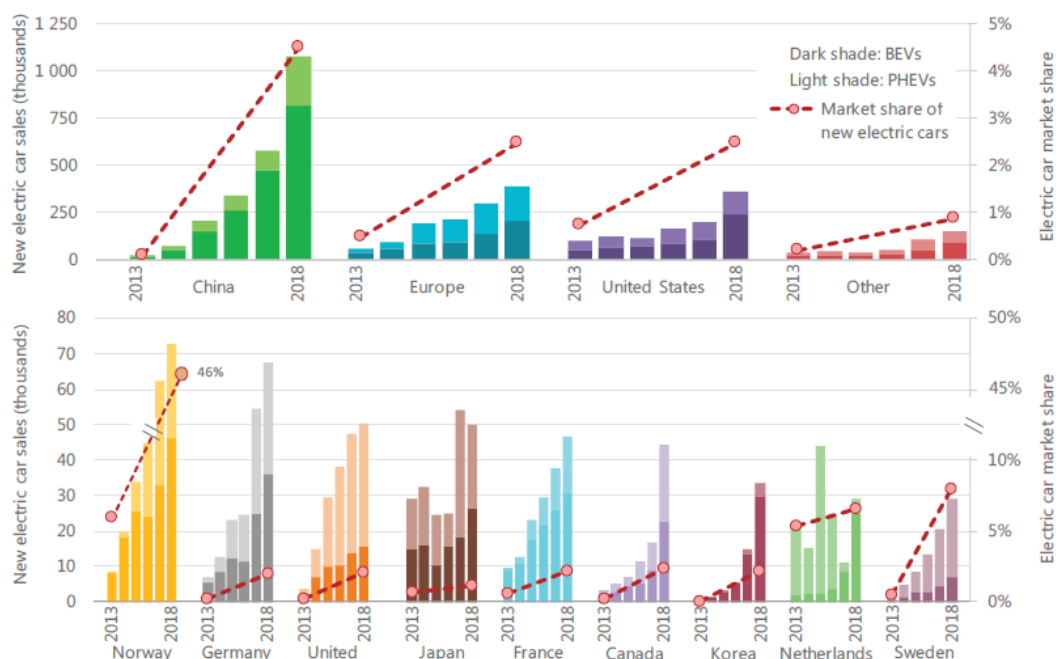


図 3.1.1 電気自動車の普及 [10]

日本のEV普及率はやや緩やかだが、近年は環境問題への対策だけでなく、有事の際における非常用電源の一つとしても注目されている。日本の自然災害は年々増加傾向であり、災害が大規模化・激甚化する事例も増加している[11]。2019年の台風15号では千葉県内で二週間近く停電が継続したエリアも発生した[12]。このような状況下において、レジリエンス強化の観点で地方自治体と自動車会社が協定を結び、電気自動車を有事の際の非常用電源として活用することも検討されてきている[13]。

これまで示した通り、環境的側面だけでなく「動く蓄電池」としての役割も今後ますます期待される場所であり、重要なDSRの一つとして認知され始めている。

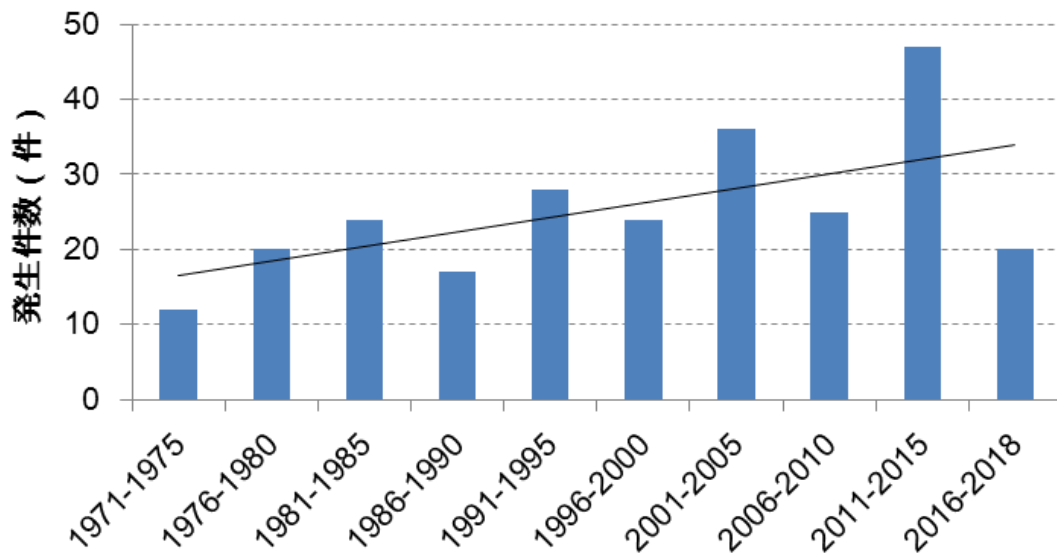


図 3.1.2 国内の自然災害発生件数 ([11]を基に作成)

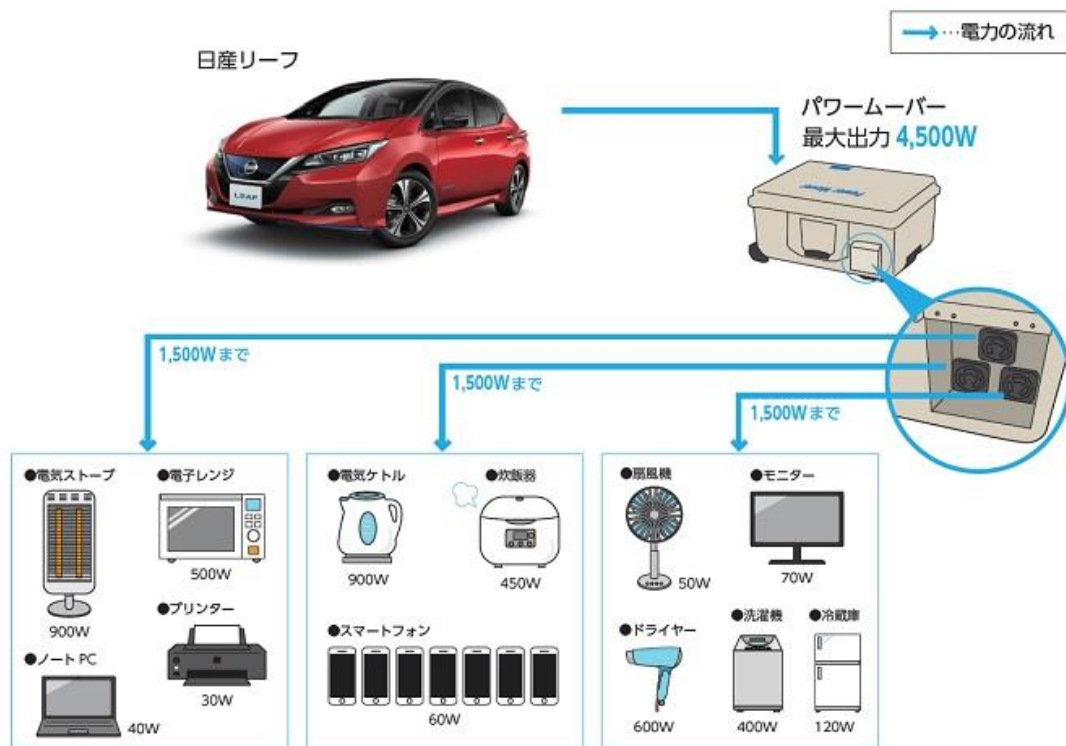


図 3.1.3 電気自動車による電力供給イメージ [13]

3.2 直流 V2B 技術の特徴と新規性

V2B とは、自動車とビル間で電力の相互供給をする技術やシステムのことを指す。その他にも、自動車と一般住宅間で電力の相互供給をする場合は V2H (Vehicle to Home)、自動車と電力系統間で相互供給をする場合は V2G (Vehicle to Grid) と呼ばれる。これらを総称して、V2X (Vehicle to X) と表現する場合もある。V2X のイメージを図 3.2.1 に示す [14]。

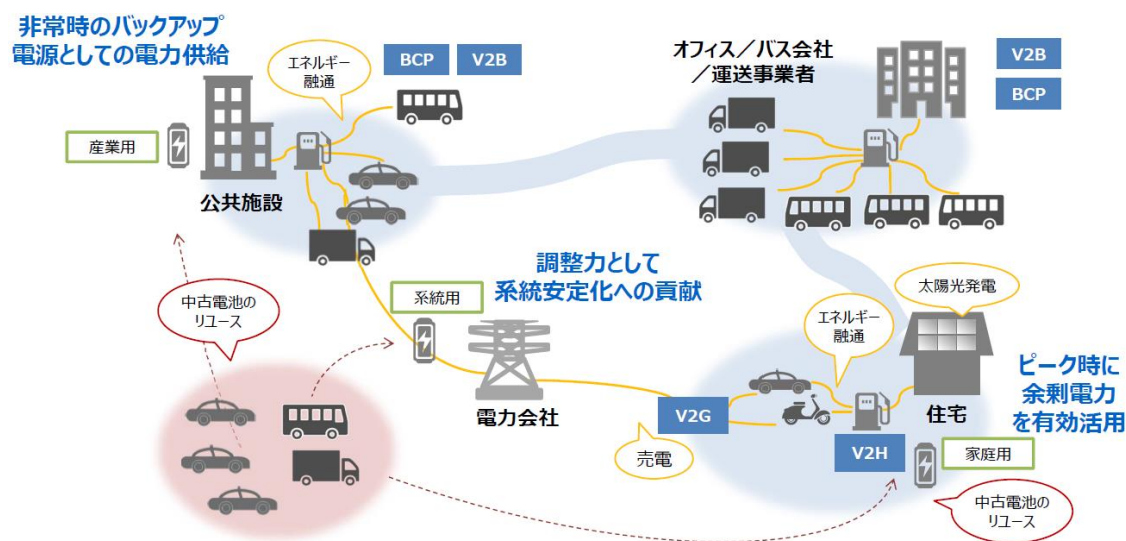


図 3.2.1 V2X のイメージ [14]

EV は温室効果ガスの排出ゼロで、環境負荷が低い自動車として認知されていると思われる。しかし、近年、Well-to-Wheel という考え方が浸透しつつある [15]。Well-to-Wheel とは、自動車の燃料を手に入れる段階から実際に走行させる段階まで、全体を通して見たときの環境負荷の考え方である。つまり、EV に使われる電気が従来の化石燃料を使った火力発電の電気で走行しているのであれば、トータルでは CO₂ を排出していることになる。このため、EV が何を原資とした電気で走行しているのかが重要となり、Well-to-Wheel で CO₂ 排出量を抑制するためには、再生可能エネルギーなどの CO₂ 排出原単位の低い電源から充電することが必要となる。

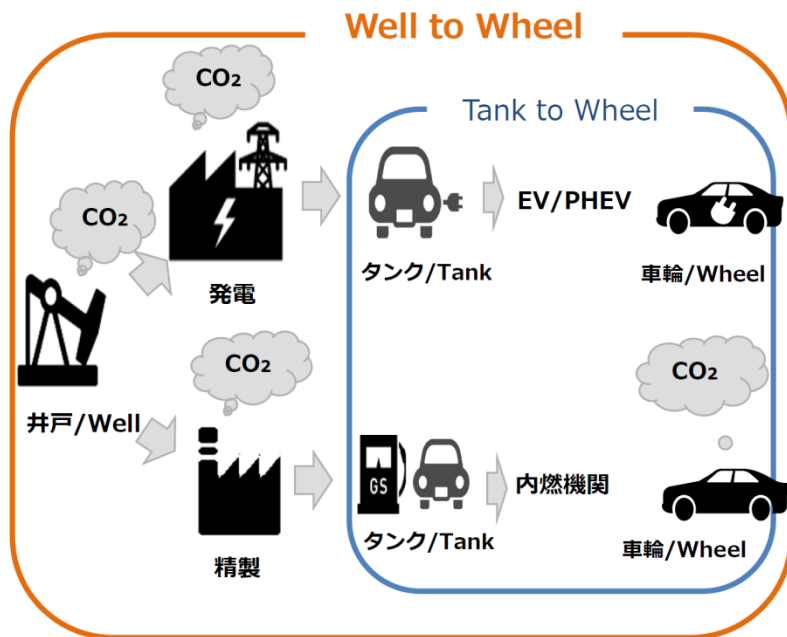


図 3.2.2 Well-to-Wheel [15]

日本政府は、Well-to-Wheel Zero Emission チャレンジと称し、日本車の環境性能向上、車の使い方のイノベーション、エネルギー供給のゼロエミッション化などに取り組む方針を示している [16].

世界に掲げる長期ゴール

- 以上を踏まえ、日本としては、世界トップレベルの技術力や経験等を有する立場として、自動車に対する環境性能向上の世界的要請の高まりに応えるべく、温暖化対策の長期目標タイミングである2050年に向けて以下の長期ゴールを世界に掲げ、積極的に世界をリードしていくことが適当。
 - **2050年までに世界で供給する日本車について世界最高水準の環境性能を実現する**
 - = 2°Cシナリオを前提とした環境性能水準
 - = 1台あたり温室効果ガス8割程度削減を目指す（乗用車は9割程度削減） <2010年比> ※
 - ※"IEA Energy Technology Perspective 2017"におけるB2DS（パリ協定と整合的なシナリオ。50%の確率で温度上昇を1.75度以内に抑えるシナリオ）における削減水準と整合的な水準。
 - = 上記水準が達成される場合、様々な前提によるが、乗用車の電動車(xEV)率は100%に達すると想定。
 - ※こうした世界の実現には、戦略的な対応が加速し、電池等の技術革新、インフラや制度面での環境整備が進み、電動車（xEV）の性能や消費者にとっての魅力を十分に高めることが重要。
 - **車の使い方のイノベーション（MaaS, Connected, 自動走行等）も追求しつつ、世界のエネルギー供給のゼロエミ化の努力と連動し、究極のゴールとしての世界的な"Well-to-Wheel Zero Emission" チャレンジに貢献。**

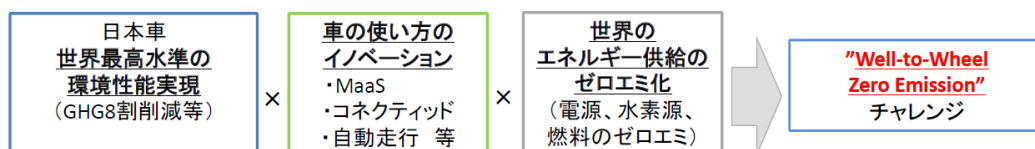


図 3.2.3 Well-to-Wheel Zero Emission チャレンジ [16]

前述したように、Well-to-Wheel の考え方を踏まえ、今後、EV を環境負荷低減の低い電源として V2X に活用していく場合、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーとの連携は必須と考えられる。ここで、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは直流の電力で発電する。加えて、これらの発電電力を充電する EV の車載蓄電池は直流の電力で動作する。更に、LED 照明やデジタル機器などの消費機器も直流で動作する。このため、直流給電方式は発電、蓄電、消費の親和性が高く、省エネルギーや再生可能エネルギーの有効活用の観点で、従来の交流給電方式に替わる新しい電力供給方式として期待が高まっている。

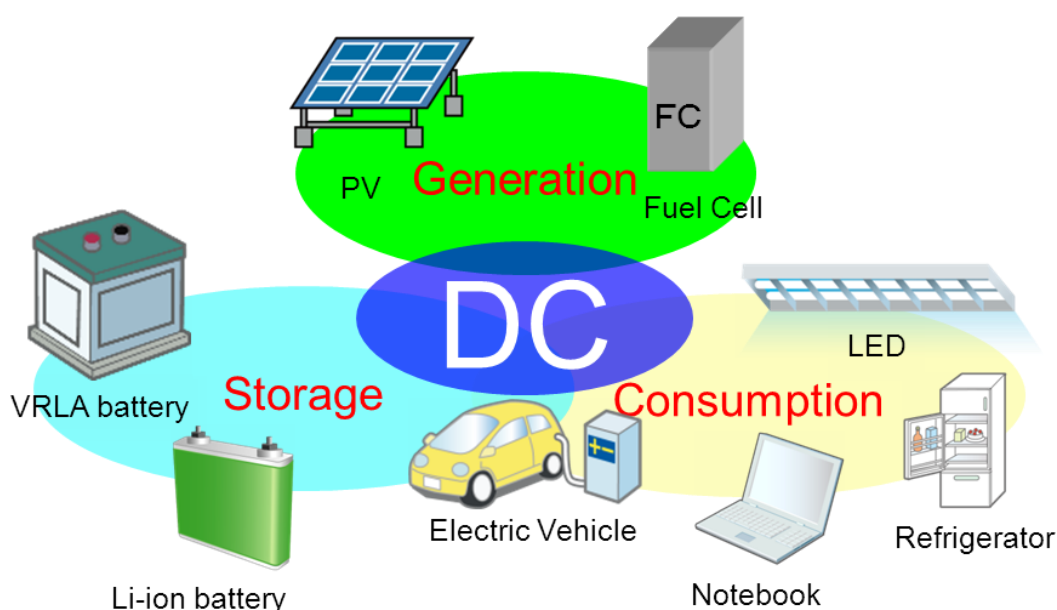


図 3.2.4 直流給電方式の適用分野

ところで、EV を DSR として活用するため、双方向 EV 充電器を介して家庭やビルの負荷設備に供給する、いわゆる V2H や V2B に関する研究はこれまで多数報告されている。Mouli らは、PV アレイと系統電力を入力とする三端子の 10 kW 双方向 EV 充電器を提案している [17]。Kwon らは、V2G と V2H が可能な双方向 EV 充電器を提案している [18]。Buja らや Abeywardana らは、V2G で電力系統に無効電力を供給する方法を提案している [19], [20]。これらの V2H/V2B/V2G は何れも交流給電方式での連系を前提としている。筆者らは、前述したような直流給電方式の特徴を踏まえ、太陽光発電システム、据置型蓄電池、EV を直流 400V 級の屋内配電網の共通母線に直接連系するオフィス向け直流給電システムに関する実証研究を進めている [21], [22], [23], [24], [25]。発電・蓄電・消費と親和性の高い直流給電方式を採用することで、発電装置から消費機器までに介在する電力変換装置の変換段数を低減させ、トータルでの電力損失の低減が期待できるためである。本章では、株式会社 NTT ファシリティーズ協力の元、400V 級の直流給電方式による新しい V2B

技術を活用した DSR としての適用可能性について実験的に確認する。

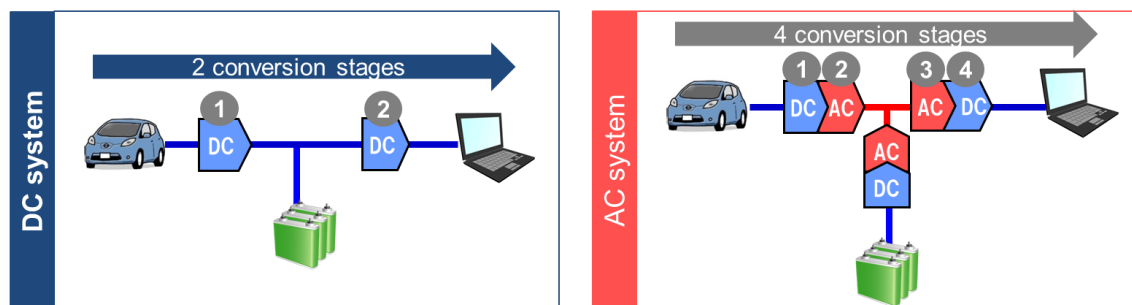


図 3.2.5 直流給電方式と交流給電方式の比較

3.3 直流 V2B 給電技術

3.3.1 実証給電システムの概要

本研究の実証給電システムの概要を図 3.3.1 に示す [26]. 実証給電システムには, 交流 200V を直流 380V に変換する整流装置, 双方向 EV 充電器, 定置型リチウムイオン蓄電池 (Li-ion 蓄電池) が含まれている. 整流装置には, 直流負荷装置及び双方向 EV 充電器に電力供給を行う整流器ユニット (Rectifier) と, 定置型リチウムイオン蓄電池に電力供給を行う充電器ユニット (LiB charger) が搭載されている. EV は三菱自動車製 i-MiEV と日産自動車製 LEAF を用いた. 双方向 EV 充電器は EV 充放電制御装置により制御される. 双方向 EV 充電器と EV 充放電制御装置間は Modbus/TCP プロトコルにより相互情報流通がなされる. 各装置の主要諸元を表 3.3.1 に示した.

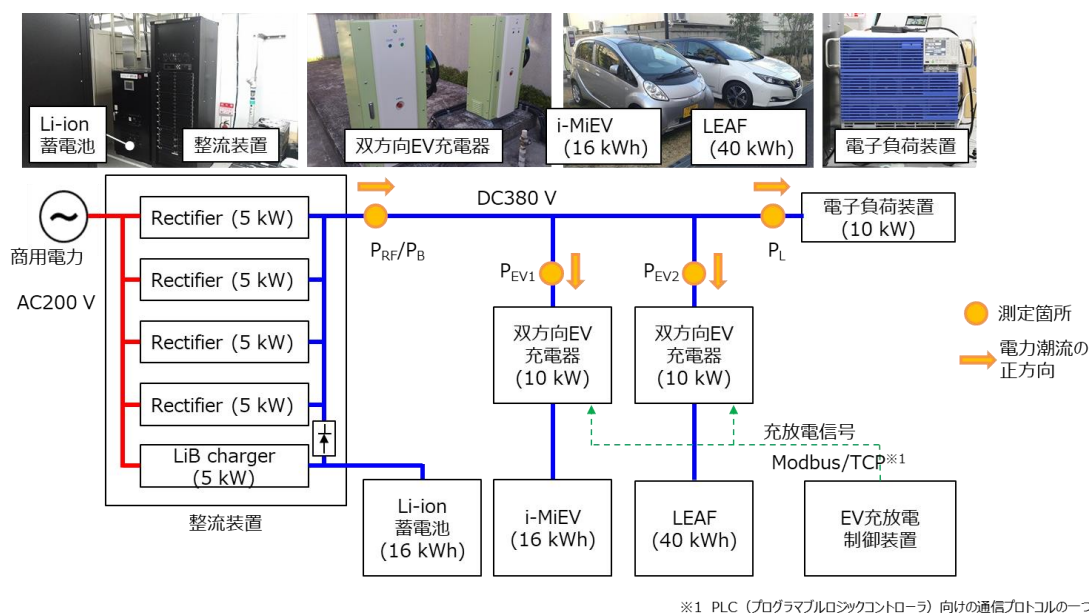


図 3.3.1 実証給電システム概要 [26]

表 3.3.1 各装置の主要諸元

Device		Voltage range		Capacity
		Input	Output	
整流装置	Rectifire	AC200 V	DC383 V	5 kW (4 units)
	LiB charger	AC200 V	DC374 V	5 kW
双方向 EV 充電器		DC370 to 388 V	Depends on the type of EV	10 kW
Lithium-ion 蓄電池		DC377 to 312 V		16 kWh

3.3.2 双方向 EV 充電器

実証給電システムの主要な装置である，双方向 EV 充電器について説明する．本装置は EV の充電機能と放電機能を有する双方向 EV 充電器である．EV との接続電源として直流給電方式を採用しており，太陽光発電や定置型リチウムイオン蓄電池，直流駆動の消費機器に直接接続可能になっている．直流電源側の電圧範囲は 370～388 V であり，EV へ最大 10 kW 充電する機能と，EV から最大 10 kW を直流電源に回生できる機能を有している．EV 側の電圧仕様は CHAdeMO V2H 規格に準拠しており，直流電源側とは絶縁された構造で 150～450 V の電圧範囲になっている．



図 3.3.2 双方向 EV 充電器の外観

本装置のシステム構造は 2 通りのモードがある．通常，待機状態では EV 充電器として使用する．EV 充放電制御装置からの制御指令があった場合，EV 充放電制御装置による制御モードとなる．Modbus/TCP プロトコルで接続された EV 充放電制御装置の充放電命令は 0.1 kW 単位で最大 10 kW の電力設定と充電上限 SOC (State of charge) の設定，放電下限 SOC の設定が可能であり，制御指令実行により自動で充電/放電の基本動作を行う．SOC は電気自動車の充電状態である．EV とは 0.1 秒周期で CAN 通信を行い，EV からの最大電圧情報・最大電流情報や EV 蓄電池の SOC・蓄電池容量(Wh)・停止命令等の EV 側要求情報および接続制御ステータス情報を入手し，EV 充放電制御装置から入手した制御指令情報を判断し，EV との接続制御および EV 充放電動作，充放電内容の情報提供を EV に実施する．一方，EV 充放電制御装置へは上述の EV 情報と EV 充放電器の充放電電力・電圧・電流・装置ステータス情報やエラー情報を加えて最速 0.1 秒の速度で独自プロトコルフォーマットにて EV 充放電制御装置からの情報要求に対応する．本装置の電力変換方式は高周波絶縁スイッチング方式で電力変換素子は SiC を使用し，電力変換効率を上げている．制御電源は直流電源からの電力を利用し，全て直流のみのシステム構造になっている．安全対策はハードでの配線用遮断器，地絡検出器による電力の安全対策と直流電力源接続時や EV 接

続時に接続リレーの溶着を保護する電圧プリチャージ機能や EV の過電圧・過電流・過放電および状態異常，本装置の状態異常，電力源の過電圧・低電圧・過電流を常時監視する機能を有している。

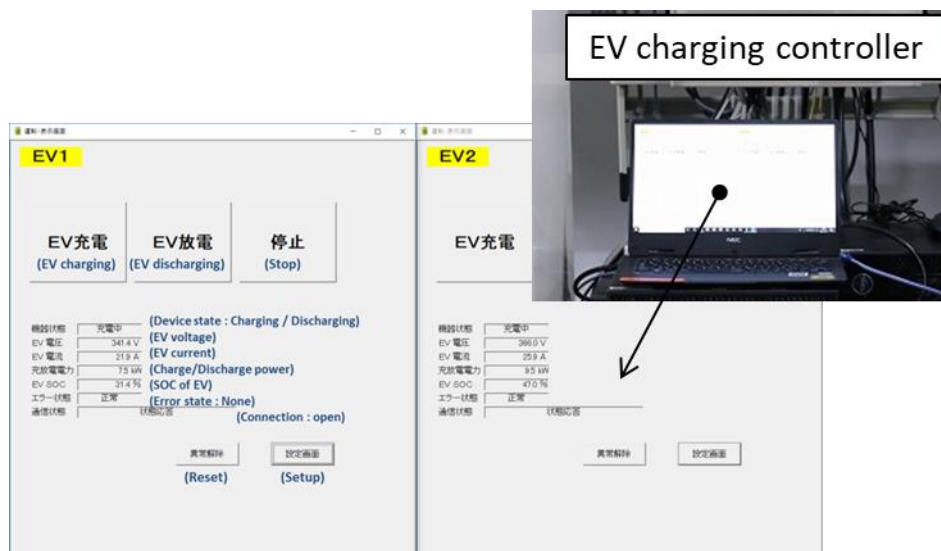


図 3.3.3 EV 充放電制御装置のユーザーインターフェース

3.3.3 実証給電システムの動作

実証システムの状態遷移図を図 3.3.4 に示す。本実証システムは EV 充電制御装置の制御指令と EV の充電状態 (SOC) に基づき状態遷移する。通常動作 (State 1) では、負荷には全て整流装置から供給される。初期状態が通常状態において、EV 充電制御装置の充放電制御指令 (Charge signal) が有効 (true)、かつ、SOC が充電上限値 (Upper limit) 未満であれば充電動作 (State 2) に遷移し、EV に充電を行う。その後、充電制御指令が解除 (false) される、または、SOC が充電上限値に達した場合に充電停止となり通常動作に遷移する。初期状態が通常状態において、EV 充電制御装置の放電制御指令 (Discharge signal) が有効 (true)、かつ、SOC が放電下限値 (Lower limit) を超えていれば放電動作 (State 3) に遷移し、EV から放電を行う。その後、放電制御指令が解除 (false) される、または、SOC が放電下限値に達した場合に放電停止となり通常動作に遷移する。

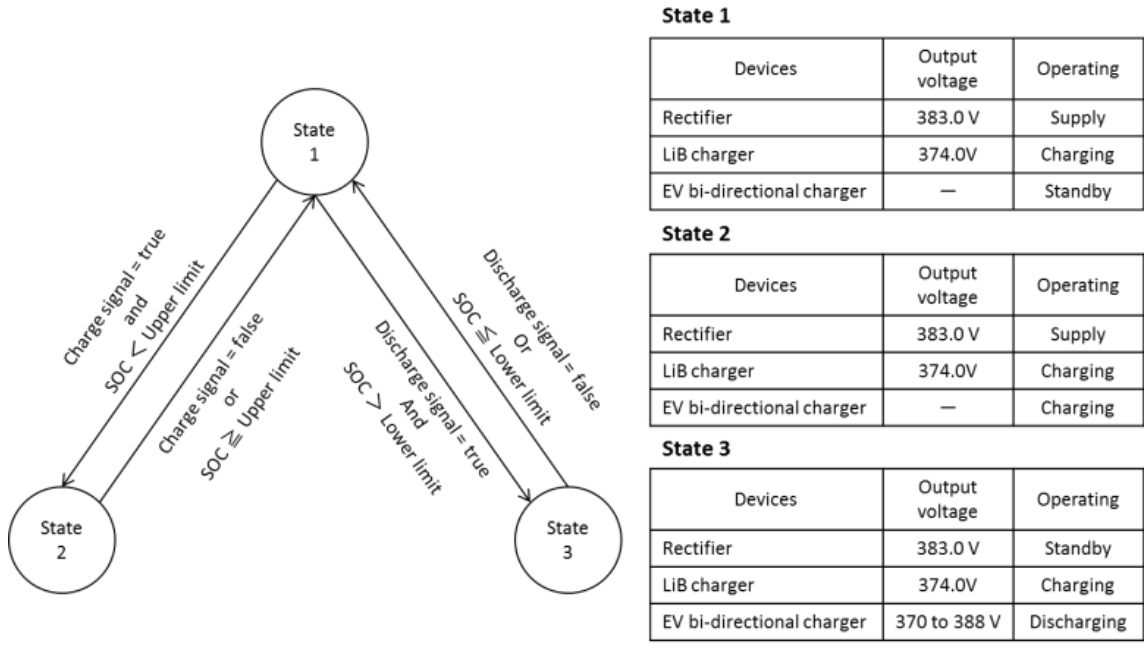


図 3.3.4 状態遷移図

3.4 試験及び結果

3.4.1 総合動作試験

本給電システムの動作正常性を確認するための予備実験として、総合動作試験を実施した。本試験では、複数台のEVから所定の電力を供給、複数台のEVに所定の電力を供給、及びその組み合わせが可能かを確認する。試験方法として、負荷電力 P_L 、整流装置の出力電力 P_{RF} 、i-MiEV の出力電力 P_{EV1} 、LEAF の出力電力 P_{EV2} の需給の組み合わせを変化させた全 25 パターンに対し、正常な需給動作をすることを確認する。図 3.3.1 における需給平衡条件は、式 3.1 の通りである。

$$P_{RF} = P_L \pm P_{EV1} \pm P_{EV2} \quad (3.1)$$

試験結果を図 3.4.1 に示す。試験の結果、連系点での需給平衡条件（図 3.4.1 中の各時間帯の需給合計が一致）が成立しており、正常な需給動作をすることが確認できた。また、双方向EV充電器二台の目標指示値合計が負荷電力以上の場合、出力電圧を上昇させる制御が干渉し電力変動する事象が確認された（図中、黄塗箇所等）。実運用においては双方向EV充電器相互の情報連携等により、負荷電力に対して制御指示値を見直すなどの制御が必要になると思われる。

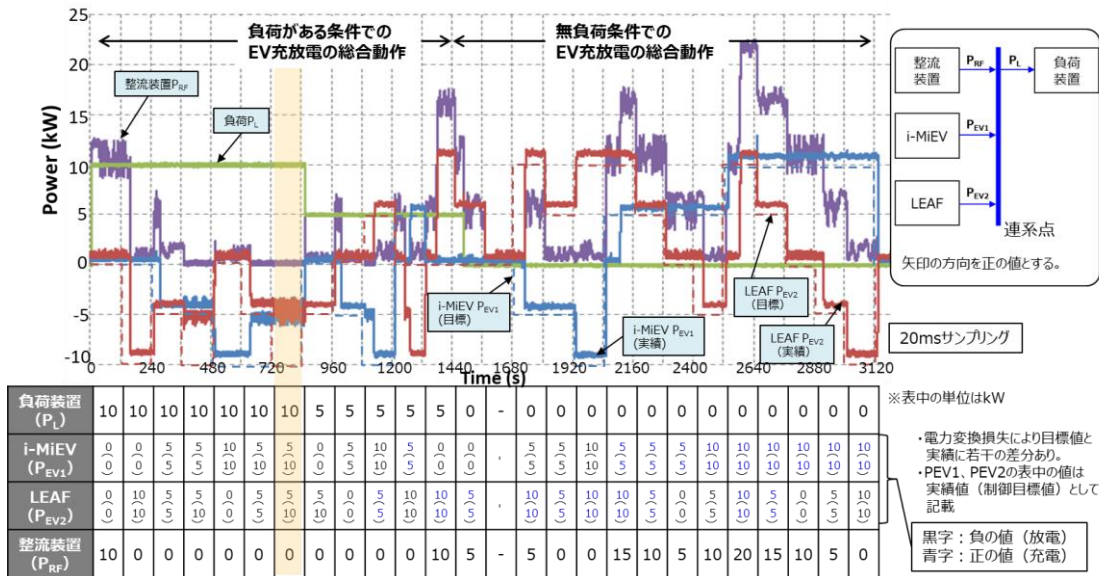


図 3.4.1 総合動作試験の試験結果

3.4.2 充電及び放電特性試験

本試験では、EV を DSR として利用するため、EV 車両への充電特性及び EV 車両からの放電特性を明らかにする。測定パターンは表 3.4.1 の通りとした。EV 充放電制御装置で設定する SOC の充電上限値及び放電下限値は事前に予備実験を実施し、EV の動作可能範囲を実験的に確認して決定した。i-MiEV の充電上限値と放電下限値はそれぞれ 96%、30%とし、LEAF は 99%、10%とした。EV 充電制御装置の充電電力及び放電電力の制御指示値は 5.0 kW、7.5 kW 及び 10.0 kW の場合でそれぞれ試験を行った。なお、充電電力を正の値 (P_{EV})、放電電力を負の値 ($-P_{EV}$) として表記する。

表 3.4.1 測定パターン

Examination	SOC		Power (kW)
	Start	Stop	
Charge characteristics	Upper limit	Lower limit	5.0, 7.5, 10.0
Discharge characteristics	Lower limit	Upper limit	-5.0, -7.5, -10.0

i-MiEV の充電特性を図 3.4.2 に、LEAF の充電特性を図 3.4.3 に示す。i-MiEV の場合は SOC が概ね 80% 付近から、LEAF の場合は SOC が概ね 90% 付近から充電電力が線形で減少することが分かる。EV への充電電力は EV 充放電制御装置からの充電電力の制御指令値に対して、EV 側の充電電流指令に基づき決定される。このとき、充電電力が減少し始める SOC の値や充電電力の傾きは、車載蓄電池の劣化状況等により異なると想定されるため、この測定結果はあくまで測定した EV の特性であることに注意が必要である。

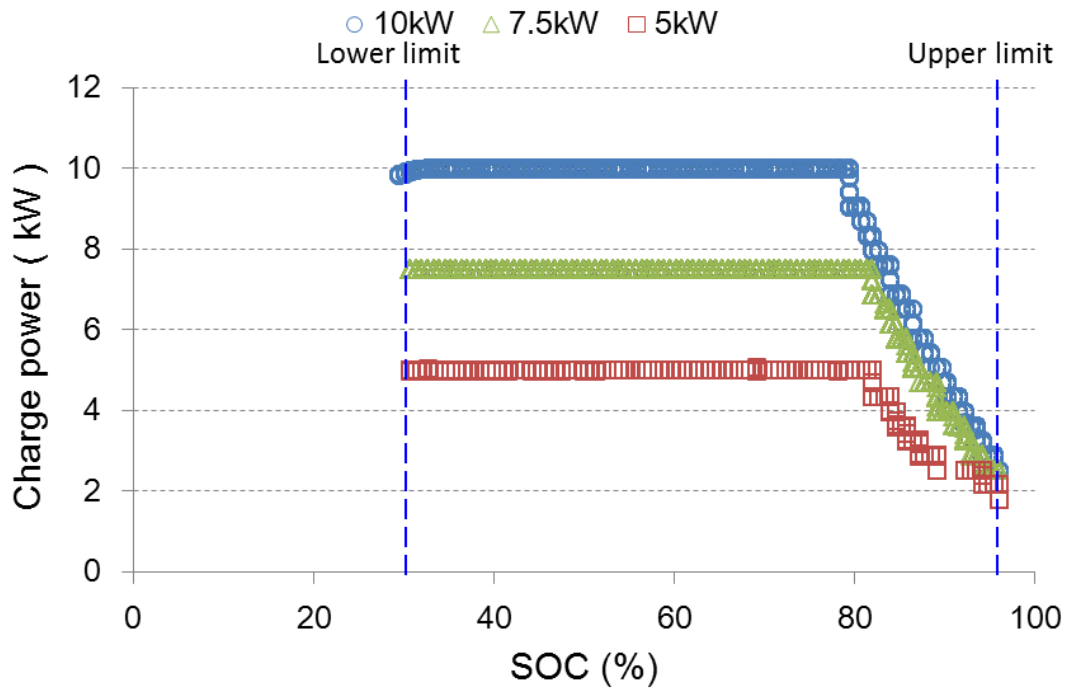


図 3.4.2 充電特性 (i-MiEV)

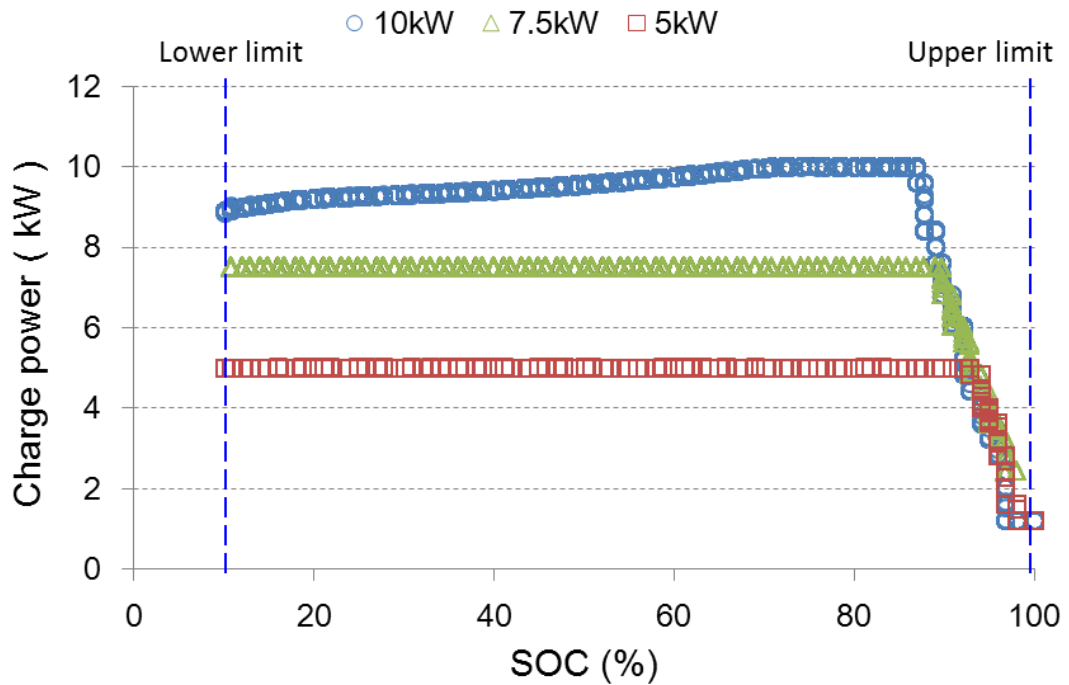


図 3.4.3 充電特性 (LEAF)

i-MiEV の放電特性を図 3.4.4 に、LEAF の放電特性を図 3.4.5 に示す。充電時と異なり、放電時は動作可能範囲内で設定した制御指令値通りに放電電力が出力されることが確認できた。

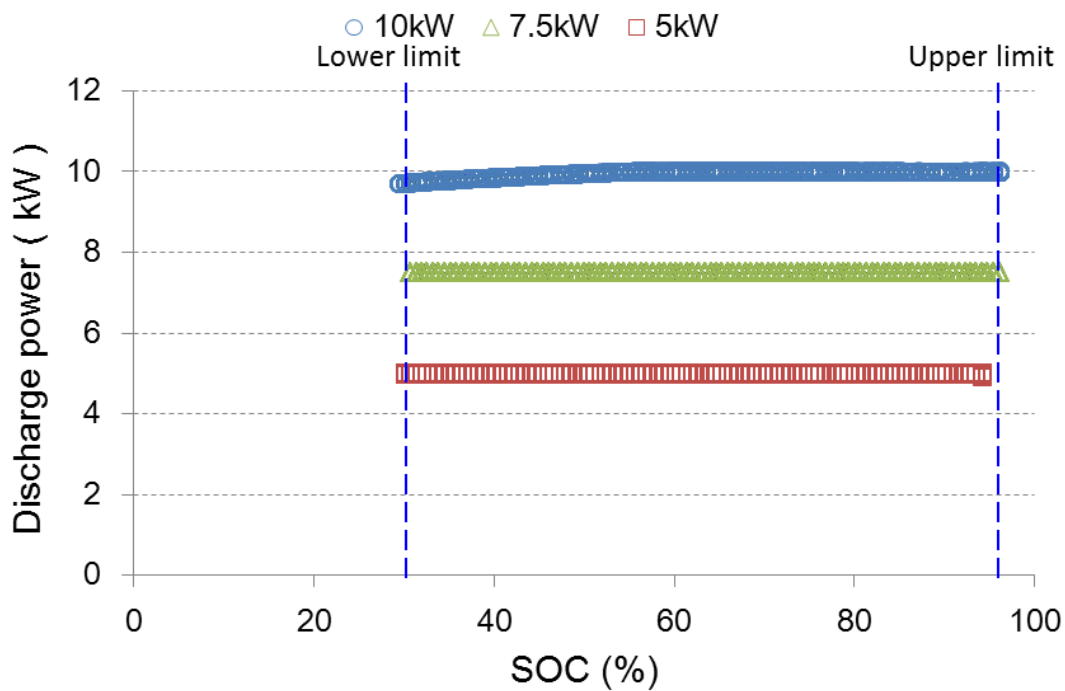


図 3.4.4 放電特性 (i-MiEV)

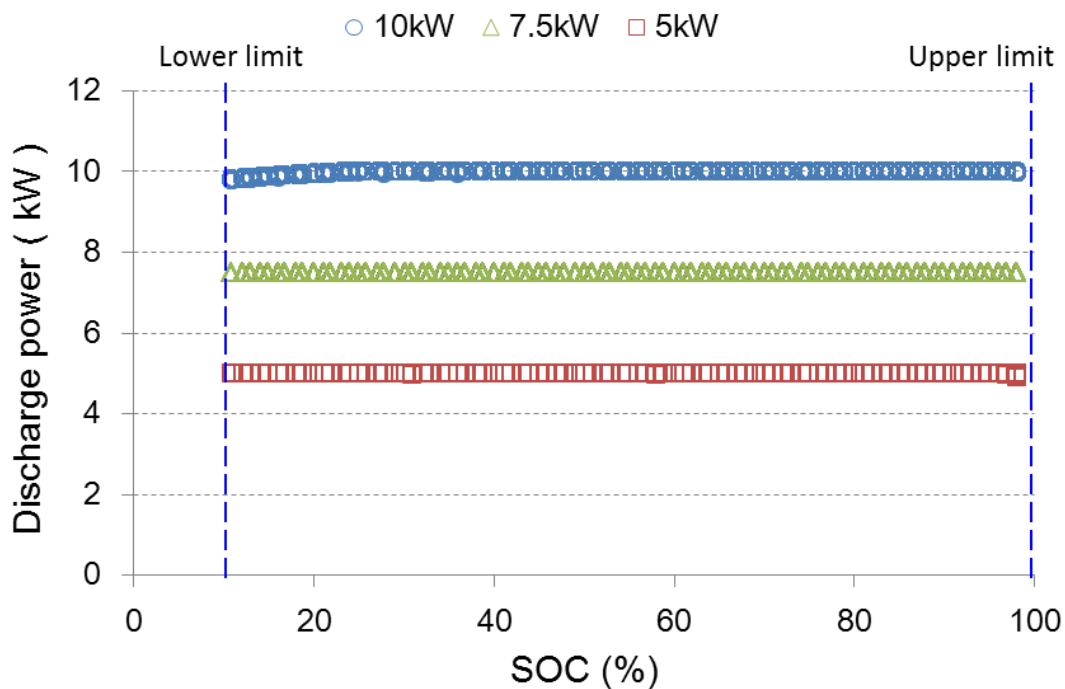


図 3.4.5 放電特性 (LEAF)

3.4.3 適用可能性評価試験

本試験では、EV が Front-of-Meter のサービスに対して DSR として適用可能な性能を有するか確認する。サービスの対象として、2021 年から段階的に開始される需給調整市場の各商品要件 [27] に対する DSR の適用可能性を検証する。需給調整市場を対象にした理由として、他市場に比べ最も早い応動性能が DSR に要求されるため、当該市場に対する性能評価を実施することで、他市場の要求性能の参考として活用し易いためである。

なお、需給調整市場の要件の内、三次調整力②より応動の速い商品は現時点で要件が未確定のため、先行する欧米諸国の要件を参照し、参考値として評価した。

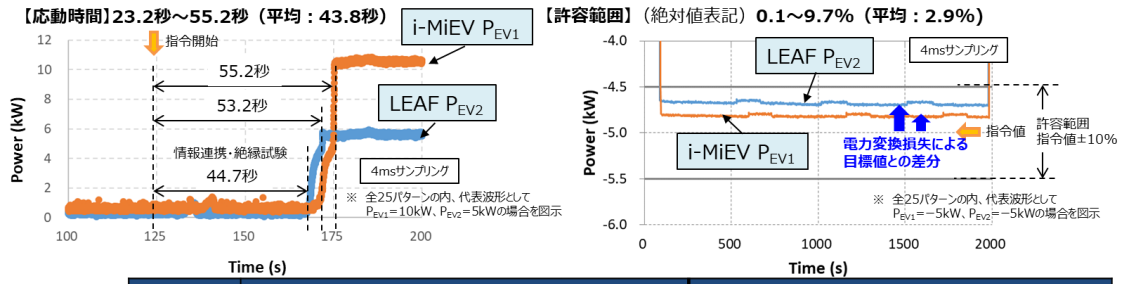
	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve for FIT (RR-FIT)
指令・制御	オフライン (自端制御)	オンライン (LFC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン
監視	オンライン (一部オフラインも可※2)	オンライン	オンライン	オンライン	専用線：オンライン 簡易指令システム：オフライン
回線	専用線※1 (監視がオフラインの場合は不要)	専用線※1	専用線※1	専用線※1	専用線 または 簡易指令システム
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内※3	45分以内
継続時間	5分以上※3	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	- (自端制御)	0.5～数十秒※4	1～数分※4	1～数分※4	30分
監視間隔	1～数秒※2	1～5秒程度※4	1～5秒程度※4	1～5秒程度※4	1～30分※5
供出可能量 (入札上限)	10秒以内に出力変化可能な量 (機器性能上のGF幅を上限)	5分以内に出力変化可能な量 (機器性能上のLFC幅を上限)	5分以内に出力変化可能な量 (オンラインで調整可能な幅を上限)	15分以内に出力変化可能な量 (オンラインで調整可能な幅を上限)	45分以内に出力変化可能な量 (オンライン(簡易指令システムも含む)で調整可能な幅を上限)
最低入札量	5MW (監視がオフラインの場合は1MW)	5MW※1,4	5MW※1,4	5MW※1,4	専用線：5MW 簡易指令システム：1MW
刻み幅 (入札単位)	1kW	1kW	1kW	1kW	1kW
上げ下げ区分	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ

※1 簡易指令システムと中給システムの接続可否について、サイバーセキュリティの観点から国で検討中のため、これを踏まえて改めて検討。
 ※2 事後に数値データを提供する必要有り (データの取得方法、提供方法等については今後検討)。
 ※3 沖縄エリアはエリア固有事情を踏まえて個別に設定。
 ※4 中給システムと簡易指令システムの接続が可能となった場合においても、監視の通信プロトコルや監視間隔等については、別途検討が必要。
 ※5 30分を最大として、事業者が収集している周期と合わせることも許容。

図 3.4.6 需給調整市場の商品要件 [27]

試験方法として、3.4.1 項の総合動作試験の全 25 パターンに対し、応動時間を 30 分間として実施した。試験結果の一例を図 3.4.7 に示す。全 25 パターンの応動時間は 23.2 秒～55.2 秒であり、単純平均値で 43.8 秒となった。応動時間の内訳として、50 秒超が 50%であり、28 秒超が 90%程度の分布となっている。応動時間は EV と双方向 EV 充放電器の情報連携や絶縁試験時間が支配的になっている。応動時間は三次調整力②～二次調整力①では十分適用可能と考えられる。一次調整力は約定時間帯をホットスタンバイ (EV に通電状態で待機) させておくなど運用上の工夫が必要である。許容範囲について、指令値に対する誤差は全 25 パターンの平均で 2.9%であった (最小 0.1%、最大 9.7%)。ただし、出力安定後の出力変動は 1%程度であり、電力変換効率を考慮した制御指令値の検討を行えば、三次調整力②～一次調整力まで適用可能性があることを確認した。

以上の結果から、本章では、一部の商品では制御面や運用面での改善は必要となるものの、EV が Front-of-Meter のサービスに対して DSR に利用可能な見通しを確認した。



監視間隔	評価対象					記事	
	三次調整力②	三次調整力①	二次調整力②	二次調整力①	一次調整力		
監視間隔	5分間隔	1秒間隔	1秒間隔	1秒間隔	1秒間隔	※2 EV用急速充電規格の国際標準	
合否条件	応動時間	45分以内	15分以内	5分以内	5分以内	10秒以内	<ul style="list-style-type: none"> 停止状態→起動：CHAdeMO※2仕様上、情報連携や絶縁試験のため、出力開始まで数十秒の遅延 運転状態→指令値変更：平均2.8秒程度で応動
	許容範囲	±10%以内 (全点)	一定の許容幅以内			±2%以内 (9.8%以上)	<ul style="list-style-type: none"> 指令値が車両への指示値になるため、需給に寄与する連系点で充電時は過大・放電時は過少の傾向 電力変換効率を考慮した制御指令値の検討が必要

※1 青字箇所は国内未確定のため、下記出典の欧米諸国の内、厳しい条件（ドイツ）を参考
 出典①：電力広域的運営推進機関, 第16回需給調整市場小委員会, 2020年01月、出典②：広域的運営推進機関, 「欧米諸国の需給調整市場に関する調査」, 2018年7月

図 3.4.7 適用可能性試験の試験結果

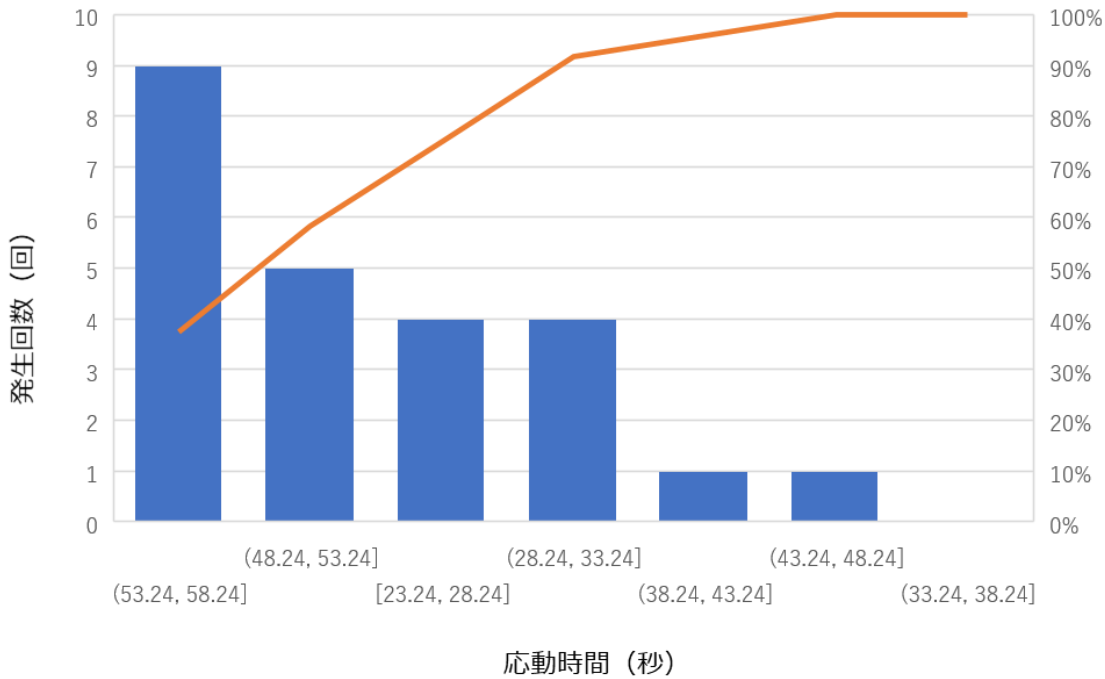


図 3.4.8 適用可能性試験の試験結果

第4章 太陽光併設蓄電システムの自家消費型長期運用戦略（運用効率化）

4.1 グリッドパリティにおける自家消費型運用の重要性

太陽光発電の急激な普及に伴い、太陽光発電の発電コストは世界的に低下傾向にある [28]。太陽光発電の均等化発電原価（Levelized Cost Of Electricity, LCOE）が既存の電力小売価格と同等以下となる状態（グリッドパリティやソケットパリティという。）に欧米諸国を中心に到達し始めている [29]。グリッドパリティの環境下では、需要家内の再生可能エネルギー比率（Renewable Energy Ratio, RER）を増加することで経済効率が高くなる。RERを増加させる方法として、太陽光発電の自家消費量を直接増加させるか、ネットメタリング制度を活用する方法が考えられる。後者は、契約上の電気料金体系や料金算定方法に依存する方法であり、運用面における調整が難しい。このため、本研究では前者の一つの方法として、定置型蓄電池やEVなどの蓄電システム（Battery Energy Storage System, BESS）を用いて需要家内における太陽光発電の自家消費量を高める方法を検討する。

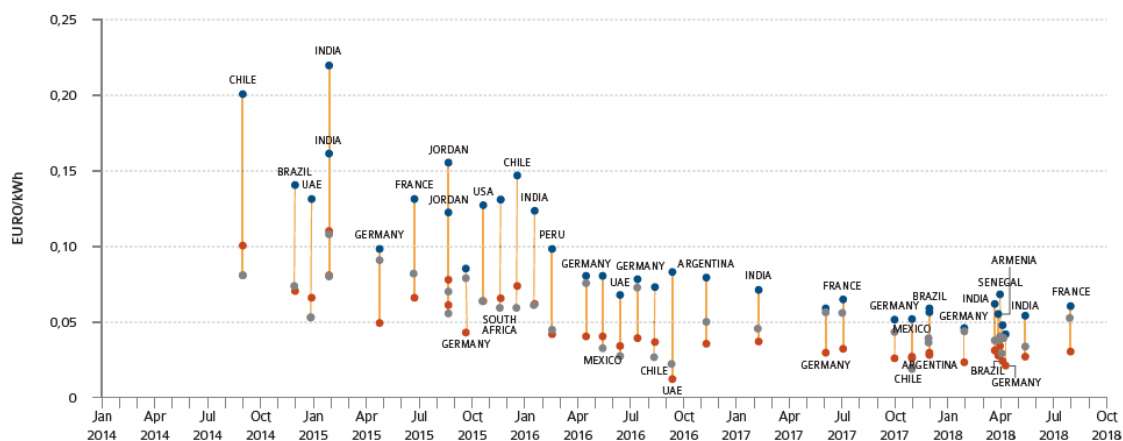


図 4.1.1 太陽光発電の LCOE [28]

執筆時点で、BESS の国内での販売価格は非常に高価であり、太陽光の余剰電力を自家消費するために BESS を導入する場合、経済合理性の確保は困難な状況である。しかしながら、普及が進む太陽光発電の更なる有効活用に向け、日本政府も BESS の価格低減に向けた後押しを進めており [30]、今後普及が進む可能性は高い。また、海外メーカーが安価な BESS の国内販売を進めていることで、市場競争により価格低減が加速し、社会実装が進む可能性もある。このため、近い将来到達するであろうグリッドパリティに向けて、太陽光発電と BESS を組み合わせた自家消費型システムの検討が重要になってくると言える。

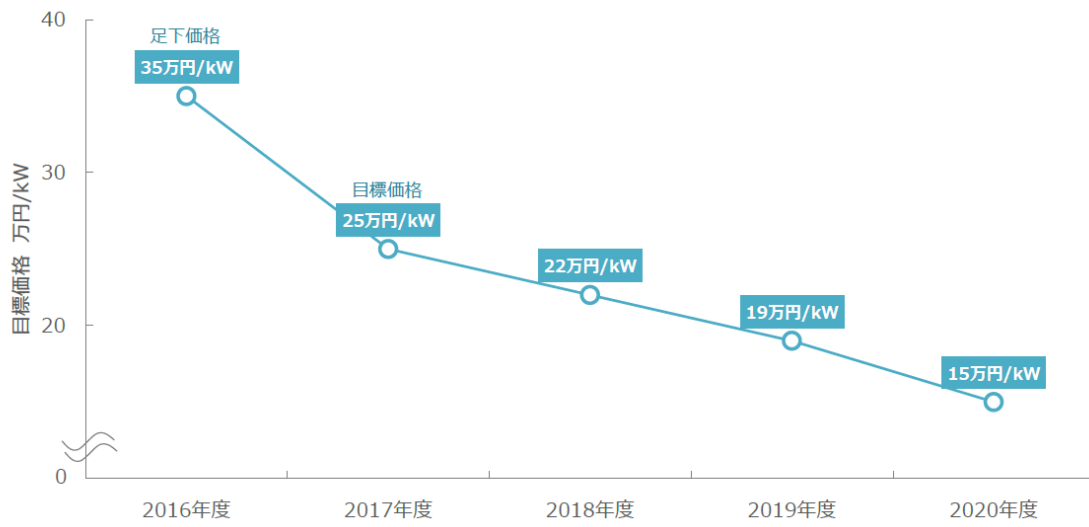


図 4.1.2 産業用蓄電池の目標価格 [30]

4.2 自家消費型運用戦略の特徴と新規性

BESS の運用パターンを制御し、経済効率や安定性を高める運用戦略は従来から数多く提案され実用化されている。例えば、Machida らは、太陽光発電と蓄電池の出力電力制御による負荷平準化戦略を提案している [31]。Hossain らは、マイクログリッド内の電圧と周波数安定化のための負荷平準化戦略を提案している [32]。Zurfi らは、電気料金の ToU (Time Of Use) プランと充電電力抑制を組み合わせた運用戦略を提案している [33]。Nge らは、ルーフトップ PV を備えた蓄電システムにおいて、24 時間での収益最大化を実現する価格ベースのエネルギーマネジメントシステム (Energy Management System, EMS) を提案している [34]。Xiaobo らは、マイクログリッド内の経済性と信頼性を改善するための運用戦略を提案している [35]。Shimomachi らは、気象統計データから太陽光発電の発電量期待値を予測し、蓄電池の運用方法を決定する戦略を提案している [36]。筆者らも、メタヒューリスティック手法を用いて、蓄電池の充放電パターンを最適化する運用戦略を検討してきた [24], [37]。

これら従来の運用戦略の多くは、計画対象日の前日に運用戦略を策定する短期的な運用戦略であり、長期的な最適性を考慮した運用戦略ではない。需要家の受電点以下 (Behind-the-Meter) に太陽光発電が接続される場合、負荷電力に一定の傾向や周期性がある場合でも天候等によって正味負荷 (負荷電力から発電電力を減じた正味の負荷電力) の長期的な傾向は変動的になる。このため、従来戦略を長期的な運用に効果的に適用することは難しい。本研究の目的は、Behind-the-Meter に太陽光発電が接続される需要家内配電系において、長期的な正味負荷の変動性を考慮した新しい運用戦略を提案し、提案する運用戦略を適用した場合の需要家内の RER の期待改善効果を数値解析により導出する。導出した結果を元に、将来の電力市場環境を考慮した経済性に関するシナリオ分析結果を報告する。

本章では、前述の目的を検証するため、太陽光併設蓄電システムを有する低圧需要家を対象に評価を行う。評価対象の給電システムを図 4.2.1 に示す。評価用給電システムには、太陽光パネル (PV)、太陽光発電用パワーコンディショナ (PV-PCS)、BESS、及びリチウムイオン蓄電池 (LiB) が接続される。各装置の主要な仕様を表 4.2.1 に示す。BESS は放電電力の目標値を 0~20 kW で 30 分毎に任意に設定可能であり、BESS の放電電力の目標値を変更することにより運用パターンを制御することとする。

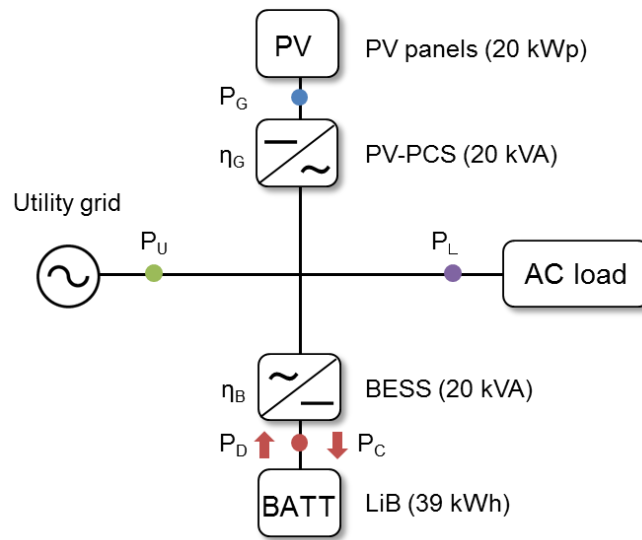


図 4.2.1 評価用給電システムの構成

表 4.2.1 装置仕様

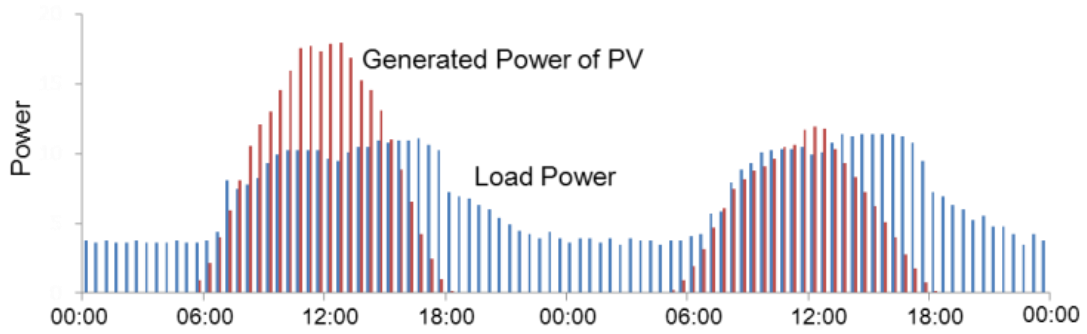
Device	Voltage range		Capacity
	Input	Output	
BESS	AC200 V	AC200 V	20 kVA
PV panels	—	—	20 kWp
Power conditioner (PV-PCS)	DC200 to 540 V	AC200 V	20 kVA
Lithium-ion Batteries (LiB)	DC270 to 378 V		39 kWh

4.3 自家消費型長期運用戦略

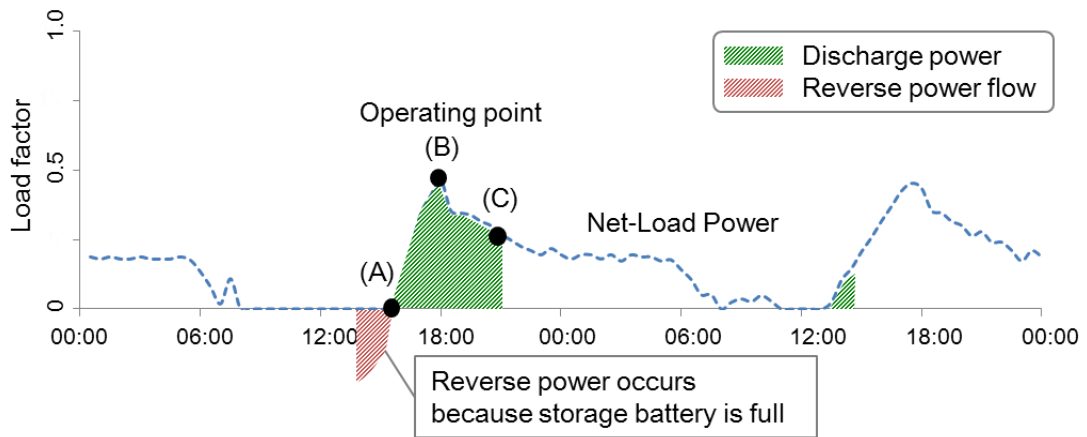
本研究では, RER を負荷電力の総量に対する再生可能エネルギー (Renewable Energy, RE) による供給電力の総量 (RE の余剰電力による蓄電池の充電分による放電電力も含む) の比率として定義する. 従って, 系統電力から供給される電力の総量が少ないか, RE から供給される電力の総量が多いほど RER が増加する. RER の計算式を式 4.1 に示す.

$$RER = \frac{\text{RE による供給電力の総量}}{\text{負荷電力の総量}} \quad (4.1)$$

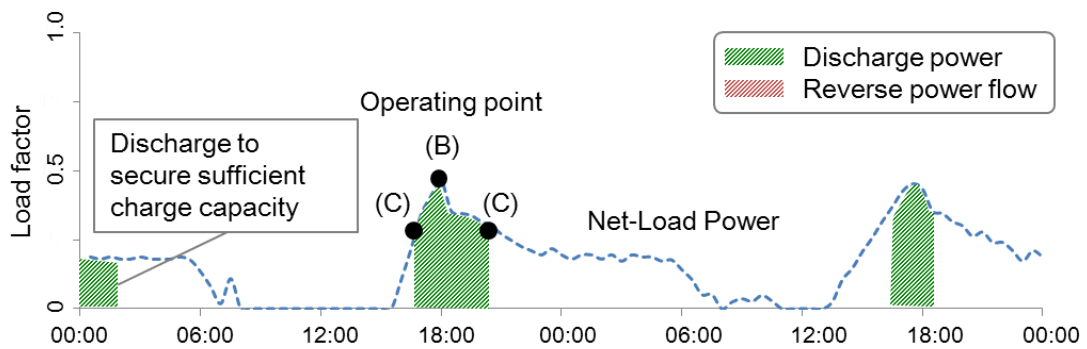
従来戦略の一例と提案戦略の概要を図 4.3.1 に示す. 太陽光の発電電力と負荷電力を図 4.3.1 (a) に示す. 負荷電力から発電電力を減じた正味の負荷電力を図 4.3.1 (b) と (c) に破線で示す. 図 4.3.1 (b) は, 従来戦略の一例を示している. この例では BESS が特定の期間 (15:00-21:00 の間) のみ放電する場合を示している. このとき, 太陽光発電の余剰電力量を充電できる十分な蓄電池容量が確保されていないため, 電力系統側へ逆潮流が発生している (14:00-15:00 の間). 逆潮流が発生すると, 太陽光発電の自家消費量が減少し RER が低下することになる.



(a) 発電電力と負荷電力



(b) 従来の運用戦略



(c) 提案の運用戦略

図 4.3.1 従来戦略の一例と提案戦略の概要

負荷率と電力変換効率の関係を図 4.3.2 に示す。図 4.3.1 (b) の場合の電力変換器の動作範囲は図 4.3.2 中の (A) から (B) であり、電力変換効率が低い領域を含む広範囲で動作している。電力損失が増加すると、供給される太陽光発電電力量が低下するため、結果的に太陽光発電の自家消費量が減少し RER が低下することになる。一方、図 4.3.1 (c) は、提案戦略の概要を示している。提案戦略では、太陽光発電の余剰電力量を推計し、充電に必要な蓄電池容量を確保するため予め放電している (00:00-01:00 の間)。これにより、電力系統側へ逆潮流が発生しなくなり、太陽光発電の自家消費量が増加することになる。更に、電力損失を低減するため、電力変換器の電力変換効率が高い領域 (図 4.3.2 中 (B) から (C)) で動作するよう放電制御している。

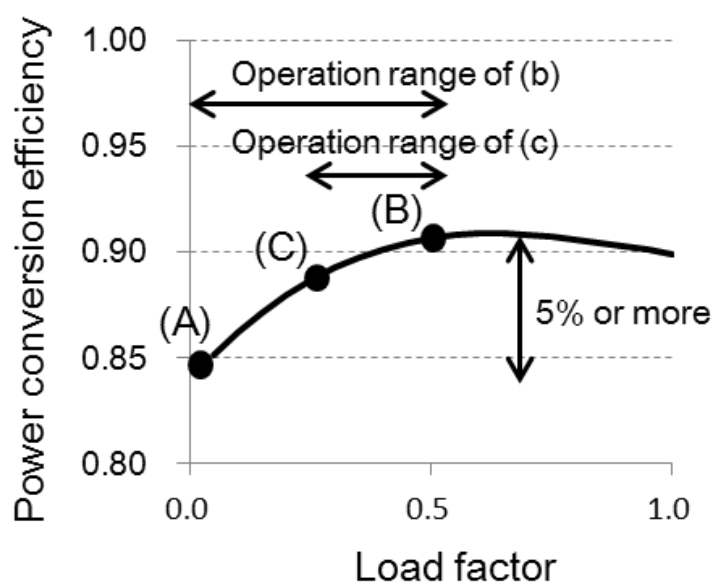


図 4.3.2 負荷率と電力変換効率の関係

ところで、式 4.1 において、RE もしくは蓄電池の設備容量を増加させることで RER を増加できるが、本稿では、運用戦略の違いによる RER の改善効果を確認するため設備容量の変更は行わない。提案戦略では、設備容量の変更を伴わない形で、次の二つの運用ポリシーを導入した。

- (i) 一週間の需要家側の RE の供給電力量を最大化 (逆潮流量を最小化と同義)
- (ii) 一週間の平均電力変換効率を最大化

(i) により逆潮流量を最小化するよう放電期間及び放電量を決定することで、太陽光発電の自家消費量が増加し、結果、RER の増加が期待できる。また、(ii) により太陽光発電の発電電力量が増加し、結果、RER の増加が期待できる。

提案戦略の具体的な手順を図 4.3.3 に示す。はじめに、負荷電力を予測する（図 4.3.3 中の 1）。次に、太陽光発電電力を予測する（図 4.3.3 中の 2）。更に、負荷電力予測値から太陽光発電電力予測値を減じ、正味の負荷電力を推計する（図 4.3.3 中の 3）。その後、太陽光発電電力予測値から負荷電力予測値を減じ、余剰電力量を推計する（図 4.3.3 中の 4）。最後に、余剰電力量を充電するために必要な放電電力量を決定する。決定した放電電力量は、余剰電力の充電開始時点までに正味負荷電力の推計結果から、電力変換効率が高くなるよう配分を行う。なお、本章では適用する運用戦略による効果の違いを確認するため、太陽光発電の予測誤差は扱わないこととする。

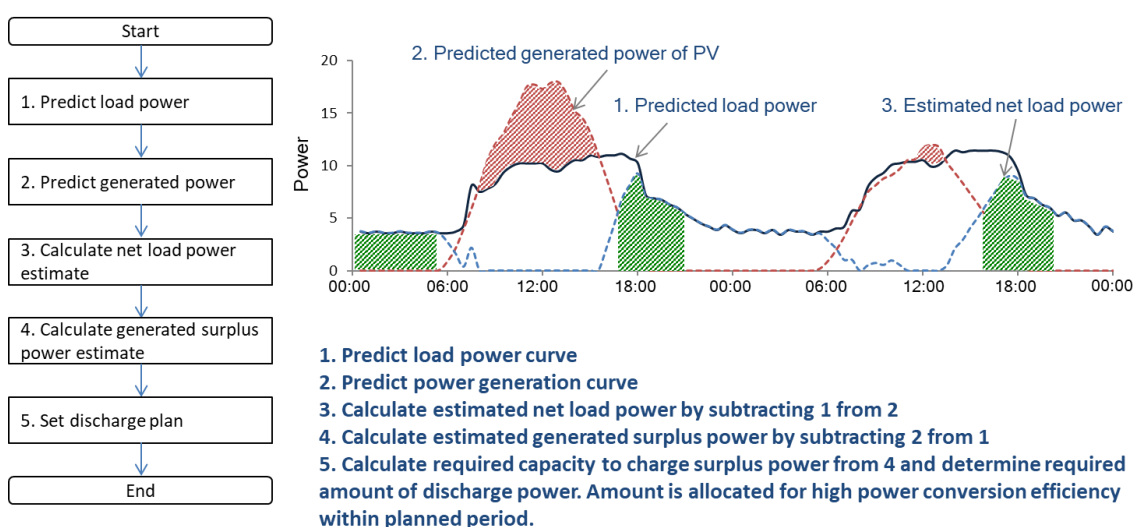


図 4.3.3 提案戦略の手順

4.4 数値解析及び結果

4.4.1 前提条件

筆者らは、表計算ソフトのマクロ機能を利用して、図 4.2.1 に示した給電システムの動作を模擬可能な評価モデルを作成した [38]. 評価モデルは、一週間を 30 分間隔の 336 点に分割しており、負荷電力と発電電力を入力として、給電システム内の電力潮流と蓄電池の充電状態 (State of Charge, SOC) を自動的に計算することができる. 評価モデルに利用する負荷電力曲線は、オフィスビルの一年間の実フィールドデータ (2018 年 1 月 1 日~2018 年 12 月 31 日) に基づいて作成した. 負荷電力曲線は 4 つの季節 (春季, 夏季, 秋季, 冬季) と 7 つの曜日 (月, 火, 水, 木, 金, 土, 日) を考慮した 28 種類を用いた. 発電電力曲線は、同じオフィスビルの一年間の実フィールドデータ (2015 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日) に基づいて作成した. 発電電力曲線は 4 つの季節と 3 つの天候 (晴天, 曇天, 雨天) を考慮した 12 種類を用いた. 一週間における天候の発生割合は、気象庁の統計データ (1981 年~2010 年) から導出した. その結果を表 4.4.1 に示す. 天候の発生順序は恣意性を排除するため、晴天, 曇天, 雨天の順に繰り返し発生することとした. 例えば、春季の例では、晴天, 曇天, 雨天, 晴天, 雨天, 晴天, 晴天となる. 数値解析に用いた一週間の負荷電力曲線と発電電力曲線を図 4.4.1~図 4.4.8 に示す.

表 4.4.1 一週間の天候発生回数

Weather	Number of occurrences in a week			
	<i>Spring</i>	<i>Summer</i>	<i>Fall</i>	<i>Winter</i>
Clear	4	3	4	5
Cloudy	1	2	1	1
Rainy	2	2	2	1

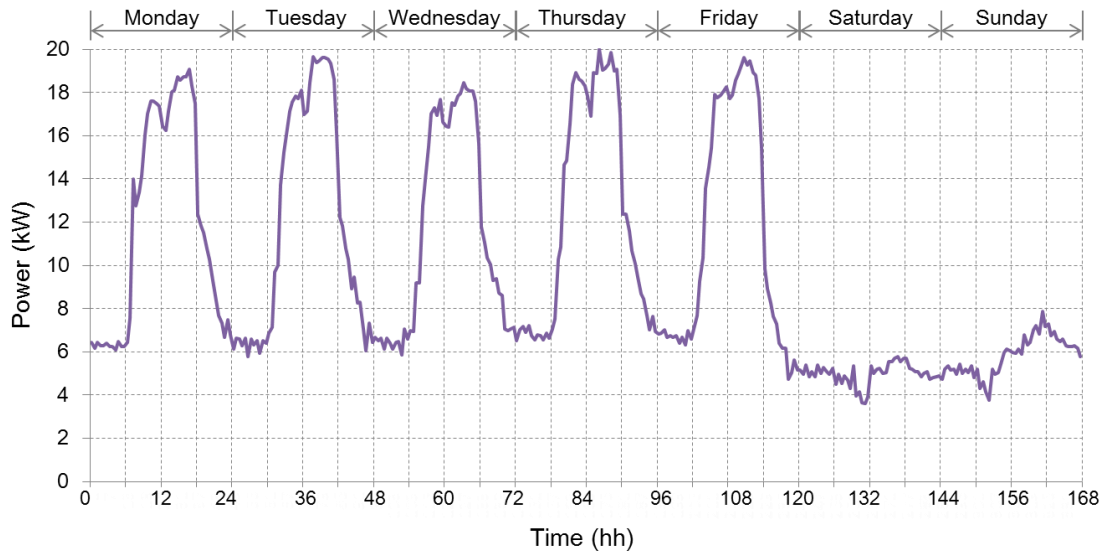


図 4.4.1 一週間の負荷電力曲線 (春季)

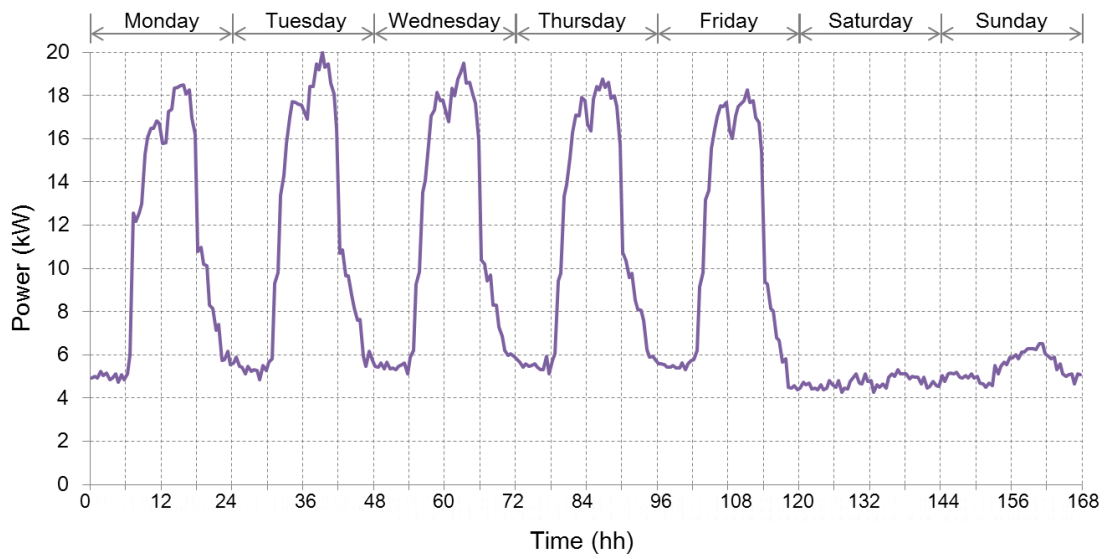


図 4.4.2 一週間の負荷電力曲線 (夏季)

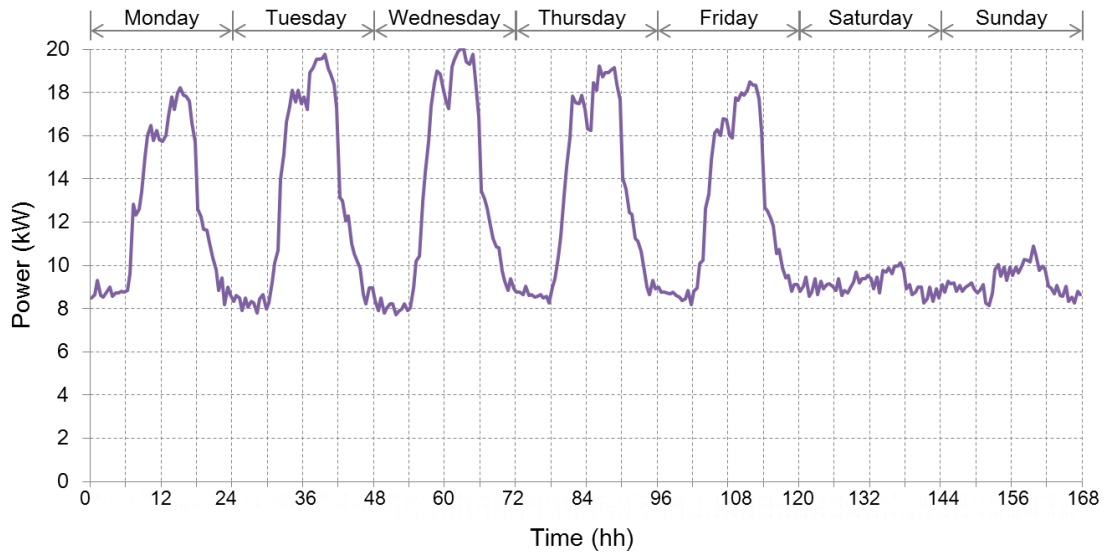


図 4.4.3 一週間の負荷電力曲線 (秋季)

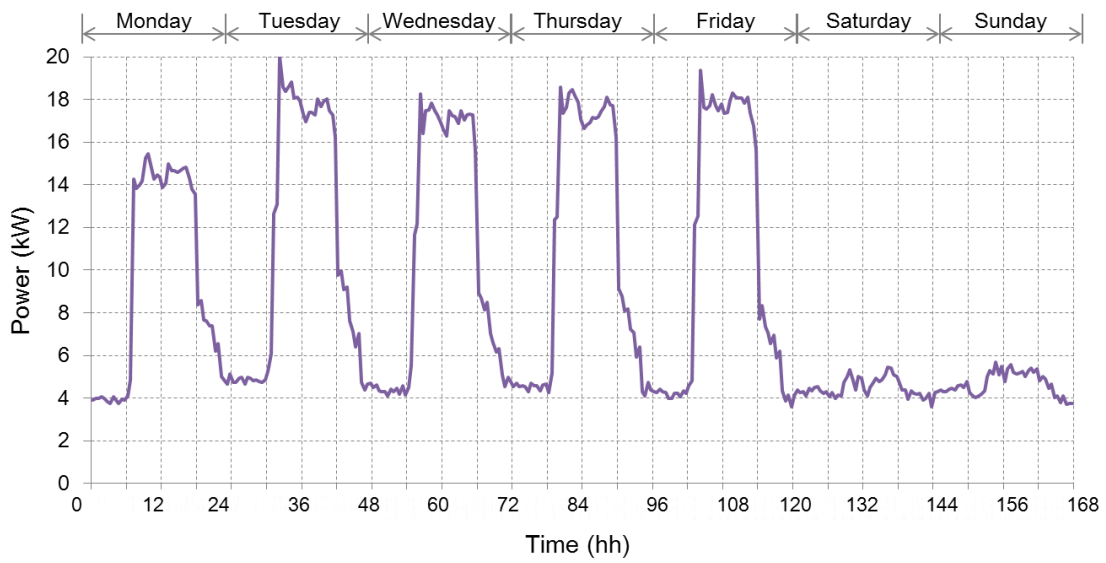


図 4.4.4 一週間の負荷電力曲線 (冬季)

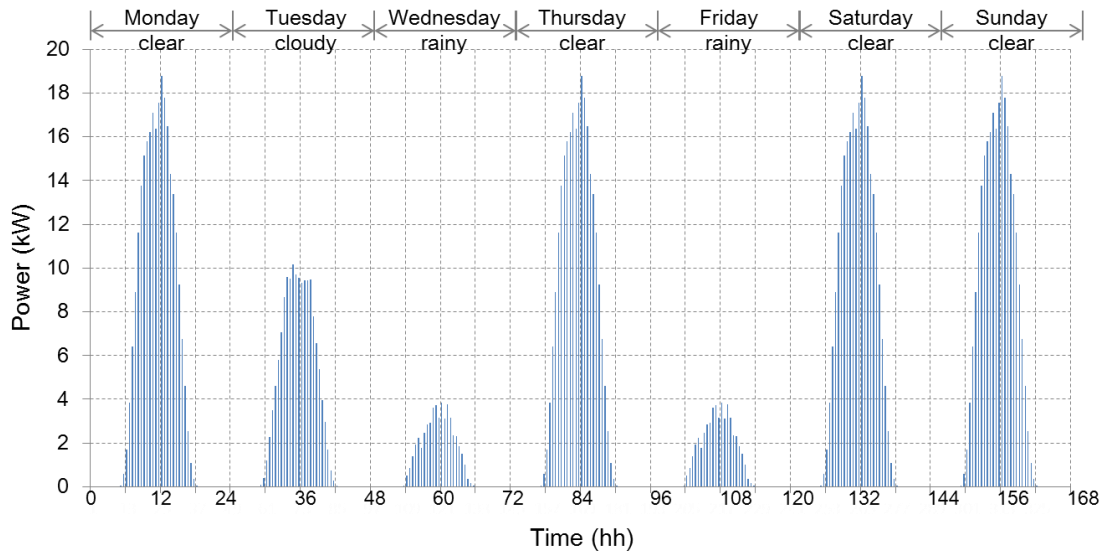


図 4.4.5 一週間の発電電力曲線 (春季)

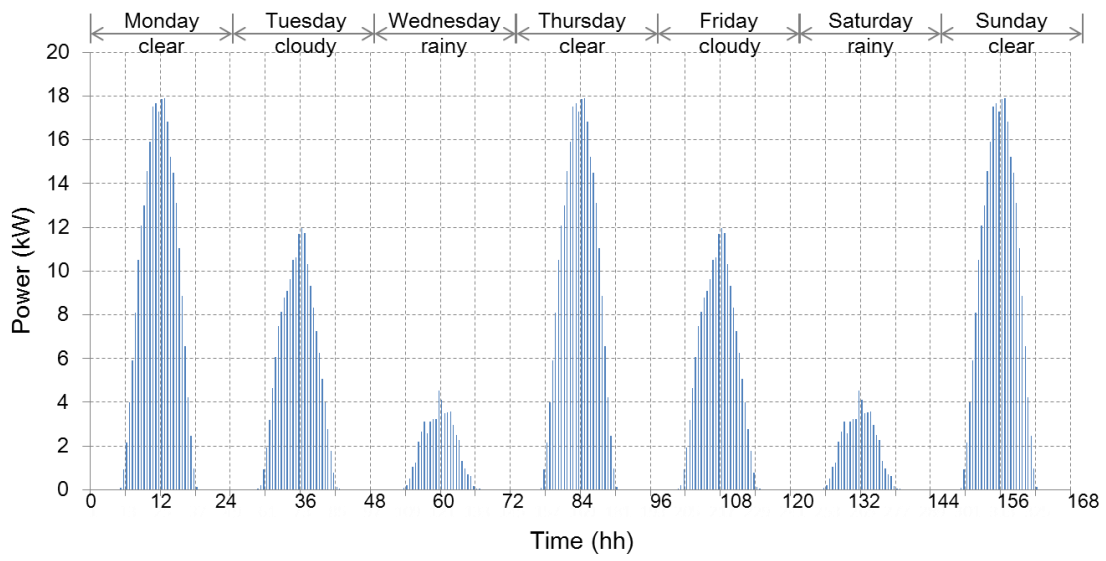


図 4.4.6 一週間の発電電力曲線 (夏季)

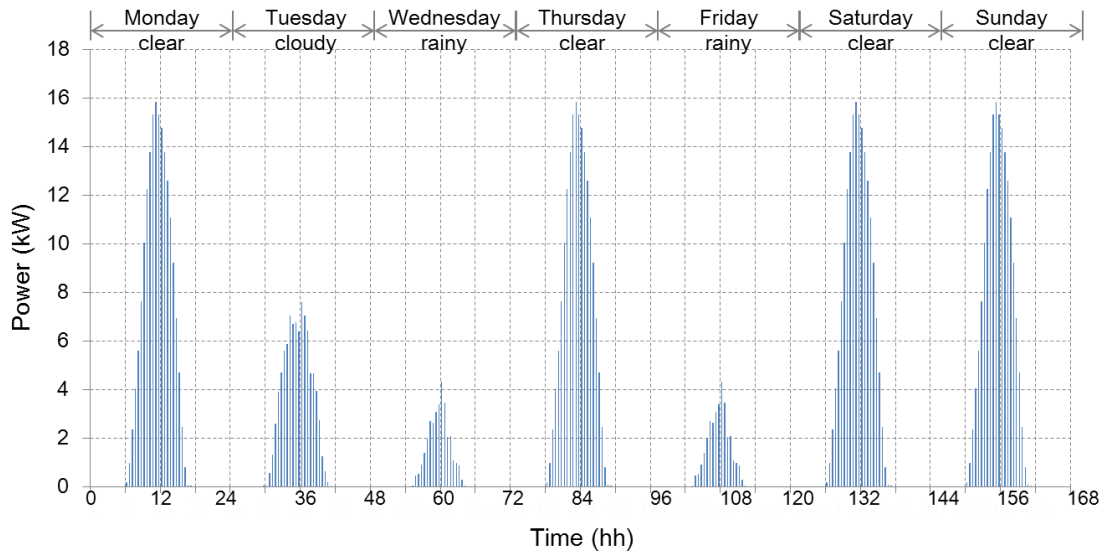


図 4.4.7 一週間の発電電力曲線 (秋季)

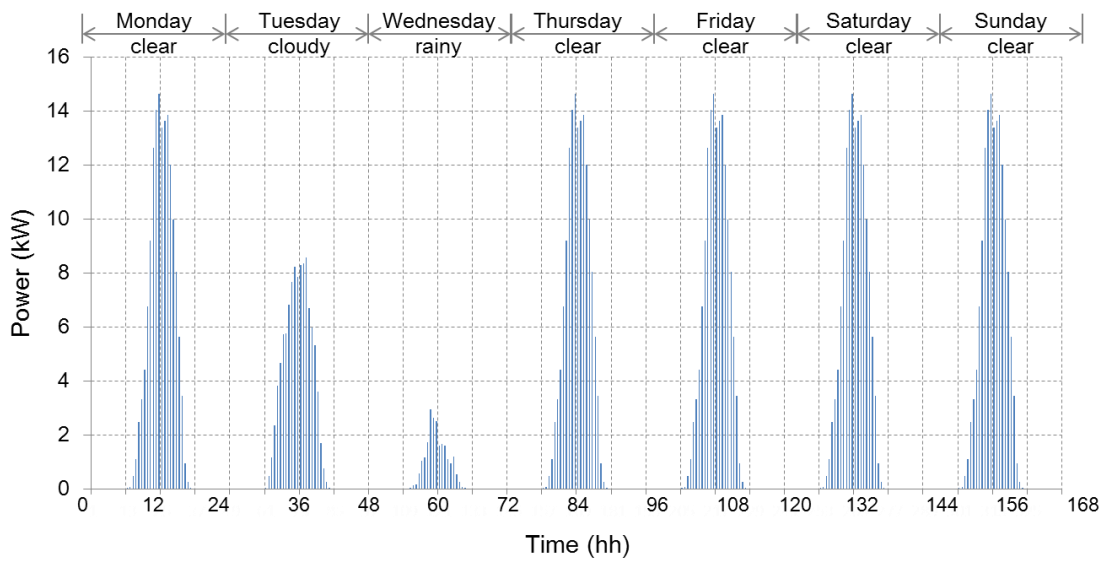


図 4.4.8 一週間の発電電力曲線 (冬季)

4.4.2 問題の定式化

前述の評価モデルを用いて、最適化計算による数値解析を実施した。本最適化問題は、需要家側の一週間の需要家側の RE の供給電力量と平均電力変換効率を目的関数とする多目的最適化問題となる。本最適化問題を式 4.2 から 4.10 の通り定式化した。

$$\max f = RER = \frac{\sum_{i=1}^{336} P_{RE}}{\sum_{i=1}^{336} P_L} [-] \quad (4.2)$$

$$\max g = \frac{(\sum_{i=1}^{336} \eta_{Bi})}{336} [-] \quad (4.3)$$

$$0[kW] \leq P_{Di} \leq 20[kW] \quad (4.4)$$

$$P_{Li} = P_{Ui} + \eta_G P_{Gi} + \eta_{Bi} P_{Di} - \frac{P_{Ci}}{\eta_{Bi}} [kW] \quad (4.5)$$

$$SOC_i = SOC_{i-1} + \frac{(P_{Ci} - P_{Di})}{C_b} [-] \quad (4.6)$$

$$SOC_{MIN} = 0.1[-] \quad (4.7)$$

$$SOC_{MAX} = 0.9[-] \quad (4.8)$$

$$SOC_{INI} = 0.5[-] \quad (4.9)$$

$$C_b = 39[kWh] \quad (4.10)$$

P_{RE} は RE から負荷への供給電力、 P_L は負荷電力、 P_U は系統電力、 P_G は発電電力、 P_D は放電電力、 P_C は充電電力である。 SOC_{MAX} と SOC_{MIN} はそれぞれ蓄電池の動作可能範囲の最大値と最小値であり、 SOC_{INI} は SOC の初期値である。蓄電池の定格容量は 39 kWh である。 η_B は図 4.4.9 に示す BESS の電力変換効率である。 η_G は PV-PCS の電力変換効率であり、負荷率に関係なく 0.93 の一定値とした。関数 f と g は目的関数である。関数 f の値は RE から供給される電力の総量と負荷電力の総量の比を表す（式 4.1 と同様）。関数 g の値は一週間の平均電力変換効率である。 P_D は設計変数であり、蓄電池の放電電力を 30 分毎に 0~20 kW に任意に設定可能である。

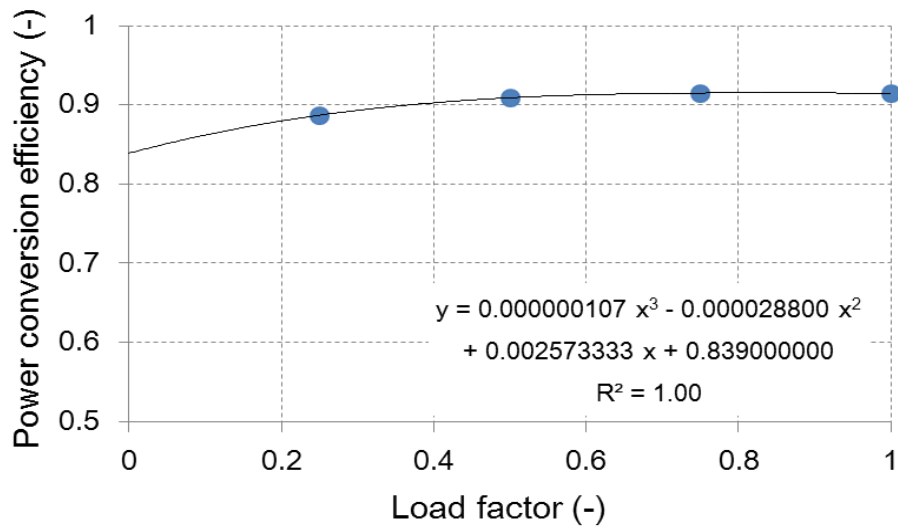


図 4.4.9 BESS の電力変換効率

最適化計算は、多目的進化型アルゴリズム (Multi-Objective Evolutionary Algorithms, MOEAs) の一手法である、NSGA-II (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) [39]により計算した。NSGA-II のアルゴリズムの概要は次に示す通りである。NSGA-II は次の手順を繰り返すことによって進化させた解集団から非劣解集合を取り出し、パレート解を近似する。なお、個体数 N を 24、世代数 t を 40、交叉率を 0.9 とした。これらのパラメータの最適性は十分検討ができていないため今後も検討の必要がある。

<NSGA-II のアルゴリズム概要>

(STEP 1) 親集団の生成

個体数 N の初期探索個体集団 P_t をランダムに生成する。(世代数 $t=1$)

(STEP 2) ランク付けと混雑距離の割り当て

非優越ソートを用いて、 P_t にランク付けを行い、各ランクに属する個体に混雑距離を割り当てる。

(STEP 3) 子集団の生成

P_t に対し、選択、交叉、突然変異といった遺伝子操作を行い、子集団 Q_t を生成する。

(STEP 4) 世代交代

非優越ソートを用い、親と子の全体 $P_t \cup Q_t$ の各個体にランク付けを行う。ランク毎に各個体をソートし混雑距離を割り当てる。ランク上位 N 番目までの個体によって次世代の親

集団 P_{t+1} を構成する.

(STEP5)

STEP3 に戻る.

4.4.3 数値解析結果

最適化計算による数値解析は図 4.4.1 の定格負荷容量 20 kVA を 20%毎に変化 (4 kVA, 8 kVA, 12 kVA, 16 kVA, 20 kVA) させた, 計 5 パターンに対して行った. これは需給の割合が変化した場合における RER の改善効果の違いを確認するためである. 数値解析結果の比較条件を表 4.4.2 に示す. 従来戦略 1 は放電期間を 18:30 から 24:00 まで 20 kW で放電することとした. これは, 日中に太陽光発電を全て充電し, 日没から充電した電力を放電する場合を想定している. 従来戦略 2 は 00:00 から 24:00 まで 20 kW で放電することとした. これは, 蓄電池が満充電となり太陽光発電が充電できない状況を避ける目的で, 可能な限り電力を放電する場合を想定している. 提案戦略は前述した運用ポリシーに従い, 放電期間と放電電力が最適化されるよう任意に決定することとした.

表 4.4.2 数値解析の比較条件

Strategy	Conditions	
	<i>Discharge period</i>	<i>Power</i>
Conventional 1	18:30–24:00	20 kW
Conventional 2	00:00–24:00	20 kW
Proposed	Optimized (00:00–24:00)	Optimized (0 kW–20 kW)

解析結果の例として, 春季における負荷容量 20%及び 100%の場合の解分布を図 4.4.10 に示す. 図中の三角で示す点はパレート最適解を示している. 結果から, BESS の平均電力変換効率が高くなる程 RER が増加する傾向があることが分かる. ただし, その傾向は僅かであることが分かった. 今回対象にした需要家の負荷パターンと発電パターンでは正味負荷の負荷率が一日間で大きく変動しなかったため, 電力変換効率による影響が小さくなったものと考えられる.

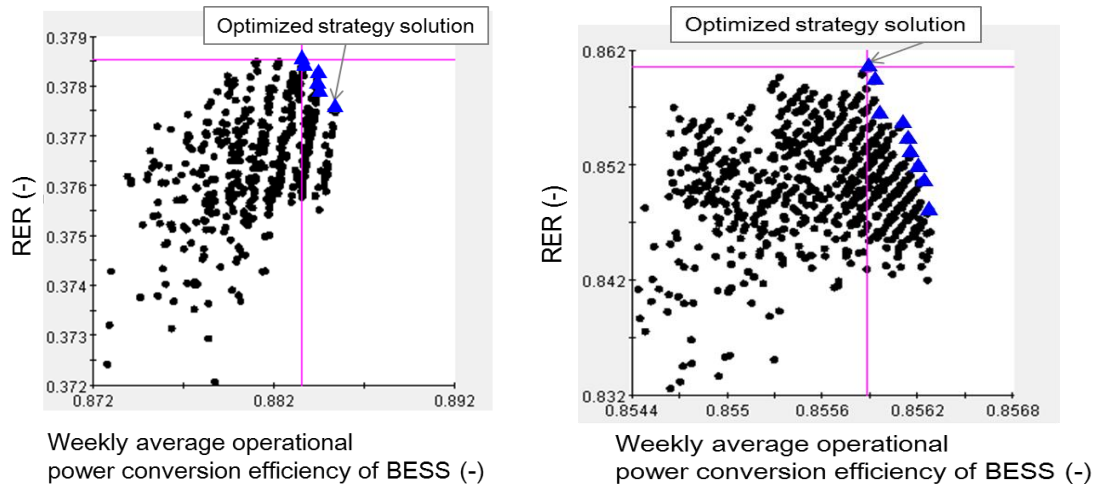
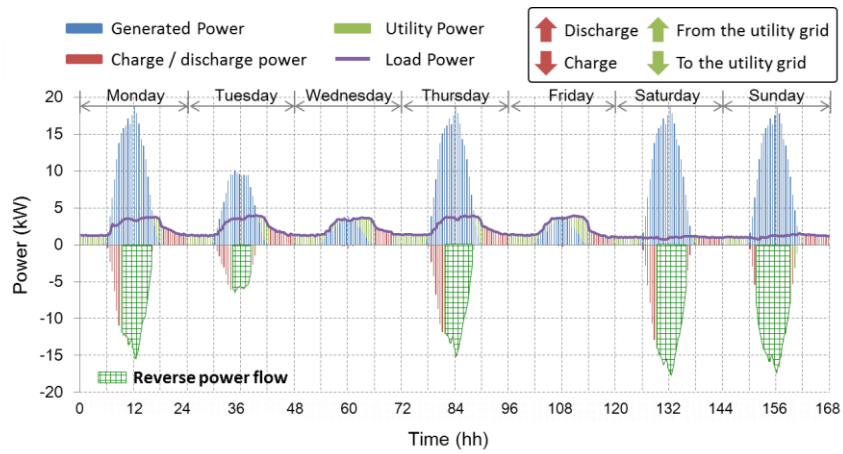


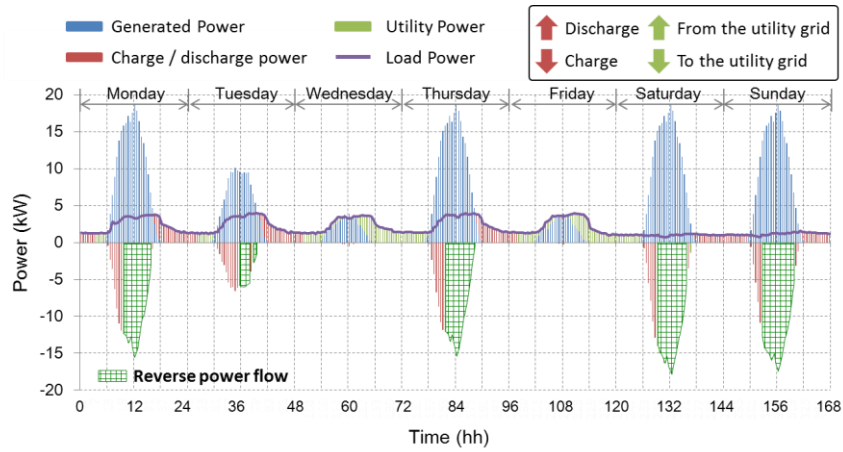
図 4.4.10 解分布

(左：春季，負荷容量の 20% 右：春季，負荷容量の 100%)

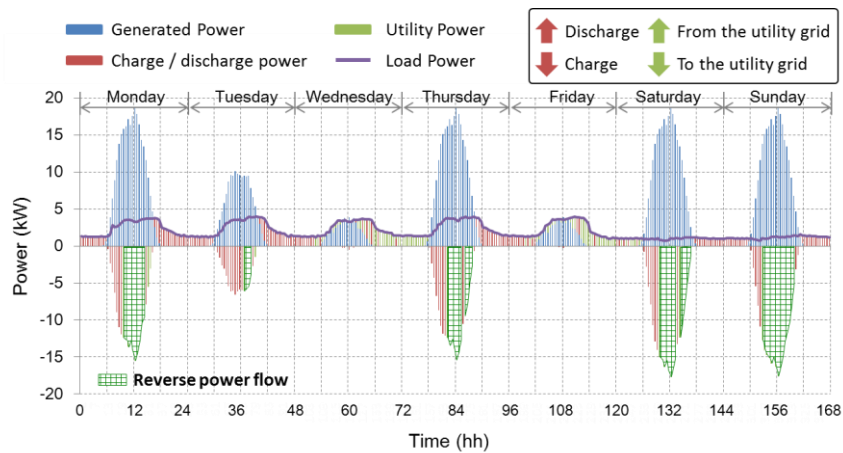
シミュレーション波形の一例として，春季の負荷容量 20%時の結果を図 4.4.11 に示す．
 図 4.4.11 では従来戦略 1 と 2 に比べて，提案戦略の逆潮流量が減少したことが分かる（図 4.4.11 中の格子箇所）．



(a) 従来戦略 1



(b) 従来戦略 2



(c) 提案戦略

図 4.4.11 シミュレーション波形 (春季, 負荷容量の 20%)

各戦略における年間の逆潮流量の一例として、春季における負荷容量の20%の結果を図4.4.12に示す。また、提案戦略を適用した場合の年間逆潮流量の低減効果を表4.4.3に整理した。提案戦略を適用した場合、従来戦略に比べ年間逆潮流量を最大34.5%低減できることが導出された。

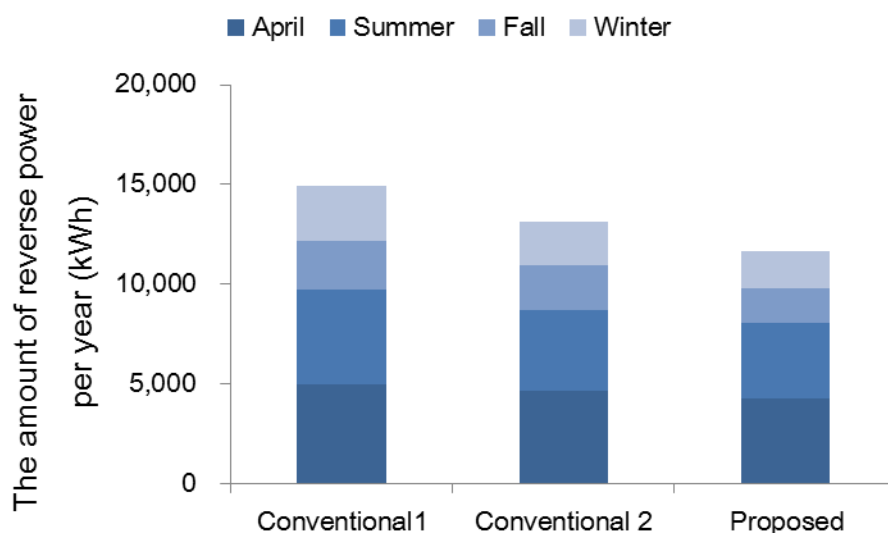


図 4.4.12 年間の逆潮流量（定格負荷容量 20%，春季）

表 4.4.3 年間の逆潮流量低減効果

Load	Reverse power flow per year (kWh/year)			Improvement	
	<i>Conventional 1</i>	<i>Conventional 2</i>	<i>Proposed</i>	<i>vs. 1</i>	<i>vs. 2</i>
20 %	14,909	13,120	11,664	0.218	0.111
40 %	8,364	7,688	5,837	0.302	0.241
60 %	4,959	4,581	3,250	0.345	0.291
80 %	3,023	3,136	2,258	0.253	0.280
100 %	2,321	2,355	1,718	0.260	0.270

RER の年間平均値に関する数値解析結果を図 4.4.13 及び表 4.4.4 に整理した。数値解析の結果から、提案戦略の適用により従来戦略 1 に比べて RER を年間最大 16.7%、従来戦略 2 に比べて 6.2%の改善することを示している。加えて、RER が高くなるにつれ、RER の改善傾向が大きくなることが分かった。

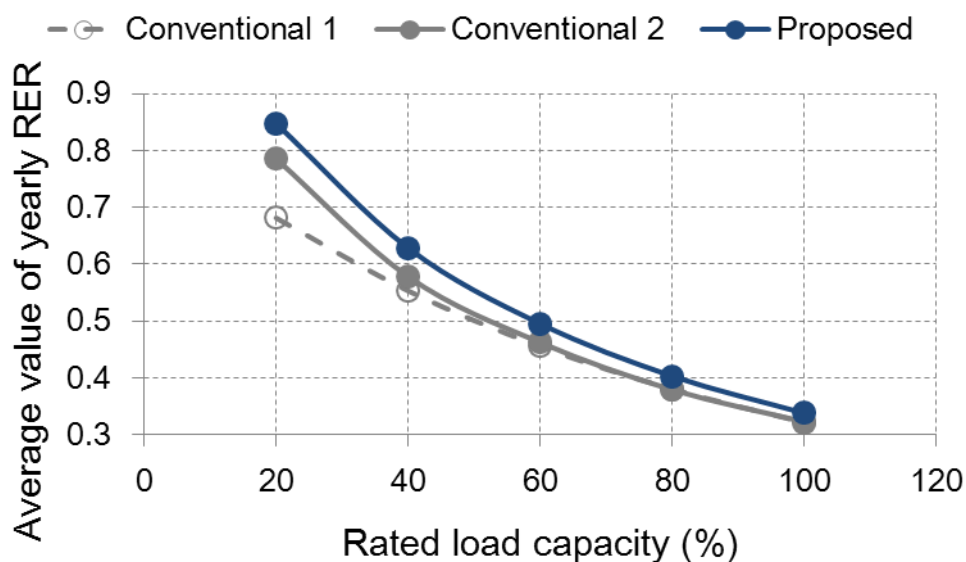


図 4.4.13 RER の年間平均値に関する数値解析結果

表 4.4.4 RER の年間平均値改善効果

Load	Average value of yearly RER			Improvement	
	<i>Conventional 1</i>	<i>Conventional 2</i>	<i>Proposed</i>	<i>vs. 1</i>	<i>vs. 2</i>
20 %	0.682	0.786	0.848	<u>0.167</u>	<u>0.062</u>
40 %	0.553	0.578	0.629	0.076	0.051
60 %	0.455	0.462	0.495	0.040	0.033
80 %	0.380	0.379	0.403	0.023	0.024
100 %	0.321	0.323	0.338	0.017	0.015

4.4.4 電力コスト低減効果の評価

前項の数値解析結果から、提案戦略を適用した場合の電力コスト低減効果を導出する。電力コストは、購入電力の費用と売電電力の収入の差で表される。購入電力の費用は、基本料金と電力量料金（サーチャージ含む）の和で表される。基本料金は東京電力エナジーパートナーの低圧電力契約 [40]を、電力量料金は日本の過去 8 年間（2010 年～2017 年）の平均価格 [41]を参考にした。なお、基本料金と電力量料金の将来的な価格見通しを予見するのは困難であるため、参考にした価格で各年度同一と仮定して評価を行った。売電電力量料金は 2018 年度、2019 年度、2025 年度（政府目標値）の固定価格買取制度（Feed-in-Tariff, FIT）による売電単価を参考にした [42]。これらを表 4.4.5 に整理した。

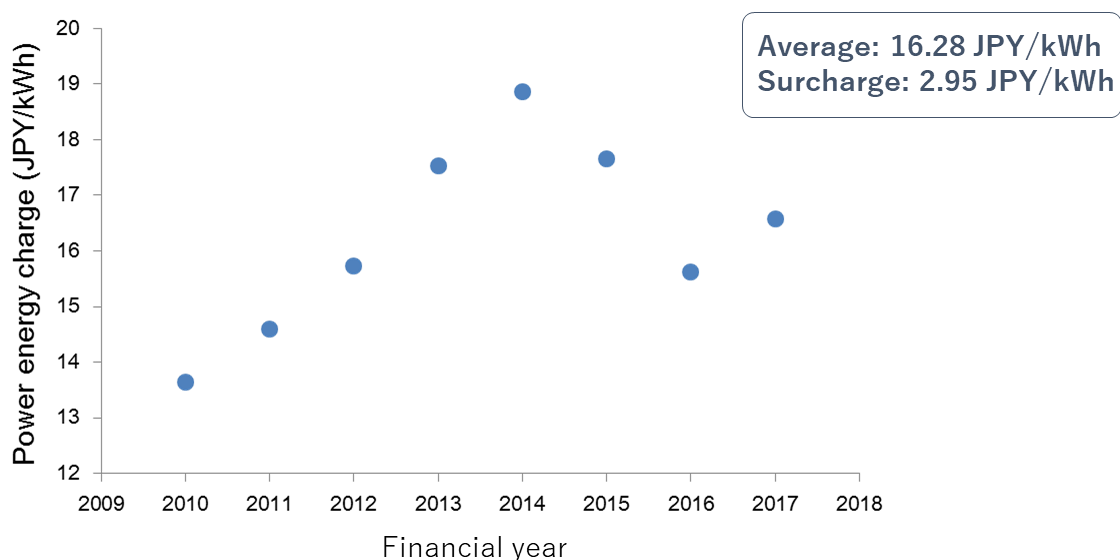


図 4.4.14 電力料金の推移（[41]を基に作成）

表 4.4.5 買電料金と売電料金

Electricity charge		Financial year		
		FY2018	FY2019	FY2025
Purchase	Basic charge (JPY/kW)	1101.6		
	Power energy charge (JPY/kWh)	19.2		
Sell (JPY/kWh)		18	14	7

提案戦略を適用した場合の従来戦略 1 及び従来戦略 2 に対する年間電力コスト低減効果を図 4.4.15 及び図 4.4.16 に示す。この結果から、売電電力量料金が安価になるにつれ、提案戦略が従来戦略よりも有利になることが分かる。これは、提案戦略を適用したことにより逆潮流量が低減されたことに起因する。また、RER が高い領域では、電力コスト低減効果がより大きくなることが分かる。最も効果があった 2025 年度の条件下では、提案戦略の適用により、従来戦略 1 と比べて最大 48.0%，従来戦略 2 と比べて最大 28.0%の電力コスト低減効果を確認した。

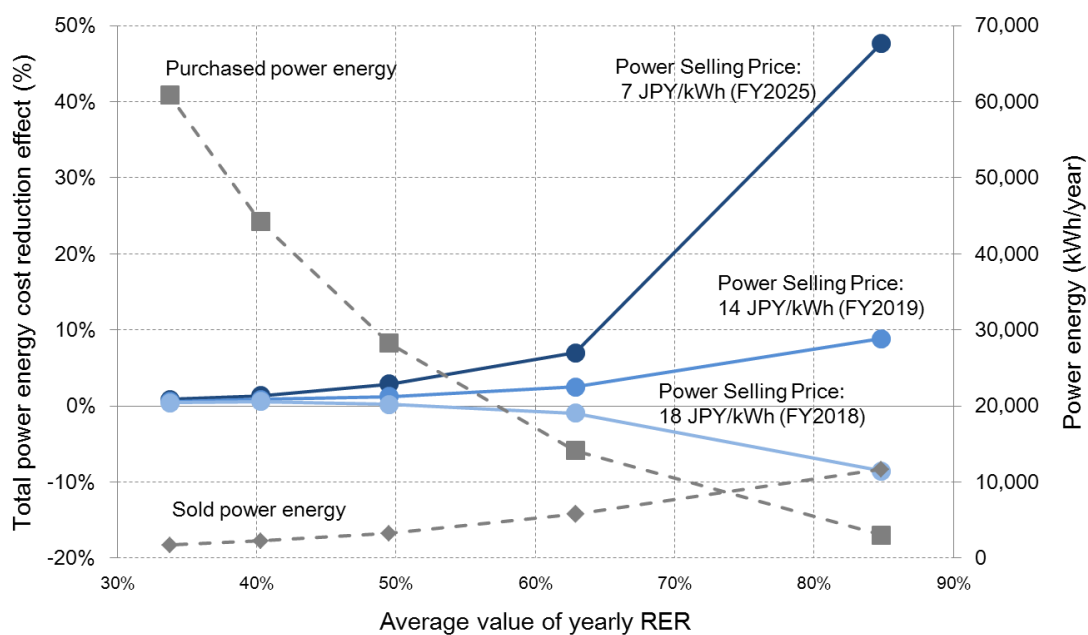


図 4.4.15 電力コスト低減効果 (対従来戦略 1)

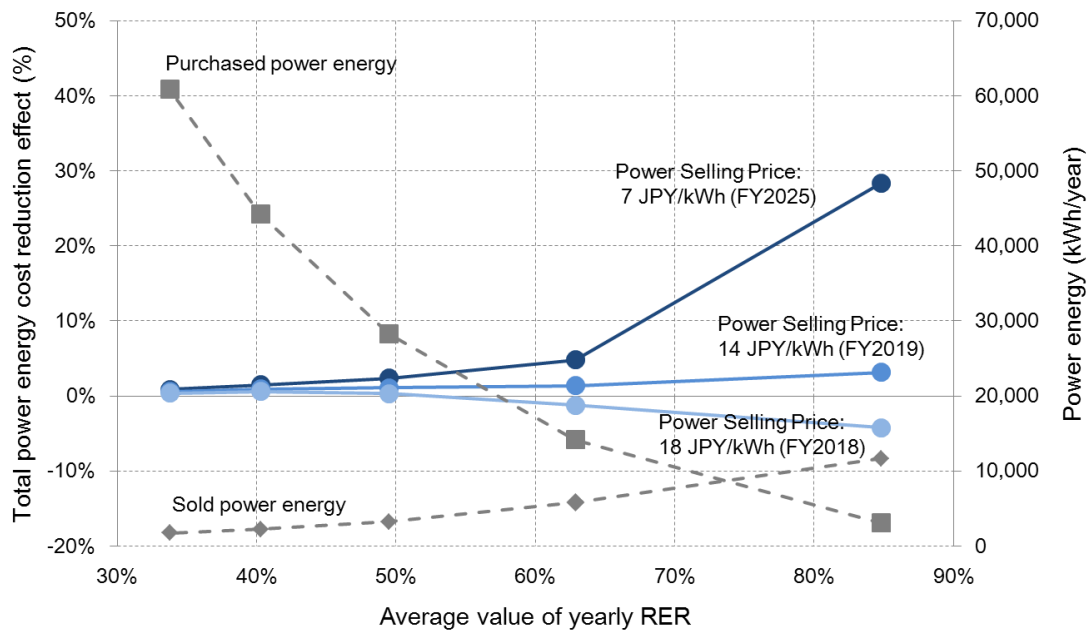


図 4.4.16 電力コスト低減効果（対従来戦略2）

本章では、Behind-the-Meter に太陽光発電が接続される需要家内配電系において、長期的な正味負荷の変動性を考慮した新しい運用戦略を提案し、提案する運用戦略を適用した場合の需要家内の RER の期待改善効果を数値解析により導出した。数値解析の結果から、提案した運用戦略を適用することで、運用の効率化が図れ、需要家内における再生可能エネルギー比率の改善に寄与することを確認した。

第5章 資本資産価格モデルによる蓄電システムの多目的運用戦略（適用領域拡大）

5.1 マルチユース運用の重要性

定置型蓄電池や電気自動車（Electric Vehicle, EV）などの蓄電システム（Battery Energy Storage System, BESS）は主要な需要家側エネルギーリソース（Demand Side Energy Resource, DSR）の一つとして導入が進んでいる。受電点以降（Front-of-Meter）では、需給バランス調整、周波数調整、電圧調整などの系統安定化のために利用され始めている [43], [44]。需要家の受電点以下（Behind-the-Meter）では、ピークシェービングなどのエネルギーマネジメントによる電気料金抑制、停電時のバックアップ、DR/VPP（Demand response / Virtual Power Plant）のアグリゲーション用のエネルギーリソースに利用されている [45], [46]。このように、BESS は様々なサービスに利用されており、その適用領域は今後も拡大する見通しである。BESS は出力制御が容易であることから、DSR を運用してエネルギーサービスを行うエネルギーサービスプロバイダーからの期待が高い。一方、BESS は執筆時点で高価のため、運用に関わる経済効率を高めることがエネルギーサービスプロバイダーの最も重要な課題の一つになっている。これまで述べたように、多様な電気の経済的価値が時々刻々と変動する将来の電力市場において、DSR を特定の用途に限定して利用するのではなく、必要に応じて用途を変化させるマルチユース運用により経済効率改善を図ることが今後重要になると考えられる。



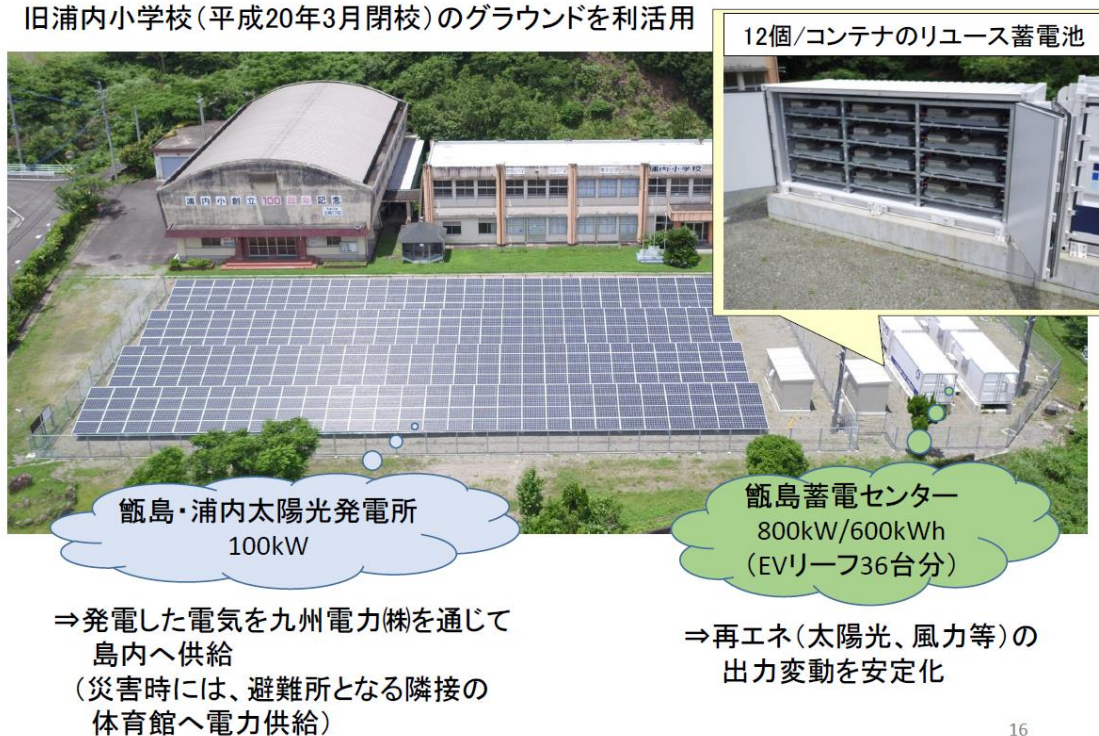
<蓄電池建屋外観>



<建屋内の交直変換装置・電解液タンク>

図 5.1.1 南早来変電所 大型蓄電システム実証事業 [43]

旧浦内小学校(平成20年3月閉校)のグラウンドを利活用



16

図 5.1.2 飯島蓄電池導入共同実証事業 [44]

コンビニエンスストアに太陽電池と蓄電システムを導入

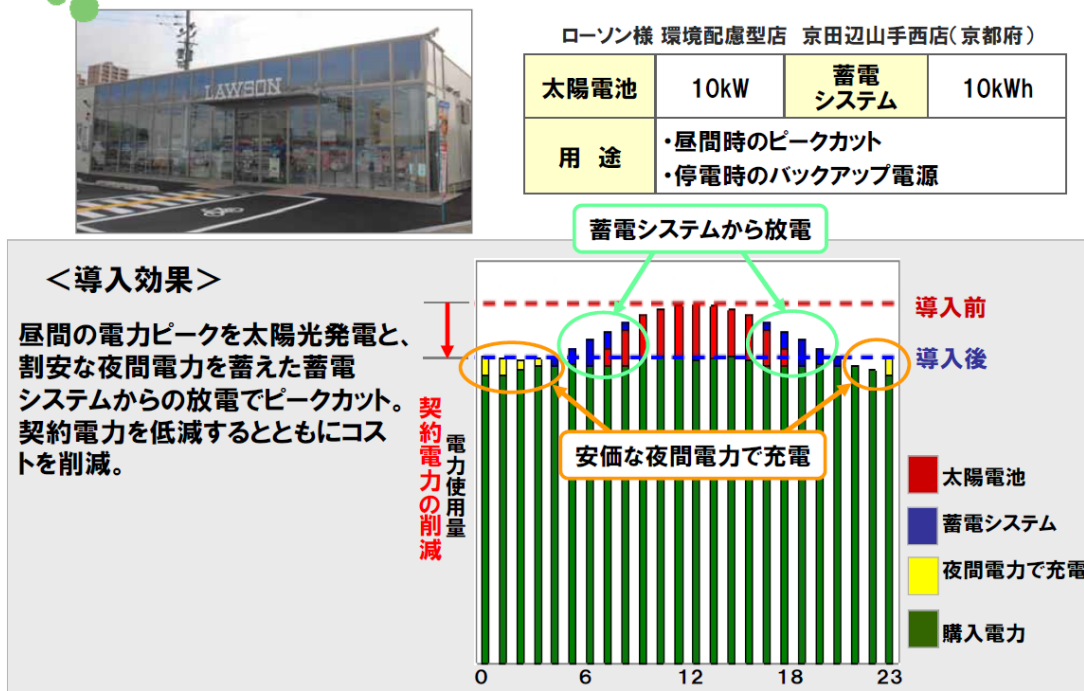


図 5.1.3 ピークカット用蓄電システムの導入事例 [45]

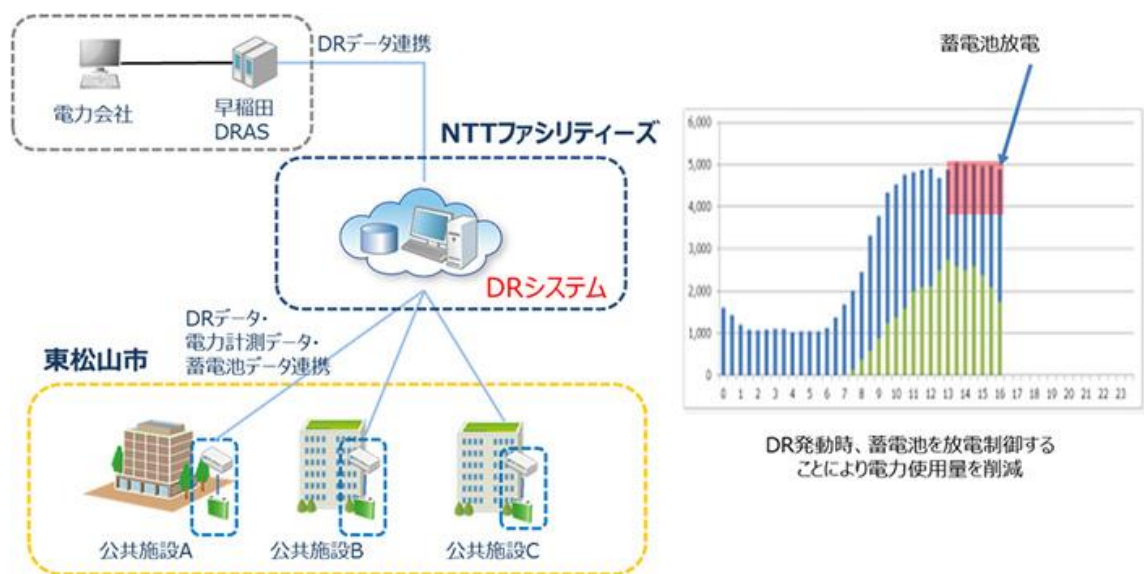


図 5.1.4 蓄電池を活用した高度制御型ディマンドレスポンス実証事業 [46]

5.2 多目的運用戦略の特徴と新規性

第4章でも述べたように、BESSの運用パターンを制御して経済効率を高める運用戦略は従来から数多く提案され実用化されている。Yangらは太陽光発電が普及した状況下における、配電電圧調整やピークシェービングのためにBESSを導入した場合の適切な設備容量や損益分岐点のシミュレーション結果を報告している[47]。Ranらは、需要家の負荷の種別を分割し、需要家の満足度と制御のロバスト性を考慮した電気料金の最適化戦略を提案している[48]。Sunらは、SOH(State of Health)の異なるリユース蓄電池で構成されたBESSの経済的な運用戦略を報告している[49]。Mahmudらは、需要家の発電予測と需要予測に基づいてEV(Electric Vehicle)群の充放電によるピークシェービングを行う運用戦略を報告している[50]。Zhaoらは、蓄電池の寿命損失モデル、太陽光パネルの損失モデル及びToUを考慮した経済最適化戦略を報告している[51]。これらの先行研究は、単一の用途(サービス)を対象に、契約に基づく電気料金や、予測した市場取引価格に基づきBESSの運用パターンを制御する運用戦略である。これらの先行研究は、契約する電気料金や予測した取引価格に基づいてBESSの運転パターンを制御する運用戦略であるが、電力サービスの取引価格が経済効率に直接影響するため、単一の電力サービスにBESSを使用するだけでは経済効率の向上には不十分である。そこで、1つのエネルギー資源を複数のサービスに利用する運用戦略もいくつか提案されている。

Kazemiらは、周波数調整市場とエネルギー市場に同時に参加する際に、電池の寿命を考慮した長期戦略を提案した[52]。Kazemiらは、前日市場、予備力市場、周波数調整市場などの複数の市場への蓄電池システムの参加戦略を評価するために、リスクベースのアプローチも提案している[53]。提案されたリスクベースのモデルは最大-最小問題であり、双対性理論を用いて等価な通常の問題に変換されている。Kazempourらは、混合整数非線形問題(MNP)を用いて、水力発電会社の自己スケジューリングについて提案した[54]。Kazempourらは、3段階の確率的最適化問題を用いて、リスク回避の観点から最適なストレージ・ポートフォリオを決定する手法も提案している[55]。Mortazは、エネルギーアービトラージ、ピークダイヤモンドシェービング、各種バランシングサービスなど、分散型蓄電プラントのサービス間の相互作用を検討し、それらの相互作用が複数のサービスにおける蓄電プラントの収益性に与える影響を評価する手法を提案した[56]。Nasrolahpourらは、前日市場やバランシング市場などで最も有益な取引を決定する蓄電システムの意思決定ツールを開発した。開発されたモデルは、異なる市場の相互作用と、それらが蓄電システムの機能に与える影響を分析している[57]。Opathellaらは、複数のアンシラリーサービスで運用されているグリッドに接続されたエネルギー貯蔵システムのための収益最大化手法を提案している。彼らの提案したモデルは、すべてのアンシラリーサービスと蓄電システムのエネルギーアービトラージを同時に分析し、短期および長期のコストを最適化することが可能である[58]。Rahimiyaniらは、ロバスト最適化に基づいた2

段階の手順（前日市場とリアルタイム市場）を用いて、価格応答型の需要クラスタを制御するエネルギー管理システムを提案した [59].

単一の BESS を複数のサービスに利用する場合、組み合わせたサービスによって取引期間が異なるため、長期的な期待収益とリスクをモデル化し、予測性能を向上させることが重要である。前述した先行研究では、収益とコストの最適化、サービス間での収益の相関分析、複数サービスを利用する場合の配分計画などが行われている。しかし、限られた過去のデータから複数のサービスを組み合わせた場合の長期的な期待収益やリスクをモデル化し、その予測性能を向上させることに焦点を当てた運用戦略は十分に検討されていない。このため本章では、エネルギーサービスプロバイダーが自ら保有する BESS を複数の電力サービスに提供し、その対価を受け取る多目的運用戦略を提案した。本戦略では、上述の課題を解決するため二つの重要な技術を適用した。一つは、BESS の放電電力の配分を決定するために、金融工学における現代ポートフォリオ理論の重要なモデルである、資本資産価格モデル (Capital Asset Pricing Model, CAPM) である。これにより、BESS の運用における期待収益とリスクを定量的に評価し、エネルギーサービスプロバイダーが選択した許容リスクに対して最大の期待収益を得ることができる。もう一つは、多目的運用戦略における推定モデルの予測性能を高めるため、バギング (Bootstrap Aggregating, Bagging) と呼ばれるアンサンブル手法を用いている。推定モデルの予測性能に影響を与える大きな要因の一つは、モデル化に用いるデータセットのサンプル数が限られていることである。そこで、提案する運用戦略ではアンサンブル法を適用し、限られたデータセットから期待収益率の予測性能を高めることを検討した。

5.3 多目的運用戦略

5.3.1 CAPMに基づく多目的運用戦略

エネルギーサービスプロバイダーは、1つの BESS に蓄えられた限られた電力を複数の電力サービス（以下、商品）に供給・配分するため、経済的に効率の良い電力配分方法を決定する必要がある。ここで、配分される商品に、長期にわたって一括して取引される先物商品などが含まれている場合、短期的に取引される他の商品への電力配分も同時に決定する必要がある。そのため、各商品の長期的な取引価格を推定することが重要となる。しかし、電力の取引価格は、電力需要、天候、燃料価格、企業活動、政策など様々な外部要因に影響されるため、すべての取引商品の電力取引価格を正確に推定することは極めて困難である。図 5.3.1 は、提案した多目的運用戦略の概要を示している。この戦略は、電力取引価格の過去のデータを利用し、金融工学における現代ポートフォリオ理論の一つとして知られている CAPM [60]に基づき、各商品に電力を供給する際の年間の期待収益率とリスクを推定し、そのポートフォリオを最適化するものである。さらに、CAPM に基づく資産配分の考え方を BESS の放電電力制御に拡張し、放電電力配分計画を決定する。CAPM では、リスクを定量化するために平均・分散分析法を用いている。この方法では、ポートフォリオの収益の不確実性は、リターンの期待値とリターンの分散という二つの量で特徴づけられます。提案された多目的運用戦略では、CAPM に基づいて導出された効率的フロンティアから、運用における任意の許容リスクに対して最も高い期待収益率を持つ放電電力配分のポートフォリオを選択可能である。

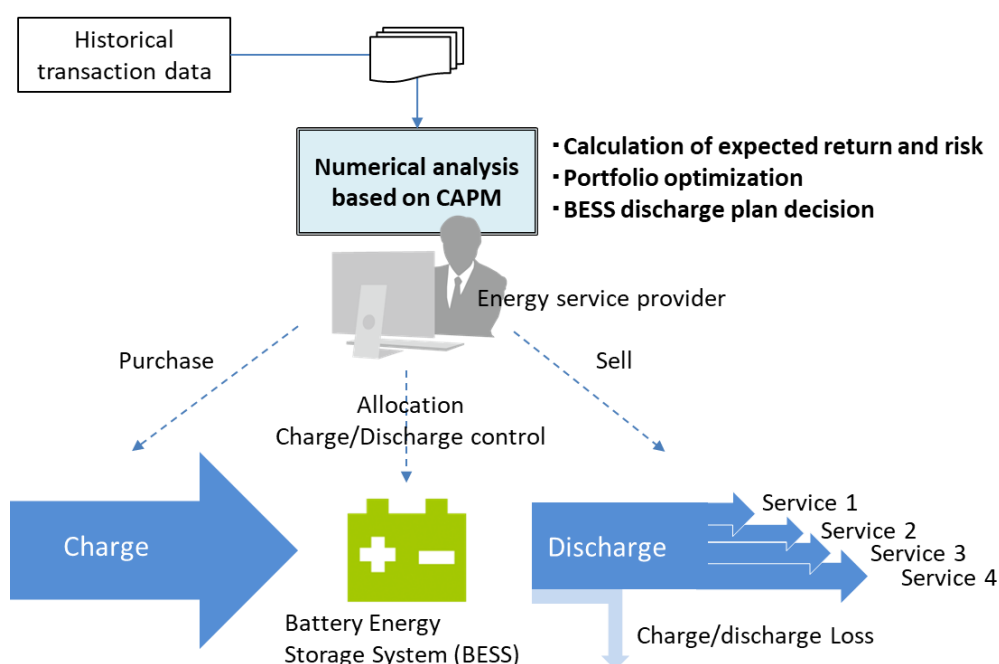


図 5.3.1 提案する多目的運用戦略

5.3.2 多目的運用戦略の定式化

1) 提案する多目的運用戦略

図 5.3.2 は本研究で提案する多目的運用戦略のフローチャートである。まず、電力取引価格のヒストリカルデータから、各商品の年間の期待収益率とリスクを推定する(図 5.3.2(1))。次に、すべての商品を組み合わせせたポートフォリオの年間の期待収益率とリスクを推定する(図 5.3.2 (2))。ここでポートフォリオとは、BESS による放電電力を、予め設定された年間の期待収益率を持つ複数の商品に割り当てた組み合わせを指す。そして、CAPM に基づいた最適化により、許容リスクごとに年間の期待収益率を最大化する放電力配分を決定することで、効率的フロンティアが導かれる(図 5.3.2 (3))。ここで、効率的フロンティアとは、リスクと年次期待収益率の組み合わせが最適となるポートフォリオの解集合のことである。最後に、これらの導出された最適化ポートフォリオを平均化し、BESS の一つの充電放電ポートフォリオとする(図 5.3.2 (4))。

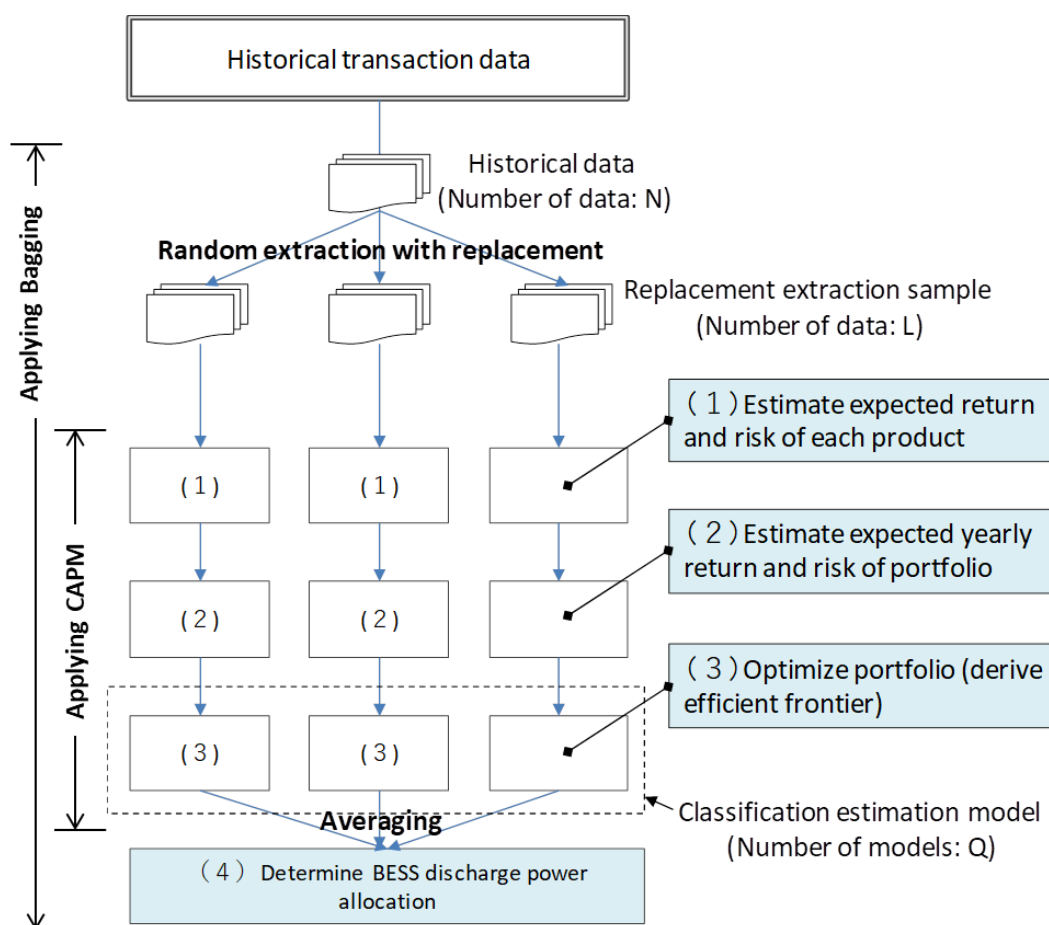


図 5.3.2 提案した多目的運用戦略の策定手順

図 5.3.2 では多目的運用戦略における推定モデルの予測性能を高めるため、バギング (Bootstrap Aggregating, Bagging) と呼ばれるアンサンブル法を用いた。アンサンブル法では、複数の弱学習器を学習させ、それらを組み合わせて使用する。この方法は、単一の学習器による方法よりも精度が高いことで知られている [61]。アンサンブル法は、弱学習器を順次生成する逐次アンサンブル法と、同時に生成する並列アンサンブル法に大別される。後者の代表的なアルゴリズムである Bagging は、依存度の低い弱学習器を組み合わせ、学習過程にランダム性を持たせることで、誤差を効果的に低減している。バギングでは、元のデータセットからランダムなサンプルを置換しながら抽出し、小さなデータセットから依存性の低い複数の異なるデータセットを生成する。これにより、予測性能に影響を与えるデータサンプル数の制約がなくなり、提案手法の予測性能が向上することが期待できる。また、アルゴリズムが単純でモデル化しやすく、並列処理が可能のため、一般的に計算時間が短縮されることが知られている [61]。このように、実用面においても、システム実装上の制約が非常に少ない有効な手段と考える。

バギングを適用した多目的運用戦略では、電力取引価格の履歴データ (データ数: N) から、無作為復元抽出 (元のサンプルから重複を許容してランダム抽出) により、 Q 個の復元抽出サンプル (データ数: L) を生成する。この復元抽出サンプルから、前述の(1)~(3)の処理を行い、 Q 個の弱学習器 (以下、分類推定モデル) を生成する。その結果、各分類推定モデルは、与えられた復元抽出サンプルに応じて、異なる効率的フロンティアを導き出す。

2) 商品の年次期待収益率とリスク

電力取引価格のヒストリカルデータから、年次期待収益率とリスクを推定する。式 5.1 は製品 P_j ($j=1,2,3,\dots,M$) における充電期間中の日次電力調達単価 C_{ij} ($i=1,2,3,\dots,N$) を示しており、 N はデータポイント数 (日数)、 M は商品数を意味している。例えば、 C_{11} は商品 P_1 の N 日目の初日の電力調達単価である。 C_{ij} は一日の電力売買単価 T_{ij} に売買手数料 f_j を加えて求められる。式 5.2 は製品 P_j の日次売電単価 B_{ij} を示している。例えば、 B_{11} は商品 P_1 の N 日間のうち初日の売電単価である。 B_{ij} は、 $T_{ij}-f_j$ と BESS の電力変換効率 η の積で表される。これは、調達時 (充電時) と販売時 (放電時) の両方で電力のロスがあり、実際に取引できる正味の電力量が減少するためである。製品 P_j の日時収益率 r_{ij} は、調達価格に対する単純利益率であり、式 5.3 で与えられる。そして、商品 P_j の年次期待収益率 $E(r_j)$ は、 r_{ij} の単純平均値として式 5.4 で与えられる。したがって、商品 P_j のリスクは、式 5.5 のように日次収益率の標準偏差 σ_j として表すことができる。つまり、取引価格の不確実性は、電力取引価格の実際の取引データに基づく日次収益率の標準偏差として数値モデルに反映される。

$$C_{ij} = (T_{ij} + f_i) \quad (5.1)$$

$$B_{ij} = (T_{ij} - f_j)\eta \quad (5.2)$$

$$r_{ij} = \frac{(B_{ij} - C_{ij})}{C_{ij}} \quad (5.3)$$

$$E(r_j) = \frac{\sum_{i=1}^N r_{ij}}{N} \quad (5.4)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (r_{ij} - E(r_j))^2}{N}} \quad (5.5)$$

3) ポートフォリオの年次期待収益率とリスク

金融工学では、投資家が保有する資産の集合体とその構成比をポートフォリオと呼ぶ。本稿では、ポートフォリオとは、期待される年次収益率を $E(r_j)$ とする商品 P_j への BESS による放電電力の配分構成を意味する。製品 P_j の年次期待収益率は、式 5.6 に示すように、それぞれの商品の年次期待収益率が $E(r_j)$ である M 個の商品の列ベクトル $\mathbf{E}(r)$ で表すことができる。期待リターン $\mathbf{E}(r)$ の分散共分散行列 \mathbf{S} は、商品数に依存する $M \times M$ の行列式であり、式 5.7 で与えられる。式 5.8 は、各商品の放電電力配分 \mathbf{x} の列ベクトル x_j を示す。放電電力配分は、各商品に対する BESS の放電電力の比率であり、0~1 の値をとる。ポートフォリオの期待リターン E_p は、式 5.9 に示すように、放電電力配分 x_j と各商品の年次期待収益率 $E(r_j)$ の加重和として計算される。また、ポートフォリオの分散 σ_p^2 は、式 5.7 と式 5.8 から式 10 で与えられる [62]。ポートフォリオのリスク σ_p は、式 5.11 で与えられる。

$$\mathbf{E}(r) = \begin{bmatrix} E(r_1) \\ E(r_2) \\ \vdots \\ E(r_M) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \cdots & \sigma_{M1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1M} & \cdots & \sigma_{MM} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$E_p = \sum_{j=1}^M x_j E(r_j) \quad (5.9)$$

$$\sigma_p^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{S} \mathbf{x} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M x_j x_k \sigma_{jk} \quad (5.10)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M x_j x_k \sigma_{jk}} \quad (5.11)$$

4) BESS の放電計画

ポートフォリオの許容リスクと年次期待収益率の最大値を用いてプロットした解集合を効率的フロンティアと呼ぶ。効率的フロンティア上のポートフォリオは、平均と分散の最適な組み合わせであることが知られている [62]。図 5.3.3 に効率的フロンティアの概要を示す。提案する多目的運転戦略では、この効率的フロンティアから、エネルギーサービスプロバイダーが許容するリスクの年次期待収益率を持つポートフォリオを選択し、BESS の各商品への放電電力配分を決定する。

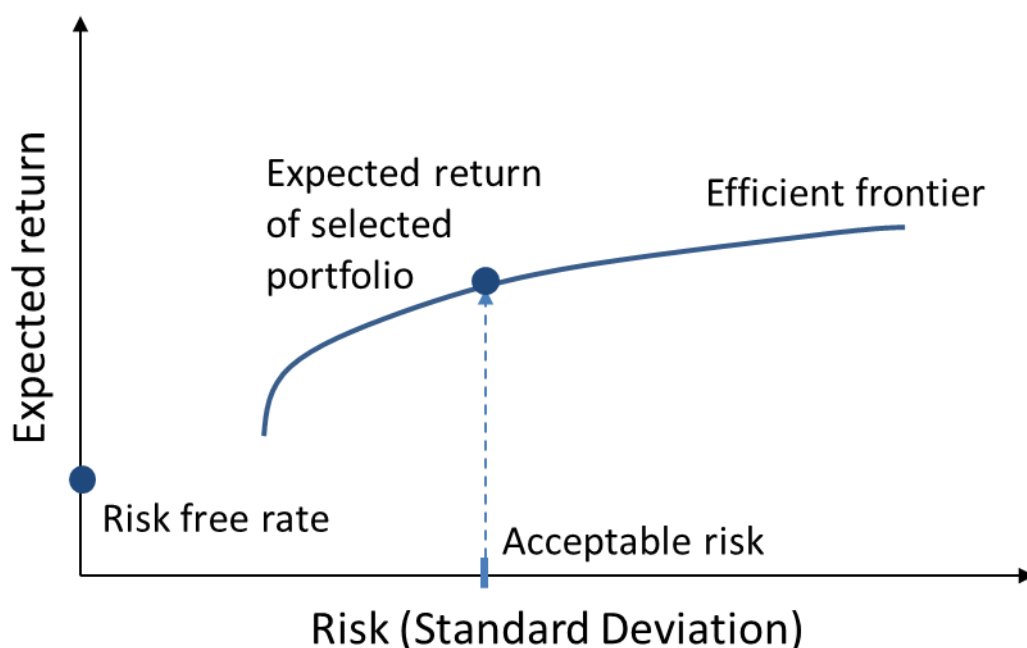


図 5.3.3 効率的フロンティア

効率的なフロンティアを導出するため、式 5.12~5.14 をポートフォリオの任意の許容リスクに対する期待収益率の最大化を目的とした最適化問題として定式化した。式 5.13 は、ポートフォリオの各商品の配分 x_j の合計が 1 でなければならないという等式制約を表している。ポートフォリオの許容リスクを変化させ、各許容リスクに対する年次期待収益率の最大値を最適化計算により算出する。最適化計算には、表計算ソフトのソルバー機能を使用し、最適化アルゴリズムには、非線形計画問題の解法である一般縮小勾配法 (Generalized Reduced Gradient method, GRG 法) を用いた (収束値は 0.0001 とした)。

$$\text{maximize } E_p = \sum_{j=1}^M x_j E(r_j) \quad (5.12)$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^M x_j = 1 \quad (5.13)$$

$$0 \leq x_j \leq 1 (j = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (5.14)$$

提案する運用戦略では、分類推定モデルの効率的フロンティアを並列計算する。そして、各分類推定モデルの効率的フロンティアにおいて、許容リスクが同じであるすべてのポートフォリオの放電電力配分を平均化することで新しいポートフォリオの放電電力配分率は x_j' となる。分類推定モデルの数を Q とすると、 x_j' は次のように計算される。

$$x_j' = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_h}{Q} = \frac{\sum_{h=1}^Q x_h}{Q} \quad (5.15)$$

ここで、 SOC_{ini} は蓄電システムの充電状態の現在値、 SOC_{min} は蓄電システムの充電状態の運用下限値、 C を蓄電システムの定格容量とすると、BESS に充電される電力量 W は式 5.16 で与えられる。各商品の BESS による充放電電力量の制御目標値 w_j は、 W と選択したポートフォリオの配分 x_j' を用いて、式 5.17 で与えられる。

$$W = (SOC_{ini} - SOC_{min})C \quad (5.16)$$

$$w_j = x_j'W \quad (5.17)$$

5.4 数値解析

本研究では、日本電力取引所 [63]の前日市場、リアルタイム市場（当日市場）、先渡市場に多目的運用戦略を適用した BESS の電力を提供することを想定した。表 5.4.1 に検討した市場の詳細を示す。前日市場では、翌日の電力を取引（売買）する。リアルタイム市場では、前日の市場と実際の需給との間に発生する不測の需給ギャップに対応するために電力を取引する。先渡市場では、中長期の電力を固定価格で取引する。先渡市場では、取引期間中に一定の出力の電気を 1 つの商品として取引する。

前日市場とリアルタイム市場では、取引価格が日毎・時間毎に変動する。一方、先渡市場では、取引期間中の価格が固定されている。このため、CAPM において、前日市場とリアルタイム市場はリスク性商品、先渡市場ではリスクフリー商品といえる。

表 5.4.1 取引商品

項目	Day-ahead market	Real-time market	Forward market
商品の記号 P_i	$P_1 \sim P_{48}$	$P_{49} \sim P_{96}$	P_{97}
分類	48 products divided into 30-minute periods each day		1 product for a specific period
取引手数料 f_i (JPY/kWh)	0.03	0.10	0.68
商品の性質	Risk product		Risk-free product

図 5.4.1 は対象商品群をプロットしたものである。各市場では、1 日を 30 分単位で区切った 48 の電力商品として取引される。先渡市場では、複数の時間ブロックを 1 つの取引商品として扱っているが、本稿では他の商品と条件を合わせるために 30 分単位で取引できる商品として扱うことにする。

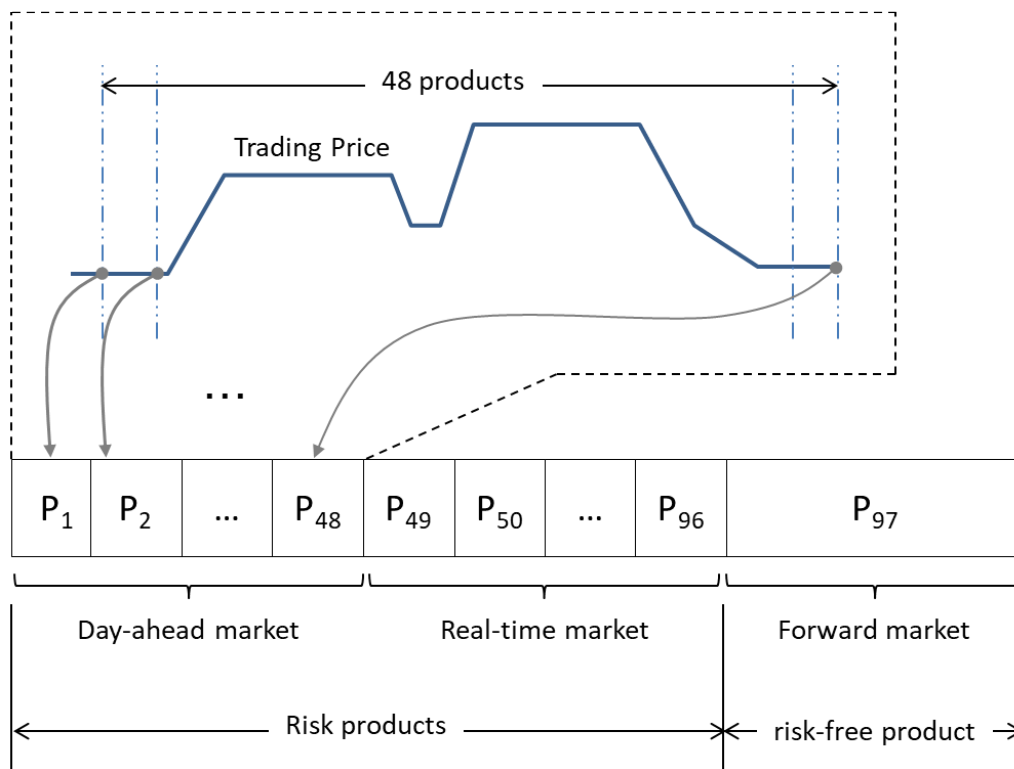


図 5.4.1 対象とする商品群

提案戦略では、式 5.3 で示される日時収益率のデータ量が増えると、日時収益率の分散（リスク）のデータ量も増えるため予測性能が向上する。このため、充電ブロックは固定することが好ましい。充電ブロックは 0:00~24:00 までの 48 ブロックから選択可能だが、過去のデータから深夜のブロックの調達価格が最も安いことが分かっているため、本研究では 0:00~0:30 のブロックを充電ブロックに固定してケーススタディを行った。このため、最初の時間ブロック（00:00~00:30）で蓄電池の充電（買電）を 30 分間行い、残りの 47 の時間ブロック（00:30~24:00）で蓄電池の放電（売電）を行うことになる。つまり、取引対象となる 97 商品のうち、昼前市場の 47 商品（図 5.4.1 の $P_2 \sim P_{48}$ ）、リアルタイム市場の 47 商品（図 5.4.1 の $P_{50} \sim P_{96}$ ）、先渡市場の 1 商品（図 5 の P_{97} ）の合計 95 商品が BESS で放電・供給される取引商品となる。

表 5.4.1 には [63] を参照した取引手数料を示している。先渡市場の取引手数料は月額固定価格だが、他の商品と条件を統一するために、30 分単位の時間ブロックごとのみなし価格としている（ $1,000 \text{ 円/月} \times 12 \text{ ヶ月} \div 365 \text{ 日} \div 48 \text{ 時間ブロック} = 0.68 \text{ 円}$ ）。BESS の充放電効率 η は、市中の BESS の電力変換効率を基に設定し、AC-DC、DC-AC の電力変換効率を 0.9 とし、充放電効率は $0.9 \times 0.9 = 0.81$ とした。一般的に BESS の充放電効率は負荷率に応じて変化するが、本研究では簡単のために一定の値とした。ここで、本研究は CAPM とアンサンブル手法を適用した運用戦略のリターンーリスク分析と予測性能向上の有効性を確認することを主な目的としているため、具体的な設置容量、蓄電池の充放電率、過渡

応答などは考慮していない。しかし、提案した運用戦略では、取引時間に応じた 30 分間隔の配分計画を想定しており、短時間応答特性などはあまり影響しないと考えている。また、リターンとリスクは無次元の値であり、設置容量によらず一般化できるものである。一方で、これらの要因は誤差として結果の精度に影響を与える。今後は、運用時に収集する電力データを用いて予測モデルを再学習することで予測モデルの精度を向上させるとともに、DFSS 法 (Design For Six Sigma) を適用して予測モデルのロバスト性を向上させることを検討している。式 5.17 の充放電される電力量 (kWh) に対応する充放電電流値は、BESS に使用する蓄電池の充放電レートよりも大きくてはならない。

数値分析には、2016 年度から 2018 年度までの 3 年間のヒストリカルデータを用いた。図 5 は、各市場の売買価格の推移 (7 日移動平均) を示したものである。この図から、取引価格は年ごとに変動する傾向があり、前年のデータセットから任意の年の取引価格を推定することは困難であることがわかる。各年の全商品の年間期待収益とリスクを式 4 と式 5 を用いて導き出し、その結果を図 6 に示した。期待年間リターンは、2016 年度が -25.0%~66.7%，2017 年度が -27.9%~16.9%，2018 年度が -33.5%~13.7% となっている。この図から、期待リターンが年ごとに異なることがわかる。

数値解析には、2016 年度から 2018 年度までの 3 年間のヒストリカルデータを用いた。図 5.4.2 は、各市場の売買価格の推移 (7 日移動平均) を示したものである。この図から、取引価格は年ごとに変動する傾向があり、前年のデータセットから任意の年の取引価格を推定することは困難であることがわかる。各年の全商品の年次期待収益率とリスクを式 5.4 と式 5.5 を用いて導出し、その結果を図 5.4.3 に示した。期待年間リターンは、2016 年度が -25.0%~66.7%，2017 年度が -27.9%~16.9%，2018 年度が -33.5%~13.7% となっている。この図から、期待リターンが年ごとに異なることがわかる。

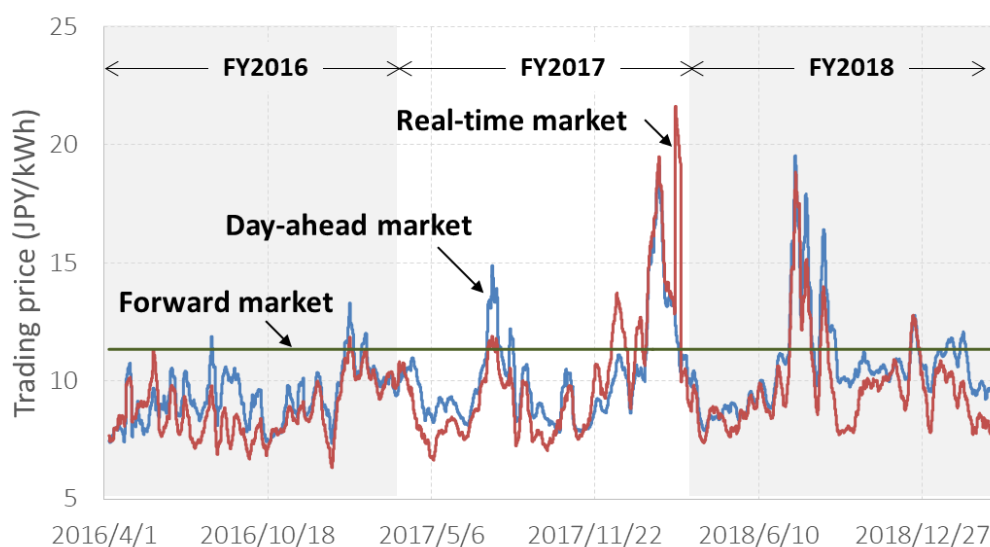


図 5.4.2 取引価格の推移 (7 日間移動平均)

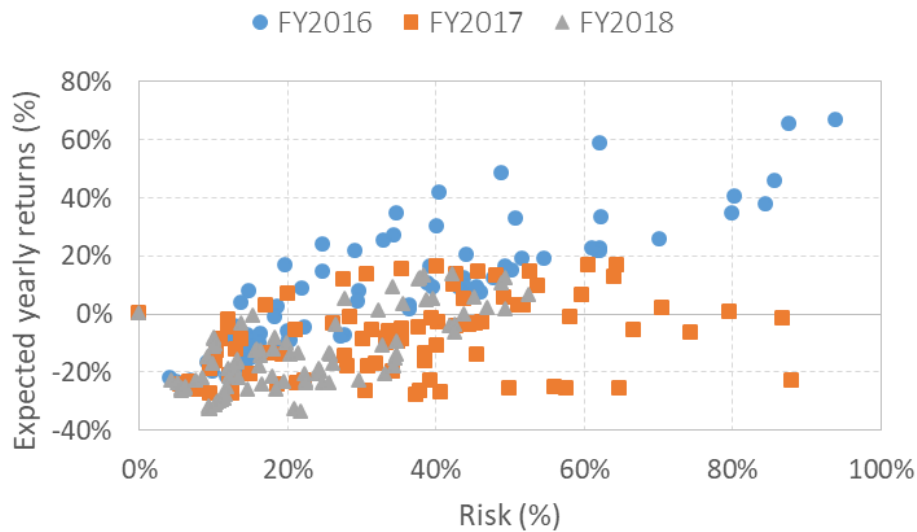


図 5.4.3 商品のリスクーリターン分布

これらのデータセットを用い、表 5.4.2 に示す異なるパターンについて、推定モデル（効率的フロンティア）と、各許容リスクに対する期待年間リターン（推定値）を導出する。表 5.4.2 において、パターン 1 は、アンサンブル手法（バギング）を用いずに CAPM を適用した場合である。パターン 2 は、復元抽出サンプルの 1 年間で、弱学習器の数が三つの場合に、アンサンブル手法（バギング）を用いて CAPM を適用した場合である。パターン 2 は、アンサンブル手法の適用効果を確認するために実施した。パターン 3 は、復元抽出サンプルの数を増やすことの効果を確認するために実施した。パターン 4 は、弱学習器の数を増やした場合の効果を確認するために実施した。次に、2019 年度の 1 年間に於いて、推定モデルのポートフォリオを運用した場合のリターン（実績値）を導出し、最後に、推定モデルで推定した値と実際の値を比較し、推定モデルの予測性能を評価した。

表 5.4.2 分析パターン

パターン	サンプル数：N	無作為復元抽出 サンプル数：L	弱学習器数：Q
パターン1 ※バギングなし	1,095	—	—
パターン 2		365	3
パターン 3		1,095	3
パターン 4		1,095	5

5.5 数値解析結果

サンプル数と分類推定モデルの数の影響は、異なるパターンの分類推定モデルの効率的フロンティアを導出することで判断した。図 5.5.1 および図 5.5.2 は、パターン 2 およびパターン 4 で得られた効率的フロンティアを示している。N 個のサンプルを持つ元のデータセットから、無作為復元抽出によって依存度の低い異なるデータセットを生成することで、各分類推定モデルの異なる軌跡を持つ効率的フロンティアが得られていることがわかる。

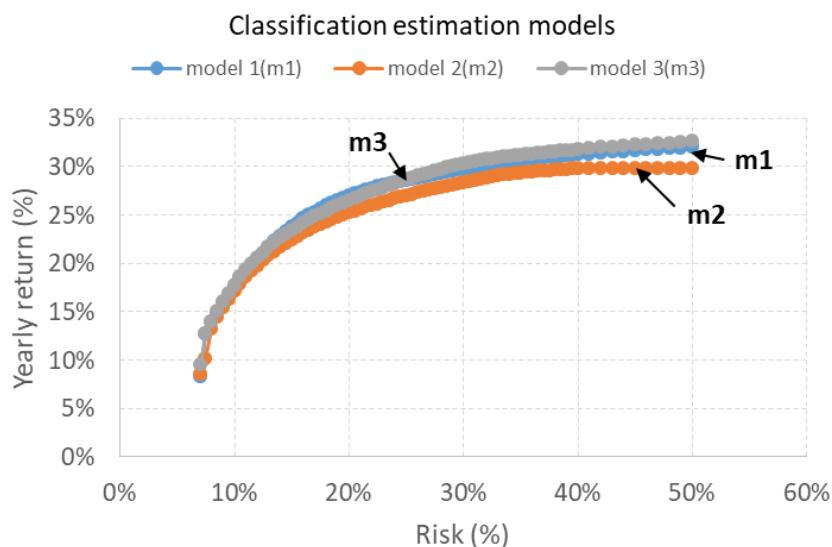


図 5.5.1 効率的フロンティア (パターン 2)

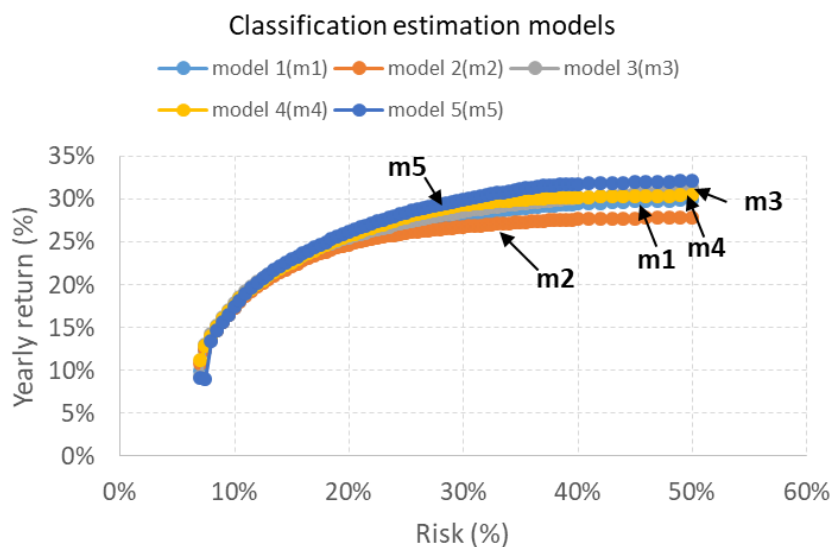


図 5.5.2 効率的フロンティア (パターン 4)

パターン2とパターン4では、復元抽出サンプルの数Lが増えるにつれ、低リスク領域（分散が小さい領域）における分類推定モデル間の差が減少し非常に小さくなっていることがわかる。この理由は、復元抽出サンプル数が増えると、平均的なリターンに近い値が多く抽出されるためと考えられる。一方、復元抽出サンプル数Lが増えると、ハイリスク領域（分散が大きい領域）における分類推定モデル間の差が大きくなる。これは、復元抽出サンプル抽出数が増えると、平均リターンから遠い値がより多く抽出されるためと考えられる。

図5.5.3~5.5.5は、提案した戦略を2019年度の一年間運用した場合の期待収益率（推定値）と実績収益率（実測値）の関係を示したものである。パターン1の期待収益率は、2016年度から2018年度までの3年間の過去データを用いて導き出された効率的フロンティアを示している。つまり、パターン1はバギングを行っていない結果を示している。パターン2とパターン3の期待収益率は、バギングを適用して得られた分類推定モデルの効率的フロンティアの平均値である。

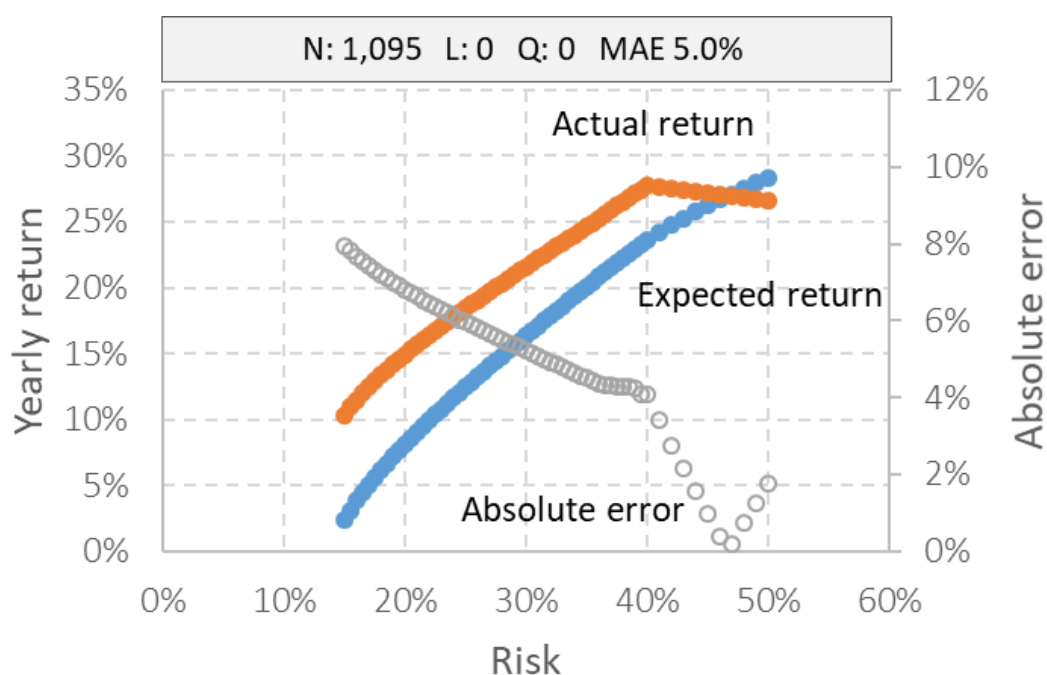


図 5.5.3 年次期待収益率と実績収益率（パターン1）

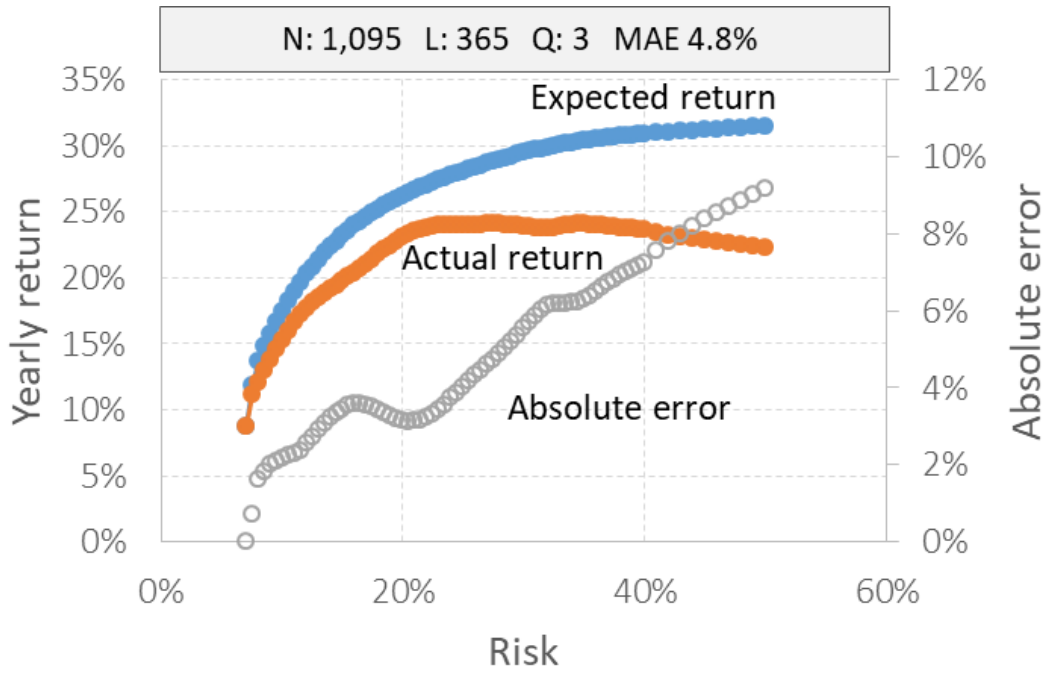


図 5.5.4 年次期待収益率と実績収益率 (パターン 2)

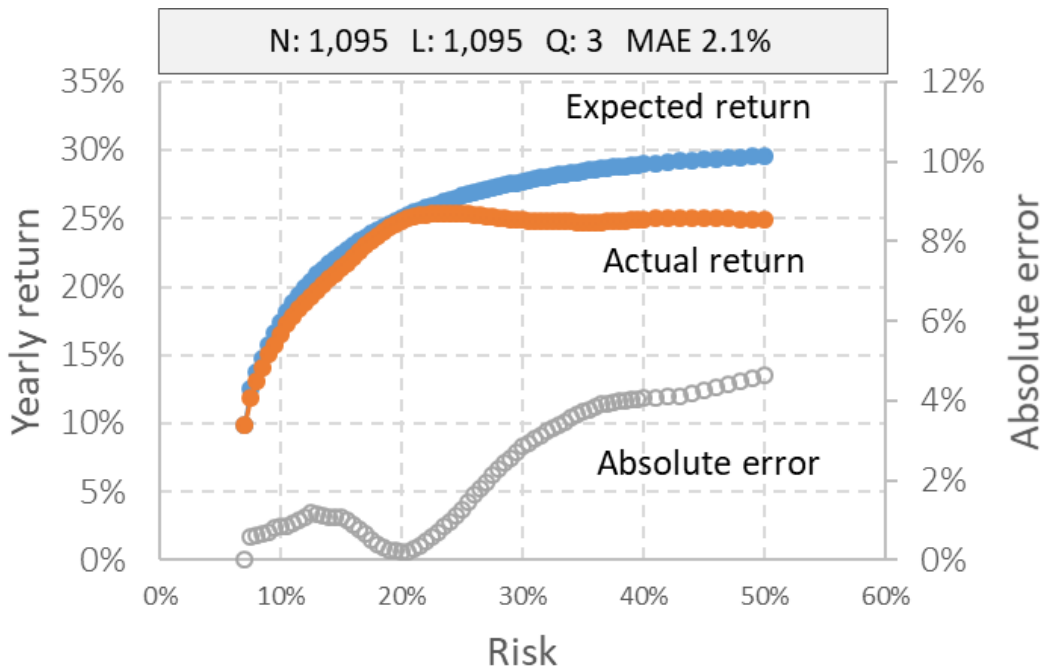


図 5.5.5 年次期待収益率と実績収益率 (パターン 3)

パターン 1 (図 5.5.3) では、推定値と実績値の乖離が大きく、測定区間における平均絶対誤差 (MAE) は 5.0%、絶対誤差の最大値は 8.0%となっている。これは、図 5.4.2 でも示したように、取引価格は毎年異なる傾向となるため、過去 3 年間という限られたデータセットでは、どの年の年間期待収益率も予測することは困難である、という仮説と一致している。パターン 2 (図 5.5.4) では、若干の改善が見られたものの、復元抽出サンプル数が少ないため、MAE は 4.8%、最大絶対誤差は 9.2%となった。復元抽出サンプル数が多かったパターン 3 (図 5.5.5) では、ハイリスク領域の誤差が小さくなっている。パターン 3 の MAE は 2.1%、最大絶対誤差は 4.7%であり、十分満足な結果となった。リスクが 25%以下の領域では、絶対誤差も 2.0%以下となっており、提案手法の予測性能は実用上十分なものと考えられる。ハイリスク領域では、測定区間における日次の期待収益率の乖離の最大値が約 50%であり、誤差の大幅な減少は見られない。分類推定モデル Q の数は、パターン 3 では 3 個、パターン 4 では 5 個と増えているが、予測性の大幅な向上は見られなかった。すべてのパターンの結果を表 5.5.1 にまとめた。

表 5.5.1 数値解析結果

パターン	MAE (%)	最大絶対誤差率 (%)
パターン1 ※バギングなし	5.0	8.0
パターン 2	4.8	9.2
パターン 3	2.1	4.7
パターン 4	2.9	6.0

図 5.5.6 と図 5.5.7 は、パターン 1 とパターン 3 の効率的フロンティアにおける BESS の放電電力配分を示している。これらの結果は、エネルギーサービスプロバイダーが許容するリスクに応じて、BESS の放電電力 W が効率的フロンティア上のポートフォリオに占める割合を示しており、式 5.17 で得られる結果と一致している。図から、パターン 3 の推定モデルは、バギングを用いて複数の異なる置換された抽出サンプルに基づいて構築されているため、商品の構成が変化した充放電電力ポートフォリオとなり、リスク分散効果が高いことが分かる。パターン 1 では、リスクが 15%以下の領域は実行不可能となったため、放電電力の配分がされていない。

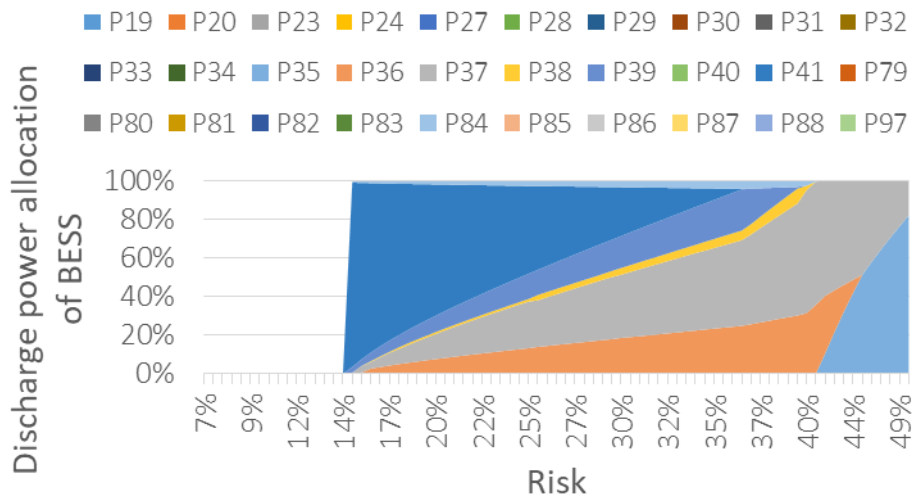


図 5.5.6 効率的フロンティアの放電電力配分 (パターン 1)

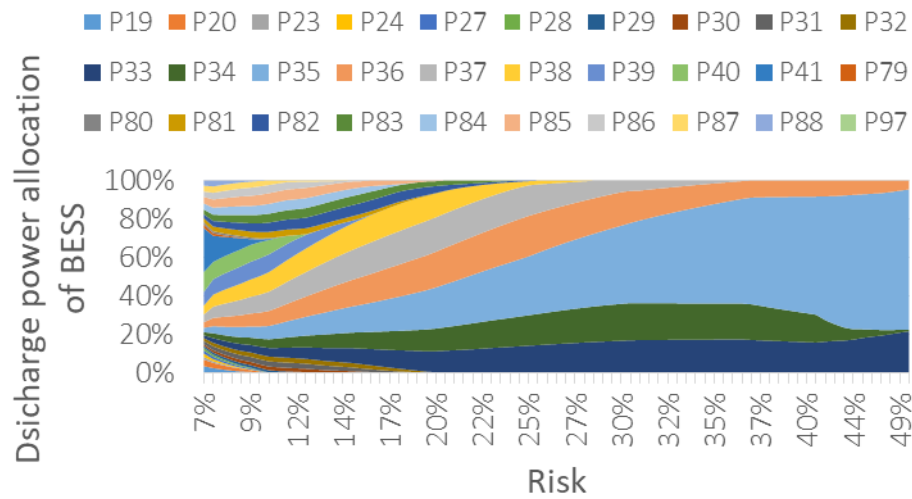


図 5.5.7 効率的フロンティアの放電電力配分 (パターン 1)

本章では、単一の BESS から複数の電力サービスに効率よく電力を配分する多目的運用戦略を提案した。提案した運用戦略では、CAPM とアンサンブルアプローチを用いて BESS の放電電力の配分を決定し、BESS 運用における期待収益率とリスクを定量的に評価し、選択した許容リスクに対して最大の期待リターンを高い予測可能性で実現することができる。リターンの分散が大きい領域（リスクが概ね 20%以上）の予測性能にはまだ改善の余地があるが、リターンの分散が小さい領域（リスクが概ね 20%以下）の予測性能は非常に高くなっている。しかし、リスクが 20%前後でリターンがピークになることを考えれば、実用上の問題はないと考えられる。以上のことから、本章で提案した多目的運用戦略は、エネルギーサービスプロバイダーのより効率的な運用を支援するとともに、事業者の許容リスクに見合った収益見通しを提供することができるといえる。

第6章 結論

持続可能な社会システム実現に向け、世界規模のパラダイムシフトが今まさに起きている最中である。電気自動車や定置型蓄電池をはじめとする蓄電システムが、様々サービスを通じ、地球環境問題や電力の安定供給に貢献し、新しい電力インフラの中核を担うエネルギーリソースに成長するか否かは、この過渡期における運用制御技術の躍進が最重要課題の一つである。

本研究では、電力システムアーキテクチャの変遷、電力市場環境の変化、電気の価値（サービス）の多様化など、電力を取り巻く将来の環境変容の見通しを説明し、エネルギーサービスプロバイダーに求められる運用制御技術課題の内、最も重要なものを、

- ① DSR の多様化
- ② DSR の運用効率化
- ③ DSR の適用領域拡大

の三つであるとした。①では、新しい蓄電システムとして期待が高い電気自動車について、直流 V2B 技術を活用した、DSR への適用可能性を実証実験により確認し、その見通しを示した。②では、需要家の Behind-the-Meter に太陽光発電と蓄電システムを有する低圧需要家を対象に、天候による正味負荷電力の長期的変動性を考慮した新しい運用戦略を提案し、需要家内における再生可能エネルギー比率の期待改善効果を数値解析により導出した結果を確認した。③では、単一の蓄電システムを複数の電力取引市場で運用する多目的運用戦略を提案した。本運用戦略では、金融工学のポートフォリオ理論の一つである資本資産価格モデル (Capital Asset Pricing Model, CAPM) を適用することで、運用面の負担の低減を実現しながら、長期的リスクやリターンを定量的に評価することを可能にするとともに、長期間にわたって安定的なパフォーマンスが期待できることを確認した。さらに、提案する運用戦略にアンサンブルアプローチを適用することで、リスクとリターンの予見性を改善した。

本研究は、電力を取り巻く将来の環境条件を考慮した上で、新しい DSR の適用可能性を明らかにするとともに、運用面における効率化や適用領域拡大に資する運用制御技術の提案と有効性を確認した。今後、再生可能エネルギーの導入促進に伴い大いに貢献すると期待される。

謝辞

本研究の遂行にあたり、あらゆる面で懇切なるご指導を頂きました学部時代からの恩師である、九州工業大学大学院 生命体工学研究科 生体機能応用工学専攻 大村一郎教授に心より感謝申し上げます。学術的・技術的指導は勿論、研究課題の意義、その成果が社会にどのように貢献できるか等、研究者として研究課題に向き合う際の考え方や姿勢を改めて学ぶことができ、結果、自分なりに有意義な博士論文として纏めることができました。重ねて御礼申し上げます。

本論文を作成するにあたり、審査委員として数多くの貴重なご助言を頂きました、同大学大学院 工学研究院 電気電子工学研究系 松本 聡教授、同大学大学院 生命体工学研究科 生体機能応用工学専攻 花本剛士教授、本田英己客員教授、バンディ シャム スディル准教授、に心より感謝申し上げます。

研究室に温かく迎えて下さりました大村研究室の皆様、ならびに、大村研究室の社会人博士の先輩であり、進学前より貴重なご助言を頂きました三菱電機株式会社の附田正則様に感謝申し上げます。特に、日頃から常に気にかけて下さり、事務手続きを含め、あらゆる面において、温かくきめ細やかなご支援をして頂きました大村研究室の岩堀美代様に感謝申し上げます。岩堀様のご支援なくして博士論文の完遂には到底至りませんでした。

博士課程への進学について背中を押して下さり、論文執筆では数多くの貴重なご指導・ご助言を頂きました、株式会社 NTT ファシリティーズの馬場崎忠利部長に深く感謝申し上げます。委員会活動や国際会議への参加など研究者として成長する多くのチャンスを頂けたことが研究完遂の大きな糧となりました。重ねて御礼申し上げます。

また、研究の遂行にあたり、業務面で最大限のご配慮を頂きました、同社の藁谷至誠取締役、田口泰啓部門長、竹内義晴課長、植嶋美喜氏、ならびに、社内の社会人博士の先輩として、進学前より懇切なるご指導を頂きました武田 隆部長に深く感謝申し上げます。

また、以上に挙げきれませんでした。ご支援いただいた全ての方々に対し心より御礼申し上げます。

最後に、3年間の社会人博士課程において、最大限の配慮と応援をしてくれた最愛の妻の由香に心から感謝します。

2022年2月 湯浅 一史

参考文献

- [1] International Energy Agency (IEA), “Trends in Photovoltaic Applications 2019,” pp. pp. 6-14, 2019.
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable Power Generations Costs in 2018,” pp. pp. 11-17, 2019.
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁, “平成 30 年度 エネルギーに関する年次報告,” pp. pp. 30-33, 2019.
- [4] 経済産業省 資源エネルギー庁, “第五次エネルギー基本計画を踏まえた電力・ガス政策の方向性について,” 2018.
- [5] California ISO, “What the duck curve tells us about managing a green grid,” 2016.
- [6] 九州電力株式会社, “2017 年度 経営計画の概要[詳細版],” 2017.
- [7] 資源エネルギー庁, “電力システム改革について,” 2015.
- [8] 経済産業省, “登録小売電気事業者一覧,” 2020.
- [9] 経済産業省 資源エネルギー庁, “第 3 弾改正法施工前検証～エネルギー基本計画に基づく施策の実施状況～,” 2019.
- [10] International Energy Agency (IEA), “Global EV Outlook 2019 Scaling-up the transition to electric mobility,” pp. pp. 9-10, 2019.
- [11] 中小企業庁, “2019 年版 中小企業白書,” pp. pp. 396-400, 2019.
- [12] 東京電力ホールディングス株式会社, “台風 15 号対応検証委員会報告書(最終報告),” pp. pp. 7-10, 2020.
- [13] 日産自動車, “日本最大基礎自治体の横浜市と日産自動車、電気自動車を活用した「災害連携協定」を締結,” 2020.
- [14] 経済産業省, “第 3 回 自動車新時代戦略会議 事務局説明資料,” 2019.
- [15] 資源エネルギー庁, “「電気自動車 (EV)」だけじゃない? 「xEV」で自動車の新時代を考える,” 2018.
- [16] 経済産業省, “自動車新時代戦略会議 中間整理 (案) 補足資料,” 2019.
- [17] G. R. C. Mouli, Jos Schijffelen, Mike van den Heuvel, Menno Kardolus , Pavol Bauer, “A 10 kW Solar-Powered Bidirectional EV Charger Compatible With Chademo and COMBO,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1082-1098, 2019.
- [18] Minh Kwon , Sewan Choi, “An Electrolytic Capacitorless Bidirectional EV Charger for V2G and V2H Applications,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32,

no. 9, pp. 6792-6799, 2017.

- [19] Giuseppe Buja, Manuele Bertoluzzo, Christian Fontana, “A Reactive Power Compensation Capabilities of V2G-Enabled Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9447-9459, 2017.
- [20] Damith Buddika Wickramasinghe Abeywardana, Pablo Acuna, Branislav Hredzak, Ricardo P. Aguilera, Vassilios G. Agelidis, “Single-Phase Boost Inverter-Based Electric Vehicle Charger With Integrated Vehicle to Grid Reactive Power Compensation,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 4, pp. 3462-3471, 2018.
- [21] M. Noritake, K. Yuasa, T. Takeda, H. Hoshi, K. Hirose, “Demonstrative research on DC microgrids for office buildings,” 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014, pp. 1-5, 2014.
- [22] M. Noritake, K. Yuasa, T. Takeda, K. Shimomachi, R. Hara, H. Kita, T. Matsumura, “Experimental study of a 400 V class DC microgrid for commercial buildings,” 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015, pp. 1730-1735, 2015.
- [23] M. Noritake, K. Yuasa, T. Takeda, H. Hoshi, K. Hirose, “The Demonstration of the CO₂ Reduction Effect of 400V Class DC Micro Grid for Offices,” 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2015, pp. 1-6, 2015.
- [24] K. Yuasa, T. Shimakage, N. Takeuchi, Y. Sugiyama, “Optimized storage battery control in hybrid power distribution system for improving energy self-consumption,” 2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2016, pp. 1-6, 2016.
- [25] K. Yuasa, M. Ueshima, T. Babasaki, “A study on optimum design of storage battery capacity for DC microgrid,” 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2017, pp. 393-399, 2017.
- [26] 湯浅 一史, 植嶋 美喜, 馬場崎 忠利, “オフィス向け直流 V2B (Vehicle to Building) の実証研究,” *IEICE Technical Report EE2019-75*, pp. pp.1-5, 2020.
- [27] 電力広域的運営推進機関, “第 11 回 需給調整市場検討小委員会 資料 4-2-2 (参考) 需給調整市場について,” 2019.
- [28] International Energy Agency (IEA), “Trends 2018 in Photovoltaic Applications,” pp. pp. 43-52, 2018.
- [29] The International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewables and electricity

- storage, A technology roadmap for Remap 2030,” pp. pp. 26-27, 2015.
- [30] 資源エネルギー庁, “定置型蓄電池の価格低減スキーム,” 2018.
- [31] S. Machida , T. Tani, “Introduction Effect of the Load Leveling System with Solar Cell and Storage Battery,” IEEJ Transactions on Power and Energy, Volume 123, Issue 1, pp. 37-46, 2003.
- [32] E. Hossain, Mashrur Zawad, KH Rakibul Islam , Md Qays Akash, “Design a Novel Controller for Stability Analysis of Microgrid by Managing Controllable Load using Load Shaving and Load Shifting Techniques; and Optimizing Cost Analysis for Energy Storage System,” INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH , vol. 6, No.3, pp. 772-786, 2016.
- [33] A. Zurfi, Ghaidaa Albayati , Jing Zhang, “Economic Feasibility of Residential Behind-the-Meter Battery Energy Storage Under Energy Time-of-Use and Demand Charge Rates,” 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 842-849, 2018.
- [34] Chee Lim Nge, Ole-Morten Midtgård , Lars Norum, “PV with battery in smart grid paradigm: Price-based energy management system,” 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012, pp. 000575-000579, 2012.
- [35] Z. Xiaobo, Zhang Baohui, He Qifei , Guan Jun, “Microgrid optimal operation considering virtual reserve capacity trading of storage battery,” 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1-5, 2016.
- [36] K. Shimomachi, T. Iwami, R. Hara, K. Hiroyuki, M. Noritake, H. Hoshi , K. Hirose, “Development of EMS for Microgrid for Office Building,” IEEJ transactions on power and energy, Vol.136, no.4, pp.373-381, 2016.
- [37] M. Ueshima, K. Yuasa , T. Babasaki, “Improving Energy Self-Consumption Rate in Renewable Energy System, A study Using a Robust Optimization Method Considering Uncertainty of Power Generation,” 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2018, pp. 281-286, 2018.
- [38] 湯浅 一史, 植嶋 美喜, 馬場崎 忠利 , 大村 一郎, “太陽光発電を有する需要家の正味負荷の長期変動性を考慮した蓄電池の最適運用戦略に関する検討,” *信学技報 EE2019-35*, 2019.
- [39] K. Deb, S. Agarwal, A. Pratap , T. Meyarivan, “A Fast Elitist “Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II,” *In KanGAL*

Report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2000.

- [40] TEPCO Energy Partner, Inc..
- [41] Agency for Natural Resources and Energy, “Verification before the third revised law enforcement”.
- [42] Agency for Natural Resources and Energy, “About solar power generation”.
- [43] 北海道電力株式会社 , 住友電気工業株式会社, “大型蓄電システム緊急実証事業 南早来変電所 大型蓄電システム実証事業,” 2020.
- [44] 薩摩川内市 次世代エネルギー課, “次世代エネルギーを活用した「超スマート」なまちづくりについて,” 2018.
- [45] 本間 充, “ピーク対策における蓄電システム,” 2011.
- [46] NTTファシリティーズ, “蓄電池を活用した高度制御型ダイヤモンドリスポンス実証事業の開始,” 2016.
- [47] Ye Yang, Hui Li, Andreas Aichhorn, Jianping Zheng , Michael Greenleaf, “Sizing Strategy of Distributed Battery Storage System With High Penetration of Photovoltaic for Voltage Regulation and Peak Load Shaving,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 982-991, 2014.
- [48] Xiaohong Ran , Shipeng Leng, “Enhanced Robust Index Model for Load Scheduling of a Home Energy Local Network With a Load Shifting Strategy,” IEEE Access, vol. 7, pp. 19943-19953, 2019.
- [49] Sun Jinlei, Pei Lei, Liu Ruihang, Ma Qian, Tang Chuanyu , Wang Tianru, “Economic Operation Optimization for 2nd Use Batteries in Battery Energy Storage Systems,” IEEE Access, vol. 7, pp. 41852-41859, 2019.
- [50] Khizir Mahmud, Animesh K , Sahoo, and Jayashri Ravishankar, “A Day-Ahead Peak Shaving Strategy Using Aggregated Electric Vehicles,” 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 6749-6753, 2019.
- [51] Shuang Zhao, Xingchen Zhao, Chris Farnell, H. Alan Mantooth, Janviere Umuhoza , Yuzhi Zhang, “ A Daily Optimization Method for a PV-Battery Microgrid Considering the Battery Lifetime and Time-of-Use Pricing,” 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2019, pp. 3243-3250, 2019.
- [52] M. Kazemi , H. Zareipour, “Long-term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6840-6849, 2018.
- [53] M. Kazemi, H. Zareipour, N. Amjady, W. D. Rosehart , M. Ehsan, “Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets,”

- IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 8, no. 4, pp. 1726-1735, 2017.
- [54] S. J. Kazempour, M. Hosseinpour , M. P. Moghaddam, “Self-scheduling of a joint hydro and pumped-storage plants in energy spinning reserve and regulation markets,” Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, pp. 1-8, 2009.
- [55] S. J. Kazempour, M. P. Moghaddam, M. R. Haghifam , G. R. Yousefi, “Risk-constrained dynamic self-scheduling of a pumped-storage plant in the energy and ancillary service markets,” Energy Convers. Manage., vol. 50, no. 5, pp. 1368-1375, 2009.
- [56] E. Mortaz, “Portfolio diversification for an intermediary energy storage merchant,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 11, no. 3, pp. 1539-1547, 2020.
- [57] E. Nasrolahpour, J. Kazempour, H. Zareipour , W. D. Rosehart, “A bilevel model for participation of a storage system in energy and reserve markets,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 9, no. 2, pp. 582-598, 2018.
- [58] C. Opathella, A. Elkasrawy, A. A. Mohamed , B. Venkatesh, “Optimal scheduling of merchant-owned energy storage systems with multiple ancillary services,” IEEE Open Access J. Power Energy, vol. 7, pp. 31-40, 2020.
- [59] M. Rahimiyan , L. Baringo, “Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: A price-taker robust optimization approach,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 4, pp. 2676-2687, 2016.
- [60] F. William Sharpe, “Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk,” J. Finance, vol. 19, no. 3, pp. 425-442, 1964.
- [61] Z.-H. Zhou, “Ensemble Methods-Foundations and Algorithms,” Boca Raton, FL, USA:CRC Press, 2018.
- [62] S. Benninga, “Financial Modeling,” Cambridge, MA, USA:MIT Press, 2015.
- [63] Japan Electric Power Exchange, “Japan Electric Power Exchange Trading Guide,” [online] Available: http://www.jepx.org/english/outline/pdf/Guide_2.00.pdf?timestamp=1627697643713, 2020.

図一覧

図 1.1.1	世界の太陽光発電システムの累積設置容量の進展 [1]	1
図 1.1.2	ユーティリティー規模の再生可能エネルギー発電技術の LCOE [2]	2
図 1.1.3	日本の中期目標とその推移 [3]	3
図 1.1.4	電力システムの将来の可能性 [4]	3
図 1.2.1	CAISO のダックカーブ問題 [5]	4
図 1.2.2	九州電力管内の需給運用状況 [6]	5
図 1.2.3	電力システム改革の全体像 [7]	6
図 1.2.4	今後の市場整備の方向性 [9]	6
図 1.3.1	エネルギーサービスプロバイダーを取り巻くサービスの全体像	7
図 2.1.1	DSR の運用制御における技術課題のイメージ	9
図 3.1.1	電気自動車の普及 [10]	11
図 3.1.2	国内の自然災害発生件数（ [11]を基に作成）	12
図 3.1.3	電気自動車による電力供給イメージ [13]	12
図 3.2.1	V2X のイメージ [14]	13
図 3.2.2	Well-to-Wheel [15]	14
図 3.2.3	Well-to-Wheel Zero Emission チャレンジ [16]	14
図 3.2.4	直流給電方式の適用分野	15
図 3.2.5	直流給電方式と交流給電方式の比較	16
図 3.3.1	実証給電システム概要 [26]	17
図 3.3.2	双方向 EV 充電器の外観	18
図 3.3.3	EV 充放電制御装置のユーザーインターフェース	19
図 3.4.1	総合動作試験の試験結果	21
図 3.4.2	充電特性（i-MiEV）	23
図 3.4.3	充電特性（LEAF）	23
図 3.4.4	放電特性（i-MiEV）	24
図 3.4.5	放電特性（LEAF）	25
図 3.4.6	需給調整市場の商品要件 [27]	26
図 3.4.7	適用可能性試験の試験結果	27
図 3.4.8	適用可能性試験の試験結果	27
図 4.1.1	太陽光発電の LCOE [28]	28
図 4.1.2	産業用蓄電池の目標価格 [30]	29
図 4.2.1	評価用給電システムの構成	31
図 4.3.1	従来戦略の一例と提案戦略の概要	33
図 4.3.2	負荷率と電力変換効率の関係	34

図 4.3.3	提案戦略の手順	35
図 4.4.1	一週間の負荷電力曲線（春季）	37
図 4.4.2	一週間の負荷電力曲線（夏季）	37
図 4.4.3	一週間の負荷電力曲線（秋季）	38
図 4.4.4	一週間の負荷電力曲線（冬季）	38
図 4.4.5	一週間の発電電力曲線（春季）	39
図 4.4.6	一週間の発電電力曲線（夏季）	39
図 4.4.7	一週間の発電電力曲線（秋季）	40
図 4.4.8	一週間の発電電力曲線（冬季）	40
図 4.4.9	BESS の電力変換効率	42
図 4.4.10	解分布	44
図 4.4.11	シミュレーション波形（春季，負荷容量の 20%）	45
図 4.4.12	年間の逆潮流量（定格負荷容量 20%，春季）	46
図 4.4.13	RER の年間平均値に関する数値解析結果	47
図 4.4.14	電力料金の推移（ [41] を基に作成）	48
図 4.4.15	電力コスト低減効果（対従来戦略 1）	49
図 4.4.16	電力コスト低減効果（対従来戦略 2）	50
図 5.1.1	南早来変電所 大型蓄電システム実証事業 [43]	51
図 5.1.2	甕島蓄電池導入共同実証事業 [44]	52
図 5.1.3	ピークカット用蓄電システムの導入事例 [45]	52
図 5.1.4	蓄電池を活用した高度制御型ダイヤモンドリスポンス実証事業 [46]	53
図 5.3.1	提案する多目的運用戦略	56
図 5.3.2	提案した多目的運用戦略の策定手順	57
図 5.3.3	効率的フロンティア	60
図 5.4.1	対象とする商品群	63
図 5.4.2	取引価格の推移（7 日間移動平均）	64
図 5.4.3	商品のリスクリターン分布	65
図 5.5.1	効率的フロンティア（パターン 2）	66
図 5.5.2	効率的フロンティア（パターン 4）	66
図 5.5.3	年次期待収益率と実績収益率（パターン 1）	67
図 5.5.4	年次期待収益率と実績収益率（パターン 2）	68
図 5.5.5	年次期待収益率と実績収益率（パターン 3）	68
図 5.5.6	効率的フロンティアの放電電力配分（パターン 1）	70
図 5.5.7	効率的フロンティアの放電電力配分（パターン 1）	70

表一覧

表 3.3.1	各装置の主要諸元	17
表 3.4.1	測定パターン	22
表 4.2.1	装置仕様	31
表 4.4.1	一週間の天候発生回数	36
表 4.4.2	数値解析の比較条件	43
表 4.4.3	年間の逆潮流量低減効果	46
表 4.4.4	RER の年間平均値改善効果	47
表 4.4.5	買電料金と売電料金	48
表 5.4.1	取引商品	62
表 5.4.2	分析パターン	65
表 5.5.1	数値解析結果	69

用語一覧

略称	語句	説明
—	調整力	供給区域における周波数制御，需給バランス調整その他の系統安定化業務に必要となる発電機等の能力
—	予備力	供給区域の調整力以外の発電機の発電余力と上げ調整力（供給区域の余剰インバランスの発生に対応するための調整力を足したもの）
DSR	Demand Side Energy Resource	需要家の受電点以下（behind the meter）に接続されているエネルギーリソース（発電設備，蓄電設備，需要設備）を総称するもの
BESS	Battery Energy Storage System	蓄電システム（二次電池電力貯蔵システム）
EV	Electric Vehicle	電気をエネルギー源とし，電動機を動力源として走行する自動車
V2B	Vehicle to Building	自動車とビル間で電力の相互供給をする技術やシステム
V2H	Vehicle to Home	自動車と一般住宅間で電力の相互供給をする技術やシステム
V2G	Vehicle to Grid	自動車と電力系統間で電力の相互供給をする技術やシステム
V2X	Vehicle to X	V2H，V2B，V2Gなどを総称した表現
RER	Renewable Energy Ratio	需要家内の再生可能エネルギーの比率
VRE	Variable Renewable Energy	太陽光発電や風力発電のような出力が変動する再生可能エネルギー
GHG	Greenhouse Gas	温室効果ガス
LCOE	Levelized Cost Of Electricity	均等化発電原価。建設費，運転維持費，燃料費など発電に必要なコストと利潤などを合計し，運転期間中の想定発電量をもとに算出するコスト指標
EMS	Energy Management System	エネルギーマネジメントシステム
SOC	State of Charge	蓄電池の充電状態
SOH	State of Health	蓄電池の健全度や劣化状態を表す指標
ToU	Time of Use	時間帯別料金
CAPM	Capital Asset Pricing Model	資本資産価格モデル。金融資産の期待収益率のクロスセクション構造を記述するモデル

記号一覧

－第三章－

記号	単位	説明
P_L	kW	負荷電力
P_{RF}	kW	整流装置の出力電力
P_{EV1}	kW	i-MiEV の出力電力
P_{EV2}	kW	LEAF の出力電力
SOC	%	EV の車載蓄電池の充電状態

－第四章－

記号	単位	説明
RER	－	再生可能エネルギー比率
P_{RE}	kW	再生可能エネルギーから負荷への供給電力
P_L	kW	負荷電力
P_U	kW	系統電力
P_G	kW	発電電力
P_D	kW	放電電力
P_C	kW	充電電力
SOC	－	BESS の充電状態
SOC_{MAX}	－	BESS の動作可能範囲の最大値
SOC_{MIN}	－	BESS の動作可能範囲の最小値
SOC_{INI}	－	BESS の充電状態の初期値
η_B	－	BESS の電力変換効率
η_G	－	PV-PCS の電力変換効率
N	－	GA の個体数
t	－	GA の世代数

－第五章－

記号	単位	説明
C_{ij}	JPY/kWh	日次電力調達単価
T_{ij}	JPY/kWh	日次電力取引単価
B_{ij}	JPY/kWh	商品 P_N の日次電力販売単価
f_j	JPY/kWh	電力取引手数料
η	－	BESS の電力変換効率

r_{ij}	—	商品 P_N の日次リターン
$E(r_j)$	—	商品 P_N の年次期待リターン
σ_j	—	商品 P_N のリスク
x_i	—	商品 P_N への配分率
E_p	—	ポートフォリオの年次期待リターン
σ_p	—	ポートフォリオのリスク
$E(\mathbf{r})$	—	商品 P_N の年次期待リターンの列ベクトル
S	—	商品 P_N の年次期待リターンの分散共分散行列
\mathbf{x}	—	商品 P_N への配分率の列ベクトル
SOC	—	BESS の充電状態
SOC_{min}	—	BESS の動作可能範囲の最小値
SOC_{ini}	—	BESS の充電状態の初期値
C	kWh	BESS の定格容量
w_j	kWh	BESS の商品 P_N への放電電力量の制御目標値
W	kWh	BESS に充電されている電力量

論文目録

学術論文

- 1) 湯浅一史, 植嶋美喜, 馬場崎忠利, 大村一郎
太陽光併設蓄電システムの自家消費型長期運用戦略に関する一検討
電子情報通信学会和文論文誌B, Vol.J103-B, No.9, pp.382-390 (2020年9月)
- 2) 湯浅一史, 植嶋美喜, 馬場崎忠利, 大村一郎
資本資産価格モデルに基づく蓄電システムの多目的運用戦略
電子情報通信学会和文論文誌B, Vol.J104-B, No.5, pp.405-413 (2021年5月)
- 3) Kazufumi Yuasa, Miki Ueshima, Tadatoshi Babasaki, Ichiro omura
Multipurpose Strategy for Energy Storage System Based on Capital Asset Pricing Model
With Ensemble Approach
IEEE Access, vol.9, pp.106725-106733 (2021年7月)

学会発表・講演実績

- 1) 湯浅一史, 植嶋美喜, 馬場崎忠利, 大村一郎
太陽光発電を有する需要家の正味負荷の長期変動性を考慮した蓄電池の最適運用戦略に関する検討
電子情報通信学会, 信学技報, Vol.119, no.217, EE2019-35, pp.53-57(2019年10月)
- 2) Kazufumi Yuasa, Ichiro Omura, Miki Ueshima, Tadatoshi Babasaki
Optimized Storage Battery Operation Strategy by Consideration Long-Term Variability of a Net Load with Photovoltaics
IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC) pp.1-5 (2020年2月)
- 3) Kazufumi Yuasa, Miki Ueshima, Tadatoshi Babasaki, Ichiro Omura
Power Energy Cost Reduction Effects by Applying Optimized Long-Term Storage Battery Operation Strategy
8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) pp.107-112 (2020年2月)
- 4) Kazufumi Yuasa, Yoshiharu Takeuchi, Tadatoshi Babasaki, Ichiro Omura
Optimized Energy Allocation Method Based on Capital Asset Pricing Model for Multi-use of Battery Energy Storage System
International Power Electronics Conference (IPEC) 2022 (投稿中, 4ページ)

参考論文

- 1) Kazufumi Yuasa, Soh Nakamichi, Ichiro Omura
Ultra-high speed short circuit protection for IGBT with gate charge Sensing
IEEE 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's
(ISPSD), pp.37-40 (2010 年 6 月)
- 2) Takuya Tanimura, Kazufumi Yuasa, Ichiro Omura
Full digital short circuit protection for advanced IGBTs
IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's
(ISPSD), pp. 60-63 (2011 年 5 月)
- 3) 則竹政俊, 湯浅一史, 星秀和, 武田隆, 廣瀬圭一
オフィス向け直流マイクログリッドの実証研究
第 32 回 電気設備学会全国大会 (2 ページ) (2014 年 8 月)
- 4) 湯浅一史, 則竹政俊, 松尾英徳, 武田隆, 菊地孝明, 廣瀬圭一
直流方式による電力相互融通の実証研究
第 32 回 電気設備学会全国大会 (2 ページ) (2014 年 8 月)
- 5) Masatoshi Noritake, Kazufumi Yuasa, Takashi Takeda
Demonstrative research on DC microgrids for office buildings
IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp.1-5
(2014 年 12 月)
- 6) Kazufumi Yuasa, Masatoshi Noritake, Hidenori Matsuo, Takashi Takeda
The novel islanding power supply method for mutual power interchange with
line-interactive uninterruptible power supply
IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp.1-5
(2014 年 12 月)
- 7) 三好宏明, 武田隆, 雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 後川知仁, 湯浅一史, 太田拓弥
フライホイールを用いたマイクログリッドにおける蓄電池電力変動抑制についての検討
平成 27 年電気学会全国大会 (4 ページ) (2015 年 2 月)
- 8) 河原大地, 三好宏明, 武田隆, 雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 後川知仁, 湯浅一史, 太田
拓弥
マイクログリッドの逆潮流時における系統故障発生時の動特性
平成 27 年電気学会全国大会, (4 ページ) (2015 年 2 月)
- 9) M. Noritake, K. Yuasa, T. Takeda, K. Shimomachi, R.Hara, H. Kita, T.Matsumura
Experimental study of a 400 V class DC microgrid for commercial buildings
9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia),
pp.1730-1735 (2015 年 7 月)
- 10) 後川知仁, 湯浅一史, 武田隆, 三好宏明, 雪田和人

- 太陽光発電と蓄電池システムを導入したオフィスビルにおける経済性評価
第 32 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (4 ページ) (2016 年 2 月)
- 11) 武田隆, 湯浅一史, 後川知仁, 則竹正俊, 廣瀬圭一, 雪田和人
太陽光発電を有する需要家間における直流電力融通に関する一検討
電気設備学会論文誌 36 巻 2 号, pp.138-147 (2016 年 2 月)
 - 12) 湯浅一史, 島陰豊成, 竹内典和, 杉山泰之
交直併給システムにおける蓄電池最適化制御によるエネルギー自家消費率向上に関する一検討
第 34 回 電気設備学会全国大会 (4 ページ) (2016 年 8 月)
 - 13) M. Noritake, K. Yuasa, T. Takeda, K. Shimomachi, R.Hara, H. Kita, T.Matsumura
The demonstration of the CO2reduction effect of 400V class DC micro grid
for offices
IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp.1-6 (2016
年 9 月)
 - 14) Kazufumi Yuasa, Tomohito Ushirokawa, Hidenori Matsuo, Takashi Takeda, Masatoshi
Noritake, Midori Nonogaki, Ken Ozeki, Keiichi Hirose
Experimental study of the storage battery capacity reduction by using direct current
mutual power interchanges for micro grid
IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp.1-6 (2016
年 9 月)
 - 15) Tomohito Ushirokawa, Kazufumi Yuasa, Takashi Takeda, Hiroaki Miyoshi, Kazuto
Yukita
Verification of cost saving for office building using renewable energy and battery system
IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp.1-6 (2016
年 9 月)
 - 16) Kazufumi Yuasa, Toyonari Shimakage, Norikazu Takeuchi, Yasuyuki Sugiyama
Optimized storage battery control in hybrid power distribution system for improving
energy self-consumption
IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp.1-6 (2016
年 11 月)
 - 17) Kazufumi Yuasa, Miki Ueshima, Tadatoshi Babasaki
A study on optimum design of storage battery capacity for DC microgrid
IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), pp.393-399 (2017
年 8 月)
 - 18) Miki Ueshima, Kazufumi Yuasa, and Tadatoshi Babasaki
Improving energy self-consumption rate by using weather forecasts in renewable energy

- system for back-up power supply
IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp.294-299
(2017年12月)
- 19) 植嶋美喜, 湯浅一史, 馬場崎忠利
災害対策用再生可能エネルギーシステムにおける天気予報を活用した自家消費率向上方法の検討
第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(4ページ)(2018年1月)
- 20) 植嶋美喜, 湯浅一史, 馬場崎忠利
再生可能エネルギーシステムにおける自家消費率向上～発電の不確実性を考慮したロバスト最適化手法を用いた一検討～
電子情報通信学会 信学技報, vol.118, no.114, EE2018-12, pp.71-76, (2018年7月)
- 21) 湯浅一史, 植嶋美喜, 馬場崎忠利
電力エネルギー自家消費率を考慮した直流給電方式の適用優位領域に関する検討
電気設備学会論文誌 38 巻 5 号, pp.30-38 (2018年11月)
- 22) Miki Ueshima, Kazufumi Yuasa, Tadatoshi Babasaki
Improving Energy Self-Consumption Rate in Renewable Energy System A study using a robust optimization method considering uncertainty of power generation
7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp.281-286 (2018年12月)
- 23) 湯浅一史, 植嶋美喜, 馬場崎忠利
建物用途別での直流給電方式適用による蓄電池削減効果に関する一考察
電子情報通信学会 信学技報, vol.118, no.387, EE2018-5, pp.111-114, (2019年1月)
- 24) 湯浅一史, 植嶋美喜, 馬場崎忠利
400V 級直流給電オフィスにおける蓄電池容量削減効果と再エネ比率との関係に関する一考察
平成31年電気学会全国大会(4ページ)(2019年3月)
- 25) 植嶋美喜, 湯浅一史, 馬場崎忠利
再生可能エネルギーシステムにおけるBCPと経済的運用の両立に関する一検討
2019年電子情報通信学会ソサエティ大会(4ページ)(2019年8月)
- 26) 植嶋美喜, 湯浅一史, 馬場崎忠利
再生可能エネルギーシステムにおける自家消費率向上～発電の不確実性を考慮した手法を用いた一検討～
電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J102-B, No.08, pp.536-544 (2019年8月)
- 27) Kazufumi Yuasa, Miki Ueshima, Tadatoshi Babasaki
Storage Battery Capacity Reduction Effect on 400V-class DC Power Supplied Office with

- Consideration for Renewable Energy Ratio
IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)pp.1-5(2020年11月)
- 28) Miki Ueshima, Tadatoshi Babasaki, Kazufumi Yuasa, Ichiro Omura
Examination of Correction Method of Long-term Solar Radiation Forecasts of Numerical
Weather Prediction
8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications
(ICRERA), pp.113-117 (2020年2月)
- 29) 湯浅一史, 植嶋美喜, 馬場崎忠利, 今井尊史
オフィス向け直流 V2B (Vehicle to Building) の実証研究
電子情報通信学会 信学技報, vol.119, no.462, EE2019-75, pp.1-5 (2020年2月)

特許取得

- 特許第 5721137 号 半導体装置の短絡保護装置 (2015年4月)
- 特許第 6310725 号 電力システム、蓄電制御装置、制御方法、及びプログラム (2018年3月)
- 特許第 6431580 号 電力制御システム、供給元電力システム、制御装置及び電力制御方法 (2018年11月)
- 特許第 6467470 号 電力制御システム、供給元電力システム、制御装置及び電力制御方法 (2019年1月)
- 特許第 6499239 号 電力制御システム、供給元電力システム、制御装置及び電力制御方法 (2019年3月)
- 特許第 6506933 号 送電システム、送電制御装置、送電制御方法、及びプログラム (2019年4月)
- 特許第 6581036 号 電力管理装置および電力管理方法 (2019年9月)
- 特許第 6640954 号 電力制御システム、制御装置及び電力制御方法 (2020年1月)
- 特許第 6730151 号 電力需給管理装置 (2020年7月)
- 特許第 6856399 号 電力制御装置および電力制御方法 (2021年3月)
- 特許第 6908444 号 電力需要予測装置、電力需要予測方法およびプログラム (2021年7月)