

# 博 士 論 文

## 都市型マイクログリッドにおける エネルギー貯蔵装置の 運用計画および運転制御に関する研究

平成 28 年 6 月 1 日提出

指導教員 馬場 旬平 准教授

東京大学大学院工学系研究科

電気系工学専攻

37-107090

下田 英介

## 論文梗概

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災以降、原子力発電に依存しない社会を目指すべきであるという考え方が社会で広く議論されるようになり、グリーンエネルギーを最大限に引き上げ、原発依存度を減らし、化石燃料依存度を抑制することが日本におけるエネルギーの考え方の基本方針となった。このような背景の中、今後は再生可能エネルギーが電力系統に多数接続され、電力系統の供給信頼性が低下することが懸念される。本研究では、需要地端に今後設置の増加が予測されるエネルギー貯蔵装置に着目し、技術面からの導入促進をアプローチすることを目的に、エネルギー貯蔵装置の運用計画および運転制御に関する方法を検討する。具体的には、以下の 5 点について検討を行う。

- ・都市型マイクログリッドの定義

マイクログリッドは大別して都市型と遠隔地型に分類することができるが、それぞれ求められる役割や供給対象が異なるため運用方法が異なってくる。本研究では、都市型マイクログリッドに必要な機能の定義を行うと共に、その機能を実現するための要件についてスマートグリッド構造モデルを用いて規定する。

- ・都市型マイクログリッドにおける電力負荷予測

マイクログリッドは極めて小規模な電力系統と考えることができるため、通常時である連系運転の際には一般の電力系統で用いられている需給調整機能の考え方を流用できる部分も多い。具体的には、数十分以上の周期で変動する負荷変動に対する電源の出力分担は、運用計画の立案によってエネルギーコストの削減や CO<sub>2</sub> 排出量の削減が最大限に得られるように決定すべきである。これにより需要家は需要地端で発電を行うメリットを享受することができ、マイクログリッド導入へのインセンティブとなる。運用計画の立案に当たっては、現時刻以降の長期的な（例えば 24 時間）電力負荷の見通しが求められるため、電力負荷予測が必要となる。電力負荷予測の精度が十分に得られないと、運用計画で立案した電源の出力分担をリアルタイムの需給調整によって大幅に修正しなければならないので、経済性などが悪化してしまう恐れがある。本研究では、都市型マイクログリッドが構築されるであろう建物の負荷特性を明らかにし、負荷特性に基づいた電力負荷予測手法を採用することで、都市型マイクログリッドにおける精緻な負荷電力予測が可能であることを実際の建物を用いて試験、評価する。

- ・蓄電池を用いた電源運用計画

電力負荷予測後には、分散型電源の運用計画の立案によってエネルギーコストの削減やCO<sub>2</sub> 排出量の削減が最大限に得られるようにする。ただし、マイクログリッドにおいてはエネルギー貯蔵装置の全電源に占める割合が既存の大規模電力系統に比べて大きいという特徴があるため、エネルギー貯蔵装置の運用計画立案手法が必要となる。エネルギー貯蔵装置の運用計画を立案する際には、その充電状態（State of Charge:SOC）が常に所定の運転範囲に納まるようにしなければならない。蓄電池の充電状態は一般に直流電流の流入出力の積分値から決定されるため、交流電力出力ではなく直流電流出力を把握しなければ、運用段階において計画時に見積もった充電状態を大きく逸脱してしまう恐れがある。そこで本研究ではエネルギー貯蔵装置の充電状態と出力に対する直流特性を明らかにし、直流特性に基づいた運用計画の立案手法を提案する。実機による運転結果と運用計画に推定したエネルギー貯蔵装置の充電状態を比較することで本手法の有効性を検証する。

- ・都市型マイクログリッドにおける自立運転制御手法

マイクログリッドを構築することによって得られる重要な機能の一つとして、商用系統の停電時などに安定した電力を供給する自立運転がある。先行研究として、交流発電機と蓄電装置を組み合わせたマイクログリッドにおいて、安定した電力品質での自立運転を実現するため、電源間で協調した負荷分担を行う「統合カスケード制御」と呼ぶ分散型電源の制御手法を開発されている。具体的には交流発電機が主となる電力を供給すると共に、周波数、電圧制御を行うことで基準となる周波数、電圧を生成し、系統連系時の電力系統の役割を担う。蓄電装置は応答特性に応じて速い負荷変動成分を補償することで、交流発電機の速い出力変動を抑制し、高品質な電力の供給を維持する。

本研究では、統合カスケード制御を拡張し、周波数、電圧制御を行う電源が交流発電機、インバータ電源を問わず適用可能となる分散型電源の制御手法を用いる。制御手法の有効性を検証するため、交流発電機が周波数、電圧制御を行う場合については、実証設備に本制御を適用し、72 時間の実機による連続自立運転で確認を行う。またインバータ電源である蓄電装置が周波数、電圧制御を行う場合についても、安定した自立運転が実現できることを、シミュレーションを用いて合わせて検証する。

- ・自立運転移行時の電力品質安定化制御

連系時と自立時では、すべての分散型電源の運転方法は異なっている。従って分散型電源が電力系統から切り離れている状態でこれらの電源が連系時の運転制御で動作してしまうと、マイクログリッド内の電力品質が不安定になる恐れがある。マイクログリッドを連系運転から自立運転へ電力品質を確保しながら移行させるためには、エネルギー貯蔵装置を用いた高速な運転制御が重要であり、その制御方法には 2 通りの手段が考えられる。1 つは連系／自立の制御モードを高速に遷移させることで制御の移行時間を極力を短くする方法であり、もう 1 つは連系／自立移行／自立の 3 状態を同時に満足するような制御系を

構築することで制御モードの遷移そのものを省略する方法である。

本研究では後者の実現方法について提案を行い、実機およびシミュレーションによる自立運転移行時の電力品質安定化の度合いを評価する。

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の背景	1
1.2 本論文の目的	7
1.3 本論文の構成	9
<b>第2章 都市型マイクログリッド</b>	<b>11</b>
2.1 マイクログリッドの概要	11
2.2 マイクログリッドの分類	12
2.3 都市型マイクログリッドに求められる役割と本研究で取り扱う機能	13
<b>第3章 都市型マイクログリッドにおける電力負荷予測</b>	<b>19</b>
3.1 建物における電力プロファイル調査	20
3.2 電力負荷予測手法	25
3.3 電力負荷予測試験	34
3.4 予測精度の評価	39
3.5 まとめ	44
<b>第4章 蓄電池を用いた電源運用計画</b>	<b>45</b>
4.1 蓄電池の直流特性評価試験	46
4.2 蓄電池の直流特性を考慮した電源運用計画の定式化	48
4.3 電源運用計画の評価	53
4.4 まとめ	56
<b>第5章 都市型マイクログリッドにおける自立運転制御手法</b>	<b>57</b>
5.1 自立運転制御手法	57
5.2 自立運転制御試験	59
5.3 まとめ	65
<b>第6章 自立運転移行時の電力品質安定化制御</b>	<b>66</b>
6.1 自立移行時の蓄電池運転制御手法	66
6.2 自立移行試験	70

6.3 まとめ	73
第7章 結論	74

# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の背景

日本におけるエネルギー政策の方向性は、経済産業省が取りまとめる「長期エネルギー需給見通し」[1]等により示されている。2008 年 5 月 21 日に公表された長期エネルギー需給見通しでは、「新・国家エネルギー戦略」[2]に示された目標の達成に向けて、「エネルギー技術戦略」を踏まえた最先端のエネルギー技術の進展・導入の効果が最大限発揮された場合に想定される我が国のエネルギー需給構造の姿が描かれている。この中でエネルギー供給については、原子力利用の推進等の電源分野における取組と新エネルギーの導入促進について以下のように明記されており、原子力発電と再生可能エネルギーをエネルギーの供給主体としていくことがうたわれていた。

### 原子力の推進

原子力発電は、供給安定性に優れ、また、発電過程において CO<sub>2</sub> を排出しないクリーンなエネルギー源である。現在発電電力量に占める原子力発電の比率は約 30%程度であるが、エネルギー源ごとに供給安定性、環境適合性、経済性等を評価し、最適な組み合わせにより需要に見合った供給力を確保する観点から、原子力発電を将来にわたる基幹電源として引き続き推進する。

ここでは戦略目標「原子力発電の発電電力量に占める比率が 30～40%程度以上」をすべてのケースで達成できるものとして発電電力量を一律に想定することとする。

### 新エネルギーの導入促進

資源の再生可能性が高く、二酸化炭素の排出も少ない太陽光、風力などの再生可能エネルギーについて、我が国は、例えば太陽光発電の導入量が過去 10 年で約 30 倍となるなど、一定の実績をあげてきた。しかし、新エネルギーは、エネルギー変換効率や設備利用率も上がらないなど競合するエネルギーと比較してコストが高く、系統連系や電力品質の確保など、事業性確保に向け未だ多くの課題が残されている。

今後、新エネルギーの産業としての自立を目指しつつ導入拡大を図ることによって、2020 年、2030 年までに、新エネルギーについてそれぞれ現状の約 2 倍、約 3 倍の導入・普及が行われると想定されている。水力・地熱発電を加えた再生可能エネルギーは 2030 年の最大導入ケースでは、一次エネルギー国内供給の約 11%を占める見通しである。

一方、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災以降、原子力発電に依存しない社会を目指すべきであるという考え方が社会で広く議論されるようになり、エネルギー政策の考え方が見直されることとなった。

2012 年 9 月 14 日に策定された「革新的エネルギー・環境戦略」[3]では、省エネ・再エネといったグリーンエネルギーを最大限に引き上げ、原発依存度を減らし、化石燃料依存度を抑制することを基本方針とし、「安全の追求」を最優先させる方針が打ち出された。

こうした背景の中、日本では 2012 年 7 月 1 日には「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」がスタートした。これは再生可能エネルギーのうち、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、を用いて発電された電気を、一定価格で最長 20 年間にわたって電気事業者が買い取ることを義務付けた制度である。この制度の実施により再生可能エネルギーの導入事業者はコストの回収見通しを立ちやすくなり、再生可能エネルギーの導入が促進されるものと考えられる。

また一方でこれらの再生可能エネルギーはその発電量が天候などに大きく依存することからエネルギーの安定供給という観点から信頼性が低い。この問題を解決するキーデバイスとして蓄電装置が注目されている。蓄電装置も再生可能エネルギー同様、導入コストが高い点が導入阻害要因となっているが、国としても積極的な導入を促進しており、2011 年には「定置用リチウムイオン蓄電池導入促進対策事業費補助金」が交付され、一般家庭及び事業所等での定置用リチウムイオン蓄電池の導入に際しては、設置する機器、及び、付帯設備費用に対して補助が行われている。



表 1.1: 再生可能エネルギーの買取価格 (2012 年度時点) [4]

電源	調達区分	調達価格 1kW 当たり (税別)	調達期間
太陽光発電	10kW 以上	36 円	20 年
	10kW 未満 (余剰買取)	38 円 (税込)	10 年
	10kW 未満 (ダブル発電・余剰買取)	31 円 (税込)	10 年
風力	20kW 以上	22 円	20 年
	20kW 未満	55 円	20 年
地熱	1.5 万 kW 以上	26 円	15 年
	1.5 万 kW 未満	40 円	15 年
水力	1,000kW 以上 30,000kW 未満	24 円	20 年
	200kW 以上 1,000kW 未満	29 円	20 年
	200kW 未満	34 円	20 年
バイオマス	メタン発酵 ガス化バイオマス	39 円	20 年
	未利用木材	32 円	20 年
	一般木材	24 円	20 年
	廃棄物系バイオマス	17 円	20 年
	リサイクル木材	13 円	20 年

経済産業省 資源エネルギー庁 HP <http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/> より作成[4]

本研究では前述のような背景を踏まえ、需要家端に今後多数設置されることが想定される再生可能エネルギーやエネルギー貯蔵装置、コージェネレーション発電機（以下、分散型電源と表記）を対象に、その利用方法を検討することで技術面からの導入促進をアプローチしている。

需要地端に複数設置される分散型電源の有効利用方法の 1 つとして、マイクログリッドという概念が注目されている。マイクログリッドとは、複数の分散型電源を用いて電力と熱の小規模ネットワークを需要地端に構築し、需要変化に合わせて設備群を最適制御することで需給バランスを維持した電力供給を行うシステムである。マイクログリッドを構築することで以下のような効果を得ることができる。

#### ① 通常時の連系運転

マイクログリッドと既存電力系統との接続点（以下、連系点と表記）における電力潮流が目標値になるように、応答特性の異なる複数の分散型電源を組み合わせることで負荷追従運転を行う。負荷追従運転を行うことで、マイクログリッド内の負荷変動や太陽光発電などの出力変動が電力系統側から観測されなくなるため、電力供給の信頼性を向上させることができる。

#### ② 非常時の自立運転

万一、電力系統に停電が発生した際には、マイクログリッドを電力系統から切り離して分散型電源のみで電力供給を行う。自立した系統は既存電力系統に比べて系統容量が極めて小さいため、電圧や周波数といった電力品質が変動しやすいが、マイクログリッドを構築し、精緻に需給バランスをとることで、マイクログリッド内の電力品質を高度に高めることが可能となる。

先行研究において、マイクログリッドはサイトを用いた実証やシミュレーションによって安定的かつ経済的な運転を実現するための様々な検討がなされている。

##### ・ 負荷予測

電力需要は一般に最高気温などの気象条件と相関が強いこと、日負荷パターンの形状変化が少なく周期的な変動を日単位で繰り返されること、が経験的に知られており、過去の負荷電力実績と気象情報を用いて近似モデルを作成する手法が検討されている。

中村らの研究[\*\*]では、過去3日間の負荷電力実績と気象情報を用いて重回帰分析により、近似曲面を作成することで簡便な負荷予測を実現している。

小松らの研究[\*\*]では、3時間程度までの短時間先の負荷電力を予測するために、重回帰分析による線形モデルを検討している。気象情報を直接、重回帰分析の説明変数に入力するのではなく、冷暖房、照明による電力需要の増加を説明するために、冷房使用開始温度や雲の量に応じた指標値を用いて説明変数を作成すること、予測周期を5分ごとと短い時

間隔とすること、により精度を確保している。

また、田中らの研究では、重回帰分析による負荷予測が観測値の平均的な値でモデル化をするため、天候の変化が大きい特殊な気象条件で誤差が大きくなることに着目し、重回帰分析によって得られたモデルの予測値をさらに階層型ニューラルネットワークモデルによって補正する手法を検討している。

日本国際博覧会・中部臨空都市における新エネルギー等地域集中実証研究においても、負荷電力実績と気象情報の強相関が確認されており、負荷予測には重回帰分析モデルが用いられていた。

このように、既往の負荷予測手法は負荷電力実績と気象条件との間に強相関があることを前提としている。これはある程度の規模になると大数の法則が成り立ちやすいためである。しかし、個々の建物で見ると必ずしも負荷電力実績と気象条件との間に強相関があるとは限らない。そのため、マイクログリッドのような小規模系統では、建物の負荷特性に従った負荷予測手法の確立が必要である。

#### ・運用計画

マイクログリッドは極めて小規模な電力系統と考えることができるため、一般の電力系統で用いられている需給調整機能の考え方を流用できる部分も多い。具体的には、数十分以上の周期で変動する負荷変動に対する電源の出力分担は、経済負荷配分（Economic Load Dispatching : ELD）と同様に、エネルギーコストの削減や CO2 排出量の削減が最大限に得られるように、分散型電源やエネルギー貯蔵装置の運用計画を決定すべきである。

小島らの研究[\*\*]では、新エネルギー等地域集中実証研究 八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクトを対象に、需給運用計画と経済負荷配分制御を組み合わせた運用計画を検討している。需給運用計画では過去の負荷電力実績と気象情報から求めた熱源需要予測を基に 30 分刻みでの 1 週間先までの運用計画を立案している。また、経済負荷配分制御では 3 分周期で将来 2 時間先までの需給バランスを考慮した最適化計算を実施し、分散型電源の起動停止と出力、蓄電池の充放電量を制御している。

日本国際博覧会・中部臨空都市における新エネルギー等地域集中実証研究では[\*\*]、エネルギー効率の最大化、CO2 排出量の最少化、コストの最小化の 3 種類を目的関数に運用計画の立案した場合の効果が検討されている。制約条件としては、電力需給制約、燃料電池出力上下限制約、充放電電力上下限制約、一日の充電量と放電量を同等とする制約、蓄電量上下限制約、購入電力上下限制約、燃料電池の応答速度が用いられている。

H. Kanchev らの研究では、分散型電源の部分負荷特性に注目し、部分負荷特性を考慮した運用計画の定式化がなされている。動的計画法を用いて、最適化を解くことにより運用コストの最小化が図られている。

Pukar らの研究[\*\*]では、運用計画による蓄電池の充放電管理の有効性が検討されている。

A. Sob らの研究では、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギー電源の予測誤差を運用計画内の制約条件に反映することで、予測誤差を考慮した高精度な蓄電池の充放電管理

が検討されている。

先行研究の運用計画手法では、大規模電力系統の運用計画をベースに、マイクログリッドの特徴に応じた制約条件がそれぞれ加味されている。特にマイクログリッドにおいては、全発電容量に対するエネルギー所蔵装置の割合が大きいことから、エネルギー貯蔵装置の充放電管理を制約条件に加えている点が特徴である。ただし、いずれの研究においても、充放電管理は電力量(kWh)を基に表現されており、充放電効率は考慮しているものの、蓄電池の直流電圧特性までは評価しておらず、本来の充放電管理で用いられる充電状態(Ah)が正しく評価できていない。本研究ではこの点を明らかにするために検討を行う。

#### ・運転制御

マイクログリッドにおいては、連系時は連系点潮流の変動が極力小さくなるように、自立時はマイクログリッド内の電力品質が高品質に保たれるように、それぞれ分散型電源、エネルギー貯蔵装置の運転制御が行われるため、高速な需給バランス制御が必要となる。

馬場らの研究[\*\*]では、分散型電源毎の出力指令に対する応答速度の違いに着目し、応答速度の低い分散型電源から順に階層的に出力制御を行う「統合カスケード制御」と呼ばれる制御手法を検討している。電源の出力分担を階層化することで電源間の出力干渉を起こすことなく、高精度な運転制御を達成している。

菊池らや西川らの研究[\*\*][\*\*]では、統合カスケード制御が各電源の運転状態を収収しなければならず、高速な制御に適さないという実運用上での問題を解決するため、「ローカル制御」と呼ばれる自端制御と統合カスケード制御とを組み合わせ、高速な需給バランスを達成する手法を検討している。

進士らの研究[\*\*]では、負荷変動や風力発電の出力変動を緩和する手段として、ガスタービンの出力制御が有効であることが検討されている。ガスタービンの制御応答性を敏感にすることで連系点潮流の維持、周波数変動の抑制が図られることが示されている。

天満らの研究[\*\*]では、蓄電池のローカル制御を用いた周波数、電圧変動抑制制御によって自立時の電力品質が高品質に維持されることが検討されている。

田邊らの研究[\*\*]では、蓄電装置として蓄電容量の小さい電気二重層キャパシタを用いた際の制御性能の検討がなされている。

また、角田らの研究[\*\*]では、インバータ電源しか有していないマイクログリッドに対して安定した自立運転が達成できるように、発電機で周波数、電圧維持のために用いられている垂下特性をインバータ制御に組み込むことで、負荷分担による電力品質維持を検討している。

このように連系時の負荷追従運転と自立時の安定した品質での電力供給は、先行研究において、実証を含め実現がされている。しかし、これらの研究ではケースバイケースで構築されたマイクログリッドに対して、二つの運転形態を実現するための分散型電源の制御手法に関する議論にとどまっており、電源構成やマイクログリッドの系統構成が変更された際に、その機能の実現が担保されるものではない。また、二つの運転形態を実現するため

の制御手法はそれぞれ独立に議論されており、スムーズな運転形態の移行手段についてはほとんど触れられていない。本研究では二つの運転形態およびスムーズな運転形態の移行を実現するための運転制御を研究対象としており、エネルギー貯蔵装置以外の電源構成にとらわれない汎用性の高い制御手法の構築を検討する

## 1.2 本論文の目的

本研究の目的は都市部に構築される都市型マイクログリッドを対象として、エネルギー貯蔵装置の運用計画および運転制御に関する方法を定めることである。この目的のために、以下の 5 点について検討を行う。なお、ここでいう都市型マイクログリッドについては、第 2 章にて別途詳述する。

### 1.2.1 都市型マイクログリッドの定義

マイクログリッドは大別して都市型と遠隔地型に分類することができるが、それぞれ求められる役割や供給対象が異なるため運用方法が異なってくる。本研究では、都市型マイクログリッドに必要となる機能の定義を行うと共に、その機能を実現するための要件についてスマートグリッド構造モデルを用いて規定する。

### 1.2.2 都市型マイクログリッドにおける電力負荷予測

マイクログリッドは極めて小規模な電力系統と考えることができるため、通常時である連系運転の際には一般の電力系統で用いられている需給調整機能の考え方を流用できる部分も多い。具体的には、数十分以上の周期で変動する負荷変動に対する電源の出力分担は、運用計画の立案によってエネルギーコストの削減や CO<sub>2</sub> 排出量の削減が最大限に得られるように決定すべきである。これにより需要家は需要地端で発電を行うメリットを享受することができ、マイクログリッド導入へのインセンティブとなる。運用計画の立案に当たっては、現時刻以降の長期的な（例えば 24 時間）電力負荷の見通しが求められるため、電力負荷予測が必要となる。電力負荷予測の精度が十分に得られないと、運用計画で立案した電源の出力分担をリアルタイムの需給調整によって大幅に修正しなければならないので、経済性などが悪化してしまう恐れがある。本研究では、都市型マイクログリッドが構築される建物の負荷特性を明らかにし、負荷特性に基づいた電力負荷予測手法を採用することで、都市型マイクログリッドにおける精緻な負荷電力予測が可能であることを実際の建物を用いて試験、評価する。

### 1.2.3 蓄電池を用いた電源運用計画

電力負荷予測後には、分散型電源の運用計画の立案によってエネルギーコストの削減やCO<sub>2</sub> 排出量の削減が最大限に得られるようにする。ただし、マイクログリッドにおいてはエネルギー貯蔵装置の全電源に占める割合が既存の大規模電力系統に比べて大きいという特徴があるため、エネルギー貯蔵装置の運用計画立案手法が重要となる。エネルギー貯蔵装置の運用計画を立案する際には、その充電状態（State of Charge : SOC）が常に所定の運転範囲に収まるようにしなければならない。蓄電池の充電状態は一般に直流電流の流入出力の積分値から決定されるため、交流電力出力ではなく直流電流出力を把握しなければ、運用段階において計画時に見積もった充電状態を大きく逸脱してしまう恐れがある。そこで本研究ではエネルギー貯蔵装置の充電状態と出力に対する直流特性を明らかにし、直流特性に基づいた運用計画の立案手法を提案する。実機による運転結果と運用計画に推定したエネルギー貯蔵装置の充電状態を比較することで本手法の有効性を検証する。

### 1.2.4 都市型マイクログリッドにおける自立運転制御手法

マイクログリッドを構築することによって得られる重要な機能の一つとして、商用系統の停電時などに安定した電力を供給する自立運転がある。先行研究として、交流発電機と蓄電装置を組み合わせたマイクログリッドにおいて、安定した電力品質での自立運転を実現するため、電源間で協調した負荷分担を行う「統合カスケード制御」と呼ぶ分散型電源の制御手法を開発されている。具体的には交流発電機が主となる電力を供給すると共に、周波数、電圧制御を行うことで基準となる周波数、電圧を生成し、系統連系時の電力系統の役割を担う。蓄電装置は応答特性に応じて速い負荷変動成分を補償することで、交流発電機の速い出力変動を抑制し、高品質な電力の供給を維持する。

本研究では、統合カスケード制御を拡張し、周波数、電圧制御を行う電源が交流発電機、インバータ電源を問わず適用可能となる分散型電源の制御手法を用いる。制御手法の有効性を検証するため、交流発電機が周波数、電圧制御を行う場合については、実証設備に本制御を適用し、72 時間の実機による連続自立運転で確認を行う。またインバータ電源である蓄電装置が周波数、電圧制御を行う場合についても、安定した自立運転が実現できることを、シミュレーションを用いて合わせて検証する。

### 1.2.5 自立運転移行時の電力品質安定化制御

連系時と自立時では、すべての分散型電源の運転方法は異なっている。従って分散型電源が電力系統から切り離れている状態でこれらの電源が連系時の運転制御で動作してしまうと、マイクログリッド内の電力品質が不安定になる恐れがある。マイクログリッドを連系運転から自立運転へ電力品質を確保しながら移行させるためには、エネルギー貯蔵装置を用いた高速な運転制御が重要であり、その制御方法には 2 通りの手段が考えられる。 1

つは連系／自立の制御モードを高速に遷移させることで制御の移行時間を極力を短くする方法であり、もう 1 つは連系／自立移行／自立の 3 状態を同時に満足するような制御系を構築することで制御モードの遷移そのものを省略する方法である。

本研究では後者の実現方法について提案を行い、実機による自立運転移行時の電力品質安定化の度合いを評価する。

### 1.3 本論文の構成

第 1 章では、本論文の背景，目的について述べている。第 2 章では、本研究の研究対象とする都市型マイクログリッドについて規定する。第 3 章では、平常時の分散型電源の運用計画の際に必要なマイクログリッドの電力負荷予測手法について、対象となる建物の負荷特性を明らかにした上で述べる。第 4 章では、第 3 章で取り扱った電力負荷予測手法を用いて、マイクログリッドにおけるエネルギー貯蔵装置の運用計画の立案手法を述べる。エネルギー貯蔵装置の直流特性を明らかにすることで、運用計画時におけるエネルギー貯蔵装置の高精度な直流特性推定を可能とする。第 5 章，第 6 章では、非常時などマイクログリッドを自立運転しなければならない事態を想定した，エネルギー貯蔵装置の運転制御手法について述べる。第 5 章では，長時間の自立運転を複数の分散型電源が協調して実現するための運転制御手法について述べる。第 6 章ではマイクログリッドが自立移行する瞬間においても電力品質を高品質に維持するためのエネルギー貯蔵装置の運転制御手法について述べる。第 7 章では，本論文全体の結論を述べる。各章の関係を図示したものが図 1.3 である。

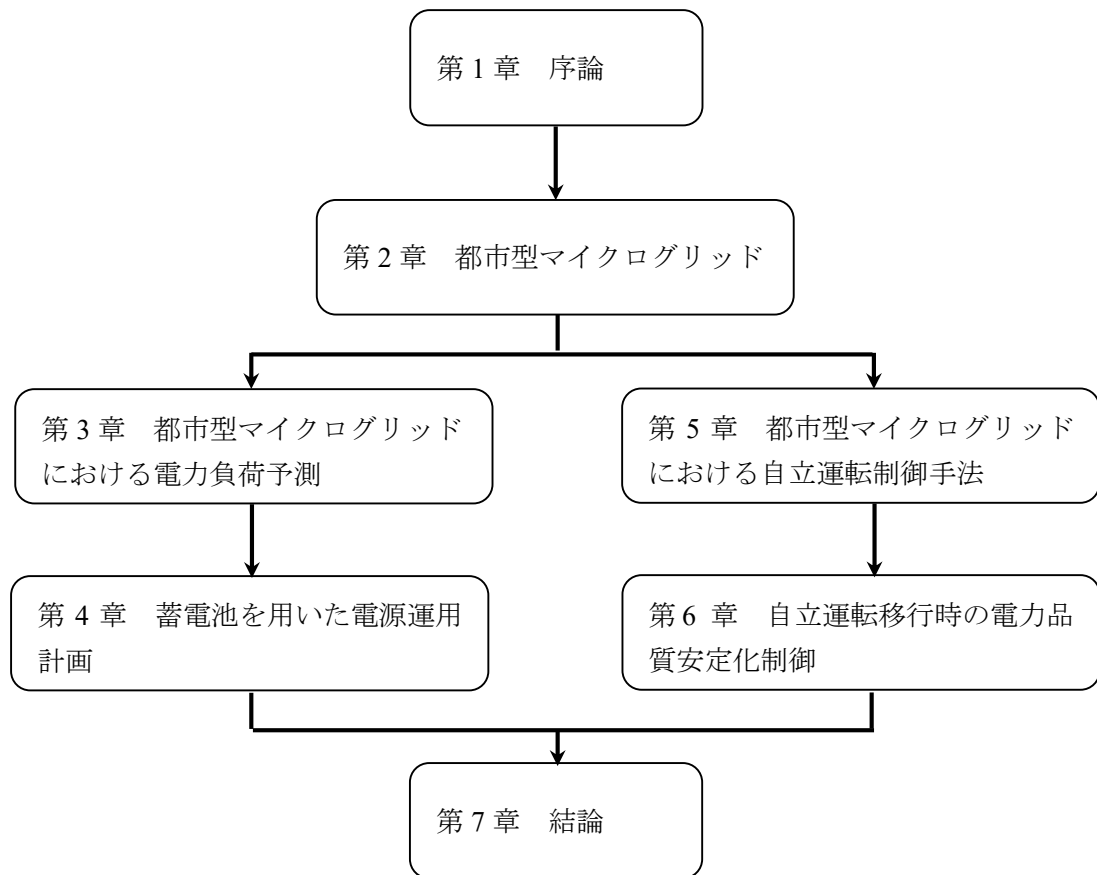


図 1.2: 論文の構成



## 第2章 都市型マイクログリッド

### 2.1 マイクログリッドの概要

マイクログリッドという名称は米国の CERT Microgrid Concept の中で規定されている [14]。それによるとマイクログリッドとは、分散型電源と負荷を持つ小規模系統で、複数の電源および熱源が IT 技術を使って一括管理されており、通常は既存の電力系統と一点で連系して運用されながら、既存の電力系統から独立して運転することも可能なオンサイト型電力供給システム、とある。マイクログリッドは図 2.1 に示すように系全体が一つのシステムとして動作するため、既存の電力系統に擾乱を与えない「良き市民 (Good Citizen)」であり、既存の電力系統に貢献できる可能性がある「模範市民 (Model Citizen)」になりうることも定義されている。

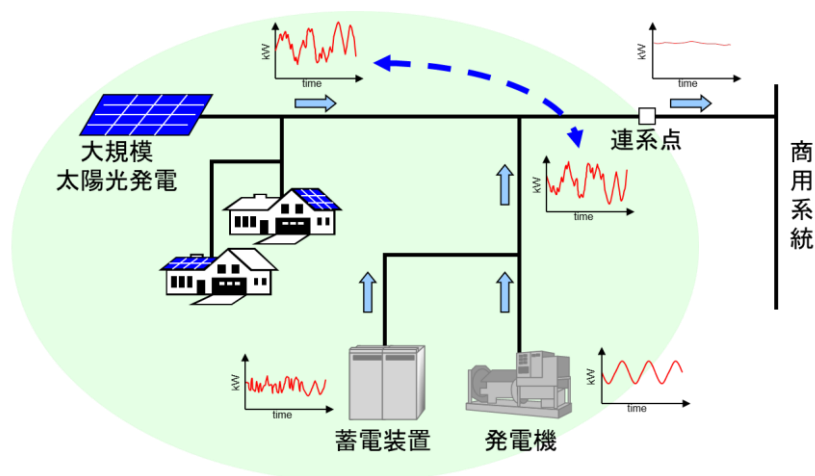


図 2.1: マイクログリッド

## 2.2 マイクログリッドの分類

マイクログリッドはその特徴から、大別して 2 種類のマイクログリッドに分けることができる。

- ・ 都市型マイクログリッド

比較的既存電力系統が強い都市部の建物や建物群を対象に構築されるマイクログリッドであり、分散型電源には太陽光発電，都市ガスを用いたコージェネレーションシステム，エネルギー貯蔵装置などが採用されやすい。都市型マイクログリッドの構築目的は，需要地端でのエネルギー利用効率の向上，および既存電力系統の停電時における自立電力供給の継続が挙げられる。マイクログリッドの構築によって，通常時だけでなく停電時の対策としての機能を兼ねられることから，本社機能を有する事務所用途ビルや防災拠点，または熱需要の大きいホテルや病院，面的なエネルギー利用が可能な大学などが対象として導入されやすい特徴を有している。

- ・ 遠隔地（離島）型マイクログリッド

電極系統の安定性が比較的低い郊外などに再生可能エネルギーが大量導入されると，擾乱が増加し系統が不安定になる可能性がある。また既存の電力系統との接続が困難な離島などでは，従来ディーゼル発電機や小規模火力発電などにより島内の電力供給が行われてきたが，近年の再生可能エネルギーの大量導入に伴い需給バランスの維持が困難になる恐れがある。このような地域では，マイクログリッドを構築することで電力品質の安定化を図る手段が有効となる。都市型マイクログリッドに比べ，再生可能エネルギーの導入割合が大きく，それに伴いエネルギー貯蔵装置も大型化する傾向がある。

## 2.3 都市型マイクログリッドに求められる役割と本研究で取り扱う機能

都市型マイクログリッドに求められる機能を以下に列挙する[15]-[16]。

### ① 通常時の連系運転

マイクログリッドと既存電力系統との接続点（以下、連系点と表記）における電力潮流が目標値になるように、応答特性の異なる複数の分散型電源を組み合わせることで負荷追従運転を行う。

主な目的は、

- ・ピークカットによる需要家契約電力の低減
- ・種々の分散型電源のベストミックスによるエネルギー利用効率の向上
- ・受電点電力変動の緩和による系統の電力供給信頼度の向上

などが挙げられる。

### ② 非常時の自立運転

万一、電力系統に停電が発生した際には、マイクログリッドを電力系統から切り離して分散型電源のみで電力供給を行う。

主な目的は、

- ・商用系統停電時のバックアップ電源
- ・高精度な電力品質供給による精密機器などの稼働

などが挙げられる。

以下に本論文で取り扱う都市型マイクログリッドの機能について記載する。

欧州の標準化団体である CEN, CENELEC および ETSI によって組織される Smart Grid Coordination Group は 2012 年 11 月に Smart Grid Reference Architecture をはじめとした複数のレポートを公開しており[17]-[19]、この中でスマートグリッドの構造モデル（Smart Grid Architecture Model : SGAM）が規定されている。SGAM は、図 2.2 で示すような 2 軸 5 レイヤ構造になっており、様々な構成要素の相互関係を含めて表現することができる。各軸とレイヤの分類を以下に示す。

ドメイン軸：電力系統を構成する要素を 5 種類に分類したもの

- ・発電  
商用系統の大規模発電所に関するもの
- ・送電  
長距離電力輸送のための設備に関するもの
- ・配電  
需要家へ直接電力を供給するための設備に関するもの

- ・分散型電源  
配電系統に直接接続される小規模電源（およそ 3kW～10MW）に関するもの
- ・需要家機器  
エンドユーザーの持つ電力消費設備全般に関するもの

ゾーン軸：制御対象範囲を 6 種類に分類したもの

- ・プロセス  
エネルギーの変換や輸送を直接行う機器に関するもの
- ・フィールド  
プロセスの機器を保護，直接制御，監視する機器に関するもの
- ・ステーション  
複数の機器から構成される拠点に関するもの
- ・オペレーション  
複数の拠点をまとめた系統に関するもの
- ・エンタープライズ  
系統運用者やアグリゲーターなどのシステム管理に関するもの
- ・マーケット  
市場運用に関するもの

相互接続レイヤ：相互接続が求められるサービスや機能，設備を配置する層

- ・機器  
機器の物理的実装を配置
- ・通信  
機器間の情報伝送のための仕組みを配置
- ・情報  
機器間や機能間でやり取りされる情報構造を配置
- ・機能  
提供されるサービス，機能を配置
- ・ビジネス  
市場や規制などを配置

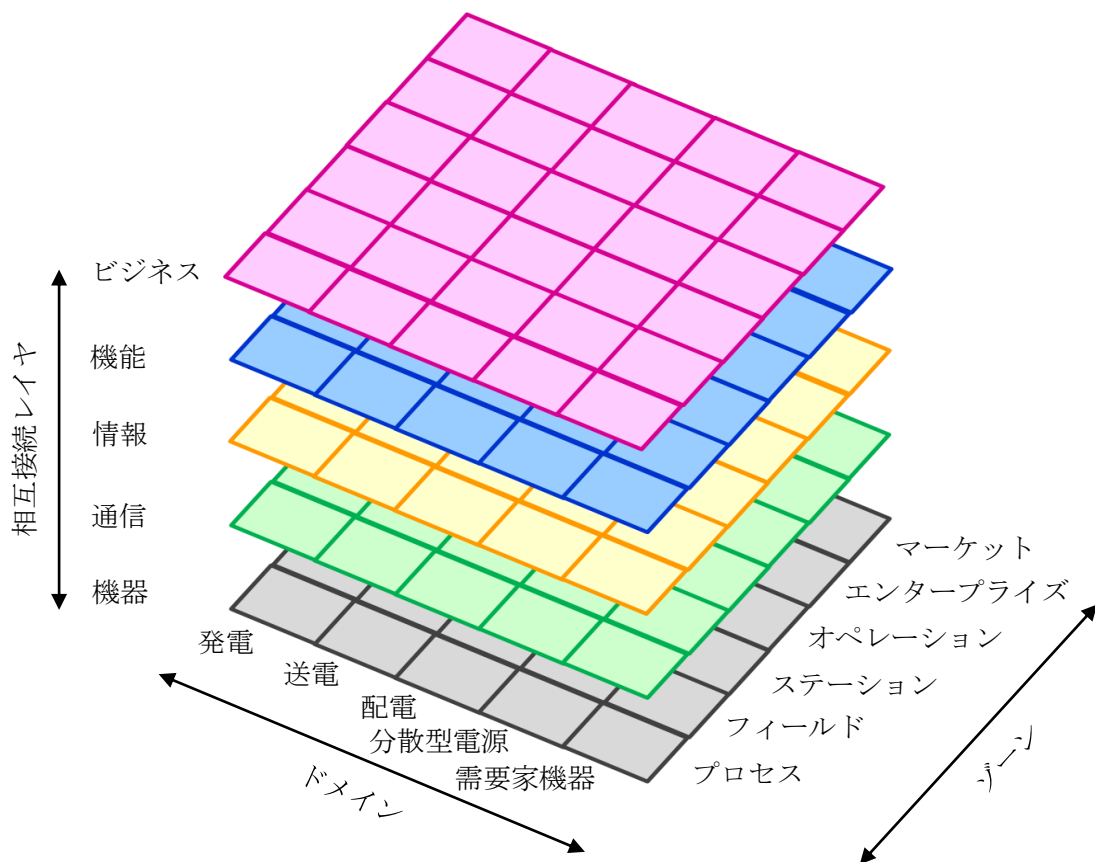


図 2.2: SGAM のフレームワーク

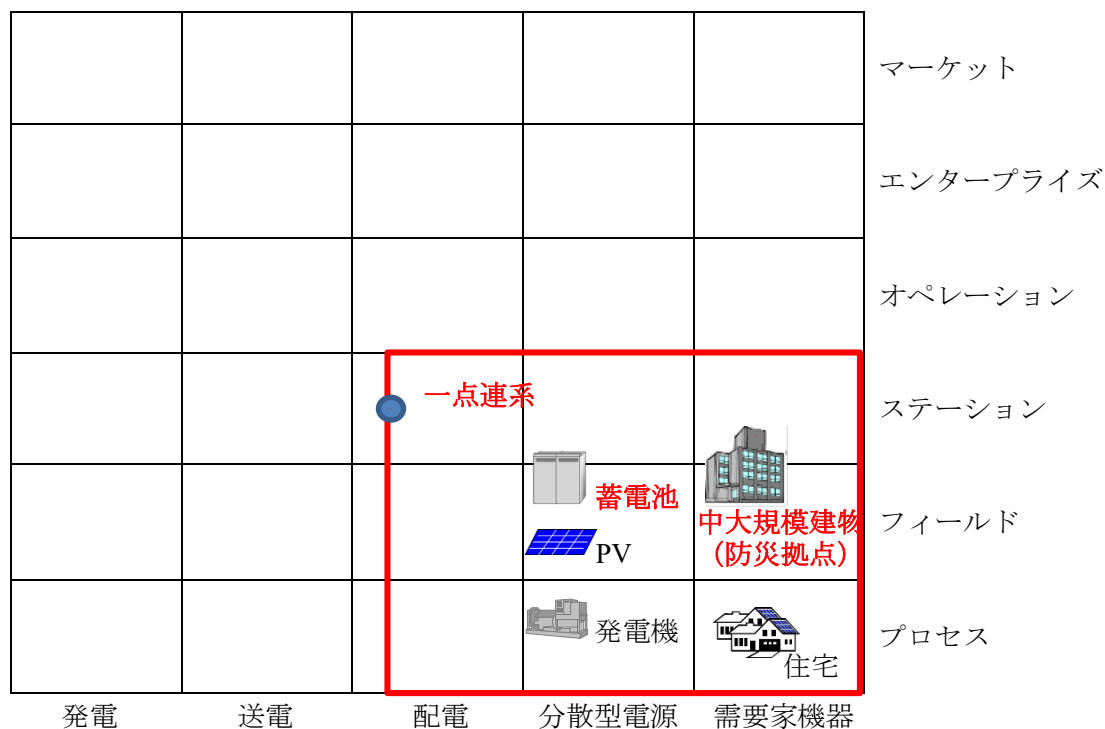
本論文で取り扱う都市型マイクログリッドの要件を図 2.3(a)～(c)にそれぞれ示す。太字で書かれた要素は必須要件であり，細字で書かれた要素は任意要件である。NIST のマイクログリッドモデルでは，配電，分散型電源，需要家機器の 3 ドメインがマイクログリッドの構成要素と記載されており，本論文でも対象ドメインについては NIST のマイクログリッドモデルに準拠している。

まず機器レイヤでは分散型電源として蓄電池を有することを必須要件としている。これはマイクログリッド内の需給バランスを取るために太陽光発電のような天候依存の電源ではなく可制御な電源が必要ということ，また特に自立運転時には秒オーダー以下の高速な出力制御が求められること，に起因している。配電ドメインでは，既存の電力系統と一点連系をするものとした。複数点で連系した場合，自立運転に移行する際にすべての遮断器の開放をもって分散型電源の制御を自立運転制御に切り替えなければならないため，移行時の制御が複雑になると共に，各遮断器の開放するタイミング次第ではマイクログリッド内の電力品質が著しく悪化してしまう恐れが生じるためである。また需要家機器では，防

災拠点となりうるような中大規模建物を対象とし、一般住宅については任意要件とした。これは中大規模建物のほうが一般住宅より自立電力供給に対するニーズが大きくマイクログリッドが導入されやすいというえに、これらの建物は電力需要が一般住宅の数十倍～数百倍になるため、マイクログリッド内の負荷変動に対する大きな因子となりうるためである。

次に通信レイヤでは、フィールドゾーン以下はアナログ信号による通信を用いることとした。これは運転制御において IP Network のようなデジタル信号を使用すると、通信遅れなどに起因して、制御応答性を高めることができなくなる恐れがあるためである。

最後に機能レイヤでは、本研究内で取り扱う運用計画と運転制御を集中エネルギーマネジメントシステム（Energy Management System : EMS）と自端制御器に分けて実装するものとしている。運用計画はマイクログリッド内の多数の情報を集約して、分オーダーから日オーダーの比較的長期的な運用方法を立案するため、上位の集中エネルギーマネジメントシステムで一元管理を行う。一方、運転制御については、特に自立運転時や自立移行時において高速な制御を行う必要があるため、最小限の情報のみを用いて、自端制御器で時々刻々の運転制御を行わせることにしている。図 2.4 に運用計画と運転制御の制御フローを示す。運用計画は日 1～3 回の頻度で分散型電源やエネルギー貯蔵装置の経済的運用を目的に実施され、運転制御は時々刻々の需給バランス維持を目的にリアルタイムで制御される。



(a) 機器レイヤ

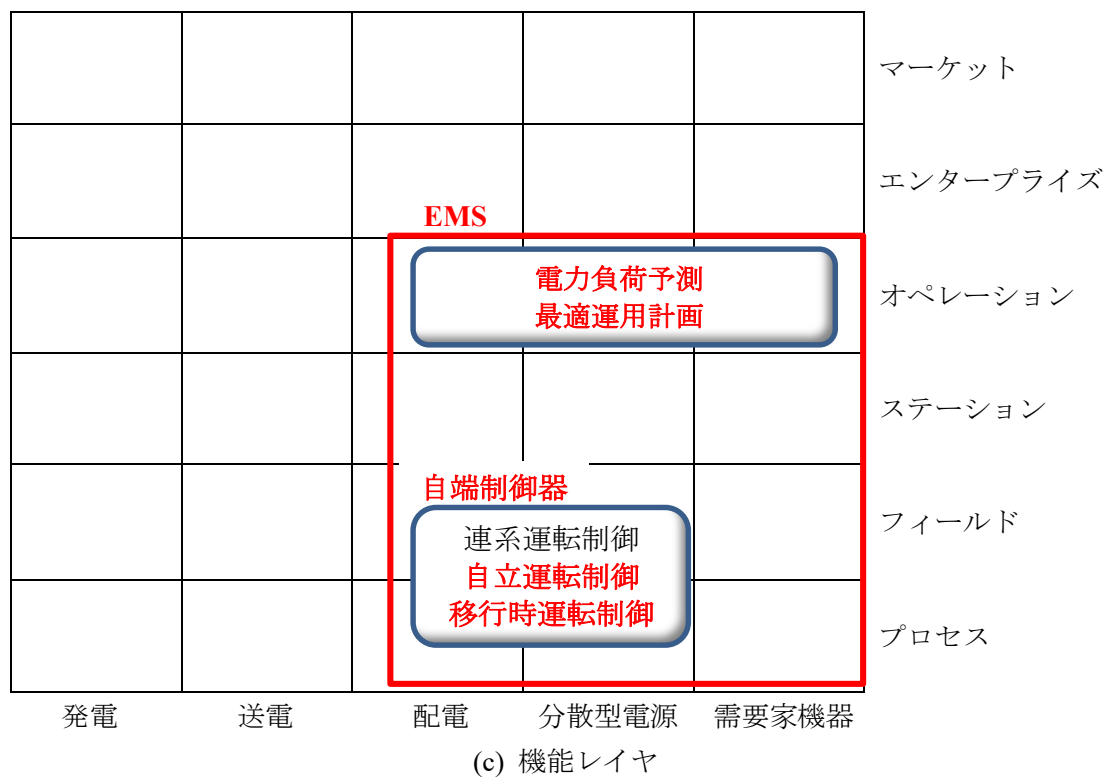
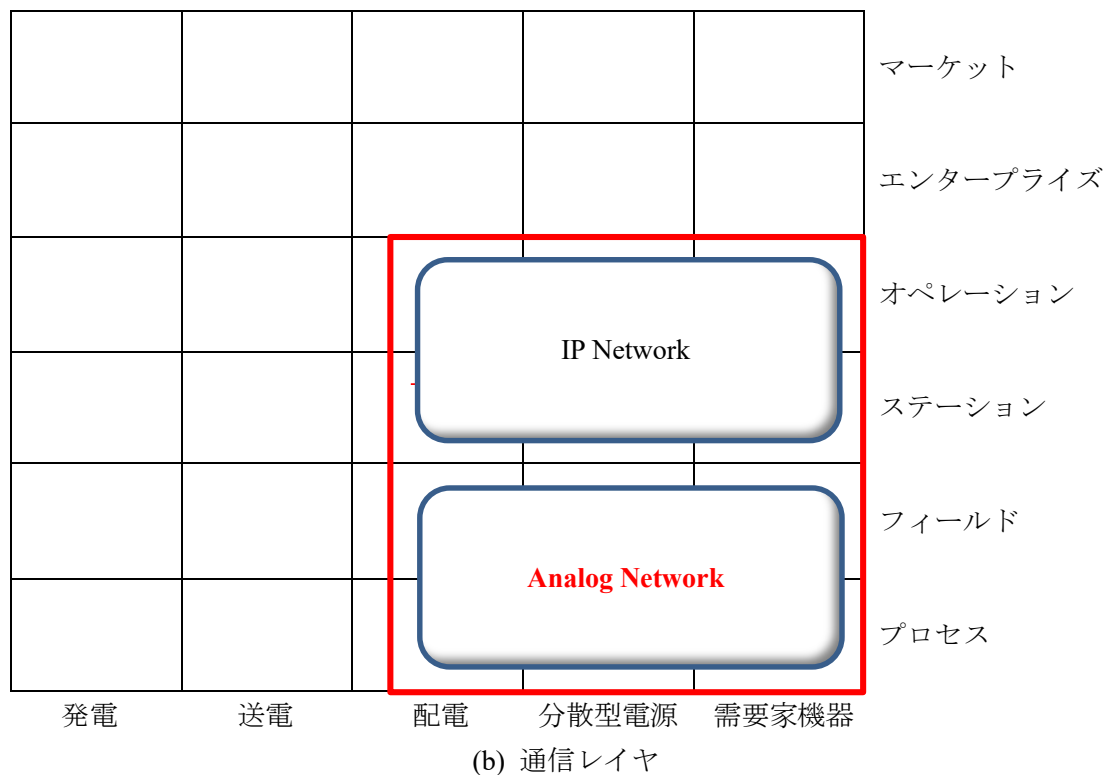


図 2.3: 本論文で取り扱う都市型マイクログリッドの構造モデル要件

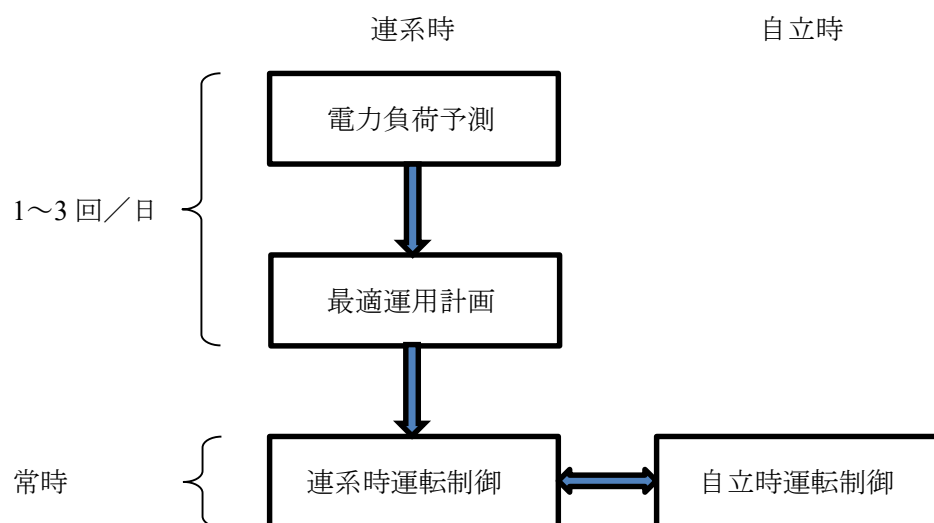


図 2.4: 都市型マイクログリッドの制御フロー

## 2.4 まとめ

2章では、本研究で取り扱う都市型マイクログリッドの定義を行った。

- 都市型マイクログリッドの構築目的は、需要地端でのエネルギー利用効率の向上、および既存電力系統の停電時における自立電力供給の継続が挙げられる。マイクログリッドの構築によって、通常時だけでなく停電時の対策としての機能を兼ねられることから、本社機能を有する事務所用途ビルや防災拠点、または熱需要の大きいホテルや病院、面的なエネルギー利用が可能な大学などが対象として導入されやすい特徴を有している。一方で、受電点電力変動の緩和による系統の電力供給信頼度の向上という効果は需要家にとっては副次的な役割にとどまっている。
- SGAMを用いることで都市型マイクログリッドの要件を図示することができる。必要となる要件は、機器レイヤ、通信レイヤ、機能レイヤに記載され、情報レイヤ、市場レイヤについては任意に構築可能である。



## 第3章 都市型マイクログリッドにおける電力負荷予測

マイクログリッドは極めて小規模な電力系統と考えることができるため、一般の電力系統で用いられている需給調整機能の考え方を流用できる部分も多い。具体的には、数十分以上の周期で変動する負荷変動に対する電源の出力分担は、経済負荷配分（Economic Load Dispatching：ELD）と同様に、エネルギーコストの削減や CO2 排出量の削減が最大限に得られるように、分散型電源やエネルギー貯蔵装置の運用計画を決定すべきである。運用計画を導入することにより、需要家は需要地端で発電を行うメリットを最大限に享受することができ、マイクログリッド導入へのインセンティブとなる。

運用計画を用いるためには、過去やリアルタイムの観測値だけではなく、現時刻以降の長期的な負荷電力の見通し（例えば 24 時間）を示す予測値を取り扱う必要がある。なぜなら、マイクログリッドは系統貢献の観点から連系点の電力潮流の変化が小さくなるように分散型電源やエネルギー貯蔵装置を運転するため、必要によっては各機器を部分負荷で運転しなければならず、各機器の稼働状態が全体の効率に大きく影響を及ぼすためである。またエネルギー貯蔵装置は、有限のエネルギー貯蔵量の範囲内で充放電を管理しなければならず、連系点の電力変動を効果的に抑制するためには、電力ピーク時間帯に放電を集中させるといった適正な時間帯での充放電が必要であり、無駄な充放電を抑制する観点からも負荷電力の日負荷プロファイルを正確に予測する必要がある。

また負荷電力の予測は、運用計画を用いないような場合にも有効である。分散型電源やエネルギー貯蔵装置の運転方法の一例として、ピークカット運転がある。これは、連系点電力が事前に定めたある目標値を上回った際に、その超過分を発電、放電することでピーク電力を抑制する運転方法である。目標値の設定が適切でないと、発電機は部分負荷で運転することになるためエネルギー利用効率が低下し、エネルギー貯蔵装置は過剰な放電を行うことで実際のピーク時間帯に放電ができなくなる恐れがある。電力負荷を予測することで、目標値の適正化を図ることができ、運転の効率や信頼性を上げることが可能となる。

第3章では、都市型マイクログリッドにおいて高精度かつ実用的な電力負荷予測手法の構築を目的に検討を進める。負荷予測の手法は1.2節で示したようにさまざまな検討がなされており、観測負荷に対して高精度な予測が得られている。これらの手法は一般に負荷として大規模な系統を想定しており、負荷電力が気象条件と強い相関を持つこと、日負荷曲線に周期性が強いこと、が経験的に示されていることから、過去の負荷電力実績と気象条件、および気象予報から重回帰分析やニューラルネットワークを用いて電力負荷の予測を

行っている。マイクログリッドはさまざまなサイトで実証が行われているが、負荷予測については、上述のような手法が用いられている。しかし、建物一棟～数棟規模のマイクログリッドでは、建物の使用状況に負荷電力が大きく依存するため、必ずしも負荷電力が気象条件と強い相関を持つこと、日負荷曲線に周期性が強いこと、が言えない可能性がある。特に蓄熱システムを持つ建物ではこの特徴が現れにくい。本研究では、建物の電力負荷変動と相関が強い空調設備の稼働状態に着目し、空調設備の可能状態の推定から電力負荷予測を行う手法を提案し、その効果について検証する。

### 3.1 建物における電力プロファイル調査

図 3.1 は都内のある事務所用途の建物における 2012 年夏期（7 月～9 月）の各時間帯における負荷電力の分布をまとめたものである。表 3.1 に建物の諸元を、表 3.2 に空調設備の諸元を示す。この建物は夏期冷房時に約 50%の熱負荷を賄うことができる蓄熱システムを有している。また表 3.3 は各時間帯の負荷電力と気温の相関係数、および負荷電力の標準偏差をまとめたものである。表 3.2 よりこの建物では相関係数が 0.6 以下にも関わらず標準偏差が 50kW を上回る時間帯が多数存在しており、気温と負荷電力変動の関係性が小さいことがわかる。このことから電力の供給範囲が建物規模程度であるマイクログリッドにおいて、例えば 30 分単位のような短時間間隔の負荷電力を予測しようとした際には、気温だけを用いて予測することは困難であり、新たな負荷電力予測手法が求められる。

表 3.1: 負荷電力調査に用いた建物の概要

所在地	東京都江東区
階数	地上 6 階, 高さ 27.6m
構造	鉄骨造, 一部鉄筋コンクリート造
建築面積	1,828m <sup>2</sup>
延床面積	9,634m <sup>2</sup>
竣工	2003 年 10 月
契約電力	570kW (2012 年時点)

表 3.2: 負荷電力調査に用いた建物の空調設備

空冷ヒートポンプチラー	92kW ×1 台
氷蓄熱ヒートポンプ	51kW ×3 台
蓄熱槽	800kWh 相当×3 台

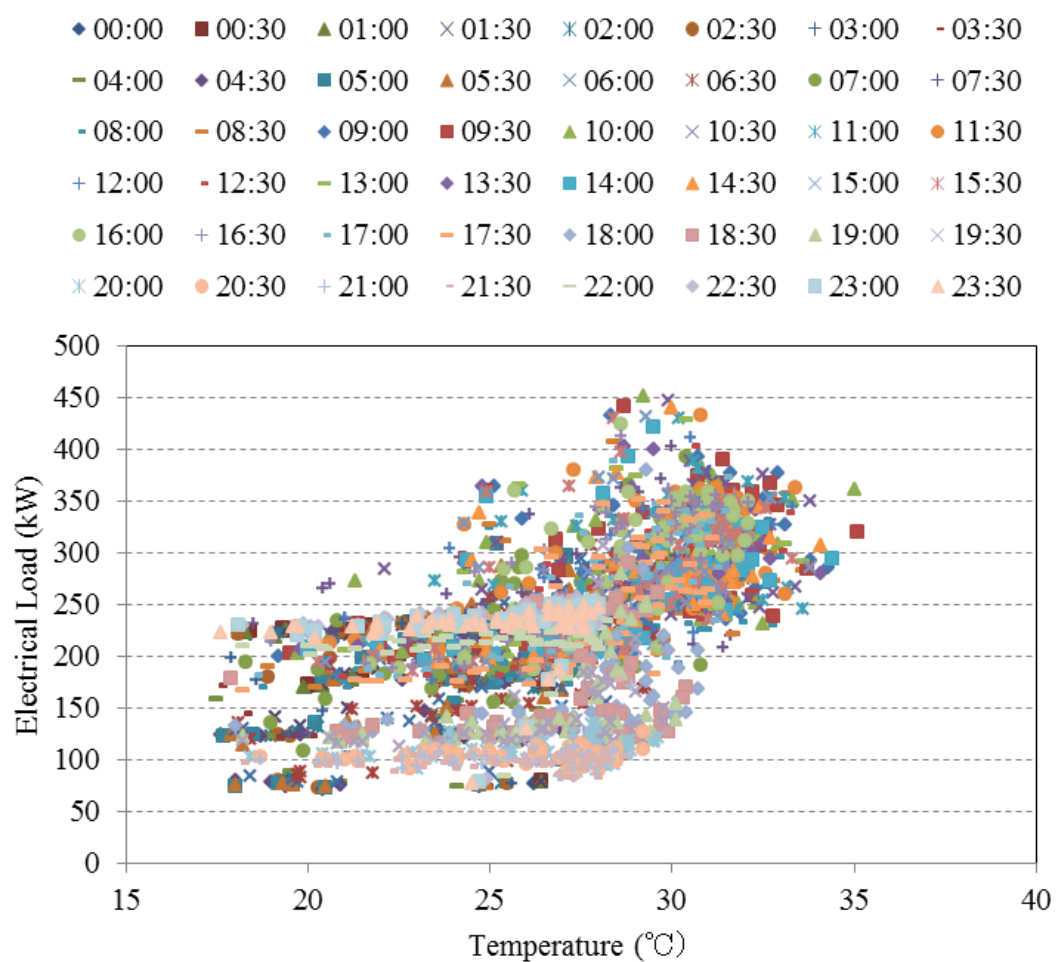


図 3.1: 負荷電力調査に用いた建物における各時間帯の負荷電力分布 (2012 年夏期)

表 3.3: 各時間帯の負荷電力と気温の相関係数および負荷電力の標準偏差

時刻	相関係数	標準偏差	時刻	相関係数	標準偏差
00:00	0.347517	37.30555	12:00	0.645754	53.68592
00:30	0.287262	37.14141	12:30	0.769634	54.50688
01:00	0.265332	37.19632	13:00	0.653001	54.97422
01:30	0.312023	40.54917	13:30	0.608226	50.38242
02:00	0.361228	43.14207	14:00	0.593064	52.95979
02:30	0.407721	45.4005	14:30	0.623258	57.25224
03:00	0.447254	45.38334	15:00	0.663095	57.21344
03:30	0.537613	47.36971	15:30	0.649294	59.77287
04:00	0.581961	50.96312	16:00	0.651523	57.27963
04:30	0.626626	57.20506	16:30	0.692709	58.85953
05:00	0.65752	59.52186	17:00	0.691726	59.57582
05:30	0.66378	58.04653	17:30	0.675038	56.04781
06:00	0.685248	55.19224	18:00	0.410555	46.354
06:30	0.649681	53.86966	18:30	0.345211	41.68836
07:00	0.630707	62.74896	19:00	0.387549	41.87254
07:30	0.531123	55.06809	19:30	0.330977	41.83055
08:00	0.656093	52.34959	20:00	0.310818	9.843217
08:30	0.634184	56.74936	20:30	0.268139	6.63997
09:00	0.529385	57.9019	21:00	0.25728	11.68095
09:30	0.551481	55.62698	21:30	0.227512	12.53032
10:00	0.559914	54.91677	22:00	0.130749	26.09755
10:30	0.579683	53.89426	22:30	0.127971	30.07569
11:00	0.56043	52.63502	23:00	0.109401	29.85765
11:30	0.573646	53.53022	23:30	0.097947	29.52149

気温に代わる負荷電力との相関因子を見つけるため、日負荷プロファイルの内訳を調査した。図 3.2 は同建物における日負荷プロファイルの一例として 2010 年～2012 年で一日の使用電力量が最大となった日の内訳を示したものである。図 3.2 を見ると、負荷電力全体の約 40%を空調設備が占めていることがわかる。また図 3.3 は同建物における 2012 年夏期（7 月～9 月）の時間別負荷電力分布を示したものであり、図 3.3(a)は空調設備を除いた場合、図 3.3(b)は空調設備を含めた場合の負荷電力分布をそれぞれ示している。各カーブは同期間内の平均負荷電力であり、エラーバーは同期間内の分布範囲を表している。図 3.3(a)より空調設備を除いた負荷電力の各時刻における分布幅は高々 50kW 程度しかないが、図 3.3(b)より空調設備を含めた際には、負荷電力の各時刻における分布幅が 200kW を超えていることがわかる。この分布幅の差は、外気温や在館人数によって建物の熱負荷処理量に違いが出るために、空調設備の稼働状態が大きく変化したことが原因である。

図 3.4 は（財）省エネルギーセンターが調査したエネルギー消費構造の分析が可能な 120 件の事務用途の建物について、エネルギー用途別のエネルギー消費原単位（値は各データ群の中央値）を比率別にまとめたものである。図 3.4 より建物の延床面積によらず、40% 強のエネルギーが空調設備で使用されており、図 3.2、3.3 の特徴は事務用途の建物全般にあてはまるものと考えられる。

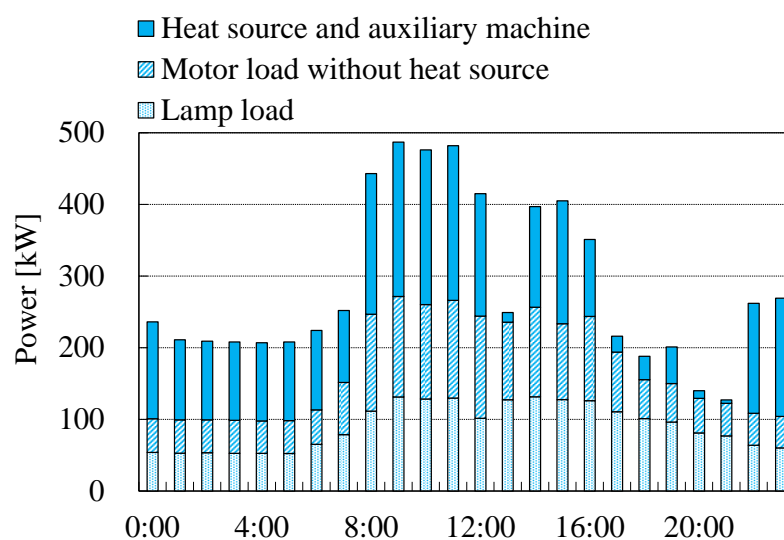
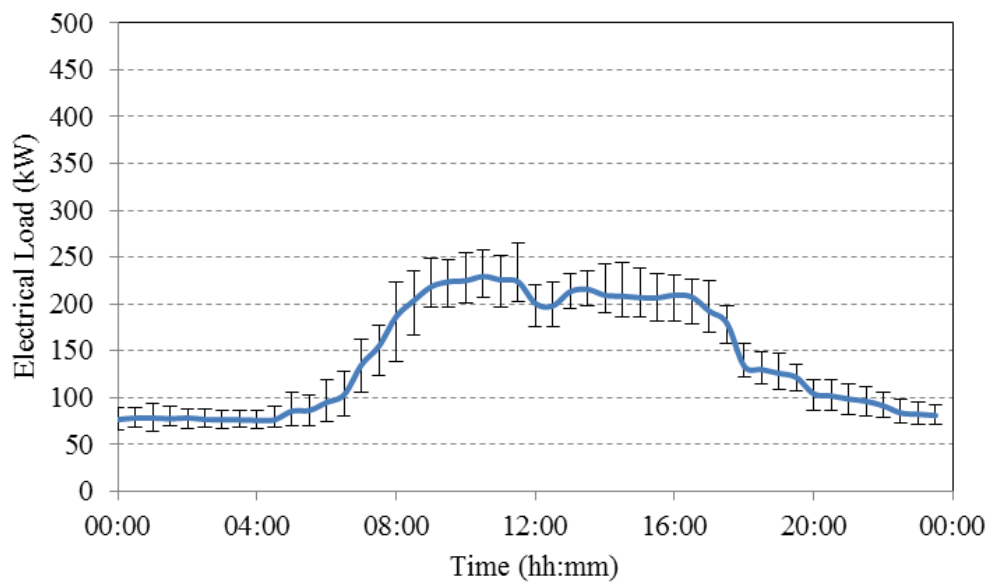
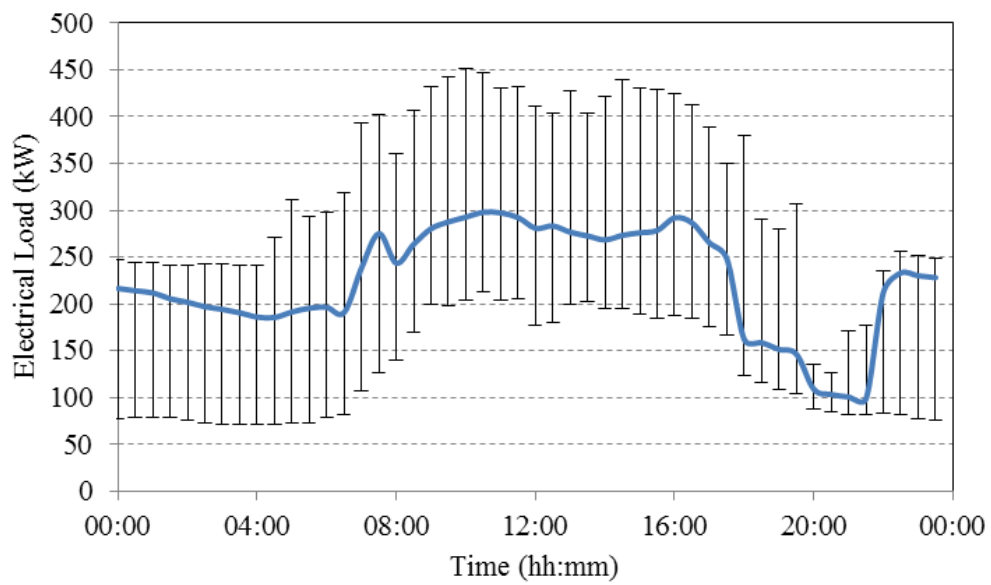


図 3.2: 建物における負荷構成の一例（2010 年 7 月）

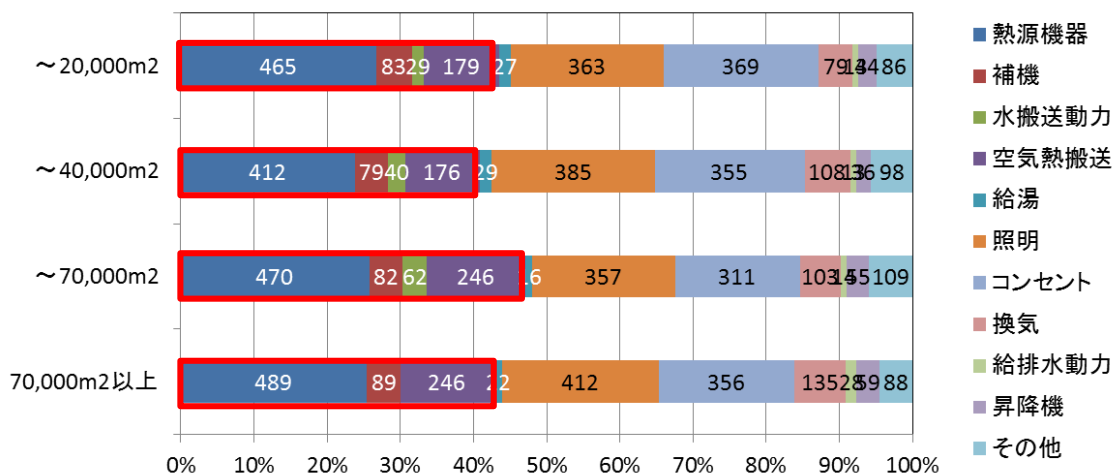


(a) 空調設備を除いた場合



(b) 空調設備を含めた場合

図 3.3: 建物における負荷電力の分布 (2012 年夏期)



一般財団法人省エネルギーセンターホームページより作成

[http://www.eccj.or.jp/office\\_bldg/01.html](http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html)

図 3.4: 事務所用途建物の規模別エネルギー消費原単位 (値は延床面積当たり) [20]

## 3.2 電力負荷予測手法

### 3.2.1 電力負荷予測アルゴリズム

大規模な電力系統では、過去の負荷電力実績と気象条件、および気象予報などを用いて電力負荷予測を行っているが、3.1 節で述べたように建物規模では、気温と負荷電力の間の相関性が弱い。一方、マイクログリッドは需要地端に構築されていることから、他の情報として建物における熱負荷実績が容易に入手可能であり、負荷電力と相関が強い空調設備の稼働状態を決定付けている熱負荷を電力負荷予測に用いることができる。本研究では、熱負荷実績を利用した熱負荷予測に基づき、空調設備の稼働状態から電力負荷を推定することで電力負荷予測の精度を向上する手法を提案する。図 3.5 に電力負荷予測のフローチャートを示し、以下に本手法を詳述する。

提案手法では、まず始めに過去の熱／電力負荷実績と気象条件、および気象予報などから当日の各時刻における熱負荷予測を行う。次に得られた熱負荷予測結果を基に、予測された熱負荷を処理するために必要な空調設備の運転パターンを推定する。空調設備は機器ごとに処理できる熱負荷、運転制御方法が決まっているので、予測された熱負荷から空調設備の稼働状態が計算できる。

空調設備の運転パターンが作成できたら、空調設備の生産熱量を成績係数 (Coefficient Of Performance : COP) で除することによって空調設備の負荷電力を推定し、この値とその他のパターン化された負荷電力とを足し合わせることで建物全体の消費電力を推定する。

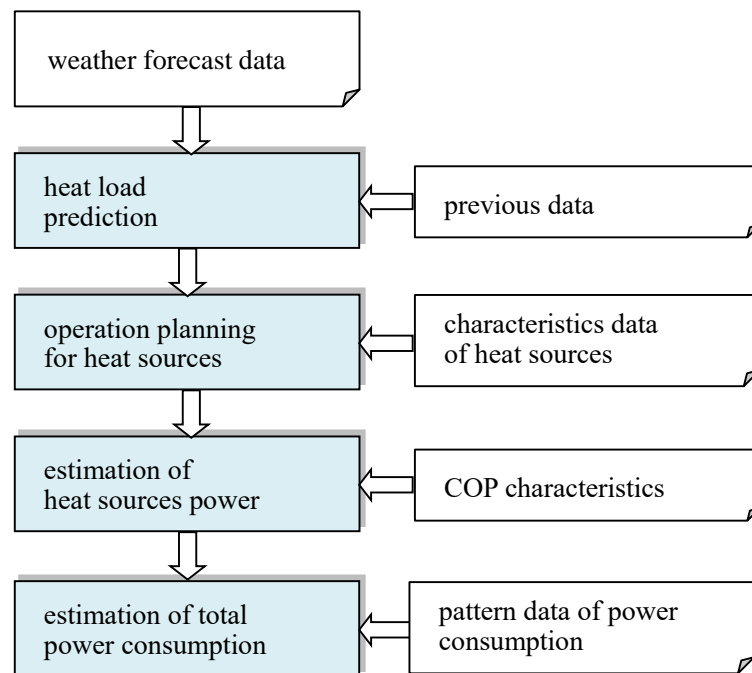


図 3.5: 電力負荷予測のフローチャート



### 3.2.2 熱負荷予測

熱負荷予測はこれまでにさまざまな手法が検討されているが、文献[21]にて各手法の予測精度の比較がなされている。文献[21]によると、ニューラルネットワークモデル（Artificial Neural Network : ANN）を用いた熱負荷予測が最も高精度であることが示されている。そこで本研究においても建物の熱負荷予測に ANN モデルを用いることとした。

図 3.6 に本研究で用いる ANN モデルのモデルを示す。以下に各入力に必要となる各パラメータの算出方法を示す。モデルの重み係数マトリクスの決定には、バックプロパゲーション手法を用いた

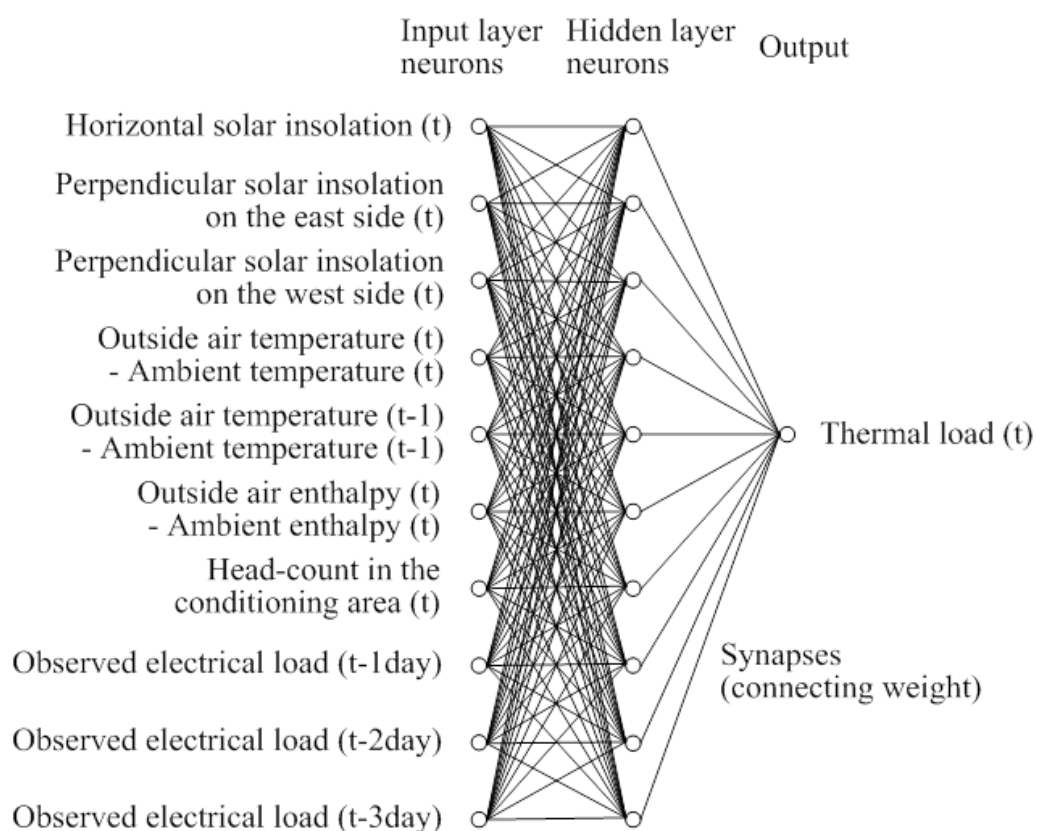


図 3.6: ANN モデル

- 水平面全天日射量

学習データ

建物外代表点の日射量実測値を用いる。

予測データ

天気予報により取得した天気概況（晴れ，曇り，雨）から予め作成したパターンデータ値を参照する。

- 東垂直面日射量

学習データ

水平面全天日射量の実測値から，式（3.1）～（3.3）を用いて算出する。

予測データ

水平面全天日射量のパターンデータ値から，式（3.1）～（3.3）を用いて算出する。

- 西垂直面日射量

学習データ

水平面全天日射量の実測値から，式（3.1）～（3.3）を用いて算出する。

予測データ

水平面全天日射量のパターンデータ値から，式（3.1）～（3.3）を用いて算出する。

$$I = I_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta = & (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta \\ & + (\cos \varphi \cos \beta - \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \sin \delta \cos \omega \quad (3.3)$$

ここで，

$I_b$	: 水平面全天日射量 (W/m <sup>2</sup> )
$\theta$	: 垂直面への太陽光の入射角 (rad)
$\theta_z$	: 天頂距離 (rad)
$\beta$	: 垂直面角度 = $\pi/2$ (rad)
$\gamma$	: 垂直面对南角度 (rad)
$\varphi$	: 緯度 (rad)
$\delta$	: 太陽赤緯 (rad)
$\omega$	: 太陽の時角 (rad)

- ・ 外気温

学習データ

建物外代表点の気温実測値を用いる。

予測データ

天気予報により取得した気温を用いる。

- ・ 室温

学習データ

建物内代表点の室温実測値を用いる。

予測データ

建物内代表点の設定温度を用いる。

- ・ 外気エンタルピー

学習データ

建物外代表点の気温，相対湿度実測値から，式（3.4）～（3.7）を用いて算出する。

予測データ

天気予報により取得した気温，相対湿度から，式（3.4）～（3.7）を用いて算出する。

- ・ 内気エンタルピー

学習データ

建物内代表点の室温，相対湿度実測値から，式（3.4）～（3.7）を用いて算出する。

予測データ

建物内代表点の設定温湿度から，式（3.4）～（3.7）を用いて算出する。

$$P_s = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \quad (3.4)$$

$$P_{s'} = P_s \frac{\varphi}{100} \quad (3.5)$$

$$\chi = 0.622 \frac{P_{s'}}{(H - P_{s'})} \quad (3.6)$$

$$h = 4.186 \times (0.240T + (597.3 + 0.441T) \chi) \quad (3.7)$$

ここで，

$P_s$  : 飽和水蒸気圧 (hPa)

$T$  : 乾球温度 (°C)

$P_{s'}$  : 水蒸気圧 (hPa)

$\varphi$  : 相対湿度 (%)

$\chi$  : 絶対湿度 (kg/kgD.A.)  
 $H$  : 大気圧 (hPa)  
 $h$  : エンタルピー (kJ/kgD.A.)

- ・ 在館人数

学習データ

建物内の時間別の人数実測値を用いる。

予測データ

予め作成したパターンデータ値を用いる。

- ・ 電力負荷

学習データ

電力量実測値を用いる。

予測データ

電力量実測値を用いる。

- ・ 電力負荷

学習データ

熱量実測値を用いる。

### 3.2.2 熱源運転パターンの決定

図 3.2 に示したように建物においては空調設備の負荷電力が全体の約 4 割を占めており、建物において快適な室内環境を維持しつつ、省エネルギーや省コストも実現するためには、空調設備の運転制御方法が重要となる。特に蓄熱システムを有するような空調整備の場合、熱負荷と蓄熱量に基づいて空調設備の運転制御が行われるため運転パターンが複雑になる。これは、我が国の建物では一般に設備容積やイニシャルコストの観点から、建物の熱負荷ピーク日における終日の全熱負荷を賄うことのできるだけの蓄熱槽を設置することがほとんどなく、日中における熱源の追いかけ運転を前提とした空調設備設計となっているためである。熱源の追いかけ運転が不足すると、熱供給量が不足してしまい室内の快適性が損なわれる一方で、過剰に運転すると、気温が高くなると運転効率が低くなるという熱源特性のために、省エネルギーや省コストが図れなくなってしまう。

限られた蓄熱量を活用する熱源の運転制御方法には、以下のようなさまざまな手法が考えられている。

- ・タイマー制御[\*\*]

熱源の運転時間をタイマーによりスケジュール化して運転する。簡単に実現できることから多くの蓄熱式空調設備で一般的に採用されているが、追いかけ運転時間を熱負荷ピーク時に対応できるように事前設定してしまうため、蓄熱量を残した運転になりやすい。

- ・蓄熱槽優先制御[\*\*]

最初に蓄熱槽内の熱を供給して、蓄熱槽がなくなった時点で熱源の追いかけ運転を行う。蓄熱量を使い切ることが可能であるが、熱負荷の大きさ次第では、蓄熱量を使い切った後の室内の快適性が維持できない可能性がある。

- ・熱源割合設定制御[\*\*]

常に熱負荷の一定割合を蓄熱槽から、残りを熱源で賄う運転方法である。熱負荷予測が可能であれば熱源の受け持つべき負荷の割合を適正に決めることで、蓄熱槽の熱を過不足なく使い切ることが可能である。

- ・負荷予測制御[\*\*]

空調開始時から熱源の追いかけ運転を開始して、蓄熱の利用を最小限に控えておき、負荷予測に基づいて、蓄熱分だけで空調終了時までの熱供給が満足できると判断した時点で熱源を停止させる。熱源割合設定制御と同様に熱負荷予測が可能であれば、蓄熱槽の熱を過不足なく使い切ることができる。

本研究では、熱源の運転パターン作成のために、それぞれの運転制御手法を以下のようにモデル化した。

・タイマー制御

$$HG(m, t) = \begin{cases} HGrate(m) & Tstart(m) \leq t \leq Tend(m) \\ 0 & t < Tstart, Tend < t \end{cases} \quad (3.8)$$

$$HS(n, t) = HS(n, t - 1) - HE(n, t) \times \Delta t \quad (3.9)$$

$$HL(t) = \sum_m HG(m, t) + \sum_n HE(n, t) \quad (3.10)$$

ここで、

$HG$  : 各時刻断面における各熱源の出力値 (kW)

$HGrate$  : 各熱源の定格出力値(kW)

$m$  : 各熱源の番号

$t$  : 各時間断面の番号

$Tstart$  : 各熱源の運転開始時刻

$Tend$  : 各熱源の運転終了時刻

・蓄熱槽優先制御

$$HG(m, t) = \begin{cases} HGrate(m) & HS(m, t) < 0 \\ 0 & HS(m, t) \geq 0 \end{cases}$$

(3.11)

$$HS(n, t) = HS(n, t - 1) - HE(n, t) \times \Delta t \quad (3.12)$$

$$HL(t) = \sum_m HG(m, t) + \sum_n HE(n, t) \quad (3.13)$$

ここで、

$HS$  : 各時刻断面における各蓄熱槽の残蓄熱量(kWh)

$HE$  : 各時刻断面における各蓄熱槽の放熱値(kW)

$HL$  : 各時刻断面における熱負荷の予測値 (kW)

$n$  : 各蓄熱槽の番号

$\Delta t$  : 熱負荷予測の時間刻み(hour)

・熱源割合設定制御

$$HG(m, t) = \frac{PL(t)}{N(t)} \quad (3.14)$$

$$HE(m, t) = \frac{PL(t)}{N(t)} \quad (3.15)$$

$$HS(m, t) = HS(m, t - 1) - HE(m, t) \times \Delta t \quad (3.16)$$

$$HL(t) = \sum_m (HG(m, t) + HE(m, t)) \quad (3.17)$$

ここで,

$N$  : 各時刻断面における熱源, 蓄熱槽の運転台数

・ 負荷予測制御

$$HG(m, t) = \begin{cases} HGrate(m) & HS(m, Tfin) > 0 \\ 0 & HS(m, Tfin) = 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

$$HS(n, t) = HS(n, t - 1) - HE(n, t) \times \Delta t \quad (3.19)$$

$$HL(t) = \sum_m HG(m, t) + \sum_n HE(n, t) \quad (3.20)$$

ここで,

$Tfin$  : 空調終了時刻

負荷予測制御は空調終了時刻から順に, 各時刻断面における各熱源の出力値を決定していく。

### 3.3 電力負荷予測試験

3.2 節で述べた電力負荷予測手法を、3.1 節で示した都内の事務所用途の建物に適用し、2012 年 7 月～9 月の電力負荷予測を行った。予測は各日 8:00、13:00、22:00 の三回行った。

比較的一週間の変化が大きかった 2012 年 7 月 23 日～27 日の熱負荷予測の結果を図 3.7 に示す。この建物の空調時間は 5:00～20:00、空調設定は 28℃、50%であった。その他の予測に用いた各種データは付録 A に示す。ANN の学習データには、2011 年の 7 月～9 月の 3 か月間のデータを用いた。図 3.7 は、折れ線グラフが予測値を、棒グラフが実績値をそれぞれ表している。図から、予測負荷は実績値の日負荷傾向をある程度捉えていることがわかる。この建物は部屋に応じて 5:00 と 8:00 に 2 度の空調開始が行われるが、立ち上がりの特徴は比較的正確に予測されている。また、負荷のプロファイルが前日と大きく異なる日であっても最大熱負荷は予測値と実績値でほぼ同じ値を示している。一方で、ANN は過去の実績に基づき、極力誤差が小さくなるように入力因子に対する重み係数を決定しているため、日毎の負荷パターンの形状変化には対応が難しい。このため蓄熱量不足に伴う室温上昇に起因していると考えられる夕方の突発的な熱負荷の増加は予測によって十分に捉えられていない。

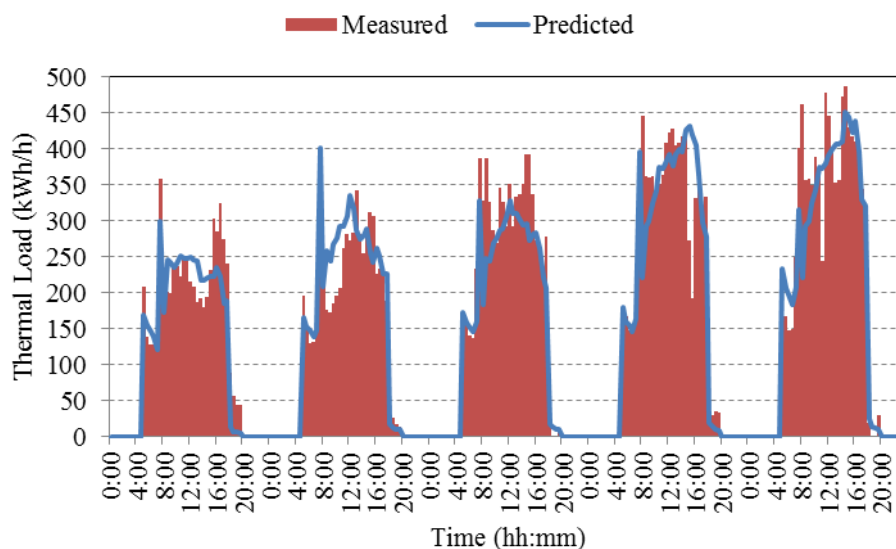


図 3.7: 熱負荷予測結果 (2012 年 7 月 23 日～7 月 27 日)



図 3.7 で得た熱負荷予測の結果から作成した**熱源**運転パターンの推定結果を図 3.8 に示す。図 3.7 同様、折れ線グラフが熱源による生産熱量の合計予測値を、棒グラフが合計実績値をそれぞれ示している。この建物における熱源の運転制御方法に従って、日中の空冷ヒートポンプチラーは熱源割合設定制御で、氷蓄熱ヒートポンプは蓄熱槽優先制御で、それぞれモデル化を行った。氷蓄熱ヒートポンプの夜間蓄熱については、タイマー制御でモデル化した。なお、この建物では 13:00～16:00 にピーク時間調整契約が、22:00～翌 8:00 に蓄熱調整契約が採用されており、13:00～16:00 は空冷ヒートポンプチラーの割合設定が最小になるように、また蓄熱開始時刻は 22:00 になるように、それぞれ設定が行われていた。

図 3.8 より夜間蓄熱に伴う熱源の運転はかなり精度よく求められていることがわかる。また蓄熱槽優先制御のモデル化によって、夕方に発生する蓄熱量不足に伴う熱源の追いかけ運転もとらえることができています。

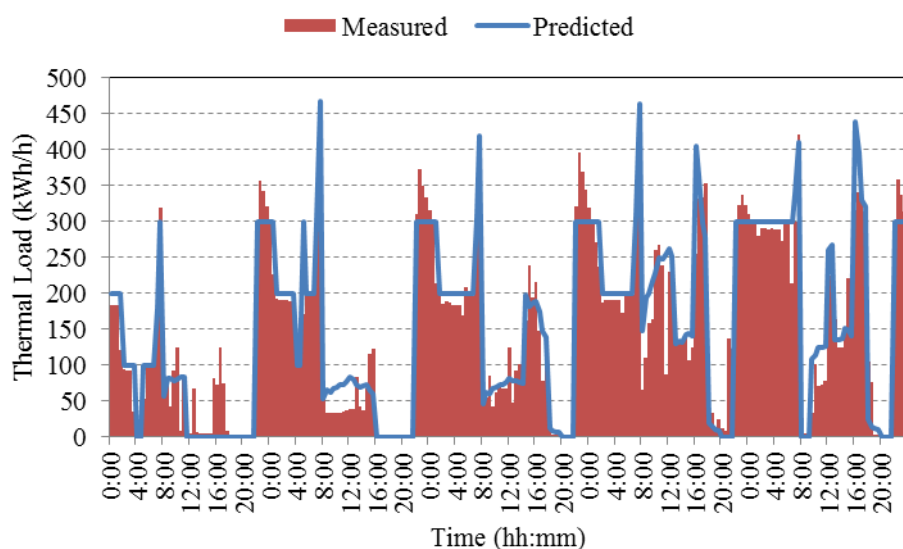


図 3.8: 熱源運転パターンの推定結果 (2012 年 7 月 23 日～7 月 27 日)

次に熱源運転パターンの推定結果を用いて、建物全体の負荷電力推定を行った。熱源運転パターンから空調設備の負荷電力を求めるために使用した、空冷ヒートポンプチラーの外気温、生産熱量別 COP 特性を図 3.9 に示す。図 3.9 の各点の値は機器のメーカー仕様書における諸元値をプロットしたものである。また図 3.10 に氷蓄熱ヒートポンプの外気温別 COP 特性を示す。氷蓄熱ヒートポンプは定格出力での運転しか行わないため、定格値の特性のみグラフ化した。また経年劣化により、明らかに COP がメーカー仕様書の諸元値と実際の COP が乖離していたため、実測値でプロットを行った。

図 3.9 および図 3.10 から、空冷ヒートポンプチラーの COP は外気温と生産熱量の二次式で、氷蓄熱ヒートポンプの COP は外気温の一次式で、それぞれ近似式を作成し、式 (3.21)、式 (3.22) を得た。

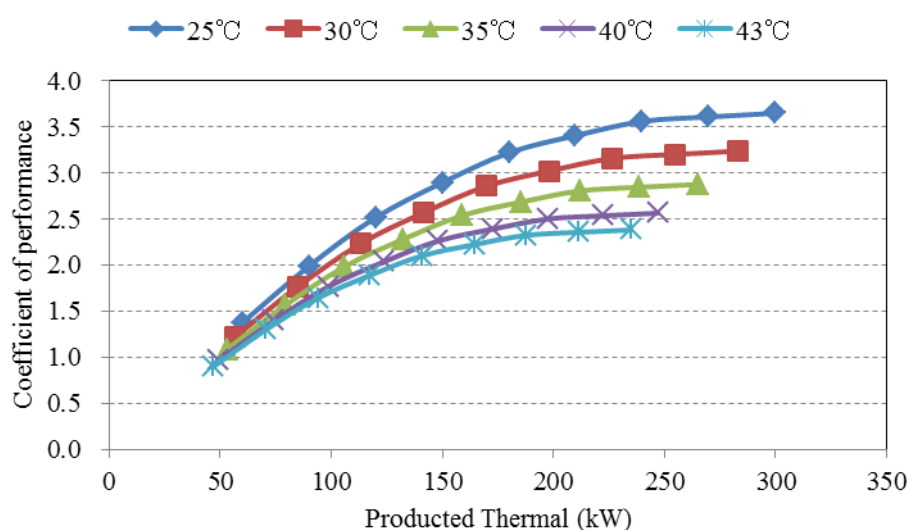


図 3.9: 空冷ヒートポンプチラーの外気温、生産熱量別 COP 特性

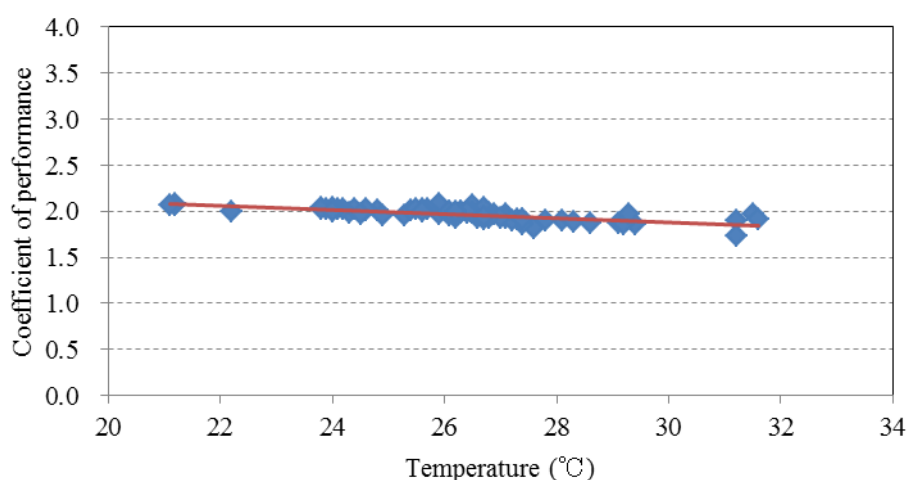


図 3.10: 氷蓄熱ヒートポンプの外気温別 COP 特性

$$COP_{HP} = -2.672e^{-2}H^2 - 4.521e^{-5}T^2 + 3.718e^{-4}H \cdot T + 0.501H + 0.032T - 2.546e^{-4} \quad (3.21)$$

$$COP_{ICE} = -2.232e^{-2}T + 2.551 \quad (3.22)$$

ここで,

$COP_{HP}$  : 空冷ヒートポンプチラーの COP

$COP_{ICE}$  : 氷蓄熱ヒートポンプの COP

$H$  : 空冷ヒートポンプチラーの生産熱量 (kWh/h)

$T$  : 外気温 (°C)

空調設備を除いたその他の負荷電力のパターン値には、図 3.11 に示す予測する週の前週と前々週のその他の負荷電力の平均値を用いた。

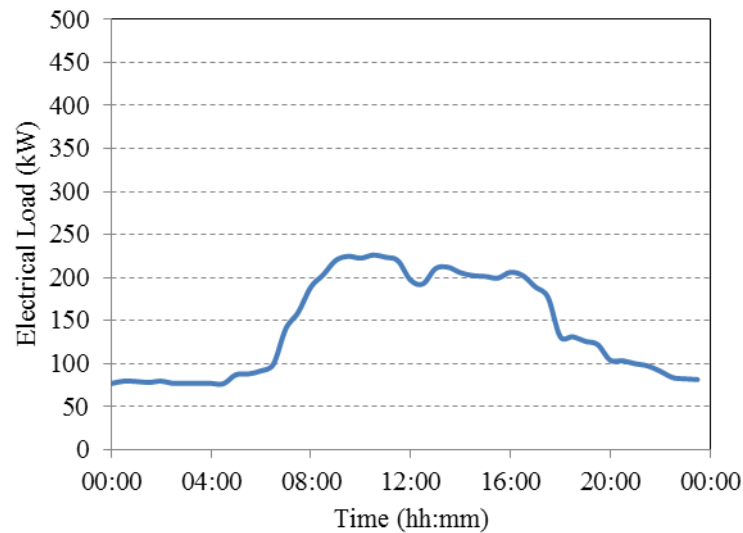


図 3.11: その他の負荷電力のパターン値

図 3.8, 3.11 および式 (3.21), (3.22) より得られた建物全体の電力負荷予測の結果を図 3.12 に示す。特に夜間は熱源ごとの蓄熱時間がかなり正確に予測されていたこともあり、良好な予測結果が得られた。また日中の空調時間帯においても、日によって異なる日負荷パターンを示しているが、日毎の特徴をとらえた予測がなされている。熱負荷予測の時点では最大で 150kW 程度の予測誤差が発生している時間帯があったが、電力負荷予測では予測誤差が 50kW 程度まで低減されており、全体を通じて高精度に予測できていることが確認できた。

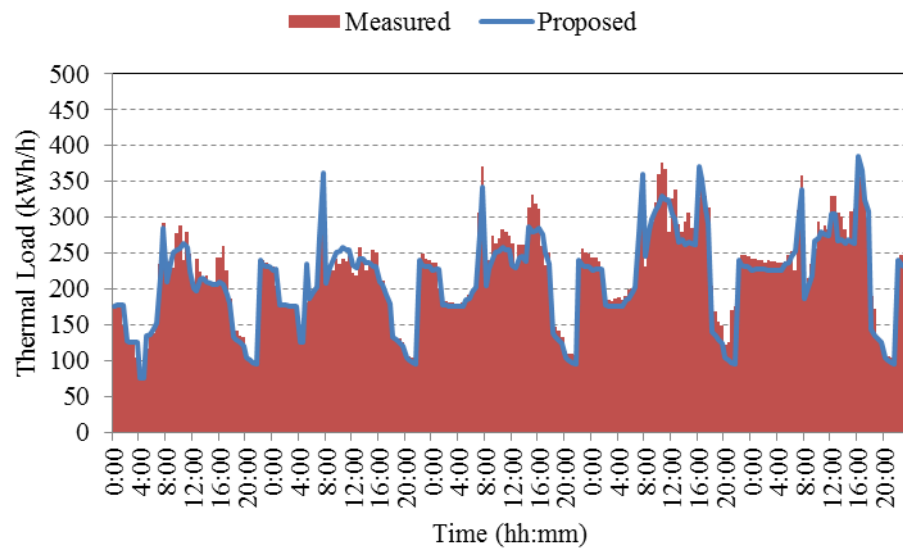


図 3.12: 氷蓄熱ヒートポンプの外気温別 COP 特性

### 3.4 予測精度の評価

#### 3.4.1 提案手法の特性評価

3.3 節で求めた熱負荷および電力負荷の定量的な精度を比較するため、以下に示す 2 種類の指標 EEP (Expected Error Percentage) と MBE (Mean Bias Error) を導入する[22]-[23]。EEP はデータの最大値に対する標準偏差の割合を示しており、式 (3.23) で求められる。EEP は最大負荷値に対する予測の誤差期待値となる。MSB はデータの平均値に対する誤差の偏りを示す指標であり、式 (3.24) で求められる。

$$EEP = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_{pred,t} - y_{data,t})^2}{n}}}{|y_{data,max}|} \quad (3.23)$$

$$MBE = \frac{\frac{\sum_{t=1}^n (y_{pred,t} - y_{data,t})}{n}}{|\bar{y}_{data}|} \quad (3.24)$$

2012 年夏期 7 月～9 月における全空調時間帯の 30 分平均値データを用いて求めた EEP, MBE を表 3.4 に示す。EEP の値を比べると、電力負荷は熱負荷より 5.47 ポイント値が改善されており予測精度が向上していることがわかる。また MBE に対しては-1.7 と 1.8 とほぼ同じ絶対値の値を示しており、電力負荷、熱負荷ともに予測値に著しい偏りは発生していないことがわかる。

図 3.13, 図 3.14 に熱負荷と電力負荷の予測値と観測値の分布状況を示す。熱負荷は観測値に対して予測値が 0~600kW とかなり広範囲にばらついていることがわかる。一方、電力負荷を見ると予測値、観測値ともに 100~400kW の範囲に集中している。これは熱源の COP が 1.0 以上であることに起因している。近年の空調用熱源は COP が 3.0~4.0 と高効率なものが一般的であり特に高効率な機器では 6.0 という装置も開発、実用化されている。従って建物の熱負荷予測をもとに、熱源の運用計画を立て、生産熱量から COP を除することで電力負荷を予測すれば高精度に建物全体の消費電力が予測できることが明らかになった。

なお、今回は一つの建物を対象に電力負荷予測を行ったが、文献[21]によると今回用いた ANN はさまざまな建物に対し適用した結果、EEP が 10%以下になることが示されており、電力負荷予測精度も今回の同精度の結果が汎用的に得られるものと考えられる。

表 3.4: 熱負荷と電力負荷の EEP および MSB

	EEP [%]	MSB [%]
熱負荷	10.06	5.38
電力負荷	4.59	0.52

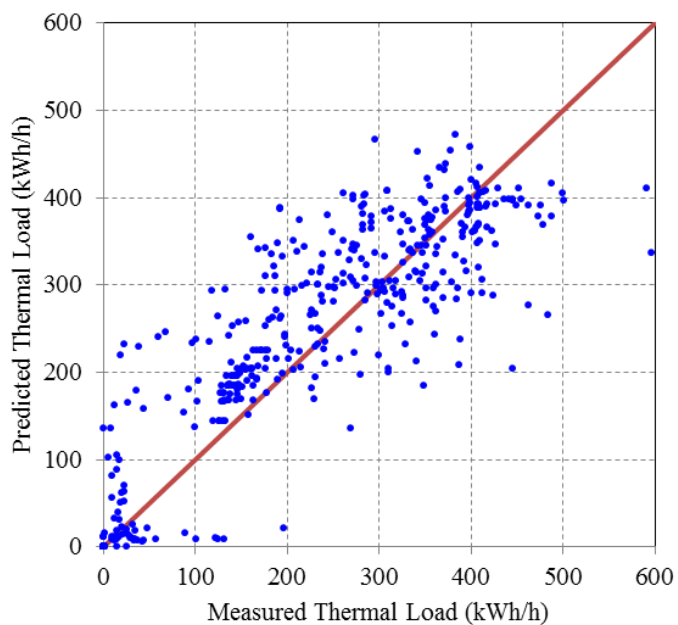


図 3.13: 熱負荷の予測値と観測値

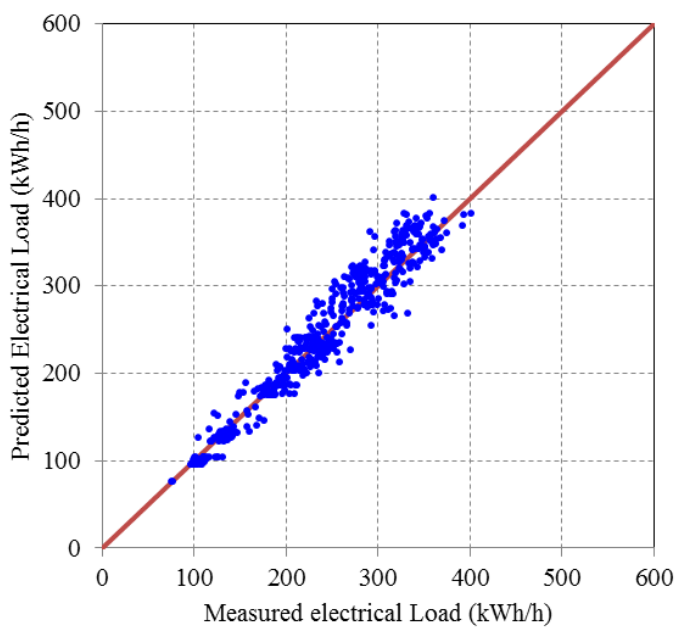


図 3.14: 電力負荷の予測値と観測値

### 3.4.2 他の予測手法との比較

本研究で検討した電力負荷予測手法の有効性を検証するため、先行研究で検討がなされている2種類の電力負荷予測手法[\*\*][\*\*]と提案手法との比較を行った。以下に比較用に用いた先行研究の電力負荷予測手法について概要を記す。

#### ・曲面近似モデル

本モデルは標準的な予測モデルを過去の電力実績と気象データから重回帰分析によって作成する。その際に、曲面近似と呼ばれる手法を用いている。  
第  $k$  日第  $i$  時間帯の予測値  $P^*(k,i)$  が、 $N$  個の説明変数によって計算できるものとする、式 (3.25) のように表すことができる。ここで  $\alpha_n(i)$  は、式 (3.26) に示すように時間帯  $i$  の2次式で表される。

$$P^*(k,i) = \sum_{n=1}^N \alpha_n(i) X_n(k,i) \quad (3.25)$$

$$\alpha_n(i) = \sum_{m=1}^2 \beta_{nm} i^m \quad (3.26)$$

負荷の実績を  $P(k,i)$  とすると、式 (3.26) のように観測期間日数  $K$  全体にわたる残差平方和  $E$  を最小にするように  $\beta_{mn}$  を定め、これを2次曲面近似における回帰係数とした。

$$E = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^2 \{P^*(k,i) - P(k,i)\} \quad (3.27)$$

なお、説明変数としては、

- ・ 予測日前日の需要実績値前日
- ・ 前々日の需要実績値の差分
- ・ 前々日と3日前の需要実績値の差分
- ・ 予測日の予想最高気温
- ・ 前日と前々日の最高気温の差分
- ・ 前々日と3日前の最高気温の差分

の6個を採用している。

#### ・3時間先需要予測モデル

本モデルでは、ある日の時刻  $t_0$  で既知の各情報を説明変数とし、その3時間後（時刻  $t$ ）の電力需要を目的変数とする。式 (3.28) に示す線形式を基に電力需要  $P^*(t)$  を予測する。

$$P^*(t) = a_1 A_t + a_2 SD_{t_0} + a_3 CH_t + a_4 LI_t \quad (3.28)$$

$A_t$  は時間帯  $t$  の平均的な需要を表す値で、過去の実績値  $P(t,i)$  から式 (3.29) より得られる。

$$P^*(t) = a_1 A_t = \frac{1}{28} \sum_{i=1}^{28} P(t,i) \quad (3.29)$$

$SD_{t0}$  は時刻  $t_0$  での  $At$  からの偏差を指数平滑した値であり、式 (3.30) で与えられる。

$$SD_{t_0} = 0.7(A_{t_0} - P(t_0)) + 0.3SD_{t_0-1} \quad (3.30)$$

$CH_t$ ,  $LI_t$  は気象情報に基づいた変数であり、それぞれ空調、照明利用による負荷電力の増加を説明するものである。

$$CH_t = \begin{cases} T_t - T_c & (T_t \geq T_c) \\ 0 & (T_t < T_c) \end{cases} \quad (3.31)$$

$$LI_t = \begin{cases} C_t & (C_t < 4) \\ 0 & (C_t \geq 4) \end{cases} \quad (3.32)$$

ここで、

$T_t$  : 気温予報値 (°C)

$T_c$  : 冷房開始温度 (°C)

$C_t$  : 天候予報値 1: 晴れ, 2: 明るい雲, 3: 中間の雲, 4: 暗い雲  
5: 雨, 6: にわか雨, 7: 雪, 8: 雷

$T$  : 外気温 (°C)

予測式の係数決定には、至近数週間のデータを用い、予測式の二乗誤差が最小になるように決定した。

表 3.5 に 3 種類の予測モデルの EEP, MBE の値を示す。予測期間はすべて 2012 年 7 月～9 月の 3 か月間である。また図 3.15 に各予測モデルの 2012 年 7 月 23 日～27 日の予測結果を、図 3.16 に予測値と観測値の分布状況をそれぞれ示す。

EEP の値を比較すると、先行研究である曲線近似モデル、3 時間先需要予測モデルに比べて提案手法はそれぞれ 4.11, 3.22 ポイント改善しており、高精度な予測が行われていることがわかる。また MSB についても提案手法は先行研究と同等以上の値となっており、予測負荷の偏りも生じていない。また図 3.16 とみると曲線近似モデル、3 時間先需要予測モデルでは、分布の傾きが 1 より小さくなっている。これは重回帰分析によって予測値の平準化効果が生じてしまったためであり、高負荷および低負荷での予測精度が下がっていることを示している。一方、提案手法では分布の傾きがほぼ 1 になっており、高負荷、低負荷時の予測精度も確保できている。

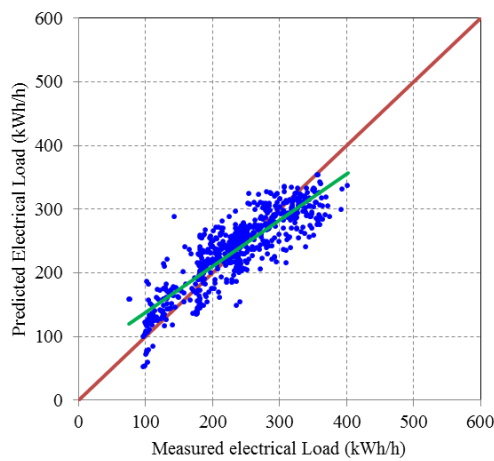
表 3.5: 各予測モデルの EEP および MBE

	EEP (%)	MBE (%)
曲面近似モデル	8.70	0.52
3 時間先需要予測モデル	7.81	1.03
提案手法	4.59	0.52

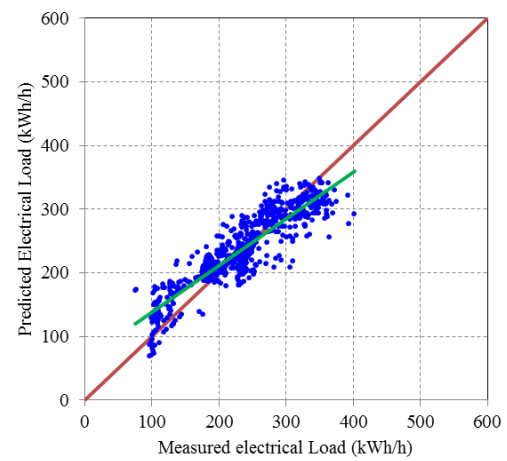




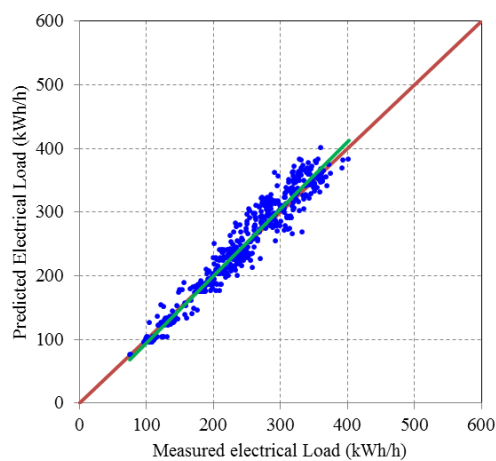
図 3.15: 各モデルの予測結果と電力負荷実績



(a) 曲線近似モデル



(b) 3 時間先需要予測モデル



(c) 提案手法

図 3.16: 各種法の予測値と観測値

### 3.5 まとめ

今回行った電力負荷予測試験により得られた知見としては以下の点が挙げられる。

- 中大規模の事務用途建物においては、40%強の電力が空調で使用されており、空調設備の出力変動が建物全体の消費電力変動の大きな要因となっている。このため、空調設備の消費電力を精度よく予測することができれば、建物全体の消費電力も高精度に予測することができる。
- 先行研究にて建物の熱負荷予測手法としては ANN を用いる方法が有効であることが明らかにされているが、その精度は EEP で約 10%である。しかし、現在導入が進んでいる省エネ型の空調設備は COP が 3.0~4.0 程度あるため、予測熱負荷を COP で除して求めた空調設備の消費電力の誤差は熱負荷の予測誤差に比べ小さくなる。これにより、空調設備を除いた消費電力の誤差を含めても EEP で約 5%まで電力負荷の予測誤差を低減することができる。
- 先行研究では過去の電力実績と気象データに基づいて、重回帰分析により負荷予測を行う手法が用いられているが、重回帰分析を用いると予測値の平準化効果が生じてしまい、高負荷および低負荷での予測精度が低下してしまう。一方、提案手法では ANN 熱負荷予測の結果から空調設備の運転パターンを求める作業によって平準化効果を緩和することができており、高負荷、低負荷時の予測精度も確保できている。

## 第4章 蓄電池を用いた電源運用計画

都市型マイクログリッドにおいては、連系点の電力潮流の変動を抑制すると共に、エネルギーコストの削減やCO<sub>2</sub>排出量の削減を実現することが大きな目標となる。都市型マイクログリッドでは、分散型電源の総定格容量に対する蓄電値の占める割合が大きいケースが十分に考えられるため、日々変化する先々の需要変化に応じて蓄電池の充放電を管理することが重要である。蓄電池の充電容量が十分に大きいマイクログリッドであれば夜間に満タンまで充電しておいて日中に放電を行えばよい。しかし一般に、設備容積やイニシャルコストの観点から、大容量の蓄電池を導入することは困難であり、連系点の電力潮流の変動を抑制しつつ、エネルギーコストの低減やCO<sub>2</sub>排出量の削減を図るためには、負荷に応じて、いつ、どれだけ充放電をすればよいのかを、有限のエネルギー貯蔵量の範囲内で決定しなければならない。

先行研究においても、運用計画を用いた蓄電池の充放電管理の有効性が検討されている。これらの研究では、蓄電池の充電状態を充放電電力の時間積算値から計算、評価している。しかしながら、蓄電池の充電状態は一般に直流電流の時間積算値から算出されるため、運用計画においても、本来、電力ではなく直流電流を求める必要がある。図4.1はあるマイクログリッドの連系点電力を終日にわたり一定にするために、蓄電池を繰り返し充放電した時の電流積算値から求めた実際の充電状態と電力積算値から求めた見かけの充電状態の時間変化をプロットしたものである。このケースにおいては24時間の運転によって、電力積算値から充電状態を算出すると、実際の充電状態との間に約20%の誤差が発生してしまうことがわかる。これは、蓄電池の充電状態や充放電電力に応じて起電圧や内部抵抗が変化することが原因である。

第4章では、複数種類の蓄電池に対し、さまざまな充電状態、充放電電力における直流電圧の計測を行い、蓄電池の直流特性を明らかにする。また計測した直流特性に基づき、運用計画における定式化を行う。この運用計画を用いることで、蓄電池の容量が最大限に有効活用できることを検証する。また蓄電池の有効活用という観点から、負荷予測の誤差や連系点潮流の変動抑制が、エネルギーコストの低減にどの程度悪影響を及ぼしうるかについてもシミュレーションを用いることで合わせて検討を行う。

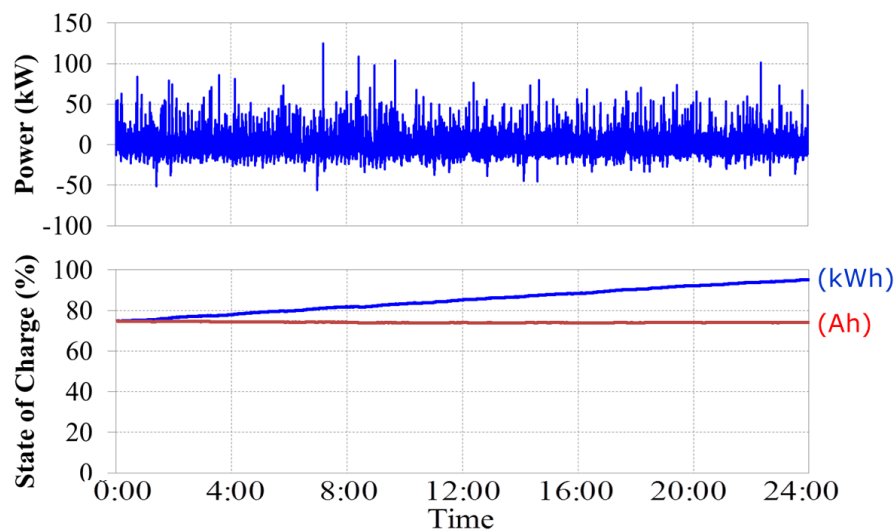


図 4.1: 蓄電池の連続運転に伴う電流積算値と電力積算値の差

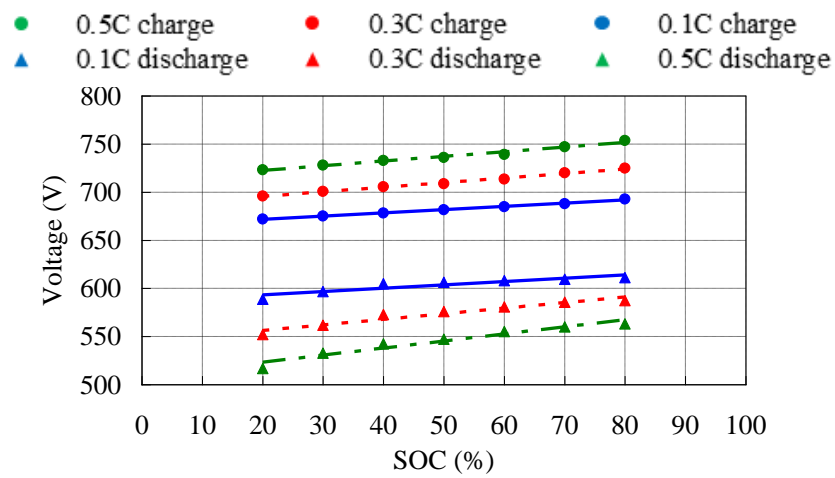
#### 4.1 蓄電池の直流特性評価試験

蓄電池の起電圧や内部抵抗は充電状態や充放電電力に応じて変化する。そこで一定の電流レートで充放電を行った際の、各充放電電流レートに対する蓄電池の直流電圧を測定した。試験に用いた蓄電池はニッケル水素電池と鉛蓄電池の 2 種類であり、実際にマイクログリッドに導入されている定置用蓄電池である。通常の運用で用いられる特性を把握することが目的であるため、充放電はすべてメーカーが保証している運転範囲で行った。

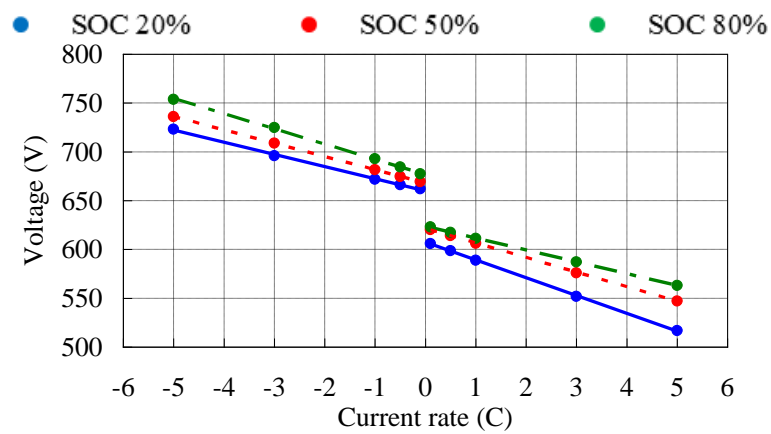
表 4.1 にそれぞれの蓄電池の主な諸元を示す。これらの蓄電池は外部からの充放電電力指令に従って、充放電電力を制御することができる。図 4.2 は表 4.1 に示す蓄電池を用いて一定の電流レートで充放電を行った際の、各充放電電流レートに対する蓄電池の SOC と直流電圧の関係をプロットしたものである。図 4.2 より SOC が 20～80% 当たりの範囲において、直流電圧は SOC および直流電流の一次関数で近似できることが分かる。

表 4.1: 蓄電池の諸元

電池種類	ニッケル水素電池
電池電圧	576V
電池電圧範囲	480V～760V
電池定格容量	700Ah (=SOC100%)
使用可能電池状態範囲	20%～80%



(a) 充電状態と直流電圧の関係



(b) 直流電流と直流電圧の関係

図 4.2: 蓄電池の直流特性 (ニッケル水素電池)

## 4.2 蓄電池の直流特性を考慮した電源運用計画の定式化

都市型マイクログリッドにおいてはマイクログリッド内の分散型電源の所有者が商用系統の系統運用者と異なるケースが大半である。マイクログリッドの所有者にとっては需要地端でエネルギーコストの削減や CO2 排出量の削減が最大限に得られるように運用を行うことが主目的となり、通常時の需給調整による商用系統貢献は付加価値である。このため、マイクログリッドを運用する際には、電力系統と同様に電源運用計画に基づいて分散型電源や蓄電装置の各時刻における出力を決定することが望ましい。特に蓄電池については、設置面積やイニシャルコストの観点からもマイクログリッド内の全電力変動を賄うだけの容量をマイクログリッド内で抱えることは不可能であり、限られた蓄電池容量を最大限に活用するためには、単純に夜間に充電を行い、日中、放電を行うだけではなく、負荷に合わせて、いつ、どれだけ充放電を行うか、を決定する必要がある。

本研究では、負荷予測に基づいた最適運用計画を採用する。最適運用計画では、連系点電力の変動を極力抑えつつ、エネルギーコストや CO2 排出量を最小にすることが目的となる。一般的に、建物の電力変動は、1 日を単位とした周期的な変動となるため、24 時間単位での運用計画を立てることが望ましい。マイクログリッドのように総電源容量が小さい系統において最適運用計画を実現するためには、高精度な負荷予測手法が重要となる。本研究では、3 章で検討した電力負荷予測手法を使用する。

以下、最適運用計画の立式化についてエネルギーコスト最小化の場合を例に詳述する。評価関数は式 (4.1) に示す 24 時間における総エネルギーコストであり、変数は各分散型電源と蓄電池の出力電力割合となる。充放電が可能な蓄電池については放電割合と充電割合をそれぞれ別の変数に設定する。

評価関数

$$\text{Minimize } \text{Energy Cost} \quad (4.1)$$

変数

$$XG(m,t), \quad XBd(n,t), \quad XBc(n,t)$$

ここで、

$XG$  : 各分散型電源の出力電力割合

$XBd$  : 各蓄電池の放電電力割合

$XBc$  : 各蓄電池の充電電力割合

$m$  : 各分散型電源の番号

$n$  : 各蓄電池の番号

$t$  : 各時間断面の番号

以降、各制約条件を規定する。まず連系点電力に対する制約条件は式（4.2）、（4.3）で与えられる。マイクログリッドでは、連系点電力の変動を極力抑える運用が求められるため、各時間断面での連系点電力の変化が一定値以内になるように定められている。

$$Pref_{Grid}(t) = PL(t) - \text{sum}PG(t) - \text{sum}PB(t) \quad (4.2)$$

$$- \Delta Pref < Pref_{Grid}(t+1) - Pref_{Grid}(t) < \Delta Pref \quad (4.3)$$

ここで、

$Pref_{Grid}$  : 連系点電力(kW)

$\Delta Pref$  : 連系点電力の時間断面毎の変化許容値(kW)

$PL$  : 各時刻断面における電力負荷の予測値(kW)

$PG$  : 各時刻断面における各分散型電源の出力値(kW)

$PB$  : 各時刻断面における各蓄電池の充放電出力値(kW)

分散型電源の出力については、式（4.4）より出力値が、式（4.5）により出力範囲がそれぞれ制約される。

$$PG(m,t) = PGrate(m) \times XG(m,t) - AG(m) \quad (4.4)$$

ここで、

$PGrate$  : 各分散型電源の定格出力(kW)

$AG$  : 各分散型電源の補機電力(kW)

$$(XGmin(m)+MG(m,t)) / 100 < XG(m,t) < (100-MG(m,t)) / 100 \quad (4.5)$$

ここで、

$XGmin$  : 各分散型電源の最低出力電力割合(%)

$MG$  : 各時刻断面における各分散型電源の予備力(%)

蓄電池の出力については、式（4.6）～（4.9）より制約が与えられる。電池ごとに放電電力と充電電力を別々に計算すると共に、式（4.9）により同時刻断面における放電と充電の同時実施を禁止することで蓄電池を表現している。また蓄電池の出力範囲は分散型電源と同様に式（4.10）、（4.11）で与えられる。

$$PBd(n,t) = PBrate(n,t) \times XBd(n,t) \quad (4.6)$$

$$PBc(n,t) = PBrate(n,t) \times XBc(n,t) \quad (4.7)$$

$$PB(n,t) = PBd(n,t) - PBc(n,t) - AB(n) \quad (4.8)$$

$$XBd(n,t) \times XBc(n,t) = 0 \quad (4.9)$$

ここで,

$PBd$  : 各時刻断面における各蓄電池の放電出力値(kW)

$PBc$  : 各時刻断面における各蓄電池の充電出力値(kW)

$BG$  : 各蓄電池の補機電力(kW)

$$XBd(n,t) < (100-MB(n,t)) / 100 \quad (4.10)$$

$$XBc(n,t) < (100-MB(n,t)) / 100 \quad (4.11)$$

ここで,

$MB$  : 各時刻断面における各蓄電池の出力予備力(%)

式 (4.12) ～ (4.17) は蓄電池の直流側状態を規定する式である。4.1 節で述べたように蓄電池の直流電圧と充電状態および直流電流の間には線形関係が確認されているため、蓄電池の直流電圧は式 (4.16), (4.17) によって充電状態と直流電流の一次関数で表現している。

$$PBddc(n,t) \times PBloss(n) / 100 = PBd(n,t) \quad (4.12)$$

$$PBcdc(n,t) = PBc(n,t) \times PBloss(n) / 100 \quad (4.13)$$

$$PBddc(n,t) = VBddc(n,t) \times IBddc(n,t) / 1000 \quad (4.14)$$

$$PBcdc(n,t) = VBcdc(n,t) \times IBcdc(n,t) / 1000 \quad (4.15)$$

$$VBddc(n,t) = aBd(n) \times SOC(n,t) + bBd(n) \times IBddc(n,t) + cBd(n) \quad (4.16)$$

$$VBcdc(n,t) = aBc(n) \times SOC(n,t) + bBc(n) \times IBcdc(n,t) + cBc(n) \quad (4.17)$$

ここで,

$PBddc$  : 各時刻断面における各蓄電池の直流放電出力値(kW)

$PBcdc$  : 各時刻断面における各蓄電池の直流充電出力値(kW)

$PBloss$  : 各蓄電池の交直変換損失(%)

$VBddc$  : 各時刻断面における各蓄電池の直流放電電圧値(V)

$IBddc$  : 各時刻断面における各蓄電池の直流放電電流値(A)

$VBcdc$  : 各時刻断面における各蓄電池の直流充電電圧値(V)

$IBcdc$  : 各時刻断面における各蓄電池の直流放電電流値(A)

$SOC$  : 各時刻断面における各蓄電池の充電状態(Ah)

$aBd, bBd, cBd$  : 各蓄電池の直流放電特性係数

$aBc, bBc, cBc$  : 各蓄電池の直流充電特性係数



蓄電池の充電状態に関する制約は式 (4.18) ～ (4.21) で与えられる。式 (4.12) ～ (4.17) において蓄電池の直流側状態を規定しているため、各時刻の充電状態を電流積算で計算することができる。これにより最適運用計画において高精度に各時間断面の充電状態を求めることが可能となる。

$$SOC(n,1) = SOCini(n) \quad (4.18)$$

$$SOC(n,t+1) = SOC(n,t) + (IBcdc(n,t) - IBddc(n,t)) \times \Delta t \quad (4.19)$$

$$SOC(n,end) = SOCend(n) \quad (4.20)$$

$$SOCmin(n) < SOC(n,t) < SOCmax(n) \quad (4.21)$$

ここで、

$SOCini$  : 運用計画の立案時間帯における各蓄電池の充電状態初期値

$SOCend$  : 運用計画の立案時間帯における各蓄電池の充電状態最終値

$SOCmin$  : 各蓄電池の最小充電状態(Ah)

$SOCmax$  : 各蓄電池の最大充電状態(Ah)

$\Delta t$  : 運用計画の時間刻み(hour)

最後にエネルギーコストについて与えられる制約を式 (4.22) ～ (4.24) に示す。エネルギーコストは発電コストと買電コストの総和となる。発電効率については、図 4.3 に示すある分散型電源の発電効率の実測値に従い、出力の 2 次式近似で表現した。

$$COSTG(m,t) = (aG(m) \times PG^2(m,t) + bG(m) \times PG(m,t) + cG(m)) \times \Delta t \quad (4.22)$$

$$COST_{Grid}(t) = PR(t) \times Pref_{Grid}(t) \times \Delta t \quad (4.23)$$

$$Energy\ Cost = sum(COST_{Grid} + COSTG) \quad (4.24)$$

ここで、

$COSTG$  : 各時刻断面における各分散型電源の発電コスト(¥)

$COST_{Grid}$  : 各時刻断面における買電コスト(¥)

$aG, bG, cG$  : 各分散型電源の発電コスト係数

$PR$  : 各時刻断面における買電単価(¥/kWh)

以上に示した評価関数、変数、制約条件を用いて最適化計算を行うことで、各時刻断面での分散型電源と蓄電池の運用計画を立案することができる。なお、表 4.2 にまとめた各引数は最適化計算の前処理で予め設定される与条件である。

表 4.2: 最適運用計画のための与条件パラメータ

電源種別	パラメータ	文字
分散型電源	定格出力	PGrate (kW)
	発電コスト係数	aG, bG, cG
	最低出力電力割合	XGmin (%)
	発電予備力	MG (%)
	補機電力	AG (kW)
蓄電池	定格出力	PBrate (kW)
	最小充電状態	SOCmin (Ah)
	最大充電状態	SOCmax (Ah)
	直流充放電特性係数	aBd, bBd, cBd, aBc, bBc, cBc
	交直変換損失	PBloss (%)
	充放電予備力	MB (%)
	補機電力	AB (kW)
	充電状態初期値	SOCini (Ah)
	充電状態最終値	SOCend (Ah)
電力系統	連系点電力の変化許容値	$\Delta Pref$ (kW)
	買電単価	PR (¥/kWh)

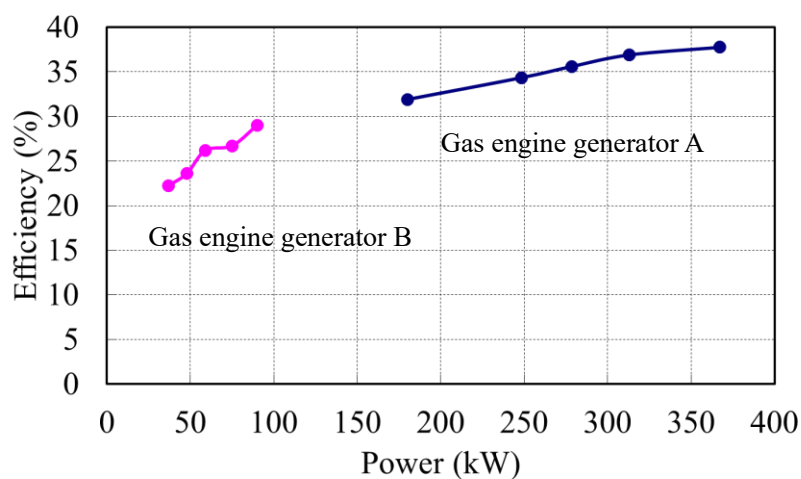


図 4.3: 発電機の部分運転効率

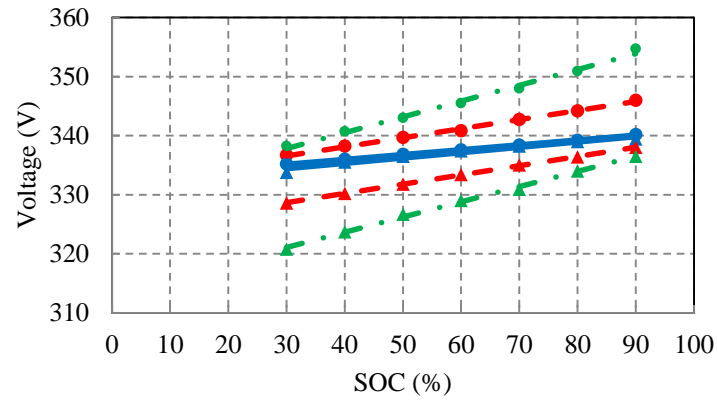
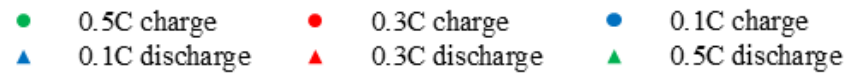
### 4.3 電源運用計画の評価

4.1 節で述べた蓄電池の直流特性が最適運用計画で適切に反映されるかどうかを確認するために、表 4.3 および図 4.4 に諸元および直流特性を示す蓄電池を用いて、最適運用計画の作成、および運用計画どおりに蓄電池を充放電させた時の充電状態の計測を行った。この蓄電池の定格蓄電池容量は 163kWh (=100%) であるが、メーカーが推奨する蓄電池の充電状態範囲が 30%～95%であるため、前日夜間に 95%まで充電をしておき、翌朝 7:00 の時点で 8:00～20:00 までの最適運用計画を立案させた。蓄電池の充電状態初期値ならびに最終値はそれぞれ充電状態範囲に従い、95%と 30%とした。

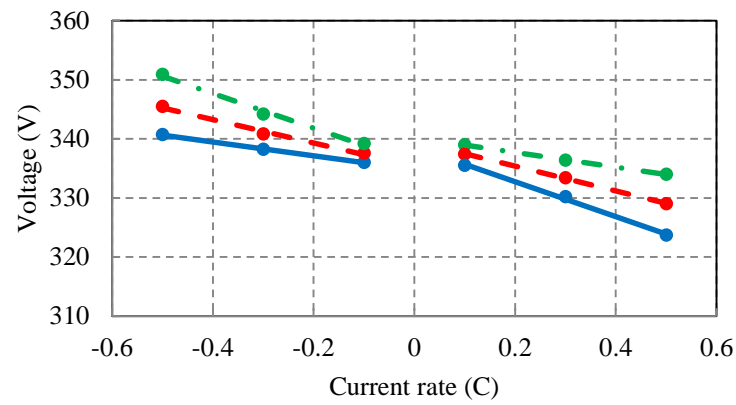
図 4.5 は最適運用計画で立案した各時刻の電池出力と最適運用計画内で計算された各時刻の充電状態、ならびに運用計画どおりに蓄電池を充放電させた時の充電状態をプロットしたものである。12 時間を通して様々な出力で充放電を行ったが、最適運用計画と実際の運転での充電状態の誤差は 4%以下に収まっており、精度よく充電状態を求められることが確認できた。

表 4.3: 蓄電池の諸元

電池種類	鉛蓄電池
電池電圧	326V
電池電圧範囲	300V～400V
電池定格容量	500Ah (=SOC100%)
使用可能電池状態範囲	30%～95%



(a) 充電状態と直流電圧の関係



(b) 直流電流と直流電圧の関係

図 4.4: 蓄電池の直流特性 (鉛蓄電池)

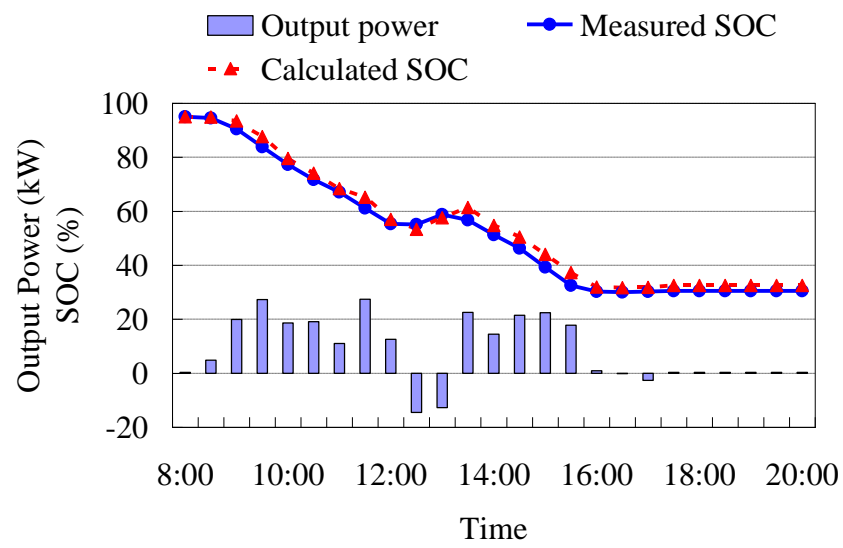


図 4.5: 運用計画および運用結果

#### 4.4 まとめ

今回用いた電源運用計画により得られた知見としては以下の点が挙げられる。

- ・蓄電池は一般的に電流積算から充電状態を判断するため、電力積算から充電状態を判断しようとするとは非常に大きな誤差が発生する。この誤差は試験ケースにおいて 24 時間で 20%に達していた。
- ・蓄電池にはさまざまな種類の電池があるが、ニッケル水素電池、鉛蓄電池ともに運用に用いられる電池電圧範囲において、直流電圧と直流電力、充電状態の間に線形関係が共通して確認できた。
- ・電源運転計画において、蓄電池の直流電圧、直流電流を制約条件に組み込むことで、電源運転計画における充電状態の推定を電流積算で行うことが可能となった。
- ・電源運転計画に従って日中 10 時間の充放電を行ったところ、充電状態の誤差を最大で 4%まで低減させることが可能となった。

## 第 5 章 都市型マイクログリッドにおける自立運転制御手法

### 5.1 自立運転制御手法

マイクログリッドを構築することによって得られる重要な機能の一つとして、商用系統の停電時などに安定した電力を供給する自立運転がある。本研究では、統合カスケード制御[8]を拡張し、周波数、電圧制御を行う電源が交流発電機、インバータ電源を問わず適用可能となる分散型電源の制御手法を用いる。

電源の出力制御アルゴリズムを図 5.1 に示す。本制御手法では、マイクログリッド内の電源を応答特性に応じて 3 種類に分類しており、それぞれ異なる出力制御手法を用いることで、電源間の出力干渉無く、安定した電力品質での自立運転を実現する。図 5.1 内の添え字は各電源の応答特性の順位を示している。

CVCF 制御を行う電源は制御用入力として周波数、電圧実効値を算出しなければならず、応答特性が優れている蓄電装置などのインバータ電源を用いても、少なからず制御遅れが発生するためである。そのため 2 番目に応答特性が優れている電源が CVCF 制御を行い、最も応答特性の優れている電源は、上記の制御遅れに伴う電力品質の低下を防ぐために、統合カスケード制御だけでなく、自端でのローカル制御[24]-[25]を組み合わせることで、負荷電力の瞬時値を基に高速な負荷変動を検出し、補償させる。

応答特性が 3 番目以下の電源は、即応性を必要とせず、電源間で出力干渉しないような負荷分担のみが求められる。また CVCF 制御を行う電源は、自身が補償する負荷変動の周波数帯域を、有効／無効電力指令によって直接指定することができない。そのため応答特性が 3 番目以下の電源は、統合カスケード制御を用いて、応答特性に応じて順次可能な限り負荷変動を補償していく。これらの電源が補償する負荷変動の周波数帯域を指定することで、残された負荷変動の周波数帯域を、CVCF 制御を行う電源が補償する負荷変動の周波数帯域とすることが出来る。

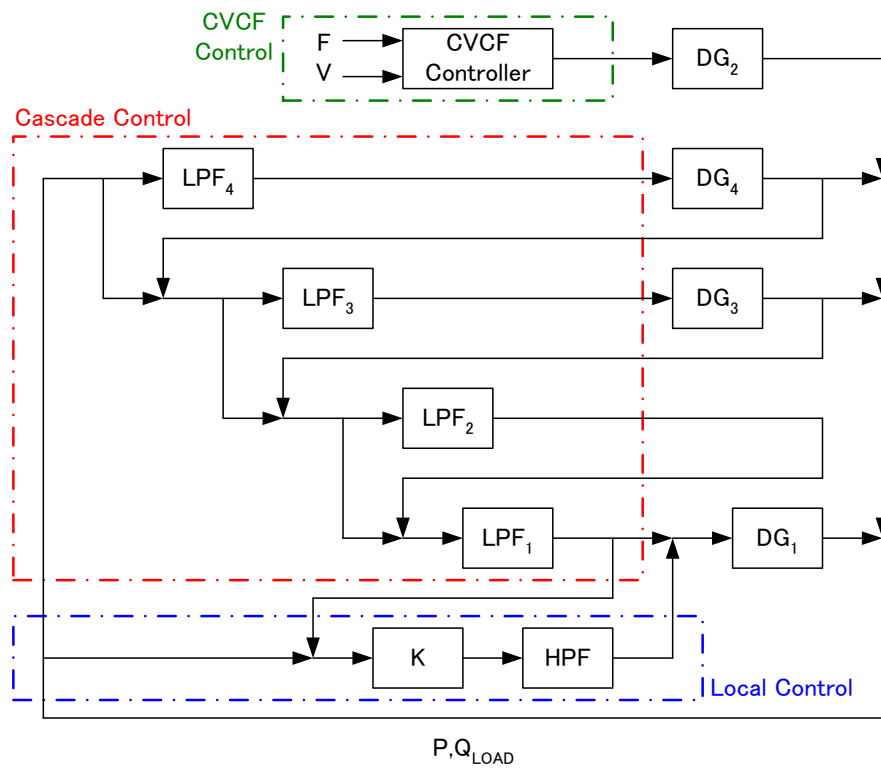


図 5.1: 提案する制御手法のブロック図



## 5.2 自立運転制御試験

本制御手法を図 5.2 に系統構成を示すマイクログリッド実用設備に適用する。表 5.1 に各電源の仕様をそれぞれ示す。電源はガスエンジン発電機（以下、GE とも表記）、ニッケル水素電池（以下、NiMH とも表記）、電気二重層キャパシタ（以下、EDLC とも表記）である。本電源構成に制御手法を適用した場合、CVCF 制御を行う電源はガスエンジン発電機かニッケル水素電池となる。表 5.2 は CVCF 制御を行う電源別に、各電源の負荷変動の補償周波数帯域をまとめたものである。

### ① ガスエンジン発電機を CVCF 制御で運転するケース

ニッケル水素電池が補償する周波数帯域は、図 5.3 に示す自立運転時のガスエンジン発電機の実出力変動と系統周波数変動の関係から、5mHz 以上とした。

### ② ニッケル水素電池を CVCF 制御で運転するケース

ガスエンジン発電機が補償する周波数帯域は、図 5.4 に示す応答特性から 10 ミリ Hz 以下とした。また電気二重層キャパシタが補償する周波数帯域は、容量から 0.5Hz 以上とした。

表 5.1: 各電源の仕様

	GE	NiMH	EDLC
定格出力	350kW	200kVA	100kVA
蓄電容量	—	400kWh	400kWs
最小出力	140kW	-200kW	-100kW
最大出力	350kW	200kW	100kW

表 5.2: 各電源が補償する負荷変動の周波数帯域

DG	Case 1	Case 2
GE	CVCF	<10mHz
NiMH	5mHz <	CVCF
EDLC	—	0.5Hz <

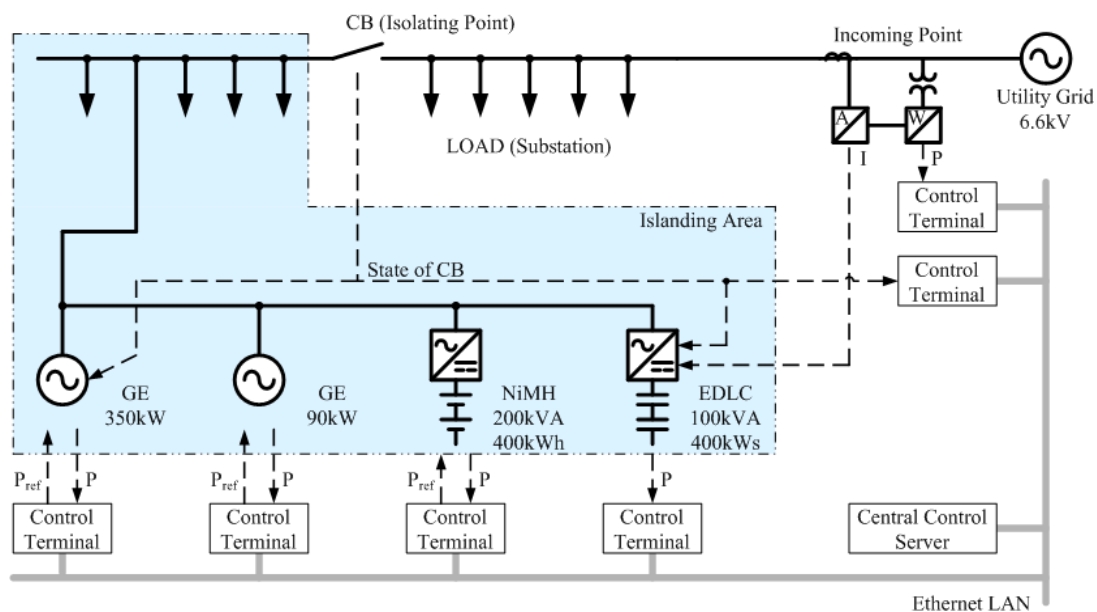


図 5.2: マイクログリッド実用設備の構成

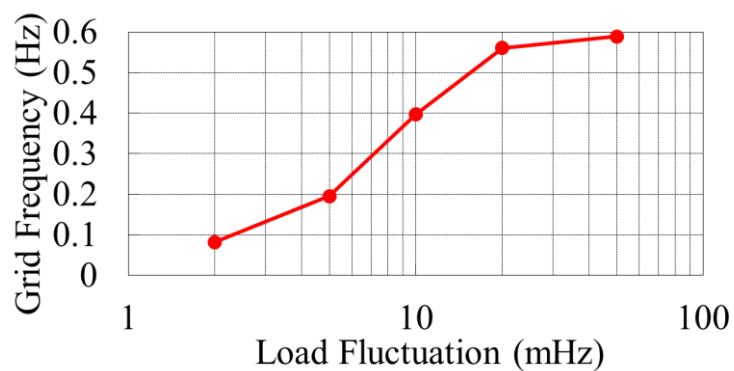


図 5.3: ガスエンジン発電機の実出力変動と系統周波数変動の関係

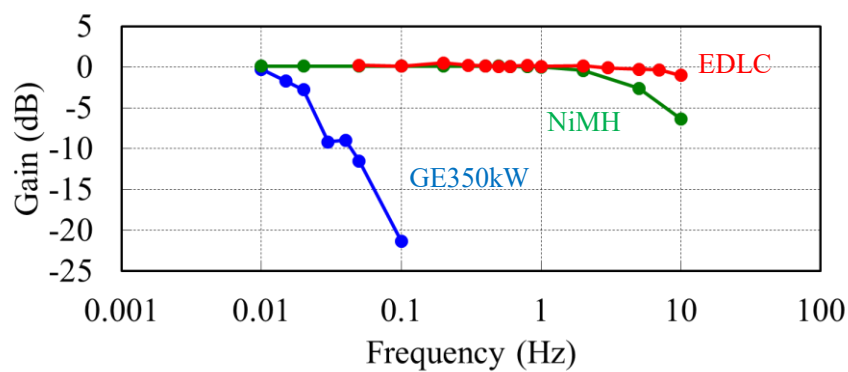


図 5.4: 各電源の周波数応答特性

# ① ガスエンジン発電機を CVCF 制御で運転するケース

運転ケースのうち、ガスエンジン発電機を CVCF 制御で運転するケースについて、実機による連続自立運転を行った。

今回の自立運転では、平日、休日、日中、夜間問わず安定した電力供給が継続できることを実証するため、木曜日 0 時～土曜日 24 時までの 72 時間を実施期間とした。負荷ならびに各変電室に設置されている自動力率調整用のコンデンサに対しては特別な調整を行わず、普段どおり運用した。

電力品質の目標値については、周波数を  $50\pm0.2\text{Hz}$ 、電圧を  $100\pm10\%$  とした。

図 5.5 に 72 時間の周波数、電圧、有効／無効電力、ニッケル水素電池の SOC のトレンドグラフを、表 5.3 に 72 時間の電力品質とニッケル水素電池の SOC の統計的諸量を示す。図 5.5 よりニッケル水素電池が中、短周期の負荷変動を補償することで、負荷変動の形態に因らず、長期にわたる安定した電力品質での電力供給が可能であることが実証された。

表 5.3 を見ると、周波数の平均値が 50Hz より低めになっている。これはマイクログリッド内の負荷変動に含まれている凸状のヒゲのような変動をニッケル水素電池が補償しきれなかったことが原因と考えられる。また電圧の平均値が 100% より高くなっているのは、ガスエンジン発電機の電圧制御が垂下特性を有していることと、各実験棟に設置されているコンデンサによる負荷側末端の電圧上昇、が原因と考えられる。

また図 5.5 で平日と休日とを比較すると、若干休日のほうが、周波数が 49.8Hz 以下に逸脱する回数が多い。休日の負荷変動要因が少ないために、2 時間毎の約 50kW の負荷変動（空調用熱源の起動）が、ステップ状変化として顕著に現れたために周波数が変動したものと考えられる。

表 5.3: 電力品質、電池容量に関する統計的諸量（ケース 1）

	周波数	電圧	SOC
最大値	50.15Hz	101.33%	242.55kWh
最小値	49.71Hz	99.21%	236.62kWh
平均値	49.99Hz	100.45%	238.54kWh
標準偏差	0.025Hz	0.31%	0.86kWh
達成率	99.987%	100%	—

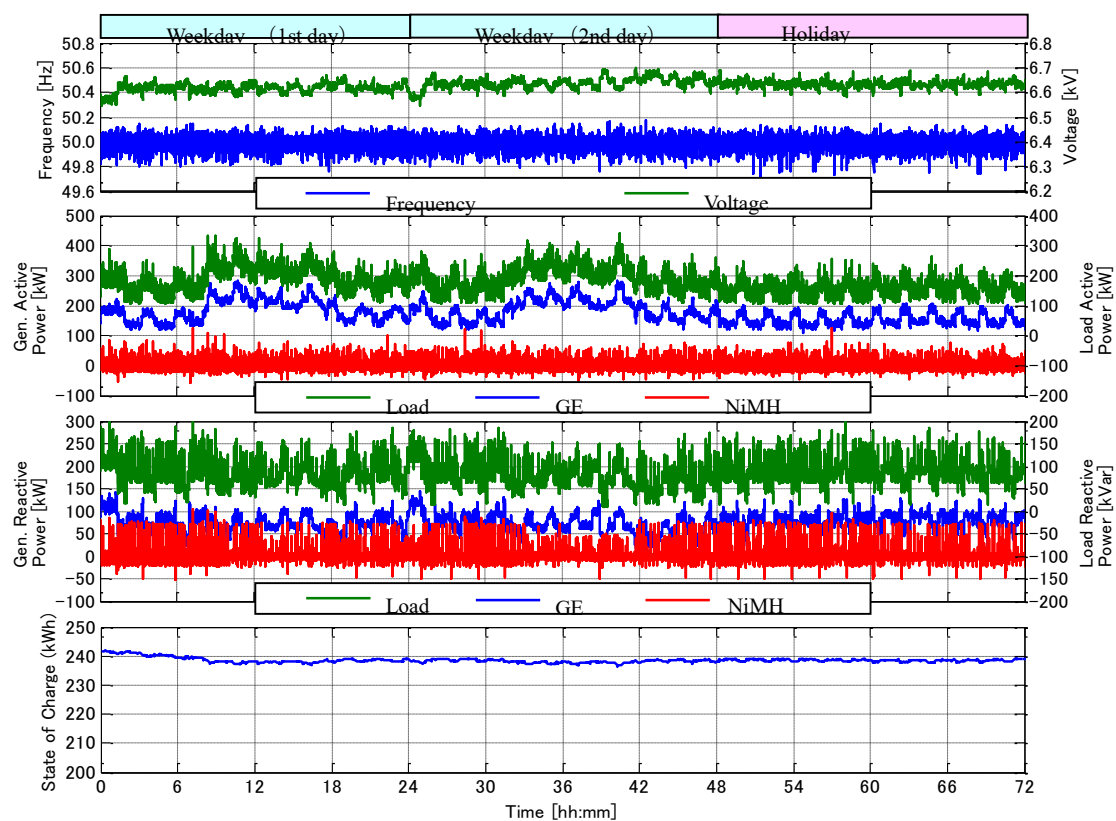


図 5.5: 実機による連続自立運転結果

## ② ニッケル水素電池を CVCF 制御で運転するケース

実機では電源仕様の都合、ニッケル水素電池を CVCF 制御で運転させることができないため、ニッケル水素電池を CVCF 制御で運転するケースは、PSCAD を用いたシミュレーションで検証した。シミュレーションに用いた負荷データには、実機による自立運転試験の 2 日目の実績値を用いた。電気二重層キャパシタの SOC はニッケル水素電池の出力を、ニッケル水素電池の SOC はガスエンジンの出力をそれぞれ制御することで一定に保つようにした。

図 5.6 に周波数、電圧、有効無効電力のシミュレーション結果を示す。図 5.6 よりインバータ電源であるニッケル水素電池で CVCF 制御を行った場合においても、電力品質が安定化できていることが確認できた。なお図 5.6 と図 5.5 を比較すると、ニッケル水素電池で CVCF 制御を行った場合のほうが、周波数、電圧ともにバンド幅は大きくなった。ただし、シミュレーションで得られた電力品質の統計的諸量をまとめた表 5.4 で平均値、標準偏差で見ると、シミュレーションの結果は実機試験の結果とほぼ同等の数値となっている。以上より、本制御手法は CVCF 制御を行う電源が交流発電機、インバータ電源を問わず適用可能であると考えられる。

表 5.4: 電力品質、電池容量に関する統計的諸量（ケース 1, 2 比較）

	実機運転		シミュレーション	
	周波数	電圧	周波数	電圧
最大値	50.15Hz	101.33%	50.17Hz	100.45%
最小値	49.71Hz	99.21%	49.82Hz	99.55%
平均値	49.99Hz	100.45%	50.00Hz	100.00%
標準偏差	0.025Hz	0.31%	0.018Hz	0.17%
達成率	99.987%	100%	100%	100%

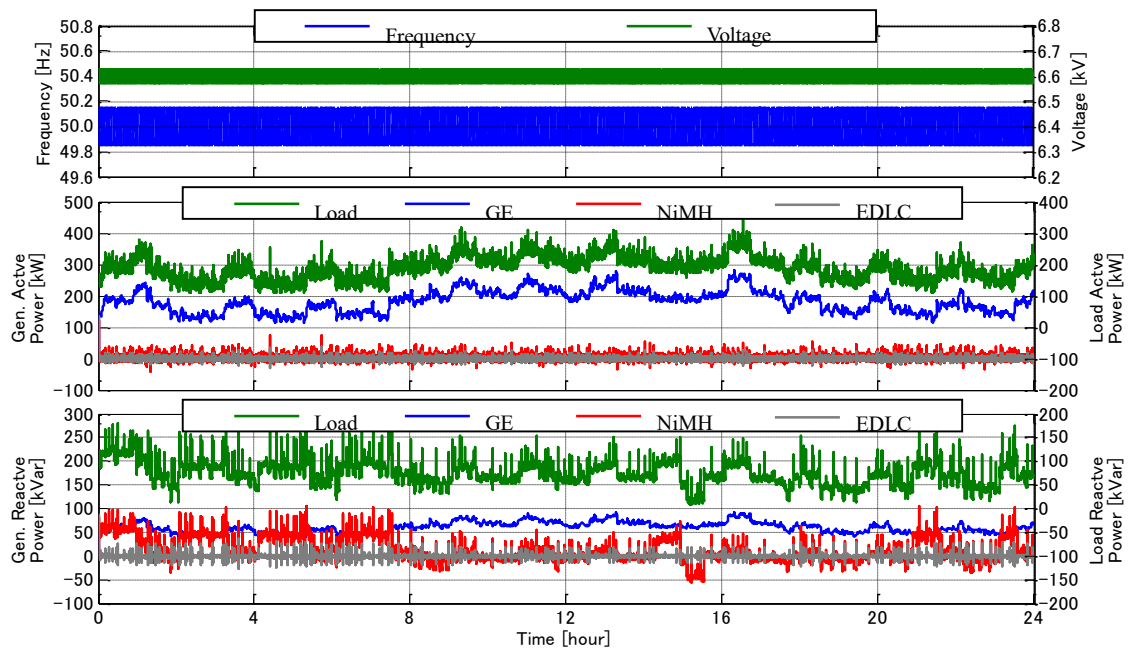


図 5.6: ニッケル水素電池を CVCF 運転させた場合のシミュレーション結果

### 5.3 まとめ

今回用いた自立運転制御により得られた知見としては以下の点が挙げられる。

- CVCF 制御を行う電源をマイクログリッド内の二番目に出力応答性が高い電源一台に限定することで, CVCF 制御の補助を行う電源と統合カスケード制御により負荷分担を行う電源とでそれぞれ制御目標を変えることができる。これにより装置間の出力干渉を起こすことなく安定的に自立運転を継続することが可能となる。
- CVCF 運転を行う電源は回転機, インバータ電源ともに設定することが可能であり, 蓄電池さえあればその他の電源構成にはとらわれることなく自立運転ができる。
- 分散型電源の慣性は非常に小さく, 今回検証に用いたシステムで系統周波数変動を±0.2Hz 以内に抑えるためには, 5mHz 以上の速さで発電機出力を変化させることが許容できない。従って, マイクログリッドで高品質な自立電力供給を行うためには, 蓄電装置の存在が必須である。

## 第 6 章 自立運転移行時の電力品質安定化制御

### 6.1 自立移行時の蓄電池運転制御手法

統合カスケード制御は各分散型電源の出力を決定するに当たり、非常に多くの時刻同期された情報を必要とするため、高速な出力調整には不向きである。

そこで統合カスケード制御では補償不可能な高速な負荷変動や太陽光発電の急峻な出力変化に対しては、高速な出力調整が可能な蓄電装置を用いたローカル制御が有効である<sup>[7-8]</sup>。ローカル制御に求められる機能は次の 3 機能である。

- ・統合カスケード制御との協調
- ・統合カスケード制御で補償不可能な高速な負荷変動の補償
- ・連系運転制御と自立運転制御のスムーズな切替

上記機能のうち、1, 2 番目については先行研究にて実現可能である。本研究では新たに 3 番目の機能を具備したローカル制御の制御手法を提案する。本機能が必要となる理由を以下に詳述する。

表 6.1 は連系／自立運転状態におけるマイクログリッドの制御目標であり、これからわかるとおり連系運転時と自立運転時ではその制御目標が異なっている。従って分散型電源が電力系統から切り離れている状態にもかかわらずローカル制御が連系運転時の動作を行ってしまうと電力品質が不安定になる恐れがある。図 6.1 を用いて具体的に説明する。

一般的にマイクログリッドでは、電源の無用な予備力を持たないように負荷容量のほうが発電容量より大きくなるケースが多い。このため連系点と自立運転用遮断器は異なる点になることが多く、また自立運転用遮断器の潮流はゼロとは限らない。そのため時刻  $t_1$  で自立状態に移行すると、自立運転用遮断器の潮流に応じて、連系点潮流も変化する。このとき最も応答性が速い蓄電装置が連系モードで運転していると、蓄電装置は連系点潮流の変動を補償しようとして出力変化を行う。その結果、主力電源の出力は蓄電装置の出力変化を受け、自立移行直前から大幅に変化することになり、大きな電圧、周波数変動が発生することにつながる。

上記の問題に対する対策としては二通りの手段が考えられる。1 つは連系／自立の制御モードを高速に遷移させることで制御の移行時間を極力を短くする方法であり、もう 1 つは連系／自立移行／自立の 3 状態を同時に満足するような制御系を構築することで制御モードの遷移そのものを省略する方法である。本発表では通信の汎用性から後者の方法を採用する。

図 6.2 は連系運転制御と自立運転制御のスムーズな切替を考慮したローカル制御を実現



するための制御ブロック図である。

図 6.2 の第一項は制御システムから受信した出力指令に従って出力を行う項，第 2 項が自立時および移行時に主力電源の出力変動を抑制する項，第 3 項が連系時および移行時に連系点の出力変動を抑制する項である。それぞれの項は干渉を起こさないように各時定数でフィルタリングされている。本モデルでは連系時において第 2 項が存在するため，連系中も主力電源の出力変動に応じて蓄電装置の出力指令が変化してしまう。しかし連系運転を行っている時に，主力電源の出力変化の時定数を十分に大きな値にしておけば，第 2 項はハイパスフィルタを通すためフィルタ出力がゼロとなり，第 2 項が連系運転時に含まれていても問題なく運転することが可能となる。

表 6.1: ローカル制御の制御目標

運転状態	制御目標
連系時，移行時	連系点潮流の変動を平滑化
自立時，移行時	主力電源の電力変動を平滑化

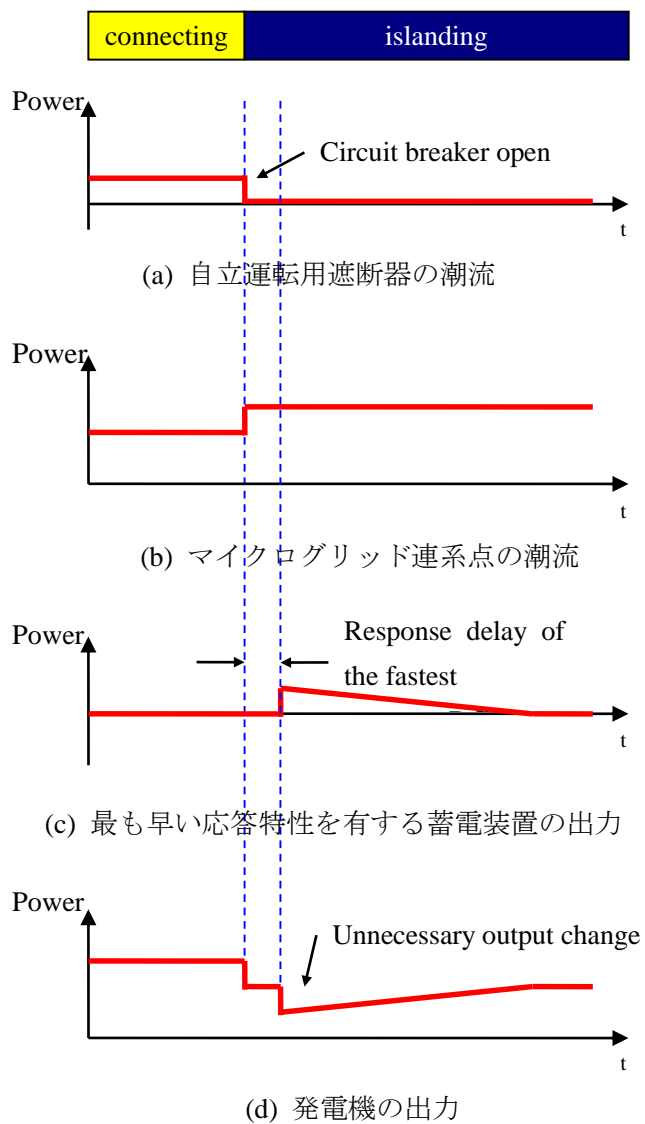


図 6.1: 自立移行時の電力品質変動要因

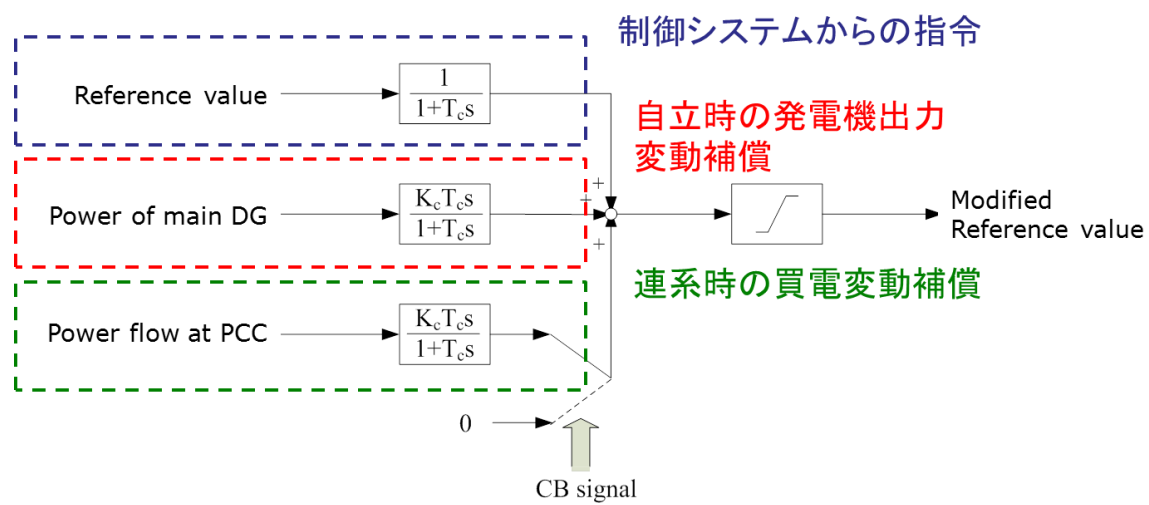


図 6.2: エネルギー貯蔵装置のローカル制御モデル

## 6.2 自立移行試験

本制御手法を図 6.3 に系統構成を示すマイクログリッド試験設備に適用する。表 6.2 に各電源の仕様をそれぞれ示す。電源はガスエンジン発電機（以下、GE とも表記）、鉛蓄電池（以下、BAT とも表記）である。鉛蓄電池は 6.1 節で述べたローカル制御を用いて運転制御を行い、ガスエンジン発電機は 5 章で述べた運転制御を用いて CVCF 制御で運転する電源とした。

表 6.2: 各電源の仕様

	GE	BAT
定格出力	300kW	100kVA
蓄電容量	—	163kWh
最小出力	100kW	-50kW
最大出力	240kW	50kW
制御方法	CVCF	1mHz<

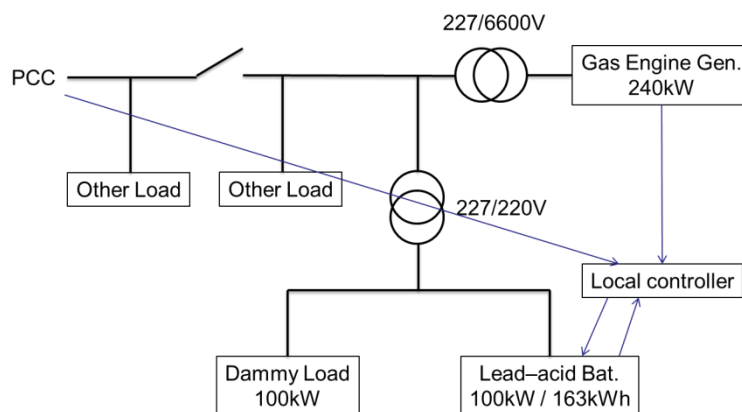


図 6.3: 検証に用いたマイクログリッド試験設備

図 6.4～6.6 に連系点潮流を 0kW/0kVar, 10kW/0kVar, 30kW/0kVar としたときの自立移行前後の各電源の出力ならびに電力品質である系統周波数を示す。また表 6.3 に各連系点潮流におけるガスエンジン発電機の自立移行時出力変化量と最大周波数変動の 5 回施行平均値を示す。自立移行時におけるガスエンジン発電機の出力変動を連系点潮流の約 7 分の 1 に低減することができており, 発電機最大出力の約 32%(出力増減方向に各 40kW = 合計 80kW) の連系点電力幅に対して, 周波数を 0.2Hz 以内に抑えながら自立移行できることが確認できた。

表 6.3: 各連系点潮流における自立移行時の電力品質変化量

遮断器潮流	GE 出力変動	周波数偏差
0.3kW	0.2kW	0.078Hz
10.6kW	2.1kW	0.10Hz
20.1kW	2.9kW	0.12Hz
31.3kW	4.2kW	0.15Hz
39.4kW	6.7kW	0.21Hz

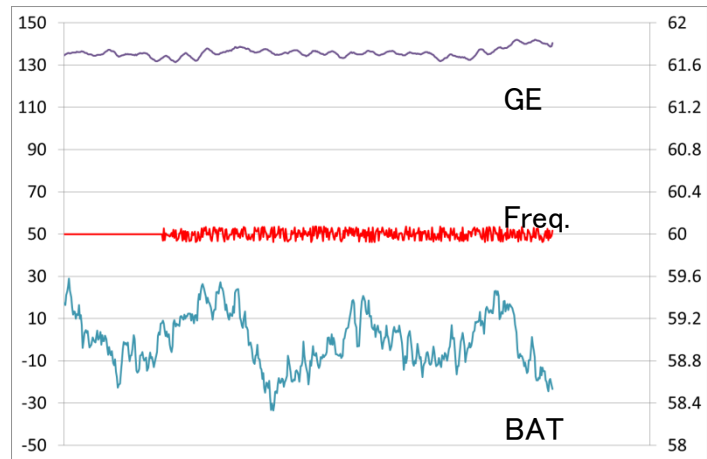


図 6.4: 自立移行前後の各電源の出力ならびに電力品質 (0kW/0kVar)

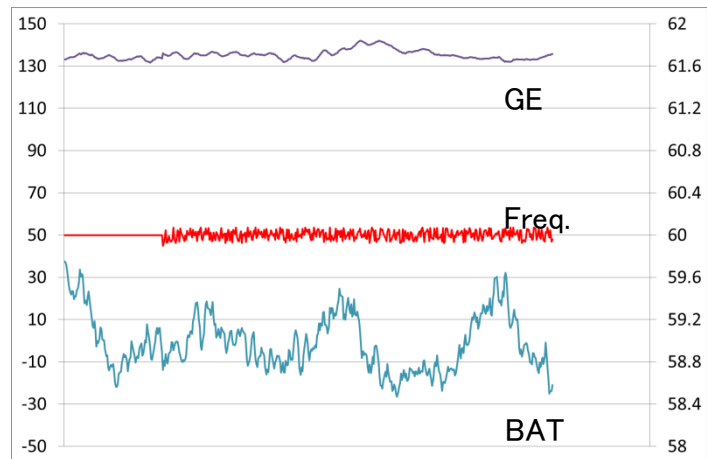


図 6.5: 自立移行前後の各電源の出力ならびに電力品質 (10kW/0kVar)

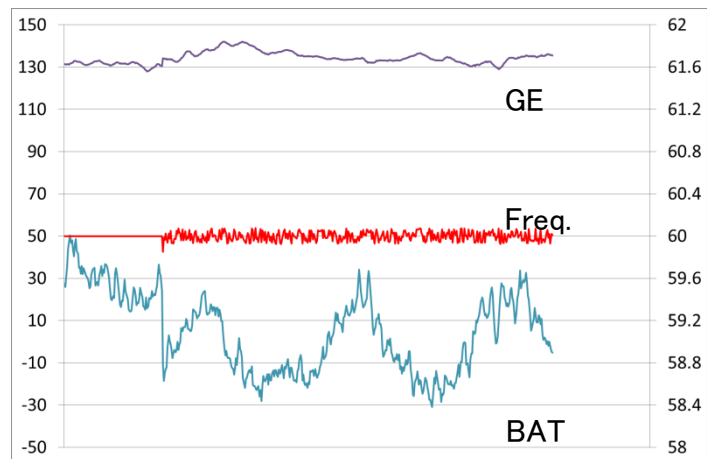


図 6.6: 自立移行前後の各電源の出力ならびに電力品質 (30kW/0kVar)

### 6.3 まとめ

今回用いた自立移行時の蓄電池運転制御により得られた知見としては以下の点が挙げられる。

- ・自立移行時に遮断器潮流がゼロでなかった場合、蓄電池の制御モードの切り替えが遅れると、不要な連系点電力補償が働くことで発電機の出力が大きく変化し、電力品質が著しく悪化する恐れがある。
- ・連系運転時において発電機の出力制御は数 100 秒オーダーの時定数であるため、連系運転時の蓄電池の運転制御に発電機の変動補償を組み込むことで、自立移行時の発電機の出力変動を緩和することができる。
- ・今回検証に用いたシステムも発電機の応答性はほぼ他の発電機と同じであったが、発電機最大出力の約 32%の連系点電力幅に対して、自立移行時の周波数変動を 0.2Hz 以内に抑えることが可能であった。なお、今回用いた制御では、発電機の出力変動を比例制御で補償しているため、完全に自立移行時の発電機出力の変動は補償できず定常偏差が残る点に注意が必要である。

## 第 7 章 結論

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災以降，原子力発電に依存しない社会を目指すべきであるという考え方が社会で広く議論されるようになり，省エネ・再エネといったグリーンエネルギーを最大限に引き上げ，原発依存度を減らし，化石燃料依存度を抑制することが日本におけるエネルギーの考え方の基本方針となった。このような背景の中，今後は再生可能エネルギーが電力系統に多数接続され，電力系統の供給信頼性が低下することが懸念される。本研究では，需要地端に今後設置の増加が予測されるエネルギー貯蔵装置に着目し，技術面からの導入促進をアプローチすることを目的に，エネルギー貯蔵装置の運用計画および運転制御に関する方法を検討した。具体的には，以下の 4 点について検討を行った。

### ・都市型マイクログリッドにおける電力負荷予測

本研究では，都市型マイクログリッドが構築されるであろう建物の負荷特性を明らかにし，負荷特性に基づいた電力負荷予測手法を採用することで，都市型マイクログリッドにおける精緻な負荷電力予測が可能であることを実際の建物を用いて試験，評価した。夏期や冬期の電力逼迫時には，都市部に多く存在する事務用途の建物はその消費電力のうち 40～50%が空調に起因するものであり，空調の消費電力を適切に予測することができれば，建物全体の消費電力も精度よく推定できることが明らかになった。ANN を用いた熱負荷予測と熱源機器の COP 特性とを組み合わせることで，予測精度の指標である EEP は 6.7%になり高精度な予測ができていることが実際に使用されている建物で夏期を通して確認された。

### ・蓄電池を用いた電源運用計画

エネルギー貯蔵装置の運用計画を立案する際には，その SOC が常に所定の運転範囲に納まるようにしなければならない。蓄電池の SOC は一般に直流電流の流入出量の積分値から決定されるため，交流電力出力ではなく直流電流出力を把握しなければ，運用時において計画時に見積もった SOC を大きく逸脱してしまう恐れがある。本研究ではエネルギー貯蔵装置の充電状態と出力に対する直流特性を明らかにしたうえで，直流特性に基づいた運用計画の立案手法を提案した。実際の定置用蓄電池を用いて蓄電池の直流特性を実測したところ，SOC が 20%から 80%の領域においては直流電圧と直流電流と SOC の 3 値はそれぞれ線形関係があることが明らかになり，この線形性を用いることで運用計画時に精度よく推定することが可能となった。



- ・都市型マイクログリッドにおける自立運転制御手法

マイクログリッドを構築することによって得られる重要な機能の一つとして、商用系統の停電時などに安定した電力を供給する自立運転がある。本研究では、統合カスケード制御を拡張し、周波数、電圧制御を行う電源が交流発電機、インバータ電源を問わず適用可能となる分散型電源の制御手法を考案した。制御手法の有効性を検証するため、交流発電機が周波数、電圧制御を行う場合については、実証設備に本制御を適用し、72 時間の実機による連続自立運転ができることを確認した。またインバータ電源である蓄電装置が周波数、電圧制御を行う場合についても、同様に安定した自立運転が実現できることを、シミュレーションを用いて確認した。結果、様々な電源の組み合わせに対して電力品質を維持した自立運転が可能となった。

- ・自立運転移行時の電力品質安定化制御

連系時と自立時では、すべての分散型電源の運転方法は異なっている。従って分散型電源が電力系統から切り離れている状態でこれらの電源が連系時の運転制御で動作してしまうと、マイクログリッド内の電力品質が不安定になる恐れがある。マイクログリッドを連系運転から自立運転へ電力品質を確保しながら移行させるためには、エネルギー貯蔵装置を用いた高速な運転制御が重要である。本研究では連系運転時における発電機の出力変化速度が小さいことに着目し、連系／自立移行／自立の 3 状態を同時に満足するような制御系を構築した。実機を用いて自立運転移行時の電力品質安定化の度合いを評価した結果、自立移行時におけるガスエンジン発電機の出力変動を連系点潮流の約 7 分の 1 に低減することができ、発電機最大出力の約 32%の連系点電力幅に対して、系統周波数を 0.2Hz 以内に抑えながら自立移行できることが確認できた。

上記の 4 点について検討を行うことで、需要地端での導入メリットが享受できる都市型マイクログリッドにおけるエネルギー貯蔵装置の運用計画方法ならびに運転制御方法が明らかになった。本研究が今後の再生可能エネルギー導入促進の一助となることを祈念して本論文の結びとする。

## 謝辞

本研究を進めていくにあたり，指導教員として長期にわたり広い視野からご助言，ご指導をして下さった馬場旬平准教授に心から感謝致します。馬場先生にはさかのぼること私が清水建設に入社して以来 8 年間にわたり，研究の進め方，実験の実施方法，論文の書き方など多くのことをご教示いただきました。本当にありがとうございました。

また本論文の主たる成果のきっかけとなった清水建設のマイクグリッド立ち上げからエネルギーマネジメントシステムの構築に至るまで，多大なるご指導をいただきました正田英介名誉教授に心から感謝致します。

仁田旦三名誉教授，谷口治人特任教授には，学会の場や様々なミーティングにおいて研究に対する助言を頂戴したこと心より御礼申し上げます。両先生から喫煙所でいろいろと教えていただいたお話は，普段聞くことがないような大変貴重な内容ばかりでありました。

また APET の鈴木宏和特任主幹研究員，太田豊氏にも大変お世話になりました。企業のお話や電気自動車の実情など大変勉強になりました。ありがとうございました。

また，大学での研究と企業での仕事との両立に対し，ご理解，ご協力をいただいた清水建設技術研究所の沼田茂夫センター所長をはじめ，エネルギーマネジメントグループのメンバーの皆様に感謝致します。研究と仕事が両立できたのも皆様の仕事に対するご配慮によるところが大きく大変感謝しております。

玉岡徳子氏には研究生活を送るにあたり様々な点で助けていただきありがとうございました。玉岡氏との会話はとても楽しいものでした。

また，谷口・馬場研究室での研究生活を共にした研究室メンバーには様々な面で支えて頂きましたこと感謝申し上げます。皆様とは年齢が離れているにも関わらず気さくにお話をさせていただき，大変楽しい研究室生活を送ることができました。特に西川勝也様，河内俊介様のお二人には，清水建設の委託研究もあり，3 年間以上，一緒に多くの研究をさせていただいたこと大変感謝しております。

最後に，公私にわたり支えてくれた家族，友人に感謝の意を捧げ，結びの辞と致します。

## 参考文献

- [1] 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 需給部会「長期エネルギー需給見通し」
- [2] 経済産業省 資源エネルギー庁「新・国家エネルギー戦略」
- [3] エネルギー・環境会議決定「革新的エネルギー・環境戦略」
- [4] 経済産業省 資源エネルギー庁 HP「固定価格買取制度」  
<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/>
- [5] 小島康弘他：「マイクログリッド向け需給制御機能の開発と実証検討」，電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 2, pp.429-436 (2008)
- [6] 島陰豊成他：「新エネルギーの普及を目的としたマイクログリッドにおける分散型電源の需給制御」，電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 1, pp.143-150 (2008)
- [7] 菊池達郎他：「回転機を含む複数種類の分散型電源を用いたマイクログリッドの高電力品質自立運転手法の提案と実証」，電気学会論文誌 B, Vol.129, No.12, pp.1561-1566 (2009)
- [8] J. Baba, et al. : “Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems” , Proc.EPE2005, CD-ROM, Dresden, Germany (2005)
- [9] K. Nishikawa, et al. : “Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems” , Proc.IEEE PES GENERAL MEETING 2008, CD-ROM, Pittsburgh, USA (2008)
- [10] 進士 誉夫他：「分散型電源によるマイクログリッド内の電力変動抑制に関する考察」，電気学会論文誌 B, Vol. 126, No. 1, pp14-20 (2006)
- [11] 天満耕司他：「マイクログリッド自立運転時の電力品質維持手法の提案と開発」，電気学会論文誌 B, Vol. 126, No. 10, pp1032-1038 (2006)
- [12] 新エネルギー・産業技術総合開発機構「平成 15 年度～平成 19 年度成果報告書 新エネルギー等地域集中実証研究 2005 年日本国際博覧会・中部臨空都市における新エネルギー等地域集中実証研究」2008 年
- [13] 新エネルギー・産業技術総合開発機構「平成 15 年度～平成 19 年度成果報告書 新エネルギー等地域集中実証研究 八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」2008 年
- [14] Bob Lasseter, et al. : “The CERTS MicroGrid Concept”, LBNL-50829(2002)
- [15] 電気共同研究「分散型電源技術と電力系統の将来展望」第 56 巻第 4 号平成 13 年 3 月
- [16] 横山 明彦：「新たな電力供給システムの動向と将来展望 総論」，電気学会誌, Vol. 125, No. 3, pp145-148 (2005)
- [17] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group : “Smart Grid Reference Architecture”
- [18] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group : “First Set of Standards”

- [19] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group : “Sustainable Processes”
- [20] 一般財団法人省エネルギーセンターHP「オフィスの省エネルギー」  
[http://www.eccj.or.jp/office\\_bldg/01.html](http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html)
- [21] 川島実他：「空調システム運転制御を対象とした実時間負荷予測手法に関する研究」,  
日本建築学会計画系論文集, 第 484 号, pp.43-51 (1996)
- [22] M. Kawashima, et al. : “Hourly Thermal Load Prediction for the Next 24 Hours by ARIMA,  
EWMA, LR, and an Artificial Neural Network” , ASHRAE Transactions, Vol.101(1), pp.186-200  
(1995)
- [23] Kreider, et al. : “Predictive Hourly Building Energy Usage” , ASHRAE Journal, Vol.36, No.6,  
pp.72-81 (1994)
- [24] 田邊隆之他：「マイクログリッド自立運転時の電気二重層キャパシタ式系統安定化装置  
の制御性能の検証」, 電学論 B, Vol. 129, No. 1, pp.139-147 (2009).
- [25] 植田喜延他：「電気二重層キャパシタ式マイクログリッド系統安定化装置」, 電気学会  
合同研究会 No.PE-08-16, pp25-28 (2008).

## 発表文献

### 査読付学術誌論文

1. 下田英介, 沼田茂夫, 馬場旬平, 正田英介, 仁田旦三:「マイクログリッドにおける負荷変動解析と電源周波数特性評価を用いた複数分散型電源の制御戦略と設備容量設計法」, 電気学会論文誌 B, Vol.129, No.12, pp.1553-1559 (2009)
2. 下田英介他:「72 時間連続自立運転によるマイクログリッド自立運転安定化制御の実証」, 電気学会論文誌 B, (査読中)

### 査読付国際会議論文

1. Eisuke Shimoda, Shigeo Numata, Toshihiro Yamane, Kimio Morino, Jumpei Baba, and Eisuke Masada: “Islanding Operation Control Method of Micro-grid Including Seamless Transition from Grid-connecting Operation”, Proceeding of the International Conference on Power Engineering-09, Vol. 2, pp. 365-369 (2010)
2. Eisuke Shimoda, Shigeo Numata, Jumpei Baba, Tanzo Nitta, and Eisuke Masada: “Operation Planning and Load Prediction for Microgrid using Thermal Demand Estimation”, Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE (2012)

### その他の学会等発表

1. 下田英介, 沼田茂生, 山根俊博, 森野仁夫, 川村正英, 古賀毅, 馬場旬平, 仁田旦三, 正田英介「無瞬断移行を考慮した複数種類分散型電源によるマイクログリッド自立運転制御の開発 2 -ガスエンジンと二次電池による電力品質維持-」, 平成 20 年電気学会全国大会 (2008)
2. 下田英介, 沼田茂生, 山根俊博, 森野仁夫, 馬場旬平, 仁田旦三, 正田英介:「マイクログリッドにおける変動補償用蓄電池の容量設計ー蓄電池容量最小化のためのシミュレーション検討ー」, 平成 20 年電気学会電力・エネルギー部門大会(2008)
3. 下田英介, 沼田茂生, 森野仁夫, 山根俊博:「都市型マイクログリッドの構築と自立運転制御の開発 その3 自立運転制御の開発と電力品質評価」, 平成 20 年建築学会大会(2008)
4. 下田英介, 森野仁夫, 前平三郎, 鈴木茂之, 江崎博俊:「太陽光発電を大量導入したマイクログリッド構築と電力供給安定化技術の開発 (その3) 太陽光発電を有効活用した非常

時の電力供給」，平成 21 年建築学会大会(2009)，

5. 下田英介，沼田茂生，馬場旬平，河内俊介，正田英介，仁田旦三：「非常時を想定したマイクログリッド 72 時間連続自立運転(1) -電力品質の定量的評価-」，平成 22 年電気学会全国大会 (2010)

6. 下田英介，沼田茂生，馬場旬平，正田英介，仁田旦三：「マイクログリッドの自立移行時における蓄電装置の出力制御手法に関するシミュレーション検討」，平成 23 年電気学会全国大会 (2011)

7. 下田英介，中村卓司，山本裕治，沼田茂夫：「蓄電池制御とデマンドレスポンスを組み込んだ BEMS による需給調整技術 ーその 2 蓄電池制御による運用結果ー」，平成 24 年電気学会全国大会 (2012)

8. 下田英介，木原寛之，沼田茂夫：「複数建物の統合エネルギーマネジメントによる全体ピーク電力削減効果の検証」，平成 25 年電気学会全国大会 (2013)

9. 下田英介，佐藤和浩：「スマート BEMS を用いた建物群のピーク電力マネジメント」，平成 25 年電気設備学会全国大会 (2013)

## 付録 A 電力負荷予測に用いた各種データ

表 A.1: 天気予報データ

7/23	0:00-3:00	3:00-6:00	6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	18:00-21:00	21:00-24:00
天気	曇り	曇り	曇り	曇り	曇り	晴れ	晴れ	晴れ
気温	22	21	23	26	27	27	28	25
湿度	92	95	98	84	66	60	68	84

7/24	0:00-3:00	3:00-6:00	6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	18:00-21:00	21:00-24:00
天気	曇り	曇り	曇り	曇り	曇り	曇り	曇り	曇り
気温	25	24	24	28	30	29	29	26
湿度	98	97	94	72	58	56	68	90

7/25	0:00-3:00	3:00-6:00	6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	18:00-21:00	21:00-24:00
天気	曇り	曇り	曇り	曇り	曇り	晴れ	曇り	曇り
気温	28	26	26	29	31	30	30	27
湿度	86	93	94	76	56	60	72	94

7/26	0:00-3:00	3:00-6:00	6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	18:00-21:00	21:00-24:00
天気	曇り	曇り	曇り	曇り	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ
気温	28	28	26	29	32	32	31	29
湿度	94	95	94	74	54	54	68	78

7/27	0:00-3:00	3:00-6:00	6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	18:00-21:00	21:00-24:00
天気	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ
気温	29	28	27	30	32	32	30	29
湿度	80	84	84	70	58	64	76	86

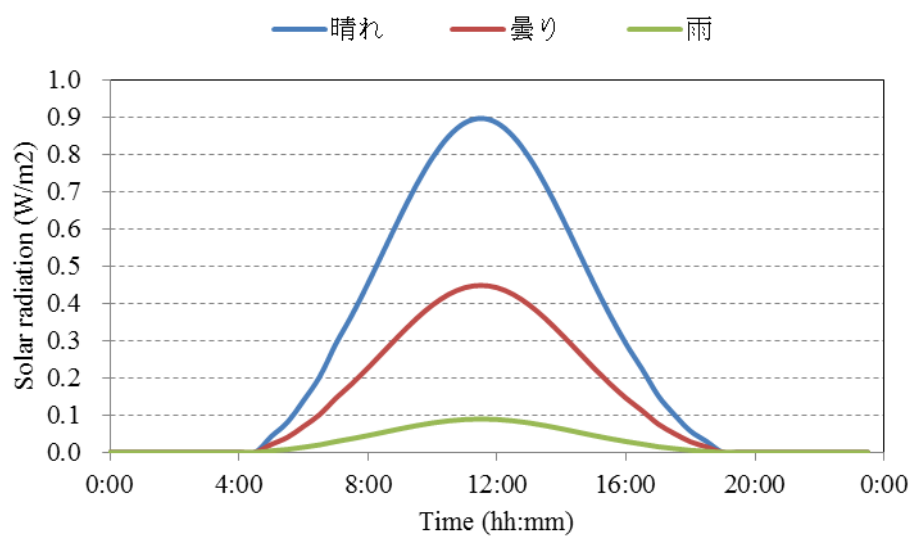


図 A.1: 水平面全天日射量 (パターンデータ)

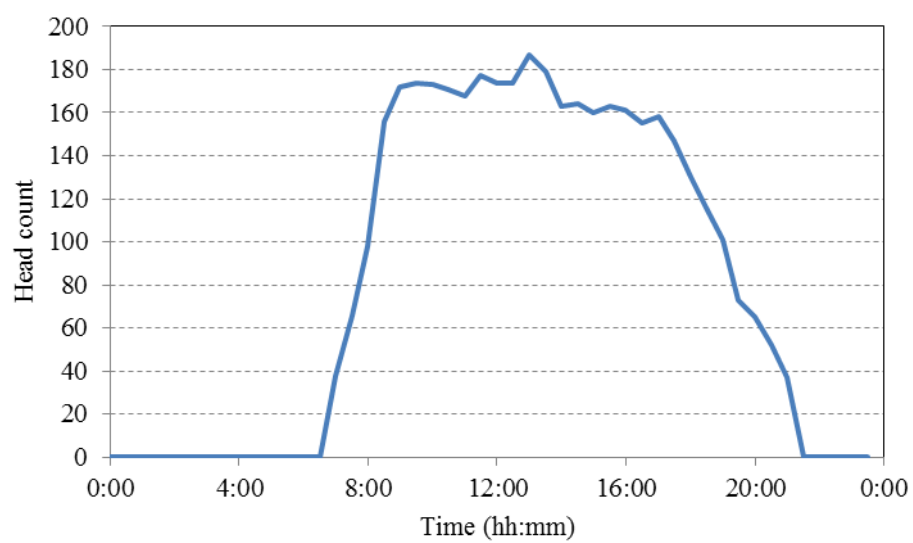


図 A.2: 在館人数 (パターンデータ)