

学位論文 博士 (工学)

電力データ解析に基づく  
電力需要機器制御に関する研究

2018 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

今西 智哉

# 論文要旨

近年の国際的な環境意識向上に伴い、低炭素社会に向けたエネルギー効率向上に関する技術開発が進み、従来の電力網へ情報通信技術を融合した分散型電源インフラ(スマートグリッド)が注目されている。IEEE に代表される国際標準化団体によりスマートグリッドに関する技術標準が策定されつつあり、電力需要機器および分散電源の相互接続・相互運用に関する実証実験の重要性が増している。電気自動車(EV)の電力ストレージを利用した電力系統応用(V2G)や、マルチベンダからなる分散電源と電力需要機器を統合制御する管理システム(EMS)は、スマートグリッドを実現する上で重要な技術である。本研究では、これらの重要な技術に関連して以下の2種類のエネルギーサービスを提案した。一つ目は、駐車場の充電インフラ制御、二つ目は、教育施設の空調機器制御である。

一つ目のエネルギーサービスである、駐車場の充電インフラ制御では、EVバッテリーにより電力負荷平準化の効果を評価するシミュレータを構築し、福江港ターミナルビルおよび敷地内の駐車場情報を活用して評価した。国際標準に関する議論に基づき、EV バッテリーのモジュール化に基づいた複数のバッテリー交換方式に着目した。また、当時現実的なパラメータを用いた評価が少なかったため、大容量リチウムイオン二次電池を搭載した実際のEVが持つ物理パラメータを活用した。需要側のパラメータについても現実的な値を得るため、実際にビルに導入したセンシング環境の情報を用いて決定した。バッテリーの制御手法として、ファジィを用いた制御手法、電力負荷平準化と充電量回復を考慮した逐次制御手法を使用した。シミュレーションの結果、面積 2335 [m<sup>2</sup>]、平均電力需要 26.6 [kWh]、駐車場 202 台分の福江港ターミナルビルの駐車場において、EVの導入量を決定するパラメータを、バッテリー交換が不可能な場合では40台、可能な場合では31台と設定すると、充電設備と制御コントローラを利用して充電と放電を制御することで、少なくとも1日の最大受電電力が5 [kW]カットできる結果を示した。今後、充電設備の導入が加速する大規模な電力需要施設および公共施設にて本手法および結果が活用可能であり、スマートグリッドにおける有力なエネルギーサービスとしての提供が見込まれる。

二つ目のエネルギーサービスである、教育施設の空調機器制御では、知的生産性の評価指標、換気管理環境下で利用可能な人数推定手法、そしてマルチベンダからなる空調制御機器を統合した、省エネ効果の実験環境を構築した。2011年に採択された国際標準規格に基づき、マルチベンダからなるビル設備の統合制御環境を構築した。従来、温熱指標および空気質環境それぞれから独立して構築されていた知的生産性指標を統合し、快適性とCO<sub>2</sub>濃度から算出する知的生産性指標を提案した。さらに、知的生産性の算出に必要な在室人数情報を取得するため、プライバシーを考慮しつつ温湿度・CO<sub>2</sub>濃度センサの情報から在室人数を推定する手法を採用した。知的生産性を考慮したピークカット制御の省エネ効果を評価するため、大学教育棟にて空調制御実験を行なった。実験の結果、快適性指標を用いて同様の空調制御を行う延べ床面積が1990 [m<sup>2</sup>]の教育施設に対し、室内の知的生産性を維持しつつ、冬季のピーク電力を10%カット、さらに一日9.5 [kWh]電力量削減できる結果を示した。既築の建物への構築が容易である本EMSは、知的生産性の維持と快適性を両立する教育施設・オフィスの有効な実現手法であり、スマートグリッドの省エネ効果を底上げする上で効果的な手段と言える。

# Thesis Abstract

## A study of power utilizing equipment control based on electricity usage analysis

In recent years, development of technology for high energy-efficiency targeting low-carbon society advances day by day as the attention to global environmental grows. Smart grid is a new electricity grid architecture as a fusion of conventional power-grid and Information and Communication Technology (ICT). Since global standards communities such as IEEE are developing frameworks of smart grid's technology, experiments of inter-connected power demand devices and distributed energy resources are highly required. In this situation, Vehicle-to-Grid (V2G) and Energy Management System (EMS) are key technologies for attaining smart grid. V2G manages batteries of EVs for maintaining power grid, and EMS is a unified control system of electric devices. In this research, two energy services are presented: control system of charging infrastructure at a parking lot and that of heating and ventilating devices at an educational facility.

For the first energy service, the effect of power demand leveling was simulated by using EV batteries based on information obtained at Fukue port terminal building and its parking lots. This simulator focused on evaluating the differences in different EV battery exchange methods from the perspective of the global issue of concerning standards. The realistic evaluation which uses actual parameters was not conducted in this kind of evaluation. Therefore, in this study, a physical parameter of actual EV batteries of a large-scale lithium-ion battery was used for the simulator. Actual demand-side parameters at the simulation were also defined according to the result of long-term observation of the target building. As the EV battery exchange methods, the fuzzy-based method and sequential-based method considering power demand leveling and SOC recovery of a battery were proposed and evaluated. The simulation results showed that at least 5 [kW] of maximum electricity usage was saved in a large building with floor space of 2335 [m<sup>2</sup>], the average power consumption of 26.6 [kWh], and the amount of 202 parking spaces and EV charging station when the EV introducing parameter was defined as 40 cars in fixed-battery type model and as 31 cars in removable battery type model. Since the proposed methods and results can be applied to commercial and public large-scale buildings of larger power demand, these methods are expected as promising energy services using smart grid.

For the second energy service, HVAC control experiments using educational facilities were conducted by constructing experimental environment unifying the following three elements: an indoor index considering intellectual efficiency, a measuring method of counting number of people in a room which is applicable to a ventilation controlled environment, and integration of multi-vendor HVAC devices. As the integration of multi-vendor HVAC devices, the proposed control system was based on a global standard approved in 2011. This research proposes productivity measurement index using both thermal comfort and concentration of carbon dioxide that are defined individually. To obtain the number of persons in a room, which is required to measure the productivity index, an estimation method of persons by using environmental sensors of temperature, humidity, and concentration of carbon dioxide was developed for preserving privacy. The effect of energy saving method using the proposed

indoor index was evaluated by conducting peak-cut control experiments at lecture room building of a university. As a result of the experiment, the intellectual productivity of the proposed index maintained enough in the target lecture room, and the method saved daily energy usage by 9.5 [kWh] and 10% of peak demand in winter compared with a method using general comfort index when applied to the educational building with floor space of 1990 [m<sup>2</sup>]. The proposed EMS has high applicability to existing educational or working facilities and shows the impact of improving energy saving effect by using smart grid.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>1</b>
1.1	論文の構成 .....	2
<b>第2章</b>	<b>スマートグリッドの背景</b> .....	<b>4</b>
2.1	地球温暖化問題 .....	4
2.1.1	地球温暖化が及ぼす影響と国際的合意 .....	4
2.1.2	国際的合意が技術開発へ与える影響 .....	5
2.1.3	我が国における環境エネルギー技術の位置付け .....	6
2.2	スマートグリッドの導入による従来電力網の変化 .....	6
2.2.1	スマートグリッドの研究経過 .....	7
2.2.2	スマートグリッドに関わる国際標準化案件 .....	10
2.3	2章のまとめと本研究の位置付け .....	12
<b>第3章</b>	<b>EV市場の動向とVehicle-to-Gridに関する研究</b> .....	<b>16</b>
3.1	EV市場の動向 .....	16
3.1.1	EVの車両導入動向 .....	16
3.1.2	充電インフラの整備導入率拡大 .....	17
3.1.3	電力市場とV2Gの位置付け .....	18
3.1.4	EVバッテリーのモジュール化に関する国際的議論 .....	20
3.2	ストレージ運用に関する既存研究 .....	20
3.2.1	Regulation (周波数調整) .....	22
3.2.2	蓄電池を用いたピークカット .....	24
3.3	3章のまとめ .....	26
<b>第4章</b>	<b>室内環境の評価指標に関する研究</b> .....	<b>29</b>
4.1	温熱快適性(PMV: Predictive Mean Vote)の指標 .....	29
4.2	CO <sub>2</sub> 濃度が意思決定に与える影響 .....	30
4.3	知的生産性に関する既存研究 .....	32
4.3.1	空気質環境に関する既存研究 .....	32
4.3.2	室内温度と学習効率 .....	33
4.4	換気量と室温が居室の学習効率へ与える影響 .....	33
4.4.1	換気量と学習効率の関係 .....	33
4.4.2	室温と学習効率の関係 .....	36
4.4.3	CO <sub>2</sub> 濃度と室温が作業効率へ及ぼす直接的影響の評価 .....	37
4.5	建物の温熱特性 .....	39
4.5.1	熱移動の概要 .....	39

4.5.2	建物の熱取得, 熱損失.....	42
4.6	4章のまとめ.....	49
<b>第5章</b>	<b>ファジィ制御を用いた仮想蓄電池の実装提案.....</b>	<b>52</b>
5.1	本エネルギーサービスの動機.....	52
5.2	提案研究の概要とモデリング.....	52
5.2.1	想定システム概要.....	53
5.2.2	Plant モデル.....	55
5.2.3	コントローラモデル.....	61
5.3	最も厳しい運用スケジュール.....	70
5.3.1	EVの発着スケジュール.....	71
5.3.2	最も厳しい負荷・太陽光発電スケジュール.....	77
5.3.3	ストレージ導入容量決定条件.....	79
5.4	シミュレーションの運用・評価条件.....	81
5.4.1	FLIBSの運用条件.....	81
5.4.2	IEVBSの運用条件.....	82
5.4.3	MEVBSの運用条件.....	82
5.4.4	シミュレーションの評価条件.....	83
5.5	提案研究のシミュレーション結果と評価.....	84
5.5.1	ストレージ容量決定シミュレーションの結果と評価.....	84
5.5.2	長期運用シミュレーション結果と評価.....	86
5.5.3	MEVBSモデル.....	88
5.5.4	考察.....	88
5.5.5	提案手法の拡張可能性について.....	90
5.6	本章のまとめ.....	90
<b>第6章</b>	<b>建物の知的生産性指標と制御手法の提案.....</b>	<b>92</b>
6.1	本エネルギーサービスの動機.....	92
6.2	室内環境評価指標.....	92
6.2.1	従来の室内環境評価指標.....	92
6.2.2	CO <sub>2</sub> 濃度の変化から導出する在室人数推定.....	94
6.2.3	提案する学習効率指標.....	98
6.3	実験環境.....	100
6.3.1	建物とセンサ類.....	101
6.3.2	システムの全体図.....	104
6.4	優先度付き空調制御手法の提案.....	104
6.4.1	空調機の制御手法.....	105
6.4.2	全熱交換器の制御手法.....	106
6.4.3	アンケートによる快適性の調査.....	107
6.5	室内温度変化の要因とシミュレーションによる検証.....	107

6.5.1	実験環境特有の温熱モデル設計 .....	108
6.5.2	パラメータの設定 .....	109
6.5.3	シミュレーション結果 .....	111
6.6	空調機器制御による提案指標の評価 .....	111
6.6.1	学習効率指標に関する事前実験 .....	111
6.6.2	実験と評価 .....	112
6.7	本章のまとめ .....	114
<b>第7章</b>	<b>結論 .....</b>	<b>115</b>

---

# 目次

図 1 (a) 従来の電力網. (b) スマートグリッド <sup>8</sup> .....	8
図 2 IEEE1888 で構築されるシステムアーキテクチャ <sup>24</sup> .....	11
図 3 本研究の対象とするインフラ概要図 .....	13
図 4 各章の内容と位置付けに関する概要図 .....	15
図 5 各国の EV・PHV の販売台数の推移 <sup>26</sup> .....	17
図 6 周波数偏差に対する V2G 制御の垂下特性 <sup>42</sup> .....	23
図 7 SOC に応じた V2G ゲインの抑制特性 <sup>42</sup> .....	23
図 8 太田らの V2G シミュレーション結果 <sup>42</sup> .....	24
図 9 CO <sub>2</sub> 濃度が意思決定能力に与える影響 <sup>55</sup> .....	31
図 10 9つの試験結果を CO <sub>2</sub> 濃度ごとにパーセンテージ表記した結果 <sup>55</sup> .....	32
図 11 予備校での学習効率実測手順 <sup>54</sup> .....	34
図 12 一人当たりの換気量と PMV の結果 <sup>59</sup> .....	35
図 13 換気量と学習効率に関する対応関係 <sup>59</sup> .....	36
図 14 作業効率と CO <sub>2</sub> 濃度・室温の応答曲面モデル <sup>71</sup> .....	38
図 15 RC 等価回路による温熱表現(2R1C) .....	42
図 16 1 部屋の RC 回路表現 .....	43
図 17 (a)壁面の温度変化モデル. (b)室内側の対流層 .....	43
図 18 直達日射と大気層 .....	46
図 19 提案するシミュレーションモデルの概要図 .....	53
図 20 FLIBS モデルの全体図 .....	55
図 21 FLIBS のリチウムイオンバッテリーモジュールモデル図 .....	55
図 22 FLIBS のインバータモジュールモデル図 .....	56
図 23 IEVBS モデルの全体図 .....	57
図 24 EV バッテリーモジュールモデル図 .....	57
図 25 MEVBS モデルの全体図 .....	58
図 26 系統電源モデル .....	59
図 27 負荷モデル .....	59
図 28 PV システムの全体図 .....	61
図 29 PV パネルのモデル図 .....	61
図 30 パワーコンディショナのモデル図 .....	61
図 31 SOC のメンバシップ関数 .....	65
図 32 時刻 t のメンバシップ関数 .....	65
図 33 $\alpha$ のメンバシップ関数 .....	65
図 34 CDCF で用いるファジールールの例 .....	67
図 35 カメラ情報から得た EV 利用情報(2011/9/9~9/15, 10/9~10/15 のデータ).....	71
図 36 作成したランダムスケジュールから算出した駐車確率と実際の駐車確率の比較 ..	72
図 37 EV 利用スケジュール決定プロセス .....	73



図 38 IEVBS の EV 利用状況反映の参考図 .....	74
図 39 MEVBS の EV 利用状況反映の参考図 .....	74
図 40 最も厳しい駐車確率, 到着・出発確率(IEVBS) .....	76
図 41 最も厳しい MEVBS 利用スケジュール(10 スロット分).....	76
図 42 一日単位での平均実負荷電力 $L_r(d)$ と統計上下限值.....	78
図 43 最大受電電力の平均値と $\beta$ の関係.....	85
図 44 ストレージ毎の比較 (a) 運用手法毎の容量決定. (b) 運用手法毎の料金設定 ....	89
図 45 PMV と相対学習効率の関係 <sup>59</sup> .....	94
図 46 換気量別人数推定結果 (a) 0[Hz] (b) 20[Hz] <sup>85</sup> .....	95
図 47 換気量別人数推定結果 (c) 36[Hz] (d) 50[Hz] <sup>85</sup> .....	96
図 48 大教室における人数推定結果 .....	97
図 49 $RLE_{pmv}$ と $RLE_{ven}$ の合算から算出した学習効率指標.....	99
図 50 室内評価指標として使用する指標(図 49)と既存研究の関係図 .....	99
図 51 矢上キャンパス 12 棟. 左上:外観. 右上:大教室. 左下:中教室. 右下:小教室	100
図 52 矢上キャンパス 12 棟の 1F(上図)と 2F(下図)の間取り .....	101
図 53 SII センサの設置図 .....	102
図 54 制御対象機器 (a)全熱交換器 (b) 室外機.....	102
図 55 制御環境構築 (a) OpenBlocksAX3 と PLC, (b) G150AD.....	103
図 56 構築した EMS の概要図.....	105
図 57 空調稼働状態 .....	105
図 58 アンケート調査ご協力のお願いと QR コード .....	107
図 59 アンケートフォーム .....	107
図 60 太陽の軌道 (a) 太陽高度 (b) 太陽方位 .....	109
図 61 室内環境 (a) SAT (b) 全天日射量 .....	110
図 62 ガスヒートポンプの稼働状況と温熱収支モデルのシミュレーション結果 .....	111
図 63 提案指標の事前実験 (a) 提案学習効率指標 (b) PMV .....	112

# 表目次

表 1 京都議定書目標達成計画における 2010 年度の目標値と実際 <sup>4</sup> .....	7
表 2 スマートグリッドに関連した周辺状況と研究の経過 .....	13
表 3 経産省が試算する, 対象施設ごとの設置目標目安 <sup>26</sup> .....	18
表 4 負荷追従運転と固定運転のシミュレーション結果 <sup>43</sup> .....	26
表 5 EV および V2G に関する研究年表 .....	28
表 6 PMV の適応範囲, および7段階評価尺度 <sup>48</sup> .....	30
表 7 換気量の設定条件 <sup>59</sup> .....	34
表 8 現地実測の条件 <sup>59</sup> .....	37
表 9 現地実測の測定結果 <sup>71</sup> .....	38
表 10 自然対流熱伝達率 $\alpha c$ .....	44
表 11 SC と SHGC の値 <sup>79</sup> .....	49
表 12 室内環境が知的生産性へ及ぼす影響に関する研究年表 .....	51
表 13 モデリング対象の名称と分類 .....	53
表 14 提案するシミュレーションモデルの概要図 .....	54
表 15 バッテリー制御コントローラにおける変数 .....	63
表 16 充電台から得られた情報 .....	71
表 17 最も厳しい EV 利用スケジュールの決定で利用した変数 .....	75
表 18 最も厳しい電力条件決定のためのパラメータ .....	77
表 19 2011/8/4~8/17 の統計上限値 .....	79
表 20 ストレージ容量決定の際に定義した変数 .....	79
表 21 業務用季時別電力 A 契約の電力価格 .....	84
表 22 FLIBS 運用シミュレーションの結果 .....	86
表 23 IEVBS 運用シミュレーションの結果 .....	87
表 24 IEVBS 運用結果と SSPDM の結果の比較 .....	87
表 25 MEVBS 運用シミュレーションの結果 .....	88
表 26 在室人数推定の各種パラメータ .....	95
表 27 換気量と推定誤差 .....	97
表 28 制御対象となる部屋の情報 .....	102
表 29 ガスヒートポンプの定格情報 .....	102
表 30 全熱交換器の定格情報 .....	103
表 31 すきま風を表すパラメータ .....	109
表 32 壁面, 窓の熱抵抗, 熱容量, g-value .....	110
表 33 冬季実験の結果 .....	113

---

# 第1章 はじめに

パリ協定に代表される国際的な気象変動に関する対策が具体化するに伴い、世界的に省エネ意識が向上している。エネルギー面では、従来の化石燃料を中心とした大規模集中型発電方式から、太陽光・風力を中心とした小規模分散型の発電方式へと変化している。このような社会的背景を反映し、さらなるエネルギー効率の向上、それによる低炭素社会の実現、そして負担の大きい電力網の維持管理コスト削減といった需要が高まっている。そこで、従来の電力網と ICT を融合した新しい電力インフラであるスマートグリッドが注目されるようになった。スマートグリッドは、電力需要家側に設置されたスマートメーターによって取得されたデータなど、様々な電力に関するデータを活用し、電力需給や分散電源の充放電状態を勘案した様々なエネルギーサービスの提供を可能とする。さらに 2010 年頃には、交通、オフィス、住環境といった複数インフラに対して ICT を融合させ、さらに情報統合した新しい概念であるスマートコミュニティへと発展した。スマートコミュニティは、電力データだけに留まらず、生活スタイルや健康状態、その他各種インフラによって生成されたデータなど多岐にわたる情報を活用することで、地域の生活に密着した中小規模でのサービスの実現を目指した取り組みである。

このような、スマートグリッド・スマートコミュニティの技術開発で重要となるのが、複数の異なるベンダによって提供されたデバイスを多数内包したシステムにおける、機器同士の相互接続性・相互運用性の保証である。IEEE などの国際標準化団体が包括的な技術フレームワークを議論する中、ユースケースとして国際的議論に基づいた制御インターフェース、データフロー等の設計、および実証実験により得られる知見の重要性が増大している。そのため、スマートグリッドの構築を通して、関連要素技術の実装、実装したインフラ上で想定される効果的なエネルギーサービスの提案と評価、さらには将来的なスマートコミュニティまで見据えた高い拡張性を兼ね備えたサービスの検討が国際的に行われている。我が国においても、2009 年に国内 12 都市を対象に選定された、EV・PHV タウン、および次世代社会システム実証地域にて、エネルギーサービスを始めた次世代インフラで想定されるサービスの実証が行われた。これらの構想において、低炭素社会の実現と住民の QoL (Quality of Life) 向上を両立する重要な技術として着目されているのが、電力需要家側から電力の需給調整へ貢献するデマンドレスポンスと呼ばれる技術である。このデマンドレスポンスの構成する重要な要素技術として、電気自動車(EV)のバッテリーを電力系統と結合した V2G (Vehicle-to-Grid)、系内のバッテリーや電力需要機器を有効活用する管理システム EMS (Energy Management System) が挙げられる。

以上の状況から、本論文ではスマートグリッドにおいて想定されているサービスのうち、電力データの解析や人・物・場所など実在する環境に基づいたエネルギーサービスの効果を、国際的な議論を踏まえつつ実験により評価する。これにより、利用者の行動や感覚への影響も考慮して省エネ・電力コスト削減を実現するなど、スマートなエネルギーサービスの提案を行うことを目指した。具体的には、人の行動に対しロバストな駐車場の充電インフラ制御、そして人の感覚を考慮した教育施設の空調機器制御を行った。

一つ目のエネルギーサービスである駐車場の充電インフラ制御では、EV ストレージを用いた電力負荷平準化を実証した。国際標準化案件にて議論の対象となった、異なるバッテリー交換

---

方式を用いた場合の V2G への影響を, 2010 年時点で初めて評価した. また, 当時は現実的なパラメータを用いた評価が少なかったため, 大容量かつ大量生産可能な実在する EV の物理パラメータを活用しシミュレータを構築した. このシミュレータを構築するにあたり, EV・PHV タウン構想の一環として選定された長崎県福江島のターミナルビル, 急速充電設備, 駐車場の利用情報を1年間観測し, 取得したデータをもとに異なるバッテリー交換方式ごとの V2G モデルを設計した. そして, 対象地域において主要な交通施設である福江港ターミナルビルの電力負荷に対する V2G の平準化効果をシミュレーションにより評価した. 以上, 駐車場の充電インフラ制御により, バッテリーモジュール化に関する国際標準化案件への貢献, さらには今後導入が拡大する大規模施設の充電設備を積極的に利用したエネルギーサービスの検討を行った.

二つ目のエネルギーサービスである教育施設の空調機器制御では, 知的生産・環境センシング・マルチベンダ機器の制御を統合した建物の EMS による省エネ効果について実証した. 従来, 独立して研究されていた温熱快適性・空気質環境と知的生産性に関する関連研究に基づき, 温熱快適性・空気質環境を両立した新たな知的生産性指標を提案した. 知的生産性の算出に必要な情報を取得するため, オフィスや教育現場等の機密性の高い環境下で利用可能な, 環境情報の推定手法を採用した. そして, スマートグリッド内の建物へ EMS を構築する際に相互接続性・相互運用性を担保することを目的とした国際標準規格に基づき, マルチベンダの統合制御環境を構築した. 知的生産性指標を用いた空調機器制御の省エネ効果を評価するため, 教育施設の空調機器に対し, 2013 年時点で一般的なデマンドレスポンスサービスとして実施されていたピークカット制御を行った. 以上, 教育施設の空調機器制御により, マルチベンダからなるビル設備の統合・連携に関する国際標準化案件へ貢献し, スマートグリッドにて主要な電力需要家となる既築の建物を対象としたエネルギーサービスの検討を行った.

## 1.1 論文の構成

本論文は全 7 章により構成される. それぞれの章の概要は以下の通りである.

- 第 1 章:はじめに
- 第 2 章:スマートグリッドの背景
- 第 3 章:EV 市場の動向と Vehicle-to-Grid に関する研究
- 第 4 章:室内環境の評価指標に関する研究
- 第 5 章:ファジィ制御を用いた仮想蓄電池の実装提案
- 第 6 章:建物の知的生産性指標と制御手法の提案
- 第 7 章:本研究のまとめ

第 2 章では世界的な環境意識向上と, スマートグリッドの研究背景について述べる. 第 3 章では電気自動車導入に関する動向と仮想蓄電池の既存研究について紹介する. 第 4 章では室内の温熱環境, 空気質環境と, 作業効率, 相対学習効率の関係性について関連研究を紹介し, その問題的について言及する. 第 5 章では駐車場の充電インフラ制御について述べる. 第 6 章で, 教育施設の空調機器制御について述べる. そして第 7 章で本論文の結論を述べる.

---

なお、技術標準化委員会においては、バッテリーという呼称よりも、より一般的なストレージと呼称することが多い。これは、リチウムイオンのように化学的物質状態の差によりエネルギーを蓄えるバッテリーの他に、蓄熱セラミックなどを用いて熱でエネルギーを蓄える方式や、フライホイールなど運動によってエネルギーを蓄える方式など、様々な手段も想定されるためである。また、化学的なエネルギー保存手段であっても燃料電池 (fuel cell) は英名ではバッテリー (battery) という表記が含まれない。このような理由から、まとめてエネルギーストレージ、単にストレージと呼称する方が望ましいとされている。本論文においても、はエネルギーストレージをバッテリーに限定しないという考え方から、以降、標準化委員会でも一般に用いられるストレージという呼称に統一する。ただし、EV バッテリーなど、リチウムイオンバッテリーといった電池を明確に指すことができる場合にはバッテリーと表記する。

また、本論文において、単位を付与する場合には、次のルールに従って表記する。

- 変数文字と単位記号が合わさることによる、視認性の低下を避けるため、[括弧]を用いて表記する。例えば、E [W]と表記する。
- これに倣い、数字に単位を付与する場合も同様に表記する。例えば、1 [W]と表記する。
- このように、SI 単位系の併用単位、および SI 単位系に準じる単位について[括弧]の表記を用いる。
- 一方で、台数など、計数における慣習的な表現は日本語において単位とみなす場合もあるが、異なる言語、例えば英語では表記されない場合がある。特定の言語に依存する単位の表記は望ましくないため、これら SI 単位系に含まれない場合は直接表記する。例えば、1 台や 1 人と表記する。
- 1 時間や 1 時間後、1 週間、1 年といった時間・時刻表記については時間の単位を有するが、[時間]といった表記を文中で用いることが殆ど行われないため、慣例的な表記として直接記載する。なお、あくまでも慣例としての対応であり、[y], [h], さらに[s]といった表記はこれを用いる。同様に慣例的な表記として、years, hours, seconds については直接表記する。
- パーセントやパーセンタイル(%で表記)は一般に無次元であるため、単位とはみなさず直接表記する。ppm (parts per million)も割合であり一般に無次元である。従って、単位とみなさず直接表記する。これは、例えば  $10^2$  を  $10E2$  と表記することはあるが、 $10(E2)$ と表記する例がないことに倣っている。
- パーセントやパーセンタイルを表記の注釈として明記したい場合は、[%]と記載する。例えば、SOC [%]や効率 [%]は、SOC および効率について%で表記することを示す注釈である。
- 固有名詞に単位が含まれる場合や、参考文献における表中の表記など、オリジナルに対して修正なく記述することが求められる場合などは、これに従う。

---

## 第2章 スマートグリッドの背景

### 2.1 地球温暖化問題

本章では、電力需要機器制御が重要視されるようになった経緯として、地球温暖化問題がもたらす環境への影響について紹介する。さらに、政府間で進んだ環境問題への国際的合意と、それによる民生部門の省エネ意識向上の流れについて述べる。

#### 2.1.1 地球温暖化が及ぼす影響と国際的合意

1950年代以降、直接観測や、衛星及び他の観測プラットフォームによる遠隔測定などの手段により、世界規模での気候システムの観測が行われてきた。気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の第5次評価報告書(Summary for Policymaker)<sup>1</sup>によると、気候システムの温暖化には疑う余地がなく、また1950年代以降に観測された変化の多くは、数十年から数千年間にわたり前例のないレベルである、と記載されているように、異常とも言える値の変化が観測されている。第5次評価報告書には、大気と海洋の温暖化、雪氷量の減少、海面水位の上昇、温室効果ガス濃度の増加などにおいて、異常な変化が報告されている。これらは、気候変動に関する国際連合枠組条約(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)をはじめとする、地球温暖化に対する国際的な取り組みに科学的根拠を与える重要な資料である。

2014年に発表された第5次評価報告書において、温暖化の原因が人間活動に起因する可能性が極めて高い(95%~100%)と過去初めて報告された。報告書の作業部会は、近年の気候変化をシミュレーションにより再現する気候モデルを構築し、大規模火山噴火直後の寒冷化、20世紀半ば以降のより急速な温暖化など、観測された大陸規模の数十年にわたる変化傾向を高精度に再現した<sup>1</sup>。この気候モデルをもとにシミュレーションによる検証・分析を行った結果、温暖化は太陽活動や火山がもたらすエネルギー収支の変化が原因ではなく、人為的影響が支配的な原因であった可能性が極めて高い(95%以上)という結果が得られた。

第5次評価報告書は、温暖化が海洋の温度や水質へ及ぼす影響についても報告している。海洋の温暖化は、気象システムに蓄積されたエネルギーの影響を受けており、1971~2010年の間に気象システムへ蓄積されたエネルギーの90%以上を海洋が蓄えているとしている。特に、気候システムの正味のエネルギー増加量の60%以上が海洋の表層部分へ蓄積され続けており、30%は水深700以上深へ蓄積され続けているという分析結果が発表された。また、1901~2010年の期間に、世界平均海面水位は0.19[m]上昇したと報告された。さらに、大気・海洋中のCO<sub>2</sub>濃度増加も大きな問題となっている。大気中の温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oは、少なくとも過去80万年間で前例のない水準にまで増加した。第5次評価報告書では、CO<sub>2</sub>濃度は大気中だけでなく海洋中でも増加しており、海洋は排出された人為起源のCO<sub>2</sub>のうち約30%を吸収していると発表している。以上のように、地球温暖化の影響は気温上昇だけでなく、海洋にも多大な影響を与えていることがわかる。

環境問題で特に注目すべき点として、CO<sub>2</sub>の排出量増加が挙げられる。近年の急激な自然

---

環境における熱エネルギー量の増加は、人為起源の CO<sub>2</sub> が原因であるとされており、CO<sub>2</sub> 排出量削減に着目した国際的議論が行われている。IPCC の発表では、具体的な温暖化に関する分析結果として以下の点が指摘された。

- 今世紀末の気温上昇は、厳しい温暖化対策が取られなかった場合は 2.6～4.8 [°C] 上昇し、人間と地球の自然体系へ不可逆なリスクが発生する。
- 今後数十年間の大幅な温室効果ガス排出削減が極めて重要である。
- 世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べ 2 [°C] 未満に抑えるためには、2050 年までに CO<sub>2</sub> 排出を 40～70% 削減し、今世紀末までに排出をほぼゼロにする。

### 2.1.2 国際的合意が技術開発へ与える影響

CO<sub>2</sub> 排出削減目標の取り決めは、エネルギー面での技術開発目標へ影響を及ぼしている。2005 年に開催された G8 Gleneagles Summit において G8 から依頼を受けて以降、IEA (International Energy Agency) は有望な温暖化対策を特定するため数々のロードマップを作成している。この IEA は隔年で ETP (Energy Technology Perspectives)<sup>2</sup> を刊行しており、2050 年に向けた温暖化抑制シナリオ (The 2°C Scenario: 2DS) の達成には、以下の 3 分野のエネルギー面における対策が不可欠と発表した。

高度に統合された分散型スマートエネルギーシステム

- 電源の転換と低炭素化
- エネルギー効率の劇的な改善

スマートなエネルギーシステム構築に不可欠な要素として、建築分野の技術革新が挙げられる。IEA が 2013 年に刊行した建築分野における 2DS 達成に向けた計画では、要改善分野の第一に省エネルギー基準の設備を挙げており、次いで住宅を対象とした省エネルギー改修の実施、冷暖房換気・照明設備の技術開発と普及などを重要視している。特に、2014 年から 2019 年までの優先度の高い研究テーマとして、「普及可能性の大きさを考慮した省エネ改修手法」「電力需要ピーク対策」「建築設備の制御手法」「建物使用条件を考慮した設備の最適化」などを挙げるとともに、新しい技術開発より既存技術の普及における現実的な課題の克服に主軸が置かれ始めている。

IEA や IPCC は各国政府機関や環境団体を主なターゲットとして目標を掲げた。一方国連が定めた持続可能目標 SDGs<sup>3</sup> (Sustainable Development Goals) は、産業界の直接的な取り組みをターゲットとしている。産業部門でのエネルギー消費削減は、環境問題だけでなく、貧困、飢餓といった、様々な社会問題と密接に関係しており、SDGs では社会全体の問題を包括的に解決する目標設定を掲げている。初期の傘下組織に、ユニリーバ、コカコーラ、ペプシと言ったメジャーな企業が参加しており、SDGs の達成に向けて様々な企業間プロジェクトを進めている。ユニリーバ CEO であるポール・ポールマン氏は、2016 年の世界経済フォーラム (ダボス会議) で世界の企業リーダーと SDGs を達成する委員会「GCBSD (The Business and Sustainable Development Commission)」を立ち上げた。さらに、2016 年にロックフェラー財団が化石燃料への投資から撤退したように、企業評価面でクリーンエネルギー・持続可能性への技術貢献が重要視される傾向

---

が顕著となっている。今後の先進各国が企業への投資を判断する上で、SDGs が代表的な評価指標として扱われるようになったといえよう。このように、国際問題・環境問題対策は、従来の国や行政主導から、電力消費の大きい産業界を巻き込んだ、戦略的かつ国際的な取り組みへと変化している。

以上のように、政府間の合意として進んできた CO<sub>2</sub> 排出量削減目標は、産業部門の直接的なクリーンエネルギー技術開発を活発化させた。特に、既存の建物への省エネルギー改修、産業部門の積極的な環境技術開発が重要視されている。注目されている技術として、省電力化や電力需要平準化を達成する空調機器・エネルギーストレージ等の電力需要機器制御があげられる。

### 2.1.3 我が国における環境エネルギー技術の位置付け

我が国のエネルギー問題に対する取り組みの課題として、民生部門の省エネ化が挙げられる。地球温暖化対策の根幹をなす京都議定書において、我が国の削減約束の達成見込みが平成 25 年に発表された<sup>4</sup>。表 1 における森林吸収量等を含めると、我が国の温室効果ガス削減約束の達成は確実にとなったものの、民生部門(業務その他部門・家庭部門)については結果が目標値を上回った。このように、本研究が実施された 2010 年前半では、企業や家庭のエネルギー消費を削減する優先度が極めて高かった。

京都議定書と並行し、我が国における温室効果ガス削減の中長期目標についてもいくつか議論されている。これらの計画は、東日本大震災と原子力発電所事故により見直しを余儀なくされたものの、平成 25 年には、第 2 次安部内閣が「2050 年までの世界全体の温室効果ガスの削減量半減、先進国全体で 80%削減を目指すという目標を達成することを改めて掲げる」とした。この戦略では、同時に見直された総合科学技術会議の「環境エネルギー技術革新計画<sup>5</sup>」を重視し、2020 年までの当面の温室効果ガス削減目標として、原子力発電による効果を含めずに 2005 年度比で 3.8%の確実な削減が必要とされる。この環境エネルギー技術革新計画では、37 種類の革新的技術が着目され、削減効果の大小、市場規模、官民の役割分担、技術の成熟段階に関して評価が行われている。

温室効果ガス排出量が依然増加している民生部門についての環境エネルギー技術は大きく 3つ(生産供給, 消費需要, 需給統合)に分類されている。生産供給分野で重要視されるのは太陽光発電, そして太陽熱利用である。一方で消費需要に関する分類は、革新的なデバイス開発, EMS (Energy Management System), 省エネ住宅・ビル, 高効率ヒートポンプである。さらに、これら需要・供給領域を統合制御する需給統合に関する分類は、燃料電池, バッテリー, そして蓄熱・断熱技術である。この計画の特徴は「革新的技術」と「既存研究」を整理しなおし、「既存技術の向上と普及が重要である」と極めて現実的なロードマップを描いた点にある。真新しい技術のみが革新なのではなく、既存技術で有望なものへこそ普及に向けた技術革新を加えることが、我が国の地球温暖化対策としてなすべきことであるとしている。

## 2.2 スマートグリッドの導入による従来電力網の変化

我が国では、2014 年 6 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」および 2015 年 7 月に策定された「長期エネルギー需給見通し(エネルギーミックス)」の実現に向け、徹底した省エネルギー



一(省エネ)の推進, 再生可能エネルギー(再エネ)の導入と国民負担抑制の両立, 火力発電の高効率化, 安全性の確認された原発の再稼働が進められている。同時に, 小規模分散, かつ不安定な再生可能エネルギーの大量導入に伴い, 従来の電力供給側が電力需給を管理するシステムから, IT 技術を駆使した電力需要側からの需要調整技術が期待されている。そこで, 2000 年半ばから開発が進むマイクログリッドについて概要を紹介し, 国際技術標準と合わせて世界の開発状況について述べる。最後に, スマートグリッドと本研究の位置付けについて説明する。

## 2.2.1 スマートグリッドの研究経過

新たなエネルギーシステムの必要性や, 建物分野における既存技術の改善への需要が高まるなか, スマートグリッドの応用が注目されている。スマートグリッドとは, 電力の需要と供給を情報通信技術(ICT)によって連携した制御を行い, 発電から消費までの全システムの効率を改善するように運用する次世代電力網である。

スマートグリッドの始まりは, ローレンスバークレー研究所の Chris Marney 氏が 2001 年に提案したマイクログリッドの提案まで遡る<sup>6</sup>。当時米国では, 老朽化した自国の電力網を新しく更新する必要があった。全体的な電力網の更新は困難であったため, 部分的な電力網の立て直しを継続的に達成する方法の検討が進んだ。特に, 中小規模水力・太陽光・風力などの再生可能エネルギーを内包した地域規模の電力網を全体から切り離し, 外部の電力トラブルから影響を受けない独立した電力需給を実現するマイクログリッドが注目された。マイクログリッドは低炭素社会の実現に向けた再生可能エネルギーの導入促進に向けた取り組みとしても優れていたものの, 内包する発電設備や大型電力需要設備からの電力利用変動の影響を受けやすい問題を抱えていた。そこで, 急速に発展・普及した ICT を利用した即応性の高い管理と運営による安定化が検討された。その結果, ICT を利用した小規模電力網の独立管理と運営という考え方が生まれ, 実証実験も行われた。

ICT による電力網管理という考え方が進むにつれ様々な応用手法が考案された。例えば, 内包する分散電源や電力需要をオンラインで管理し, ダイナミックプライシングによる価格変動を

表 1 京都議定書目標達成計画における 2010 年度の目標値と実際<sup>4</sup>

排出量の単位は MtCO <sub>2</sub>	基準 年	2005 年度	2010 年度の目標値(京 都議定書目標達成計 画, 2008 年 3 月)	約束期間(2008～ 2012 年度)の平均排 出量の実際(結果)
エネルギー起源 CO <sub>2</sub>	1,059	1,201	1,076～1,089	1,143
産業部門	482	452	424～428	416
業務その他部門	164	239	208～210	234
家庭部門	127	174	138～141	179
運輸部門	217	257	240～243	231
非エネルギー起源他	202	257	240～243	231
合計(①)	1,261	1,359	1,239～1,252	1,279
森林吸収量及び京都メカニズムクレジット(②)				122
結果(①-②)【基準年からの削減率(%)】 *右欄のように②を参入することにより削減約束を達成。				1,157【-8.2%】< 削減約束-6%

考慮しつつ積極的に発電・配送電・蓄電・電力制御を行うシステムや、ネットワーク時刻同期を利用した高度な事故点評価システムの構築へと発展した。これにより、マイクログリッドだけでなく大規模電力網に対しても効果的であると認識されるに至った。2007年には、老朽化した電力網の更新、人口増加や家電利用の増加に伴い高まる電力需要への対応、諸外国における電力網の近代化を見据えた国際競争力の確保といった方向性が米国 EISA (Energy Independence and Security Act)として示され、内需拡大も見据えた大型国家プロジェクトが始まった<sup>7</sup>。このような社会的背景に伴い生まれたのが、電力インフラに ICT を導入し、電力網の高機能化・高度化・統合化・効率化を図るスマートグリッドである。

このスマートグリッドに関する一連の取り組みはすぐに海外に普及し、風力発電を中心とした再生可能エネルギーの導入増加を目的とした欧州や、EV (Electric Vehicle) による太陽光発電の活用を目指しているアジアなど、様々な形として世界中で提案、実施された。我が国でも多くの大規模プロジェクトが実施されており、特に2011年3月の東日本大震災以降、原子力発電の運転停止に伴う電力供給のひっ迫が深刻な問題となっているため、分散電源・デマンドレスポンス・分散蓄電システム技術への期待が高まっている<sup>8</sup>。

従来の電力系統は、図 1(a)に示した構成となっている。電力は中央集中で発電されたのち、需要家側へと一方的に供給され、電力消費情報は低電圧領域から高位の管理センターへと送信される。一方、スマートグリッドでは図 1(b)のように、電力、通信が双方向で行き来することで、分散電源も活用した全体効率化を図ることを目指している。これにより、電力ストレージを用いた電力ピークシフト、太陽光発電(PV)の発電効率向上、EV による電力需要制御、電力需要予測等、様々な革新的な技術の導入が必要となる。

DSM (Demand Side Management)は、電力計測対象である需要家側の制御を達成するため実

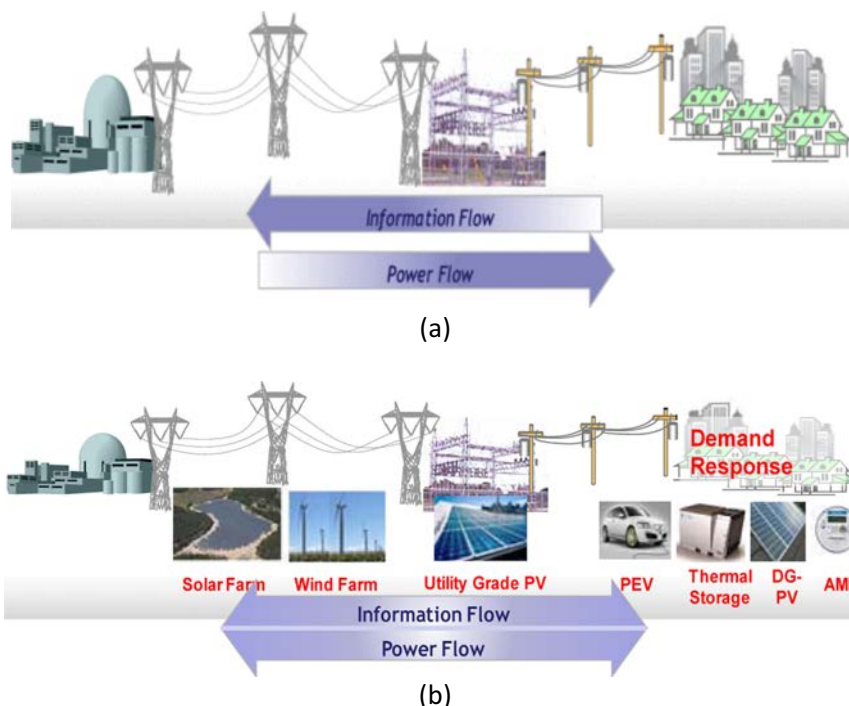


図 1 (a) 従来の電力網. (b) スマートグリッド<sup>8</sup>

---

装されたシステムである<sup>9</sup>。新たな発・送電インフラを導入することなく、高効率のエネルギー利用を達成する目的で構築される<sup>10, 11</sup>。スマートグリッドの実現には、従来のような電力供給の努力だけでなく、電力需要家側の需要削減に対する貢献が不可欠となるため、DSM はスマートグリッドへの移行へ不可欠な技術と言える。

電力需要家側からの需要制御、さらには電力需要家における分散電源の効率利用を達成するには、電気機器を統合制御するEMS (Energy Management System)の開発が重要となる。特に建物のエネルギー設備全体を、情報通信技術を用いて監視・制御するシステムのことを、BEMS (Building Energy Management System)、一般家庭の建物の場合 HEMS (Home Energy Management System)と呼び、センサから日々集積されたデータを用いて機器制御によるエネルギー削減を行う。BEMS は商用施設やオフィスでのエネルギー管理システムであり、HEMS はBEMS の技術を家庭用に応用した技術である<sup>12</sup>。さらに、これら省エネを実現するEMS や蓄電池・太陽光発電等を連携させた広域エネルギーマネジメント技術を CEMS (Community Energy Management System)と呼び、地域毎の電力需給を管理するシステムである。これら BEMS, HEMS, CEMS は管理する対象が異なるが、電力需給の監視・制御を行うという基本システムは共通している。

特に2000年後半から、電力インフラだけでなく都市全体のインフラと融合したスマートシティ・スマートコミュニティ開発が盛んに行われている。我が国における代表的なスマートシティ開発として、2009年に国内12都市が選定された、EV・PHV タウン構想、および次世代エネルギー社会システム実証地域があげられる。これらの構想には、CEMS をベースとしたEMS の導入が行われた。EMS 導入にあたり、建物を対象としたBEMS、一般家庭の電力消費を管理するHEMS、集合住宅へ導入された分散電源、EV バッテリーや固定蓄電池を用いた電力ストレージ、再生可能エネルギー等がCEMS に含まれている。

次世代エネルギー社会システム実証地域は、再生可能エネルギーを大量導入しつつ系統安定を維持したい日本の電力需要、そしてスマートグリッドを基盤とした地域社会のQoL 向上といった狙いから検討が開始した。都市の形態(広域大都市型:横浜市, 戸別住宅型:豊田市, 住宅団地型:けいはんな学研都市, 地方中核都市型:北九州市)ごとに、様々なケースの実証事業を展開した。例えば北九州市では、BEMS・HEMS・CEMSだけでなく、国際標準規格に基づいたスマートメーター・ホームエリアネットワークの構築によって、家庭内の様々な情報を活用する新サービスの創出を検証した。このように、従来からあるエネルギーの見える化だけでなく、新たな都市インフラ・社会システムの開発、ビジネスモデル・雇用の創出、国際標準を視野に入れた検証がなされた<sup>13, 14</sup>。

EV・PHV タウン構想は、今後国際的に開発・普及が予想されるEV とプラグインハイブリッド自動車(PHV)の国内普及モデルの確立、そして低炭素社会の実現に向けた応用技術開発を狙いとして検討が開始した<sup>15</sup>。特に、積極的なCEMS 構築を進める我が国では、EV を環境に優しい非ガソリン車という面だけでなく、CEMS 構築に重要となる電力ストレージという面でも利用することが期待されている。このような期待から、4つの目的(初期需要の創出、充電インフラの整備、普及啓発の促進、効果評価の実施)を達成するための環境導入および実証実験が国内8都市にて行われた。例えば、長崎県福江島を対象とした長崎 EV&ITS プロジェクトでは、レンタカー・公用車の位置付けでEV・PHV を150台導入した。これにより、利用者へのEV 導入メリットの説明、EV のレンタカー利用に十分な急速充電設備の設置、専用ホームページを通じた普及啓発、充電インフラ設置場所ごとの利用状態の特徴評価が実施された。さらに、後述するCHAdeMO

---

の国際標準規格に基づいた急速充電設備の設置, 2010 年頃から世界的に議論されていた EV ストレージの電力系統応用など, 国際的議論に基づいた技術開発・検証も多数実施された。

## 2.2.2 スマートグリッドに関わる国際標準化案件

スマートグリッドでは, ベンダごとに異なる通信プロトコル, 運用方針を採用する可能性が懸念され, これにより電力インフラ全体の運用・保守での品質低下を招く恐れがある。そこで, 電力系統・通信システムの国際標準規格に基づいた技術開発は, 運用・保守の視点から高い拡張性を保つ上で重要である。例えば, IEEE, IEC, ITU の標準化団体が, スマートグリッドや EMS における通信プロトコル(ZigBee, PLC, WiMAX 等)を定め, 技術的な大枠が明確となったことで, 今後さらなる普及が見込まれている。本小節では, スマートグリッド内での複数デバイス間の相互接続性を過去の運用経験に基づき定めた IEEE2030, および BEMS や HEMS に関するスマートグリッド内における通信プロトコルを定めた IEEE1888 について紹介する。

### 2.2.2.1 IEEE 2030<sup>16</sup>

スマートグリッドはその性質上, 多数の異なる電力システムや電気機器が電力インフラへ接続される。IEEE2030 は世界中の特徴的なスマートグリッドの経験を統合し, 電力システム・コミュニケーション・情報通信技術の包括的な議論に基づき, スマートグリッドへの相互運用・相互接続性を損なわないよう, 機能インターフェースやデータフローを規定した初めての実用的な試みである<sup>16</sup>。当該規格は, スマートグリッドの迅速な普及と, 消費者にとっての選択肢の拡大, 電力システムの信頼性向上, 再生可能エネルギー源への依存拡大を支援することを目的としている。本標準案件は, IEEE 標準にてスマートグリッドの全てを包括した初のロードマップであり, 今後の国際的な技術開発フレームワークを決定づける枠組みといえる。以下では, IEEE2030 を考案する上で参考事例となった, 世界各国のスマートグリッド実証実験を紹介する。

初期のスマートグリッドに関する実証実験において, 大規模なスマートグリッドの構築を行った例としてイタリアの電力会社 Enel Sp. A.があげられる<sup>17</sup>。2005 年に Telegestore プロジェクトとして完成した本環境は, 電力インフラ業界から見ても独特である。Enel Sp. A.独自に製造したメーター, 独自の統合制御システム, そして独自のソフトウェアから構築されている。本プロジェクトは世界初の商用スケールでの一般家庭に向けたスマートグリッド利用であり, 21 億ユーロを投入したプロジェクトで年間 5 億ユーロを節約した実績を上げている。

アメリカでは, 2008 年にテキサス州 Austin<sup>18</sup>, そしてコロラド州 Boulder がスマートグリッドプロジェクトを立ち上げた。双方の事例では, スマートメーターを HAM (Home Automation Network) のゲートウェイとして利用しており, スマートソケット, デバイスを制御するために用いている。本事例の優れた点は, 制御プロトコルに関する共通見解が今日でも得られていないものの, 将来のスマートグリッド技術標準の策定を待たずに先行的にスマートメーターの HAN へ制御機能を内包し, デファクトスタンダードを狙った点である。

ポルトガルでは, 2010 年に Evora が対象範囲の広さにおいて革新的な InovGrid を実施した<sup>19</sup>。このプロジェクトは, 電力網に情報通信, 電力管理を達成する自動制御デバイス, サービス品質の向上, 管理コスト削減, 高効率エネルギー利用, 持続的環境, 再生可能エネルギーと電気自動車の普及促進を目的としている。3 万世帯へ無料で設置したスマートメーターから得る電力情報を収集・分析し, 電力供給側やサービスプロバイダーへ需要家情報とエネルギー消費傾

向に関する情報を提供している。

この他にも、カナダ、ドイツなどでも実証実験が進んでいる。Hydro One はカナダ Ontario の大規模スマートグリッドである<sup>20</sup>。本事例は、Trillian の標準的通信インフラに基づいて構築されている。2010 年の終わりから、本システムはオンタリオ州 130 万人の顧客へサービスを提供した。さらに 2008 年から、ドイツの都市 Mannheim では、BPL (realtime Broadband Powerline)通信を都市モデル(MoMa: Model City Manheim)プロジェクトとして運用している<sup>21</sup>。

IEEE2030 は、これら欧米を中心とした世界中のスマートグリッドに関する実証実験を参考として 2011年に策定された。スマートグリッドが内包する電力需要機器を想定した実証実験が多く実施されたが、普及しつつある EV とグリッドの連携を想定した実証実験は、当時目立った動きがなく、IEEE2030 では扱われなかった。2.2.1 にて紹介した次世代エネルギー社会システム実証に関わる取り組みの中で、三菱電機が量産型 EV と家庭の充電ステーションを連携する V2H (Vehicle-to-Home) を発表し<sup>22</sup>。さらには 2009 年に開始した EV・PHV タウン構想においても三菱電機の量産型 EV を導入した電力系統応用が検討された。

また、IEEE2030 は技術フレームワークの定義に注力しており、スマートグリッドでの主要な電力需要家である建物内部で用いる、マルチベンダからなる電力需要機器の制御プロトコルまでは踏み込んでいない。そこで、次に説明する IEEE1888 が、IEEE2030 と同年に策定された。

#### 2.2.2.2 IEEE1888

BEMS, HEMS を含む、スマートグリッドにおける通信プロトコルの国際標準規格として IEEE1888 が存在する。IEEE1888 は、次世代 BEMS やスマートグリッド向けに開発された FIAP(設備情報アクセス・プロトコル)をベースとした通信規格であり、2011 年 2 月に標準化された<sup>23</sup>。この規格は、通信方式に HTTP と XML を採用しており、これまでベンダ毎に構築されていたビルの設備システムを統合、連携することを目的としている。

具体的には、図 2 のように<sup>24</sup>、各センサや設備の情報を送受信する各フィールドバスからのデ

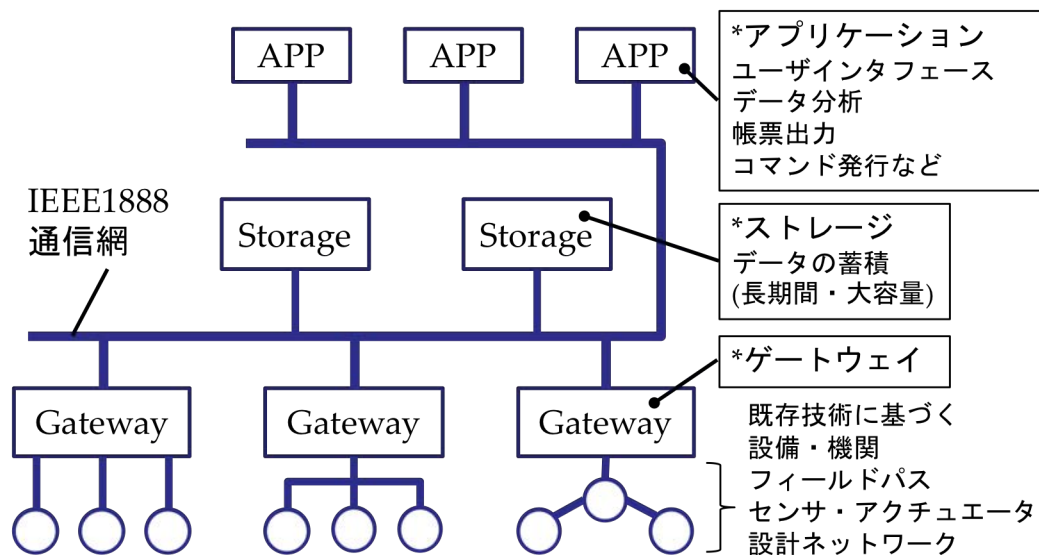


図 2 IEEE1888 で構築されるシステムアーキテクチャ<sup>24</sup>

---

ータを、ゲートウェイ経由でデータベースなどのストレージや、ウェブブラウザなどのアプリケーションと相互接続して連携させる。これらのデータから、リアルタイムでの設備情報、過去の計測データの閲覧、それらのデータに基づいた制御が可能となる。IEEE1888 は商業施設や事務所施設の通信プロトコルを対象としており、外部との通信を想定して設計されている。

IEEE1888 で構築されるシステムは、ゲートウェイ、ストレージ、そしてアプリケーションと呼ばれる機能部品で構成され、これらの部品間は HTTP ベースの通信で情報が交換される。IEEE1888 はこの通信の手順やフォーマットを規定したものであり、それぞれの機能部品は次のような役割を果たす。

ゲートウェイは、他のシステム(既存技術により構築された設備や機器で、センサやアクチュエータが搭載されている)に接続し、取得したデータを IEEE1888 で扱えるように変換する。または IEEE1888 で送られてきたコマンドを発行する。ゲートウェイは必ず TCP/IP ネットワークに接続され、IEEE1888 の通信インターフェースを提供する。接続の対象となるシステムには、各ベンダが独自に規定している通信バスや、既存のローカル通信バス(Lonworks, BACnet, ZigBee, RS485, 1-Wire, PCL)も含まれる。

ストレージは、IEEE1888 フォーマットで表現されたデータを長期間にわたって蓄積する。たとえば、電力消費量の推移、人感センサの検知イベント、空調の温度設定、部屋の温度などを数か月、または数年に渡って蓄積し、様々なアプリケーションとのデータ共有プラットフォームとして使われる。データ分析のような計算処理は、何らかのアプリケーションと連携させることによって達成される。

アプリケーションは、ストレージからデータを読み出し、パソコン画面、プリンタ、メール配送システムに利用させるなど、運用管理者とのインターフェースとなる。ゲートウェイに対してコマンドを発行するのもアプリケーションの役割である。また、データ分析を行うアプリケーションは、ストレージからデータを読みだした後、何らかの分析処理(差分計算、平均値計算、特殊な分析)を行い、再びストレージに書き込むといった処理をおこなう。このように、IEEE1888 はデータの蓄積を中心に据えたアーキテクチャを採用している。この構造により、従来は困難であった BEMS や HEMS のマルチベンダ化が可能になる。

## 2.3 2章のまとめと本研究の位置付け

世界的な温室効果ガス排出量削減目標が、京都議定書にて決定し、国際的に省エネ意識が高まっている。環境問題に関しては、1997年の京都議定書から始まり、2015年のパリ協定、そしてSDGsの採択により、各国での具体的な対策目標が決定した。さらに、電力網へICTを組み合わせたマイクログリッドの有効性が2001年より注目され始め、低炭素社会を実現する技術として技術標準化・研究開発が進んでいる。特に、電力需要家側から電力インフラへ貢献するデマンドレスポンスとして、建物の電力需要機器を効率的に運用するEMS、蓄電設備を活用した電力需要平準化は、スマートグリッドを実現する上で重要な要素技術として研究されている。これらの背景に加え、環境情報を収集するセンシング技術が充実した結果、電力インフラのみをターゲットとしていたスマートグリッドは、複数インフラを都市レベルで統合したスマートシティ(スマートコミュニティ)へと発展している。このように、個々の技術からサービスへ、インフラ独自からインフラ融合へ、そして、大局的観点から分散・個別的観点へのシフトという流れが、スマートグリッドに

表 2 スマートグリッドに関連した周辺状況と研究の経過

年	周辺の状況と研究の経過
1997	第3回気候変動枠組条約国会議(COP3)にて、京都議定書を採択 <sup>4</sup>
2001	ローレンスバークレー研究所 Chris Marney 博士がマイクログリッドを提唱 <sup>6</sup>
2005	世界的にスマートグリッドの実証実験が開始
2007	米国にて成立した EISA(エネルギー自給・安全保障法)により、スマートグリッドの研究開発が加速 <sup>7</sup>
2009	我が国のスマートシティ(横浜市・豊田市・けいはんな学園研究都市、北九州市)に関する研究開発が開始 <sup>13,14</sup>
2010	長崎県五島市福江島にて「長崎 EV&ITS プロジェクト」を開始
2011	東日本大震災 スマートグリッドの国際標準化(IEEE1888 <sup>24</sup> , IEEE2030 <sup>16</sup> )が進む
2013	慶應義塾大学にて、学習環境に特化した EMS を実装・実験 第2次安倍内閣が EMS・ストレージシステムの開発・性能向上を重視したロードマップを発表 <sup>5</sup>
2015	国際連盟が、169の持続可能な開発目標 SDGs を採択 京都議定書以来初となる、気候変動に関する国際的枠組条約であるパリ協定が採択
2016	我が国にて電力小売自由化が開始
2017	我が国にて都市ガス小売自由化が開始

関わるトレンドである。以上にて紹介した出来事、およびスマートグリッドに関連した周辺情報を表 2 に示す。

このような背景に基づき、本研究ではスマートグリッドに代表される情報通信技術の電力応用に着目した。特に、スマートなエネルギーサービス(図 3)を重視し、実在する条件(人・気象・電力需要機器・場所など)を重視した実験環境構築と評価を行った。ここでいうスマートとは、「ICTにより系から情報を取得し、対象機器・システムを制御する」という意味である。しかし、スマートなエネルギーサービスを実現する上で課題となるのが、人の行動に対するロバスト性、そして人の感覚の考慮である。エネルギー需要は電力需要家の行動により常に変化し、電力需要機器制御では利用する人の状況・感覚を考慮しつつ制御を達成する必要がある。そこで本研究では、環境センシングにより人の行動・感覚を把握しつつ、省エネ・電力コスト削減を達成する。これにより、スマートなエネルギーサービスの実現を目指す。

スマートなエネルギーサービスとして、2種類の提案を行った。一つ目は、長崎県福江五島列

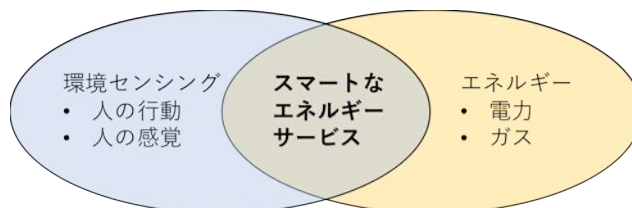


図 3 本研究の対象とするインフラ概要図

---

島の福江港ターミナルビルでの駐車場利用情報を用いた、充電インフラの電力系統応用サービスの提案である。二つ目は、神奈川県横浜市日吉の矢上キャンパスでの温冷感・知的生産性を考慮した、教育施設の空調制御サービスの提案である。これらの提案に関して、1.1 節で示した本論文の構成を踏まえて、図 4 へ各章の大まかな位置付けを示す。

本研究の工学的貢献は、スマートグリッドの国際技術標準である IEEE2030・IEEE1888 の議論に基づいた実験環境を構築した点にある。2011 年に採択された、スマートグリッドの技術的な枠組みである IEEE2030 の議論の一環として、エネルギーサービスとして重要な駐車場の充電インフラ制御、教育施設の空調機器制御が電力系統へ及ぼす効果について実証実験している。さらに、本研究が構築した全ての EMS は、IEEE1888 に準拠した通信プロトコルにより需要機器の統合・運用がされている。なお、IEA は長崎県五島列島で行なった本研究による実験を重要な電気自動車のユースケースとして取り上げ、専門書において報告しており、その後の関連技術標準化などにも影響を与えた<sup>25</sup>。また、本研究の学術的貢献は、提案した制御手法および、そのモデル化手法、さらに新たな学習効率指標の提案とそれに基づく制御手法の提案である。多変数最適化が必要であるが、簡素かつ適切なモデル化により厳密さを失わず、その入力値に対する最適解を算出可能とした。さらに、学習効率指標、および温度・湿度センサの値の他、CO<sub>2</sub>濃度センサの値を用いた算出手法を構築し、この指標を用いて実際に制御実験を行ったことにある。快適性に加えて、学習効率を用いた制御実験は本研究が初めてである。



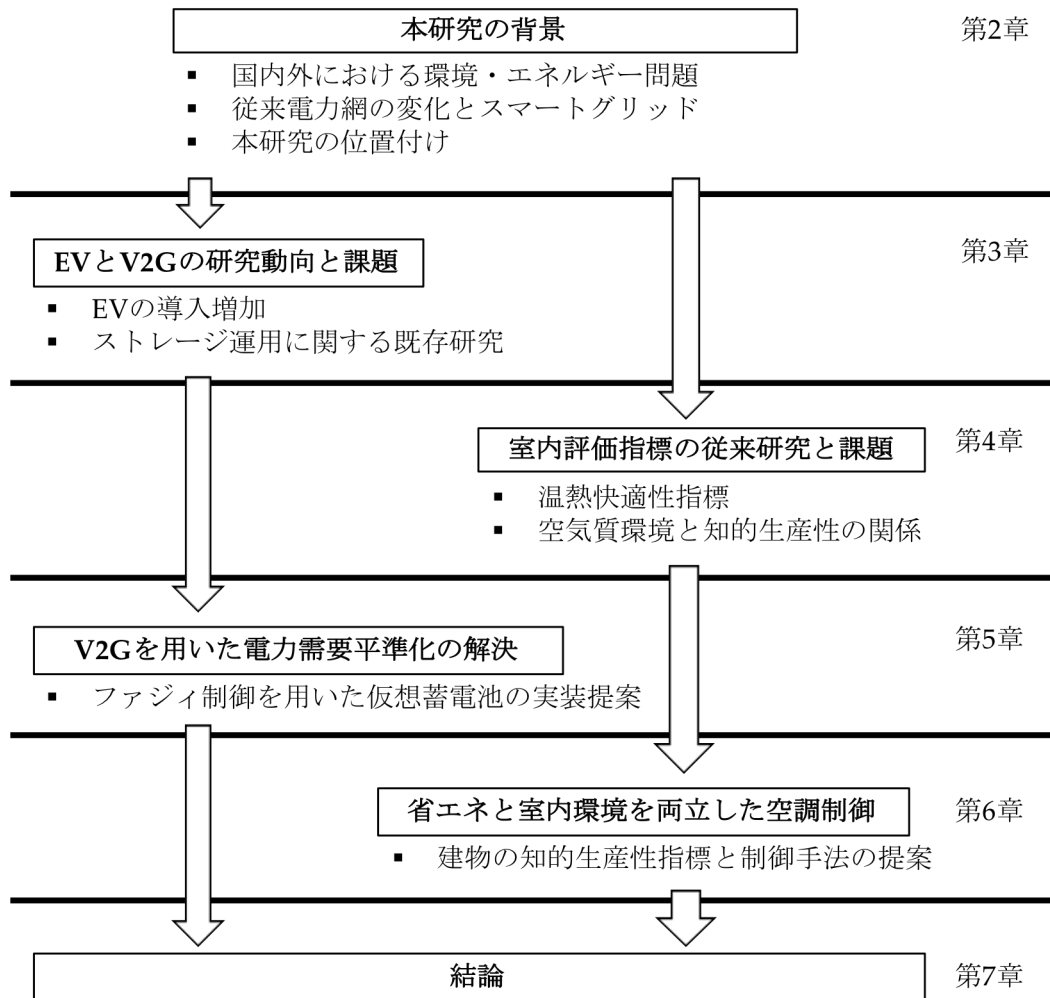


図 4 各章の内容と位置付けに関する概要図

---

## 第3章 EV 市場の動向と Vehicle-to-Grid に関する研究

### 3.1 EV 市場の動向

我が国では、エネルギーセキュリティの向上や環境負荷低減への対応、自動車産業の競争力強化の観点から、2030年までに新車販売に占める次世代自動車(EV)の割合を5から7割とすることを目指す「日本再興戦略改訂2015」が政府より発行された。さらに、ドイツでは100万台、イギリスは150万台、フランスは200万台を2020年の普及目標とし、中国では2025年までに3500万台、そして車両数に見合った充電設備を設置すると発表している。このように、世界中の積極的なEV導入が進んでいる<sup>26</sup>。

このような背景には、EVの高いCO<sub>2</sub>排出量削減効果が理由として挙げられる。EVとガソリン自動車の化石燃料から走行までのエネルギー運用効率を比較すると、EVは35%、ガソリン車は8.6%となっており、従来のガソリン車と比較しCO<sub>2</sub>排出削減効果が高いという調査結果がある<sup>27</sup>。EVの発電や充電、モーター駆動等で発生するエネルギーロス、ガソリン車のエンジンや機械損から生じるエネルギーロスよりはるかに小さく、EVは総合的に見て4倍近いエネルギー効率が得られる。さらに、将来的な走行距離の長距離化、夏季における太陽光パネル発電逆潮流による系統電圧上昇問題などの一時的な余剰電力としての利用、災害時における分散予備電源としての緊急ストレージとして利用するなどのメリットから、EVは今後も着実に普及が進むことが期待されている。

本節では、経産省が公開する報告書を参考に<sup>26</sup>、今後の国内外におけるEV利活用の動向、充電インフラの設備方針について紹介する。その後、電力市場の大まかな分類、その中で本研究がスマートなエネルギーサービスの一つとして提案する、充電インフラ制御による電力系統応用について説明する。

#### 3.1.1 EVの車両導入動向

我が国のEV・PHVの累計販売台数は、2009年度以降の6年間で約12万台と、ハイブリッド自動車の導入時を上回るペースで増加している。また、2016年2月末では、EV・PHVの累計導入数は推定14万台となっている。この背景には、国や一部の自治体による車両購入時の補助、インフラ設備に積極的に予算措置、公用車としての導入、駐車料金の割引、さらには一部地域で乗り入れ規制の対象外にするなどの取り組みが理由となっている<sup>26</sup>。さらに、米国や中国、一部の欧州諸国のEV市場の伸びは著しく(図5)、今後EV・PHV普及拡大に向けた世界的な競争の激化が予想される。

国際的な側面から、将来的なEV・PHVの普及台数の見通しに関する議論が進んでいる。IEAが2012年に発表したEnergy Technology Perspective<sup>28</sup>では、いくつかのシナリオ毎に見通しを報告している。EV・PHVの普及が進む2DSシナリオ(The 2°C Scenario)では、2020年の世界の

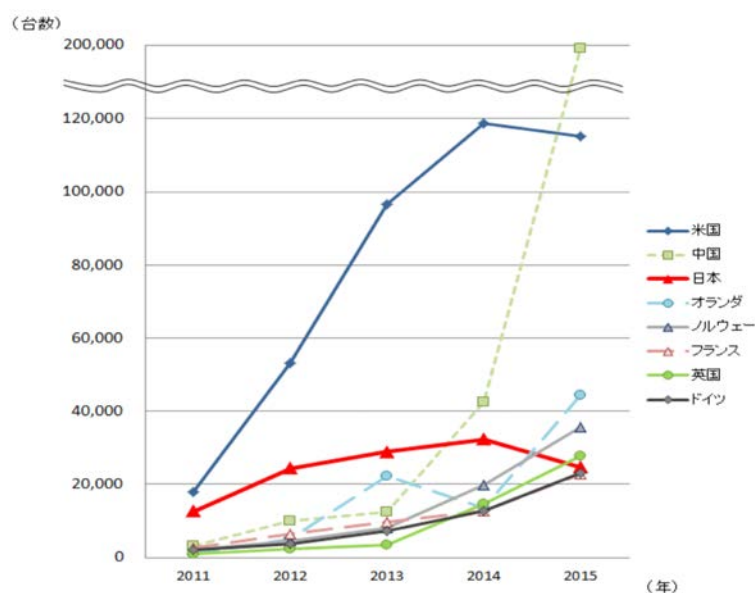


図 5 各国の EV・PHV の販売台数の推移<sup>26</sup>

新車販売市場において EV・PHV が 7%のシェアを占めるとする一方、普及が進まない 4DS シナリオ(The 4°C Scenario)では、2%程度にとどまるとされている。これらの状況を踏まえ、ドイツでは 100 万台、イギリスは 150 万台、フランスは 200 万台を 2020 年の普及目標とした。さらに中国では、2025 年目標として 3500 万台、車両数に見合った充電設備の設置を発表している。

我が国では、他の先進国の積極的な姿勢、温暖化対策の促進、EV・PHV 市場の早期確立から、2DS シナリオに則したの目標設定が望ましいと考え、2020 年までに最大で保有台数 100 万台を目指すこととしている。さらに、2030 年の EV・PHV の保有台数を全体の 16%、新車販売では全体の 20 ~ 30%と見込んでいる。これは、2016 年時点のシェアが 1%以下であることを踏まえると、極めて野心的な目標を積極的に達成する姿勢が見て取れる。

### 3.1.2 充電インフラの整備導入率拡大

わが国では、先に述べた新車販売の 20 ~ 30%を EV で獲得するという目標を達成するため、充電インフラの設備導入、走行距離の向上が急がれている。そこで、充電インフラの一般的な分類について紹介し、各分類の特徴と目標設置目安について簡単に説明する。

充電インフラを役割別に大別すると、あらゆる車両が利用可能な「公共用充電器」と、限られた車両のみが利用可能な「非公共用充電器」に大別できる。このうち「公共用充電器」は、長距離移動の電欠回避を主な対象とする「経路充電」と、異動先での滞在中の駐車時間を利用した充電を主な対象とする「目的地充電」の2つの利用シーンが想定される。また、「非公共用充電器」は、車両が保管されている場所における「基礎充電」として利用され、戸建て住宅・集合住宅・職場への展開が期待されている。なお、「経路充電」には短時間の充電が可能な急速充電

表 3 経産省が試算する、対象施設ごとの設置目標目安<sup>26</sup>

対象施設		設置目標目安
大規模商用施設	約 3,000 店舗	駐車場台数を 209 万台分とすると、約 0.9 万台分の設置を目指す。
宿泊施設	約 1,200 施設	駐車場台数 108 万台分とすると、約 0.5 万台分の設置を目指す。
観光施設	約 890 施設	各施設 1 基ずつ(約 0.1 万台分)の設置を目指す。
遊戯施設	約 2,500 施設	駐車場台数 51 万台分とすると、約 0.2 万台分の設置を目指す。
公共施設	約 93,000 施設	市区町村ごとに複数施設(約 0.3 万台分)への設置を目指す。

器が、「目的地充電」には急速充電器よりもコストが抑えられる普通充電器が利用される。

経路充電の全国的な整備は、EV・PHV の普及に不可欠である。電力中央研究所が行ったシミュレーションでは<sup>29</sup>、約 30 [km]ごとに充電器が整備されれば、理論上電欠は起きないとの結果が示されている。CHAdeMO 協会の報告によれば<sup>26</sup>、急速充電器の施設数は 2017 年 1 月時点で 6,935 箇所(基数では 7,204 基)に達しており、数だけを見れば官民の努力によって整備が進んでいると言える。ただし、実際には充電器の配置や稼働率がばらついており、充電器のない空白地帯を削減し、稼働率の平準化により充電待ちを解消するため、地方自治体ごとに設置計画の見直しが行われている。例えば、充電待ちが発生しやすい道の駅やサービスエリアへの充電器の増加、目的地を考慮しつつ充電需要の少ない地域に設置された充電器へ誘導する充電スポット検索アプリなど、様々な取り組みが存在する<sup>30</sup>。

EV・PHV の利便性向上のため、主要な目的地には充電器が設置されていることが望ましい。2020 年時点で最大 100 万台を目標とするには、多くの潜在的なユーザーに EV・PHV の利便性向上を実感させる取り組みが必要となる。そのためには、ある程度大規模で集客数が多い目的地から重点的に設置を働きかけることが効果的である。駐車可能台数が 100 台を超える大規模商業施設や宿泊施設など、今後重点的に設置が進む施設を表 3 に示す。普及率を 100 万台、稼働率を 50%と仮定し駐車中の EV・PHV の半数に充電器を提供すると仮定し、既設分を含め約 2 万基が設置されると、駐車中の EV・PHV の半数に充電器が提供できると試算されている<sup>31</sup>。

基礎充電は、全国民の4割が居住している共同住宅であってもほとんど普及しておらず、EV・PHV の潜在市場の掘り起こしに向けて重要な課題となっている。特に人口の集中する4大都市圏では、半数以上が共同住宅に居住しており、かつ大都市圏における自動車の利用目的の4割以上は「日常の買い物、用足し」と言った EV・PHV に適した近距離移動であることから、共同住宅への充電器設置は EV・PHV の普及促進に効果的と考えられる。比較的大規模な共同住宅だけでも、分譲共同住宅の持ち家が約 460 万戸、賃貸共同住宅等の借家が約 533 万戸存在する。このうち、周期的に訪れる住宅の大規模修繕、年間の新築数、駐車場の設置率を考慮すると、2020 年の EV・PHV の普及達成に向け、年間 2,000 基の共同住宅への基礎充電の設置が必要と計算されている。

### 3.1.3 電力市場と V2G の位置付け

電力市場はいくつかの異なる市場に分類でき、それぞれに制御方針が異なる。そこで、最も

---

一般的な4つの分類(baseload power, peak power, spinning reserve, regulation)に基づき電力市場を紹介する<sup>32</sup>。これらの電力市場は、制御手法、レスポンス時間、給電、契約条件、そして価格が異なる。また、文献や対象となる国により用語の定義、種類、および電力供給形態が異なる場合があるが、基本となる概念は全ての大規模電力網で共通している。

- Baseload power

Baseload power は 24 時間体制で供給される電力で、典型的な電力供給源として、大規模な原発、石炭火力発電等、kWh 当たりの発電コストが安い電源が用いられる。一般的に、安価かつ安定的な発電を前提とした、長期間の利用に基づいた売買が行われる。当該分野は、既存研究から V2G を利用するには価格競争の面から不適切であることが知られている<sup>33, 34</sup>。その理由として、走行が主目的である EV 利用の特徴、バッテリー容量の限界値、利用期間の寿命短縮、そして kWh 当たりのコストの高さなどが Baseload power として用いる際に障害となることなどが挙げられる。また、V2G の強みであるレスポンス時間の早さ、低い待機電力が Baseload power では活かさない点も、V2G と相性が悪い理由である。

- Peak power

Peak power は、電力需要機器が集中して稼働する、電力需要が逼迫する特定の日に問題となり、対策としてガスタービンのような短期間でスイッチのオンオフが可能な電力プラントが典型的に用いられる。当該分野は、一年を通して対象となる日での数時間程度のみ必要となるため、kWh 当たりの発電コストが高いものの導入コストが安い発電機に頼る方が、経済的に理にかなっている。既存研究から、V2G は特定条件下において Peak power に対して有効であることが証明されている<sup>33, 35</sup>。必要となる時間間隔は 3 ~ 5 時間となっており、EV の搭載バッテリー容量が解決されれば V2G に適した領域である。このバッテリー容量問題は、連続的に複数の EV から電力を取り出せる、もしくは他のコジェネシステムと統合されていれば解決可能となる<sup>35</sup>。

- Spinning reserve

Spinning reserve は、10 分以内に発電・蓄電可能なバッテリーによる追加供給である。Spinning reserves を供給する発電機は、ゆっくりとしたスピードで稼働しており、常に電力網と協調している。このように、Spinning reserves は最も早いレスポンスを有しており、予期せぬイベントにて発生した負荷に対応できるによる追加電源と言える。Spinning reserve の一般的な料金形態は、利用可能状態で待機している時間により換算される。例えば、1 [MW]の発電機が”Spinning”状態を維持しつつ 24 時間待機していた場合、発電機の規模と待機時間から算出した利用料金が発生する。さらに、もし実際に利用が発生した場合、実質利用した電力分だけ追加料金が発生する。多くの場合、この料金換算には利用時の電力市場価格が用いられる。

Spinning reserve のような料金形態は V2G に適している。多くの EV は自宅・駐車場に充電器へ接続された状態で駐車しており、比較的短い時間でありながら”spinning”状態として収益を得ることができる。V2G を活用した Spinning reserve の運用方法として、EV 所有者への付加サービスとしての提案が想定されている。

- Regulation

Regulation もしくは周波数調整と言われる分野では、電力網の周波数・電圧を需要調整することで微調整する。電力網の管理者からの指令に基づき、1 分以下のレスポンス時間で発電量

---

の増減が要求される。いくつかの電力市場では Regulation を、発電量の増減という点で、2つの要素へ分割している。発電量の過多・不足は同時に発生することがないため、Regulation up, Regulation down のどちらか片方だけが稼働する。Regulation は基本的に、電力網の観測結果に基づき自動的に制御される。Spinning reserves と比べ、高頻度(1日に400回程度)で運用され、高速な応答性が必要となる。このように、短期的な利用が中心となり、エラー検知から実際の制御まで含め、10 [ms]以内での運用が主となる。V2G を周波数調整に用いることは可能であるが、突然の需要が発生するため、計画的に対応することは困難となる。また、制御遅延が極端に短い場合、大量に存在するEVを統一的に低遅延で制御することに対する制御および通信上の困難も伴う。

### 3.1.4 EV バッテリーのモジュール化に関する国際的議論

EV の国際標準規格について議論する際、V2G への影響が論点となる場合がある。例えば、2013 年に行われた EV 無線給電に関する議論(EVWPT: Electric Vehicle Wireless Power Transfer)<sup>36</sup> が挙げられる。3.1.2 で述べたように、EV の普及モデルを確立する上で充電インフラに関わる議論は不可欠であり、特に頻繁な充電が想定される EV 充電では、駐車するだけで充電ができる無線給電に注目が集まっている。無線給電の規格化を目指し IEEE 標準化委員会より開始した EVWPT では、EV ストレージのモジュール化が議論された。EV ストレージのモジュール化案として、EV から取り外しが可能な方式(IEVBS: Interchangeable EV Battery System)、取り外し不可能な方式(MEVBS: Multi-EV Battery System)について議論され、各々の交換方式が V2G へ与える影響について議論する必要性が出た。このような理由から、実環境に近い条件下で異なるバッテリー交換方式をモデル化した、V2G の評価実験が重要となった。なお、IEEE2030 でも述べたが、技術標準化においてはケーススタディが重要な標準策定の議論材料となる。

## 3.2 ストレージ運用に関する既存研究

本節では、国内外の EV・V2G に関する幅広い状況について説明する。その後、既存研究として蓄電池を用いた周波数調整、ピークシフトに関する2つの研究を紹介する。

まず、2016 年に発表された Tugrul U. Daim らは、前述した EV の世界的な導入目標の具体化に伴い、V2G を用いたデマンドレスポンスに基づいた新たな市場が構築されつつあると報告している<sup>37</sup>。V2G が対象とする電力市場は、Peak power, Spinning reserve, Regulation であり、特に Tugrul U. Daim らは日中のピークシフトに対し注目している。これは、将来的に一般家庭への充電設備が充実することで、電気料金の安い夜間に自宅で EV の充電を行い、電気料金の高い日中に EV から放電するという運用が期待されるためである。2017 年現在では、世界中のほとんどの企業が商用施設の充電設備開発をターゲットとしているが、5 年後には V2G 利用を念頭に置いた一般家庭向け充電市場が、商用施設を上回る市場へと成長すると予測されている<sup>37</sup>。現在、AC Propulsion 社と Azure Dynamics 社が V2G を中心に据えた充電ステーションを開発しており、Siemens, GM がすでに市場への参入を表明している。このように、2020 年以降には、V2G への利用が可能な充放電ステーションの開発、一般家庭向け充電設備・EV の普及という社会的背景に伴い、V2G を通じたデマンドレスポンスの実現がますます期待される。

EV および V2G の技術開発を語る上で、大気正常化に関するレギュレーションである 1990 年に CARB (California Air Resources Board) が制定した ZEV (Zero Emission Vehicle) 法、2019 年より中国が制定する NEV (New Energy Vehicle) 法は重要である<sup>38</sup>。CARB は、カリフォルニア州での販売台数が一定以上を超える大手自動車メーカー (GM, Ford, DaimlerChrysler, トヨタ, 日産, ホンダ, マツダ) に対して、電気自動車の販売台数を義務付けた。当初は電気自動車のみを対象としていた ZEV は、2~3 年毎の度重なる見直しを経て、導入義務の目標設定の詳細化と PHV や燃料電池車等 (FCV) のハイブリット車も対象とするよう修正が加えられた。2017 年現在では、ZEV を 17% 以上販売しなければ罰金が科せられるルールとなっている。中国では、従来補助金を活用した EV 普及促進を試みてきたが、さらなる普及促進を目的とした NEV 規制が 2019 年より開始される予定である。NEV 規制では、ZEV と同様に購入者ではなく自動車メーカーへの EV 販売目標を設定している。

ZEV によるカリフォルニアの環境へ配慮した非ガソリン車の積極的導入が進む中、Willett Kempton を中心とした AC Propulsion 社が EV の分散電源としての利活用を提案した<sup>35</sup>。V2G というコンセプトを明確に定義したのは、Willett らの研究が初めてである。1998 年から 3 年分のカリフォルニアでの電力データを活用し、ストレージサイズ・有用性・経済的ポテンシャルの 3 点について評価を取った。ZEV から予想される EV の導入台数と、利用可能なストレージ容量を換算した結果、最も EV が運転状態にある 3~6 時の時間帯でさえ 92% の EV が V2G として利用可能であり、3.1.3 にて紹介した 3 つの電力市場 (Peak power, Spinning reserve, Regulation) に対し有効である結果を示した。

V2G 技術に関する実験は初期段階ではあるが、政府主導の研究レベルで行われている。Delaware 大学の Sandia National ラボは、2007 年に MAGICC (Mid-Atlantic Grid Interactive Car Consortium) を開始した<sup>39</sup>。MAGICC は V2G のコンセプトを証明するため始まったプロジェクトであり、PHI, Google, Delaware Green Energy ファンド等からの援助をもとに、研究開発・実証実験を行った。当該プロジェクトは、V2G の環境・経済的効果を証明し、V2G 関連における商品開発市場の活性化を目的とした。翌年の報告書によると、EV の十分な導入と V2G へ利用可能な充放電ステーションを導入すれば、ピークシフトや近・中距離の通勤に伴う温暖化ガス排出ゼロが達成可能であるとしている。

EV の導入増加に伴うデマンドレスポンスへのメリットが多数存在する一方、V2G を実運用するための障害も存在する。例えば Salman らの調査によると<sup>40</sup>、特定個人の EV に対しバッテリーの充放電を頻繁に行うことで、バッテリーの劣化が進むことが懸念されている。しかし、バッテリーを含む EV の性能向上は日進月歩であり、V2G 利用に伴うバッテリー劣化コストの定量化は困難である。適切な運用に基づいた制御を行えば、バッテリーの劣化を最小限に抑えられるものの、一般電力需要家の EV を用いた V2G の実運用を達成するには、バッテリーのパラメータ (抵抗値等) に基づいた何かしらのルール設定が必要である。加えて、単純に EV 普及に伴う充電量の増加が懸念されている。カリフォルニアでの研究によれば<sup>41</sup>、Plug-in EV が kWh あたり 30 [mile] 移動し、50% が同時に充電を行った場合、普及率が 20% から 100% へ増加すると、年間消費エネルギー量が約 50 [TWh] 増加し、ピーク電力は約 80 [GWh] 増加すると想定されている。このように、V2G を効果的に実現する上で、バッテリーモデルのパラメータ設定、そして効率的な充放電スケジュール決定に関する研究は重要である。

V2G に関する研究の重要性が高まる中、シミュレーションを中心とした実験が多数行われた。そこで以降では、EV の蓄電池を活用した周波数調整に関する研究、および固定蓄電池を用い

た施設のピークカットに関する研究を紹介する。前者では、EVの充電状態に対する一般的な管理方針を説明する。後者では、蓄電池を用いた負荷平準化を実現する際の、電力需要予測手法とバッテリーモデルの出力効率を考慮するの必要性について述べる。

### 3.2.1 Regulation (周波数調整)

太田らは<sup>42</sup>、再生可能エネルギーの導入時の周波数安定を保証するため、スマートグリッド状況下でのV2G利用を提案した。太田らはEV利用者の要求を満たすLFC (Load Frequency Control)の自律制御を目的とし、LFCを達成するV2G、EVが出発する直前に充電するV1G、V2G・V1Gを組み合わせた制御、そして実際の電力周波数データを活用したシミュレーションによる評価を行った。前提条件として、車載バッテリーに充放電機能が設置されており、自端周波数の測定が可能であり、充電状態の推定機能を追加した環境を想定している。以降では、V2G、V1G、シミュレーション条件、そして検証結果について説明する。

V2G制御では、EV利用者が駐車している間の自律的な周波数調整を提案する。安定した周波数調整を実現するため、各EVの充電状態(SOC: State of Charging)に応じたV2Gゲイン特性を設計した。電力システムの周波数は正規分布に従い変動するとし、SOCを安定的に自律制御できるシステムを考える。まず、EVのプラグインケーブルの容量により、最大出力の絶対値 $P_{max}$  [kW]が決定される。また図6に示す通り、予測される最大周波数偏差 $\Delta f_{max}$  [Hz]から出力の最大ゲイン $K_{max}$  [kW/Hz]を決定する。次に、SOC(high or low)に応じた出力抑制ゲイン $K$ を(3-1)のように決定し、(3-2)で出力 $P$  [kW]を決定する。

$$K = K_{max} \left\{ 1 - \left( \frac{SOC - SOC_{low(high)}}{SOC_{max(min)} - SOC_{low(high)}} \right)^2 \right\} \quad (3-1)$$

$$P = P_{max} \cdot K \quad (3-2)$$

これにより、V2G制御ではSOC=50%となるよう制御される(図7)。なお、EVのバッテリーはSOCが高い(低い)状態で充電(放電)すると、過充放電や劣化に対するリスクが増大する。そこで、太田らの研究では、 $SOC_{max}=90\%$ 、 $SOC_{min}=10\%$ 、 $SOC_{high}=80\%$ 、 $SOC_{low}=20\%$ としている。

V1G制御では、V2G制御でSOC=50%へバランスがとれていたEVのバッテリーをプラグアウト時間までに充電する。太田らは、電力システムの周波数が標準偏差 $\sigma$ の正規分布に従って変動すると想定し、V1G出力の期待値は(3-3)から推定する。

$$P_{V1G} = \frac{K_{max} \cdot \sigma}{\sqrt{2\pi}} \quad (3-3)$$

一方、バッテリーの開回路電圧が明らかであれば、内部抵抗、電流効率による損失を無視すると、出力期待値 $P_{V1G}$  [kW]と充電電力量 $W_{V1G}$  [kWh]、そして(3-4)から充電時間 $T_{V1G}$ を推定する。この推定した $T_{V1G}$ の最大値を用いて、プラグアウトまでの余裕がなくなるタイミングでV2G制御からV1G制御に切り替える。

$$T_{V1G} = \frac{W_{V1G}}{P_{V1G}} = \sqrt{2\pi} \cdot \frac{W_{V1G}}{\sigma K_{max}} \quad (3-4)$$



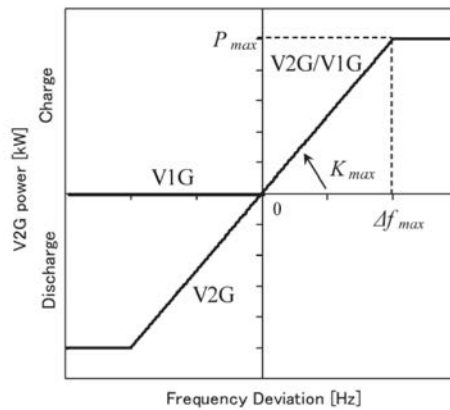


図 6 周波数偏差に対する V2G 制御の垂下特性<sup>42</sup>

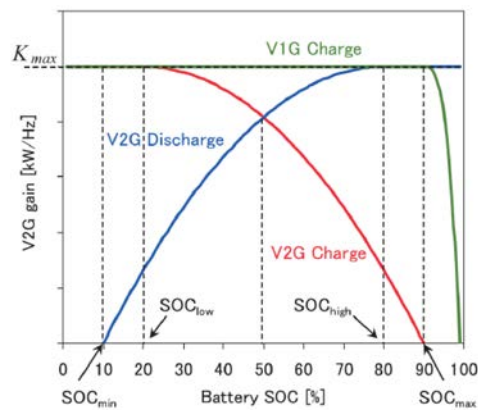


図 7 SOC に応じた V2G ゲインの抑制特性<sup>42</sup>

想定するシミュレーション条件は、周波数が 60 [Hz]、100 V コンセントにおける 1/30 秒サンプリングのものを 4 秒に間引いて利用する。また、電気自動車の利用スタイルとして、夕方 7 時プラグイン、翌朝 7 時プラグアウトの 12 時間でのシミュレーションを想定している。バッテリーの容量は 16.2 [kWh]、最大出力  $P_{max}$  は 5 [kW]、最大ゲインは周波数偏差 0.33 [Hz] で最大出力となる 150 [kW/Hz] としている。初期 SOC が 20% でプラグインされ、12 時間後に 90% でプラグアウトするシナリオを想定し、V1G 充電時間  $T_{V1G}$  の推定には周波数の標準偏差  $\sigma$  の過去 4 時間の最小値を利用している。

シミュレーションの結果を図 8 に示す。SOC を 20% から 90% に充電する際の電力量 11.59 [kWh] に対し、V2G による追加的な充放電電力として、充電で 8.04 [kWh]、放電で 7.78 [kWh] が得られた。プラグインされてから 3 時間程度は放電抑制により、SOC が 50% に近くように制御され、その後は SOC を 50% 付近に保つように V2G 制御が実現されている。図 8(c) の実線はプラグアウトに備えた V1G 充電時間の推定値であり、8.66 時間の時点でプラグアウトまでの時間(点線)を上回るため、V1G 制御に切り替わっている。そして、プラグアウトまで約 1 時間を残した段階(11.1 [時間])で、充電が完了している。以上の結果から、EV ユーザーの要求を満たしつつ EV がプラグイン中の 12 時間で LFC を提供できる結果が確認できた。

### 3.2.2 蓄電池を用いたピークカット

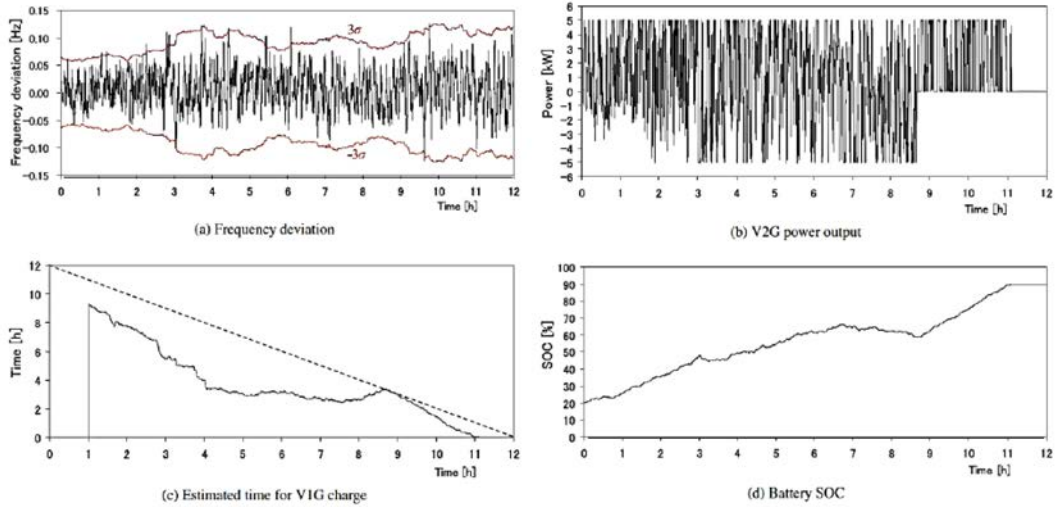


図 8 太田らの V2G シミュレーション結果<sup>42</sup>

樋田・関らは<sup>43</sup>、実際に設置された NAS (sodium and sulfur)電池を用いたキャンパス施設の受電電力ピークカットをシミュレーションにより評価した。NAS 電池はストレージシステムの中でも比較的大容量のストレージであり、世界 200 箇所で 270 [MW]、東京電力管轄内では 96 箇所で 180 [MW]を超える NAS 電池が 2010 年時点において導入されている。樋田・関らの実験対象となる環境では、明星大学にて定格出力 1000 [kW]の NAS 電池を運用し、2007 年から電力需要と運用データを蓄積している。樋田・関らの提案するピークカットの流れは次の通りである。まず、過去の運用履歴から需要電力の予測値を算出し、その結果に基づいて目標受電電力  $P_0$  を設定する。そして設定された  $P_0$  を超えないよう、バッテリー制御を用いて受電電力のピークカットを行う。樋田・関らの事前研究から、重回帰分析を用いる需要予測手法について紹介し、次に運用履歴に基づいた制御手法の提案、そしてシミュレーションの結果について述べる。

過去の運用履歴から、樋田・関らは需要予測に関して以下の 4 つの仕様に従って開発した。1) 現制御時点から 22 時までの需要曲線を予測すること。2) 特異日や稀頻度事象にも例外処理なく予測を行うこと。3) 通信やネットワークを使わず、電池設置サイト内で完結したシステム構成にすること。4) 年間を通じて予測し続け、データの更新や年度の切り替え作業を必要としないシームレスな構成にすること、以上の 4 つである。これらの要求仕様から、需要に変動を与える相関の強い要素を説明変数(週、曜日、気温、予測対象日当日の需要実績)を用い、次式で示す重回帰モデル式が構築できる。

$$P_{i,j} = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_3^2 + a_5x_4 + C_0 \quad (3-5)$$

$$\begin{aligned} 0 &\leq x_k \leq 1 \text{ for } k = 1, 2 \\ i &= 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18 \\ j &= 8, 10, 12, 14, 16, 18, i + 1 \text{ for } i < j \end{aligned}$$

ここで、 $P_{i,j}$  は予測修正時間  $i$  における時間  $j$  の需要、 $x_1$  は正規化された年間(週間)需要パターン、 $x_2$  は正規化された週間(曜日別)需要パターン、 $x_3$  は気温、 $x_4$  は予測修正時間  $i$  の需要、 $C_0$  は

モデル式の切片である。(3-1)が予測する対象は、現時点から2時間間隔で将来を予測する。ただし、予測修正時間の1時間後は非常に相関が強いため、予測需要点として $x_1$ を加えている。さらに、需要が立ちさがる15, 17時前後は電池の枯渇に対する影響が大きいため、1時間間隔での予測とした。 $x_1$ では年間の最大需要が1となるよう正規化し、年間で52週ある週間需要を過去の履歴から準備している。 $x_2$ では授業のない日曜日を除く6週間の週別平均需要を正規化し準備した。曜日別の電力需要では、火水木金が横並びで最大となり、月曜がわずかに少ない、そして土曜は平均的に需要が低く時間が経つごとに減少するデータとなっている。 $x_3$ では平均気温とピーク需要の関係をプロットし、最大需要が1となるよう正規化したデータを用いた。特に $x_3$ は、気温が低い(高い)季節に需要が増加、16 [°C]前後の快適な季節に需要が減少する下に凸な曲線となるため、気温と気温の二乗項をそのまま説明変数に使っている。

さらに樋田・関らは、予測した2時間間隔の電力需要を自然に表現するため、過去1年の実績曲線から予測点の近傍を通る曲線を選び出し、波形を平均化する手法を採用している。このように、過去1年間の実績データをもとに需要予測することで、過去実績から大きく逸脱した曲線の採用を避けている。実績需要点、および予測修正時間の需要を含む7点からの誤差が最も小さい上位5日の需要曲線を選出する。選出した需要曲線を単純平均した結果を最終的な予測曲線としている。以下に、過去の実績と需要点の誤差式、需要曲線の算定式を示す。

$$Err = \sum_{d=1}^l (P_{n,T[d]} - P_{m,T[d]})^2 \quad (3-6)$$

$$P_{avg,t} = \frac{P_{top1,t} + P_{top2,t} + P_{top3,t} + P_{top4,t} + P_{top5,t}}{5} \quad (3-7)$$

ここで、Errは誤差、T[d]は予測と実績を含む需要点(d=1,2,...,7)、 $P_{n,T[d]}$ は予測対象日nにおけるT[d]時点の需要、 $P_{m,T[d]}$ は過去日mにおけるT[d]時点の需要、 $P_{ave,t}$ はt時における過去実績 $P_{top5}$ を平均したt時の予測需要、そしてtは1日24時間を30分間隔で刻んだ時間(t=1,2,...,48)である。

予測した需要から、受電電力を適切にピークカットする制御手法を考える。基本的な運転方針として、NAS電池の運転方式には、固定運転と負荷追従運転があり、負荷追従運転では次のようなプロセスで運転する。1) 需要曲線を予測する。2) 過去の予測対象びの予測と実績結果から、確率的に電池枯渇を起こさないようにマージン( $\pm k\sigma$ )を計算する。3) 修正時間の電池残量からマージンを差し引き、有効残存電力量を算出する。4) 修正時間以降の需要予測曲線に対し、利用電力量が有効残存電力量に当てはまる目標受電電力 $P_0$ を計算する。5) 需要家の負荷が $P_0$ を超えた時、超えた需要電力分を電力貯蔵装置の放電電力で賄う。6) 1)~5)を予測修正時間毎に繰り返す。これらの制御プロセスにおいて、需要の変化に反応して契約電力超過(ピークオーバー)を防止し充電した電力を夜間までに使い切ることで、設備の有効活用が可能となる。

表 4 負荷追従運転と固定運転のシミュレーション結果<sup>43</sup>

	余剰日数	最大受電電力	平均日負荷率
固定運転	0	3807	70.3
k=0	0	3577	74.0
k=1	6	3574	73.5
k=3	42	3710	72.8

2008 年の制御対象日(151 日)に対して負荷追従制御のシミュレーションを行った結果を表 4 に示す。余剰日数は、夜までに電力貯蔵装置の電力を使い切れず、設備が有効に活用できなかった日数を示している。最大受電電力はカットしたいピーク電力であり、小さいほど優れた制御が達成されていると言える。平均日負荷率は、日毎の平均負荷率を示す。結果から、固定運転より負荷追従運転の方が最大電力を抑えられ、負荷平準化効果により日負荷率が改善していることがわかる。一方で、マージンの幅(k)を大きくすると電池余剰の頻度が増加する。

このように樋田・関らの研究から、負荷平準化制御には目標受電電力を動的に決定する方法が有効であることがわかる。さらに、電力需要を予測できれば、より制御性能が良い負荷平準化制御手法を提案できる。一方で、蓄電池のモデル化の荒さ、需要予測に用いるデータの必要計測期間が課題としてあげられる。蓄電池の効率は 100%ではなく、インバータや内部抵抗に依存する変数である。さらに、需要予測を実現するために過去1年間という大量の実測データを取得するには、必要なデータが揃うまで準備期間が必要となる。

### 3.3 3 章のまとめ

本章では、国内外における EV 市場の動向、そして V2G の研究について紹介した。表 5 へ本章で紹介した事例についてまとめる。

EV の普及目標として、中国では、3500 万台、ドイツでは 100 万台、イギリスは 150 万台、フランスは 200 万台としており、我が国では 100 万台と設定している。さらに我が国では、大規模商用施設・公共施設を中心に、充電設備を 2020 年までに 100 万台分設置する目標を設定している。それに加え、将来的には共同住宅を中心とした一般家庭への充電設備の普及も目指している。このように、世界的に EV の導入が進む中、V2G を活用した電力インフラへの貢献として、Peak power, Spinning reserve, Regulation が期待されている。

1990 年にカリフォルニア CARB が制定した ZEV 規制に伴い、2001 年に AC Propulsion 社が EV のストレージを電力インフラの安定化へ活用する V2G の可能性を示した。その後、2000 年代半ばへかけてマイクログリッド・スマートグリッド・EMS への社会的な期待が高まるにつれ、V2G を用いた再生可能エネルギーの有効活用・デマンドレスポンスに関するシミュレーション、および実証実験が世界中で加速した。特に、2009 年に i-MiEV に代表される一般消費者へ向けた EV が販売開始して以降、我が国でもストレージを積極的に活用した DSM に関する研究が進み、2011 年には福江港ターミナルビルでの実験が行われるに至った。さらに、東日本大震災以降は再生可能エネルギーへの需要がさらに増加、スマートグリッドにおける国際技術標準の決定、電力自由化の実施に伴う電力小売業者のサービス多様化、といった社会的背景から、より一層 V2G の必要性は高まっている。2020 年に向け、中国の NEV 規制の制定、国内の EV 導入増加、

---

さらには一般家庭向け充放電設備の開発が進むため、V2G による Peak power, Spinning reserve をターゲットとした電力需要平準化に関する研究は重要となる。

本研究がスマートなエネルギーサービスの一つとして提案する、駐車場の電力充電インフラ制御では、紹介した 4 つの電力市場の分類のうち、数秒から一日の電力需要を対象とした Spinning reserve と Peak power への活用を前提としている。そこで本研究では、駐車中の EV バッテリーを利用した、最大受電電力削減、および一日の電力負荷平準化の効果を実証する。本エネルギーサービスの貢献として、①実際の利用環境に近い条件で評価を行った点と、②無線給電に関する国際的議論に基づきバッテリー交換方式のモデル化を行った点があげられる。

①に関しては、太田らの研究で紹介したように、2010 年時点で、EV バッテリーの系統応用に関する研究は実際の場所や人の行動を除外したシミュレーションでの評価が中心であった。そこで、後述する大型商用施設から得られた電力需要情報と、実際の駐車情報を活用した、実在する人・場所を考慮したシミュレーションでの評価を行った。さらに、樋田・関らの研究では、蓄電池の内部抵抗やインバータの出力効率を考慮せずバッテリーをモデル化していた。そこで、EV に搭載された大容量リチウムイオン電池の物理パラメータをメーカーとの技術協定により取得し、より精度の高い評価を行った。

②に関しては、2013 年に行われた EV 無線給電に関する議論(EVWPT)で論点となった、異なるバッテリー交換方式が V2G へ及ぼす影響について考慮した点である。議論の対象となった、バッテリー交換可能な EV ストレージモデル(IEVBS)と、不可能な EV ストレージモデル(MEVBS)それぞれをモデル化し、電力負荷平準化へ及ぼす影響について評価した。

表 5 EV および V2G に関する研究年表

年	EV および V2G の研究動向	周辺の状況
1990	CARB による ZEV 規制 <sup>38</sup> の制定	
1997		第3回気候変動枠組条約国会議(COP3)にて、京都議定書が採択 <sup>4</sup>
2001	Willett Kempton ら(AC Propulsion, Inc.)がカリフォルニアでの研究レポートにて Vehicle-to-Grid を提唱 <sup>35</sup>	ローレンスバークレー研究所 Chris Marney 博士がマイクログリッドを提唱 <sup>6</sup>
2005	Willett Kempton らが、V2G を用いた電力(Peak power, spinning reserve, regulation)への有効性をシミュレーションにて示す <sup>41</sup>	世界的にスマートグリッドの実証実験が開始
2007	Delaware 大学にて、V2G 実証実験(MAGICC)を開始 <sup>39</sup>	米国にて成立した EISA(エネルギー自給・安全保障法)により、スマートグリッドの研究開発が加速 <sup>7</sup>
2009	三菱自動車により三菱 i-MiEV が生産開始	我が国のスマートシティ(横浜市・豊田市・けいはんな学園研究都市、北九州市)に関する研究開発が開始 <sup>13,14</sup>
2010	太田らが、EV を用いた周波数調整に関する研究をシミュレーションで行う <sup>42</sup>	長崎県五島市福江島にて「長崎 EV&ITS プロジェクト」を開始
	樋田・関らが、明星大学の蓄電池を用いたキャンパスの受電電力へピークカットをシミュレーションで行う <sup>43</sup>	
2011	長崎 EV&ITS プロジェクトの一環として本論文記載の提案を行う	東日本大震災
		スマートグリッドの国際標準化が進む (IEEE1888 <sup>24</sup> , IEEE2030 <sup>16</sup> )
2013	EV 無線給電の国際的議論(EVWPT)	慶應義塾大学にて、学習環境に特化した EMS の実装・実験を行う
		第2次安倍内閣が EMS・ストレージシステムの開発・性能向上を重視したロードマップを発表 <sup>5</sup>
2015		国際連盟が、169 の持続可能な開発目標 SDGs を採択
		京都議定書以来初となる、気候変動に関する国際的枠組条約であるパリ協定が採択
2016		我が国にて電力小売自由化が開始
2017		我が国にて都市ガス小売自由化が開始
2019	中国が NEV 規制を制定開始	
2020	国内の新車販売に占める EV の割合 7 [%]の達成期限 <sup>26</sup>	

## 第4章 室内環境の評価指標に関する研究

建物の電力需要機器, 分散電源を総合的に管理する EMS は, 持続可能社会における重要な要素であり, かつ技術的にも国際標準化が積極的に進められている. 特に建物の EMS での代表的な制御対象として空調機があげられる<sup>44</sup>. しかしながら, 制御機器の多様化が進む一方でそれらを統合的に管理し, 管理者の意図や在室者の感覚を反映した制御を実現する統合制御システムの開発は十分ではない. 統合制御システムの実現に必要なものは, 2.2.2.2 で述べたような国際標準に基づいた制御プロトコル, 室内情報を取得するためのセンシング技術, そして人の感覚を考慮した室内評価指標である. この中から本章では, 2006 年に実証された換気量・室温が知的生産性へ及ぼす影響や, 2012 年に実証された CO<sub>2</sub> 濃度が作業効率へ及ぼす影響といった, 人の感覚を考慮した室内評価指標の既存研究を紹介する.

空調機器を制御するためには, 建物の用途に適した室内評価指標を用いる必要がある. 例えば, 室内環境を評価する指標には, 物理的な評価指標(室温, 空気質, 粉塵量)と, 実証実験をもとに評価式を構築した人の感覚を考慮した評価指標(温熱快適性<sup>45</sup>, 知的生産性<sup>46</sup>)が存在する. 特に, 空調機器の稼働状況が電力需要変動へ大きく寄与する夏季・冬季では, 異なる室内環境評価指標を利用した際の電力コスト差が顕著となるため, 様々な室内評価指標の温熱・消費エネルギー特性を把握することが重要となる. また, オフィスや学校といった知的生産性が要求される環境では, 経済性や社会的意義といった観点から見た総合的な生産性を考え, 省エネ化や快適性を犠牲とした作業・学習効率の向上を優先する傾向にある.

本節では, オフィス・居住環境の室内環境評価指標に関する既存研究について紹介する. まず, 在室する人の温冷感を評価した温熱快適性指標について紹介する. 次に, 室内の空気質を低下させる支配的な要因である CO<sub>2</sub> 濃度と知的生産性の関係性について議論し, 最後に温熱快適性・空気質環境から導出される知的生産性指標を紹介する.

### 4.1 温熱快適性(PMV: Predictive Mean Vote)の指標

空調機制御において, 多くの場合は温度管理のみ考慮されているが, より詳細な室内環境快適性を計測するという考え方から, 温熱環境の評価指標である PMV (Predictive Mean Vote)を導入する例が見られる<sup>45</sup>. PMV は, 1985 年にデンマーク工科大の Fanger らが快適性評価式を大規模な検証実験結果を元に構築したモデルであり<sup>47</sup>, 体の代謝量  $M$  [W/m<sup>2</sup>], そして外的要因がもたらす熱負荷  $L$  [W/m<sup>2</sup>]を用いて次式で表される.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)L \quad (4-1)$$

これら  $M$ ,  $L$  は数値化が容易ではないため, 熱的快適性に関係する 4 要素 (室温, 相対湿度, 輻射, 気流) と活動量, 着衣量を含めた 6 要素を用いて PMV を算出するのが一般的である. さらに, アメリカ暖房冷房空調学会(ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-

表 6 PMV の適応範囲, および7段階評価尺度<sup>48</sup>

PMV の適応範囲		PMV の7段階評価尺度		PPD(予測不満足率)
PMV	-2 < PMV < +2	+3	暑い	99[%]
代謝量	0.8~4 [met]	+2	暖かい	75[%]
着衣量	0~2 [clo]	+1	やや暖かい	25[%]
空気温度	10~30 [°C]	0	中立	5[%]
平均放射温度	10~40 [°C]	-1	やや涼しい	25[%]
平均風速	0~1 [m/s]	-2	涼しい	75[%]
相対湿度	30~70%	-3	寒い	99[%]

Conditioning Engineers) が PMV と快適域の評価尺度を理解しやすい 7 段階評価へと拡張させている(表 6)<sup>48</sup>. この評価尺度は, ISO-7730 として国際規格に採択されており, PMV が 0 から ± 0.5 に収まる範囲が最も快適な温熱環境である<sup>49</sup>. Fanger らは, PMV による年齢や性別といった暑さ寒さの感じ方の個人差に対応するため, 温熱環境に不満足や不快さを感じる人の割合, すなわち予測不快者率 PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) と PMV の関係性を評価している. ISO が快適とする  $-0.5 < PMV < 0.5$  では不快者率が 10%以下(PPD<10%)となる.

PMV を用いた空調制御に関する研究は世界各地で行われている. 2006 年に Yoghong Huang らは<sup>50</sup>, 線形化させた PMV のファジィ予測モデルを利用し, 制御器を設計した. この制御器と従来の PID 制御器を比較した結果, 提案手法は PID 制御よりも快適な制御を達成した上で, 18.5%の電力を削減できたとしている. また, 2010 年に Mark Feldmeier らは<sup>51</sup>, PMV と室内環境センサを用いた, 特定個人の状態に特化した空調機自動制御を提案している. 在室者の活動量を計測しつつ1ヶ月間の夏季実験で冷房制御を実施した結果, 通常の設定に基づいた制御と比較して 24%の省エネを達成している. ただし, 通常状態で空調機が動作し続ける環境であったため, 在室者がいない場合のオンオフ制御からくる省エネ効果が大きかった点に注意が必要である.

## 4.2 CO<sub>2</sub> 濃度が意思決定に与える影響

一般に, 室外の CO<sub>2</sub> 濃度は 380 ppm 前後であり, 都心エリアでは 500 ppm に達することもある. ここで, 「ppm」とは百万分率を表し, parts per million の略である. 厚生労働省は, 室内の CO<sub>2</sub> 濃度を 1,000 ppm 以下に維持することを基準としており<sup>52</sup>, これを超える CO<sub>2</sub> 濃度の空気を吸引すると呼吸, 循環器系, 大脳の電気活動に変化が見られたとの報告もある<sup>53</sup>. さらに, 20,000 ppm を超えると息苦しさを感じ, 40,000 ppm を超えると呼吸困難, 100,000 ppm ではめまいと視覚異常が生じる. それだけでなく, 室内の CO<sub>2</sub> 濃度が高い状態で, 室外機が十分に稼働していない状態では, 室内空気汚染とそれによる悪影響が存在する可能性が指摘されていた<sup>54</sup>. また, 室内の空気を換気することで空気質環境が向上する一方で, 暖房・冷房を稼働している状況下では温熱環境の悪化を招く. 反対に, 暖房状態で温熱環境を向上させるために換気を怠ると, CO<sub>2</sub> 濃度が上昇し健康被害を招く. このトレードオフの問題を把握するため, 2012 年に Usha Satish らは室内環境で一般に起こりうる CO<sub>2</sub> 濃度と意思決定に関するテスト結果から, 9通りの作業効率と CO<sub>2</sub> 濃度の関係性を評価した<sup>55</sup>.

Usha らは, 6 つのグループに分けた 18 才以上の地元大学生を被験者とし, 3 つの CO<sub>2</sub> 濃度



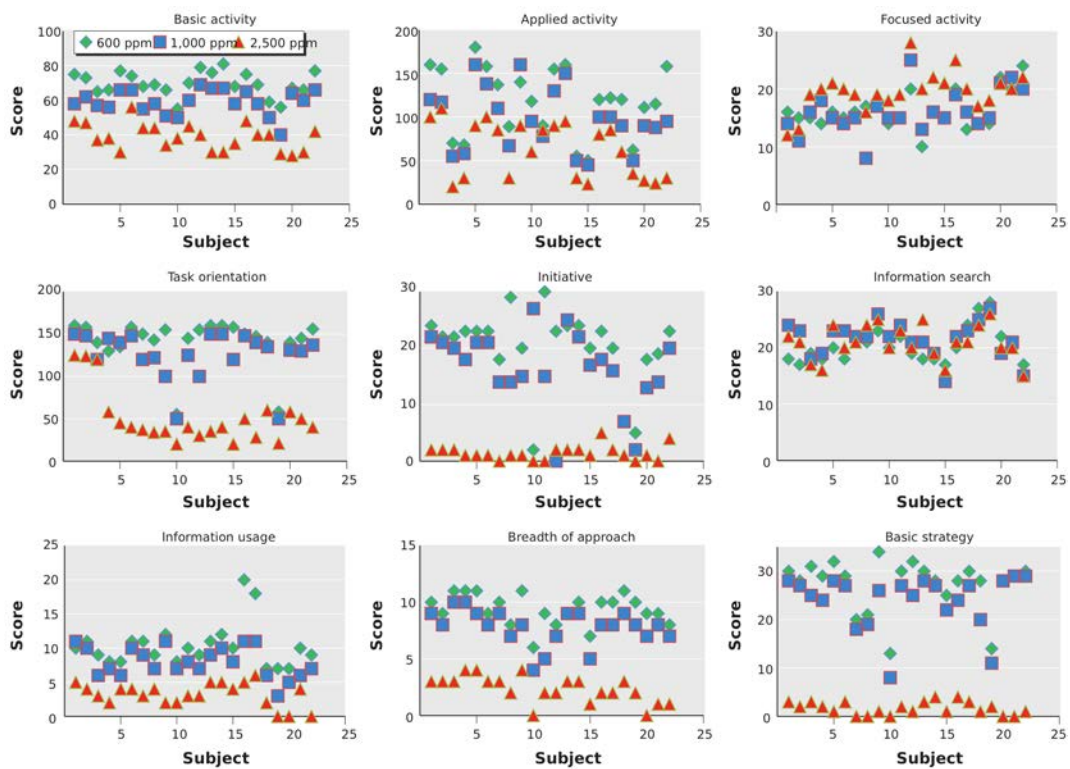


図 9 CO<sub>2</sub> 濃度が意思決定能力に与える影響<sup>55</sup>

を維持した室内(600 ppm, 1,000 ppm, 2,500 ppm)に 2.5 時間の間滞在させた。室内温度は 22.9 ~ 23.1 [°C]の間で維持され、全ての実験は 1 日の 9 時~11 時半, 12 時半~15 時, 16 時~18 時半のスケジュールで実施された。各試験の間には 1 時間の室外での休憩が挟まれ、1 度目と 2 度目の試験の合間に各自が準備した昼食をとった。3 種類の CO<sub>2</sub> 濃度は被験者ごとに均等となるよう振り分けられ、その順番はランダムで選ばれた。被験者には室内 CO<sub>2</sub> 濃度は知らされず、意思決定能力に関する試験<sup>56</sup>を受けた。試験には複雑なオフィスでの作業例として、文章校正、数値計算など 9 通りの試験<sup>57</sup>を用いている。試験の採点には SMS (Strategic Management Simulation<sup>58</sup>)を採用した。ここで、SMS は、ニューヨーク州大学が公開する、意思決定能力に関する評価を取るためのプログラムである。さらに、各試験の開始前、終了後にウェブベースの室内空気質環境に関する認識テストと健康テストを実施した。そして実験後に被験者たちには小額の報酬が支払われた。

図 9 は、9 つの作業(basic activity, applied activity, focused activity, task orientation, initiative, information usage, information usage, breadth of approach, basic strategy)に対する試験結果を、22 人の被験者と 3 つの CO<sub>2</sub> 濃度(600 ppm: 緑色ひし形, 1,000 ppm: 水色四角形, 2,500 ppm: 赤色三角形)に関して表記したものである。このうち、focused activity と information search を除く 7 つの作業(basic activity, applied activity, task orientation, initiative, information usage, breadth of approach, basic strategy)が、CO<sub>2</sub> 濃度とスコアの間に関係性を示しており、CO<sub>2</sub> 濃度が 2,500 ppm の場合に顕著な意思決定能力の減少を示している。この結果を、9 つの作業と CO<sub>2</sub> 濃度ごとにパーセンテージ表記した結果が図 10 である。図 10 では各作業と作業効率を 5 つのレベル(superior, very good, average, marginal, dysfunctional)に分割しており、ほぼ全てにおいて、600 ppm から 1,000 ppm で緩やかな意思決定能力の低下を示している。さらに、1,000

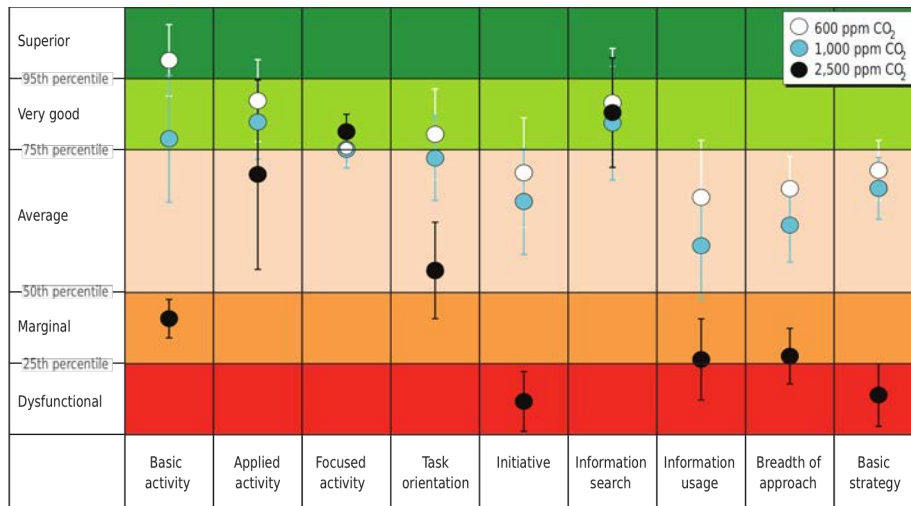


図 10 9つの試験結果をCO<sub>2</sub>濃度ごとにパーセンテージ表記した結果<sup>55</sup>

ppm から 2,500 ppm では多くのスコアが marginal, dysfunctional へ属しており、1,000 ppm を超える CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が作業効率へ大きな影響を与えている。

以上のように、室内の CO<sub>2</sub> 濃度がパフォーマンスに直結する試験結果は、室内空気質環境が経済的に非常に重要である事実を示唆しており、総合的なエネルギー効率の側面から見ても、一人当たりの適切な換気量を担保する意義を表している。空調機器を制御対象とする場合、単なる省エネや温熱快適性だけでなく、CO<sub>2</sub> 濃度を考慮した室内評価指標を設定すべきである。

### 4.3 知的生産性に関する既存研究

日本に限らず、世界中の先進国において、人件費の高騰は大きな問題である。このような状況から、欧米を中心に建物のライフサイクルコストと知的生産性向上に伴う利潤向上に関する研究が報告されている。本節では、オフィスでの知的生産性を業務成績、換気量、疲労度など、幅広い側面から別々に評価を取った既存研究について紹介する<sup>59</sup>。

#### 4.3.1 空気質環境に関する既存研究

オフィスでの室内空気質環境と知的生産性について最も先駆的な研究を行った例として、2004年に発表された D. Wyon らの研究がある<sup>60</sup>。D. Wyon らは、デンマークやシンガポールのコールセンターの実測や実験室ベースの実験結果から、室内空気環境が劣悪な環境では、オフィスでの知的生産性が 6 ~ 9% 低下すると推定している。また、アンケートによる室内環境の不満足度と全体的なパフォーマンスの低下が線形関係にあることも示している。そして、コールセンターの人件費から見て、室内空気質改善に投資した賃金は 2 年以下で回収することができるという報告している。

このように、コールセンターなどの作業内容が限定されているオフィス環境では、知的生産性の正確な測定が比較的容易である。例えば、P. Wargoocki らは<sup>61</sup> 外気取り入れフィルターの交換 (6 ヶ月使い古したフィルターを新品のフィルターに交換)、外気導入量の増加 (2.5 [L/s] から 25 [L/s]) がコールセンターの知的生産性に及ぼす影響を検討している。なお、Wargoocki らは知的

---

生産性の基準として、1つの案件を処理するサービス時間に注目している。実験の結果、換気量が十分高い状態で新品のフィルターへ交換したところ、従業員のサービス時間(会話時間)が10%短縮され、換気量が十分でない状態では、新品のフィルターに交換したのちにサービス時間の短縮は見られなかった。さらに、新品のフィルターで換気量を増加させたところ、サービス時間が6%短縮され、使い古されたフィルターで換気量を増加させたところ、サービス時間が8%延長した。以上から、換気扇のフィルターを定期的に交換しつつ、換気量を保つことは、コールセンターの人件費削減に貢献することを報告している。

単純な作業効率だけでなく、心拍数や脳内状態から生理・心理状態を計測することで知的生産性を評価する試みもある。西原、田辺らは<sup>62</sup>、コンピュータを用いた複数の作業を被験者に課し、作業成績の評価のみならず、主観的な疲労感の計測、血中の疲労物質濃度を測定し評価している。実験の結果、室温が高くなると(33 [°C])不快感や作業量の低下、疲労感が増加する結果を得ている。さらに西原、田辺らは、劣悪な環境下でも被験者が努力すれば作業成績の低下が認められないこともあるが、その代償として脳内の疲労などには顕著な差が見られると報告している。このような生理量の計測方法は、電極などの装着が必要となる場合が多く、この違和感への作業量への影響を考慮すべきである。

#### 4.3.2 室内温度と学習効率

D. Wyon ら<sup>63</sup>が行った教室の温度と学習効率に関する実験は、4人の少年グループが20 [°C]、23.5 [°C]、27 [°C]の環境条件下で実験を行なっている。実験の結果では、中間の温度域では明らかな傾向は見られないが、最も高い温度設定では勉強に関する作業効率が最も低下している。これは、室温上昇が教室内の子供に対し、覚醒や機敏さを低下させる効果があると考えられる。また、Wargocki ら<sup>64</sup>による、教室環境と学習効率に関する発表によると、室温設定を1 [°C]低下すると回答速度による学習効率は4%改善する結果となることを報告している。

以上のように、既存研究では、教室の温度が上昇した場合に子供の学習効率低下が確認されている。同様に、オフィス空間の温度が上昇した場合に成人の作業効率が同程度低下しており<sup>65</sup>、室温が適温を超えて上昇することで知的生産性へ悪影響を与えることが確認されている。また、室内環境と知的生産性の関係性を報告したこれらの報告は数十年前の事例であり、現在の高い断熱性を保持した建築様式や、気密性の高い生活空間、高効率の換気機器では、知的生産性への影響は異なると考えられる。

### 4.4 換気量と室温が居室の学習効率へ与える影響

4.3の既存研究を踏まえた上で、村上らは資格試験対策予備校(日建学院)での学習効率と一人当たりの換気量との関係性を実験で示した<sup>46, 59, 66, 67</sup>。学習効率を絶対的に評価するのは難しく、既存研究では解答速度や正答率、短期的な記憶の程度など、特定の要素に着目し評価している場合が多い。一方で、教育環境では効率的に授業の内容が吸収できているか、理解できているかといった観点からの、総合的な学習効率の評価が望ましいといえる。

#### 4.4.1 換気量と学習効率の関係

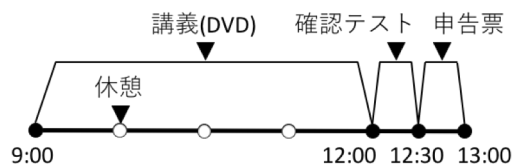


図 11 予備校での学習効率実測手順<sup>54</sup>

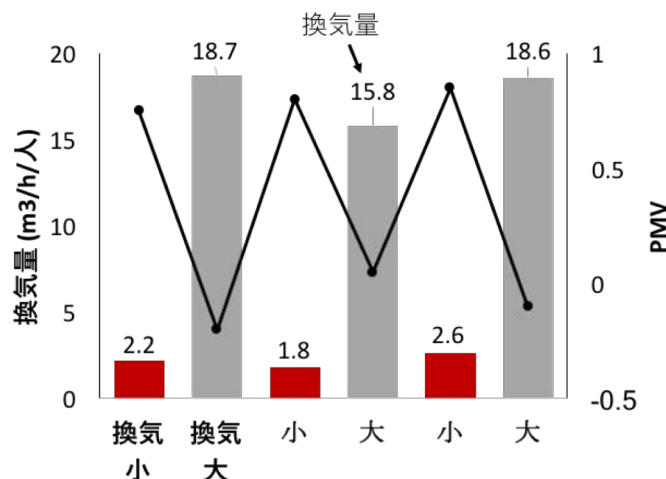
表 7 換気量の設定条件<sup>59</sup>

実測日	換気量	講義科目		被験者数
3/20(日)	3.5 [回/h]	理論系科目	構造 1	41
3/27(日)	0.4 [回/h]		構造 2	41
4/3(日)	0.4[回/h]	暗記系科目 I	計画 1	50
4/10(日)	3.5 [回/h]		施工 1	50
5/15(日)	3.5 [回/h]	暗記系科目 II	計画 2	57
6/12(日)	0.4 [回/h]		計画 3	57

村上らは、長期にわたるテスト結果データ収集の経験がある日建学院を対象とし、温熱・空気質環境が学習効率に与える影響を評価している。一級建築士受験対策講座の確認テストを、十分な解答時間を確保した上で実施し、テストを主催する企業にストックされた母集団が 10,000 人以上のテスト結果をもとに比較を行っている。本統一確認テストは、大量のサンプルデータから全国平均点を算出しているため、全国平均点をテストの難易度とみなして統計処理している。さらに、主観的な学習効率について評価するため、自己申告票を用いたアンケート調査を行なっている。自己申告票には、空気調和・衛生工学会に設置されたプロダクティビティ研究小委員会で議論された、知的生産性の標準測定法を元に作成したアンケートを用いている<sup>68</sup>。講義は教師の教授能力を統一するため、全国一律で用いている映像コンテンツを用いた授業方式を調査対象としている。

通常の講義進行スケジュール(図 11)に沿って実験を実施している<sup>59</sup>。講義開始時刻は毎週午前 9 時であり、180 分間の講義が設定されている。正午過ぎに講義が終了し、引き続き 30 分間の確認テスト、そして主観評価のための申告票の記入を行っている。180 分の講義中、5 分程度の休憩が 3 回設けられている。これらすべてのスケジュールは映像コンテンツを使用した講義形態のため、完全に時間がコントロールされた状況で進行している。実験時の換気量、講義科目、被験者数に関する詳細な条件は表 7 に示す。被験者は 20 代から 40 代の社会人が中心であり、学習効率の調査を実施することや室内の環境条件を調整していることを告知していない。また、個人に特有の体調に依存する生体リズムを考慮するため、同曜日・時間帯で実測を実施している。

換気量と PMV の測定結果を図 12 に示す<sup>59</sup>。換気量を大にした設定では、一人当たり 20 [m<sup>3</sup>/h]程度あり、一般的な事務所ビルと比較して特別に換気量が多い条件ではない。ここでいう換気量の大小とは、換気量の小と比較して相対的に多いという意味で使用している。また、PMV を用いた温熱評価も行っている。代謝量を 1.0 [met]と仮定し、着衣量は各授業の一般的な衣服から平均着衣量を算出している。その結果、換気量小の条件で PMV が 0.8 程度、換気量大の条件で PMV が-0.1 程度となり、換気量小では、ISO の設定する熱的な快適推奨域をやや外れ



(1)論理形科目 (2)暗記系科目 I (3)暗記系科目 II

図 12 一人当たりの換気量と PMV の結果<sup>59</sup>

る結果となっている。また、CO<sub>2</sub>濃度をマルチガスモニター(光音響法)で連続測定した結果、換気量大の条件で安定的に 990(±80) ppm, 換気量小の条件で最大 5,000 ppm を超える結果となっている。換気量小に関しては、平均濃度が 2800(±1400) ppm となり、在室者の多い教室では強制換気を実施しない場合の室内環境悪化が懸念される。

また、村上らは主観的な学習効率についても評価を示している。「室内環境が原因でロスしたと思う時間」の申告結果は、理論系科目では換気量が小から大へ変化させることで有意に 6.8 分減少し、暗記系科目では、換気量小から大へ変化させることで有意に 4.7 分減少する結果となっている。講義有効時間を基準とし、主観的な学習効率を百分率で換算した結果、理論系科目では 4.0%の向上、暗記系科目では 2.8%の向上であったと記されている。

さらに、村上らは空気質と学習効率について評価している。空気質に対する不満足者率と学習効率の相関は線形近似、換気量や温度、湿度といった物理環境要因と学習効率の相関は対数近似でよく近似できることが既存研究から明らかとなっている<sup>69, 70</sup>。そこで村上らは、現地実測で得られた結果をもとに、独立変数を「空気質の不満足者率」や「一人当たりの換気量」、従属変数を学習効率として相関関係を調べている。暗記系科目における空気質の不満足者率と確認テスト平均点で線型近似をとったところ、R<sup>2</sup>=0.79 の相関で次の近似曲線が得ている。

$$y = -0.823x + 89.21 \quad (4-2)$$

ここで、x は空気質の不満足者率、y は確認テストの平均点(0 ≤ y ≤ 100)である。次に暗記系科目を対象とした場合の一人当たりの換気量と確認テスト平均点の相関を分析している。対数近似を用いた近似曲線は、R<sup>2</sup>=0.73 の相関が見られた。実験結果から、空気質の不満足者率を 10%削減すると、学習効率が 9.1%向上する結果となっている。また一人当たりの換気量を 10 倍にすると学習効率が 13%増加したと記されている。

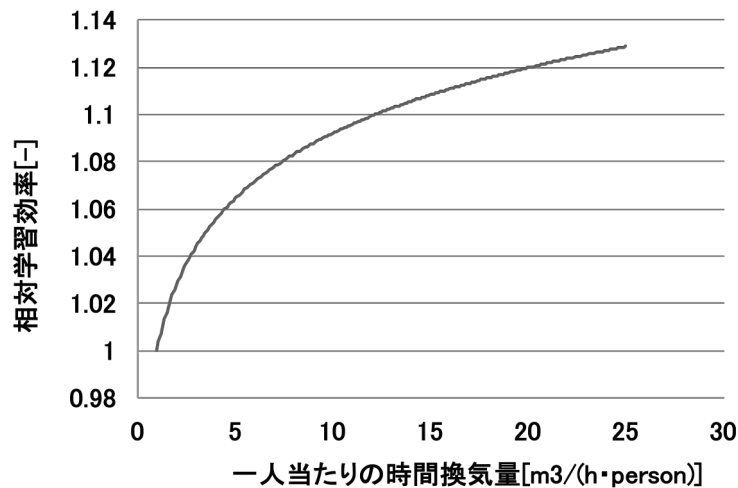


図 13 換気量と学習効率に関する対応関係<sup>59</sup>

村上らは以上の結果を踏まえ、空気質の不満足者率と一人当たりの換気量、そして確認テストの平均点との近似式に対し、再現性の確認を実験室実験にて実施している。ここでは、現地実測と実験室実験の整合性について紹介する。現地実測ならびに実験室実験それぞれの空気質の不満足者率と学習効率の関係について、不満足者率が 0%の時に学習効率の相対値が 1.00 になるよう修正し比較したところ、不満足者率の増加に対する学習効率の低下は、現地実測と比較して実験室実験が相対的に小さい結果となっている。次に、一人当たりの換気量と学習効率を、1.0 [m³/h]を基準として比較した結果、実験室実験で得た換気量の増加に対する学習効率は、一人当たりの換気量が現地実測と 2～3%の誤差で一致する結果となっている。現地実測と実験室実験の結果を合わせた全測定データを用い、換気量と学習効率の関係式を推定すると、次式のように示されている。

$$y = 0.04 \ln(x) + 1.00 \quad (4-3)$$

ここで、 $x$  は一人当たりの換気量、 $y$  は学習効率の相対値である。算出した近似曲線(図 13)は、現地実測と実験室実験の結果と  $R^2=0.82$  の相関が見られた( $p=0.002$ )と報告されている。以上の結果から、換気量と相対学習効率の関係は現地と実験室でほぼ同じ傾向を示し、不満足者率と学習効率の相対値の関係はやや差のある結果となることが示されている。

#### 4.4.2 室温と学習効率の関係

4.4.1 に示したように、村上らは換気量変化に伴う確認テスト平均点への影響を研究している。さらに、同環境において換気量を一定の条件とし、温熱環境(PMV)のみを変化させて現地実測を実施することで、温熱環境が学習効率に及ぼす影響について検討している<sup>59</sup>。

表 8 現地実測の条件<sup>59</sup>

実測日	ケース名	環境条件	科目	被験者
2/19(日)	PMV (-0.8→+0.4)	涼しい側から 徐々に暖かくなる	施行 1	90
2/26(日)	PMV (0.0)	熱的中立	施行 2	86
4/9(日)	PMV (-0.1)	熱的中立	施工 3	74
5/7(日)	PMV (+0.5)	暖かい	施工 4	73
5/14(日)	PMV (-0.5)	涼しい	計画 4	70

表 8 は実測実験における PMV の条件を示している。PMV (-0.8→+0.4)という条件は、温熱環境を時間内で変化させることを意味する。具体的には、PMV が涼しい側(-0.8)から暖かい側(+0.4)に変化させる環境条件である。その他、熱的中立条件(再現性を含め 2 回設定)として PMV が 0.0 程度、やや暖かい条件設定である PMV+0.5、やや寒い条件設定である PMV-0.5 の 4 種類の PMV 条件を設定している。なお、PMV の定義では PMV-0.5 から+0.5 までの快適な環境とされ、この範囲は全て快適であると見做すことが出来る。施工、計画分野の 2 つの暗記系科目の広義において実験し、換気量はすべてのケースにおいて同一量(一人当たり 約 25 [m<sup>3</sup>/h])に制御している。

現地実験の結果、PMV (0.0)の環境条件を基本とした場合、PMV (-0.8→+0.4)、PMV (-0.1)、PMV (+0.5)、PMV (-0.5)の各条件へ変化させたことで、それぞれ 9.1 点、0.5 点、8.7 点、0.6 点低下する結果となっている。PMV (0.0)の環境条件の点数を基準として学習効率の低下率を百分率換算すると、それぞれ 11.2%、0.6%、10.7%、0.7%の低下となる。PMV が時間的に変化する条件、ならびに PMV が暖かい側で一定の環境条件では、他の環境条件よりテストの点数が特に低くなる傾向となっている。

現地実験で得られた結果から、PMV を独立変数、学習効率(テストの点数)を従属変数として多項式近似により R<sup>2</sup>=0.99 の相関が認められる結果となった。PMV を x、テストの点数を y とした場合、近似式は次のようになる。

$$y = -16.2x^2 - 8.0x + 80.8 \quad (4-4)$$

ここで、y はテストの平均点(0 ≤ y ≤ 100)、x は室内の PMV を示している。また、PMV (-0.8→+0.4)は PMV が一定でないため、相関分析の対象から排除している。この結果から、学習効率が最大となる PMV は-0.24 と算出されている。村上らの現地実測では、換気量一定の条件で PMV のみを変化させた場合、熱的中率である状態よりもやや涼しい状態において学習効率が最大となり、涼しい側比較して暖かい側の学習効率低下が大きくなる結果を得ている。

#### 4.4.3 CO<sub>2</sub>濃度と室温が作業効率へ及ぼす直接的影響の評価

既存研究から、教室内の総合的な知的生産性は、温熱快適性(室温もしくは PMV)との間に二次関数的な関係を持ち、空気質(CO<sub>2</sub>濃度もしくは換気量)との間には対数的な関係がある。こ

表 9 現地実測の測定結果<sup>71</sup>

実測日	4F		5F	
	室温 [°C]	CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	室温 [°C]	CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]
7/11(水)	24.9±0.7	740±90	27.0±0.8	620±20
7/18(水)	26.9±0.5	710±80	24.9±0.7	630±50
7/25(水)	25.0±0.6	780±90	27.7±0.4	760±70
8/1(水)	27.5±0.4	780±90	25.1±0.6	740±60

これらの結果を踏まえ、伊香賀ら<sup>71</sup>は温熱環境、CO<sub>2</sub> 濃度、作業効率の関係を3次的に表現している。伊香賀らは、オフィスビルに勤務する社員を対象として室内環境を変化させ、社員の主観評価と合わせて実験的に評価を取っている。主観評価に用いる質問項目は、国土交通省の知的生産性研究委員会が検討した内容に準じている<sup>72</sup>。制御環境で通常通りの業務を行なった後、17 時ごろにオフィスのネットワークを利用し、Web 上でアンケートの回答を実施している。

この実験環境は、7階建オフィスビルの 4F, 5F を利用しており、被験者は 354 名の社員、いずれのフロアも床面積 1,512 [m<sup>2</sup>]となっている。実測した室温、CO<sub>2</sub> 濃度を表 9 に示す。室温と CO<sub>2</sub> 濃度の空間分布を考慮し、室内を8つのゾーンへ分類している。時間経過・ゾーン間で室温・CO<sub>2</sub> 濃度のばらつきが存在したものの、概ね設定通りの制御が達成されている結果となったことが示している。

また、各実測日の実測の前後1週間で実測日と同様の制御を行うことで得られる結果の精度を高めている。社員の作業効率は、アンケートを用いた主観評価により測定している。仕事のしやすさの妨げとなっている要因(光環境、温熱環境、空気環境、音環境、空間環境、人間関係、職務内容、モチベーション、特になし)の内、上位環境要因の改善による作業の予測向上[%]を回答させ、以下に示す式により算出している。

$$\text{作業効率} = 100 - \text{予測向上率} \quad (4-5)$$

ここで、算出される作業効率と被験者が回答する予測向上率は百分率である。ここで得られ

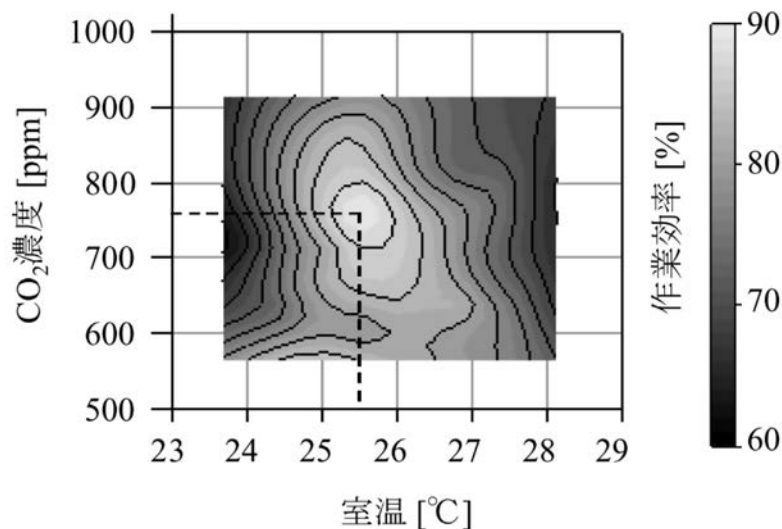


図 14 作業効率と CO<sub>2</sub> 濃度・室温の応答曲面モデル<sup>71</sup>



た作業効率と、実測された室温・CO<sub>2</sub>濃度の結果をもとに、作業効率と室温・CO<sub>2</sub>濃度の関係を調べている。

室温・CO<sub>2</sub>濃度を説明変数、作業効率を目的関数とし、応答局面モデルとして示されているのが図 14 である。図中では、室温 25.5 [°C]、CO<sub>2</sub>濃度 774 ppm の時、作業効率が最大になっている。また、室温 25.5 [°C]から離れるごとに作業効率が低下し、室温 26 [°C]付近では CO<sub>2</sub>濃度 750 ppm 付近から離れるにつれ作業効率が低下している。また、室温の変化が作業効率へ与える影響は、CO<sub>2</sub>濃度の変化より大きいことが示されている。

伊香賀らの研究では、知的生産性へ支配的な温熱・空気質環境と、作業効率への直接的な関係性を示した点で優れている。一方で、温熱環境の評価指標として居住者の快適性を考慮に入れた PMV を使用していない点や、サンプル数不足による応答曲面の歪である点が欠点と言える。例えば、室温 25.5 [°C]、CO<sub>2</sub>濃度が 770 ppm 付近では、CO<sub>2</sub>濃度の減少に伴い学習効率が低下するという、既存研究とは異なる推定結果が得られている。よって、既存研究を踏まえつつ、CO<sub>2</sub>濃度の減少に伴い学習効率が単純増加し、温熱指標として室温ではなく PMV を活用した指標を新たに設定する必要がある。

## 4.5 建物の温熱特性

4.4 では、室温と CO<sub>2</sub>濃度が知的生産性に与える影響について、村上・伊香賀らの実測実験結果をもとに紹介した。本節では、熱移動における基本式<sup>73</sup>から、室温・CO<sub>2</sub>濃度に対して支配的な熱・空気の移動モデルについて紹介する。

### 4.5.1 熱移動の概要

- 熱移動の基本

建物のモデル化を説明する前に、モデル化に必要な熱移動の基本式について述べる。ここでは、熱伝導、熱対流、熱放射、そして熱対流と熱放射を合わせた総合熱伝達率について簡単に説明する。

- 熱伝導

熱伝導は、個体中を熱エネルギーが高温部から低温部へと移動する減少である。電気的な絶縁体は結晶格子の熱振動、金属のような導電体は自由電子と格子原子との衝突エネルギーにより熱伝導が行われる。いずれの場合も原子自体は移動せず、熱エネルギー自体が原子から原子へと渡されていく事が大きな特徴である。また、後述する個体近傍の対流が発生していない流体においても、熱伝導が支配的となる。

固体中の熱伝導の基礎式はフーリエの式(4-6)により表される。

$$q = -\lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta} \quad (4-6)$$

- 熱対流

熱対流は、壁体内部から熱伝導で運ばれた熱が、壁体にごく近い境界層の流体分子に伝導で伝えられ、加熱された流体分子が移動する事で熱を運ぶ現象である。流体の移動が温度上昇に伴う浮力のみによっておこる現象を自然対流、風など強制力の伴う現象を強制対流という。対流による伝熱量は、ニュートンの冷却則(4-7)により示される。

$$q = \alpha_c(\theta_s - \theta_f) \quad (4-7)$$

$\alpha_c$ は対流熱伝達率と呼ばれる定数で、流体の種類、自然対流か強制対流かの種別、強制対流では流速の大小により変化する。

- 熱放射

熱放射は、光と同じく物体の電子の運動から放出される電磁波による熱移動現象であり、物体間の媒質がない真空中に置いて直接伝達される。入射するすべての波長の放射熱を完全に吸収し、自らは理論的に考えられる最大の放射熱を出す物体表面を黒体という。黒体からの放射熱量はシュテファンボルツマンの式(4-8)により算出される。

$$E = \sigma T^4 = C_b \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (4-8)$$

また、物体間の熱放射は絶対零度でない限りお互いに放射熱を吸収しあうため、熱の受け渡しを考える際には互いの放射量の差分として考える必要がある。そこで、この熱放射量 $\bar{q}_r$ は、(4-9)のように表される。 $\bar{\varphi}_{12}$ は形態係数と呼ばれ、面1から出た放射線の内面2に到達する割合を

$$\bar{q}_r = \bar{\varphi}_{12} \varepsilon_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) S_1 \quad (4-9)$$

示す。従って、面1が面2ですべておおわれている場合は $\bar{\varphi}_{12} = 1$ となる。

(4-9)は熱伝導や対流のように温度差( $\theta_1 - \theta_2$ )の一次式で表現されていないため、計算上不便である。そのため、一般には $\theta_2 \approx \theta_f$ として、(4-10)のように表す。

$$q_r = \alpha_r(\theta_1 - \theta_f) \quad (4-10)$$

(4-10)において、 $\alpha_r$ は放射熱伝達率といい、(4-9)、(4-10)から(4-11)で表現され、近似的に定数として取り扱う。

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \delta (T_1^4 - T_2^4)}{\theta_1 - \theta_f} \quad (4-11)$$

- 総合熱伝達率と熱貫流率

(4-7)、(4-10)から、壁体から空気へ伝えられる対流と放射の総合熱量  $q$  (4-12)で与えられ、 $\alpha$ を総合熱伝達率という。

$$q = (\alpha_c + \alpha_r)(\theta_1 - \theta_f) = \alpha(\theta_1 - \theta_f) \quad (4-12)$$

また、1次元におけるすべての熱移動を考えると、熱は高温側の空気から熱伝達で内表面に伝えられ、内表面から素材中を熱伝達で外表面に、外表面から再び熱伝達で低温側の空気に伝熱される。このように、一方の空気から物体を通して他方の空気まで熱が流れることを熱貫流という。この高温側から低温側への熱移動は、熱貫流率 $K$  [ $W/m^2 \cdot K$ ]を用いて(4-13)として表すことができる。なお、 $\alpha_{in}$ 、 $\alpha_{out}$ はそれぞれ、高温側と低温側の総合熱伝達率であり、 $\lambda$ は物体の熱伝達係数、 $\delta$ は物体の長さである。

$$q = \left( \alpha_{in} + \frac{\lambda}{\delta} + \alpha_{out} \right) (\theta_{in} - \theta_{out})$$

$$= K(\theta_{in} - \theta_{out}) \quad (4-13)$$

- RC 回路表現

室内の温度は長時間一定ではありえない過渡的な状態であり、非定常状態として考慮すべきである。しかし、一般的に暖房時の伝熱は近似的に定常状態(4-14)と仮定し、冷房時は非定常状態(4-15)とされている。

$$\frac{d\theta}{dt} \neq 0 \quad (4-14)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (4-15)$$

また、熱流量 $q$ を電流 $I$ 、温度差 $\Delta\theta$ を電位差 $V$ 、熱貫流率の逆数 $1/K$ を熱抵抗 $R$ に対応させると、伝熱もオームの法則(4-16)が成り立つ(4-17)。このように、オームの法則は電流以外にも適用できる重要な法則である。

$$V = RI \quad (4-16)$$

$$\Delta\theta = \frac{q}{K} \quad (4-17)$$

オームの法則を用いて物体の温熱変化を表現すると、物体内に蓄積する熱量を静電容量 $C$ として図 15 のように表される。時刻  $t$  において、温度  $T_1$  から  $T_2$  へ熱が移動する際に、熱流量( $q_1 - q_2$ )が物体内に蓄熱される。各熱抵抗での熱流量  $q$  は、温度差と熱抵抗により決定される。熱変化を RC 等価回路で表現した関係式を次に示す。

$$c \frac{dT(t)}{dt} = q_1(t) + q_2(t)$$

$$= \frac{T(t) - T_1(t)}{R_1} + \frac{T_2(t) - T(t)}{R_2} \quad (4-18)$$

RC 等価回路は熱的变化だけでなく、ロボティクス(Position angle, Force torque)・化学(Concentration, Reaction rate)・電磁気(Magnetic potential, Magnetic Flux)など幅広い分野のモデル化に活用される<sup>74</sup>。利点として、独立した異なる現象が相互的に影響し合う系を相互接続

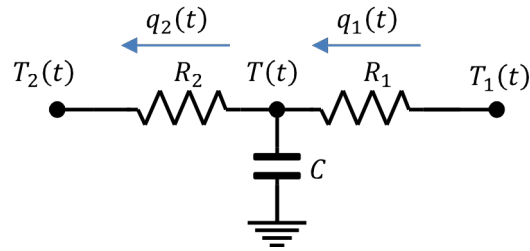


図 15 RC 等価回路による温熱表現(2R1C)

可能な点が挙げられる。さらに、モデル化の目的に合わせた粒度の選択が容易であり、物体の温熱変化を細かい粒度で表現する場合は RC の数を増加、3次元的に表現する場合は図 15 を上下に連結することで表現できる。

建物の温熱シミュレーションでは、細かい粒度で立体的な温熱変化を予測する CFD (Computer Fluid Dynamics)を除き、経験的に 2R1C(図 15)もしくは 3R2C を最小単位としてモデル化する場合が多い<sup>75</sup>。また、熱抵抗 R の数値は、簡易的な設計では物理量からの推定値を等分割し、精度を向上させる場合は実際の熱変化を観測した結果から数値解析的に決定する。後述するシミュレーションの結果から、本研究では物理量から推定される熱抵抗 R を等分割した 2R1C モデルを採用する。以降にて、この RC 回路表現を用いた建物の一般的なモデル化について説明する。

#### 4.5.2 建物の熱取得、熱損失

冬期の暖房時では、部屋からの熱損失 $\bar{q}$ を(4-19)で求めることができる。

$$\begin{aligned}\bar{q} &= \sum_i (K_i S_i + c_p \rho n V) (\theta_{in} - \theta_{out}) \\ &= \overline{KS} (\theta_{in} - \theta_{out})\end{aligned}\quad (4-19)$$

ここで $K_i$ は部屋の i 番目の熱貫流率、 $S_i$ は部屋の i 番目の部位の面積、 $c_p \rho$ は空気の容積比熱、 $nV$ は換気量を意味する。すなわち、建物全体の熱取得または熱損失は、空気の移動を伴わない熱移動 $K_i S_i (\theta_{in} - \theta_{out})$ と、空気自体に含まれる熱量 $c_p \rho n V (\theta_{in} - \theta_{out})$ の合算値として求めることを示している。 $\overline{KS}$ は総合熱貫流率と呼ぶ。この係数は建物が大きくなるに従って増大するため、建物の大小の影響を取り除き、断熱性を評価するために、延べ床面積で割った値を熱損失係数 Q で表す。この値は Q 値と称され、建物の断熱性を評価する指標として広く用いられている。本研究のモデル化では、(4-19)の総合熱貫流率を可能な限り単純化している。

4.5.1 で述べた RC 回路表現を用いて、(4-19)をモデル化した図を図 16 に示す。ここでは換気による熱移動 $c_p \rho n V (\theta_{in} - \theta_{out})$ を除く各モデルの詳細とパラメータの算出方法や定義について記述する。

なお、より正確な温熱シミュレータを構築するためには、潜熱について詳しく議論する必要がある。例えば、室内の水蒸気量変化についての詳細なモデル化と、それに伴う潜熱の変化を検討する場合。室内の水蒸気量変化を考える為に、室内湿度、すきま風による空気の流入、室

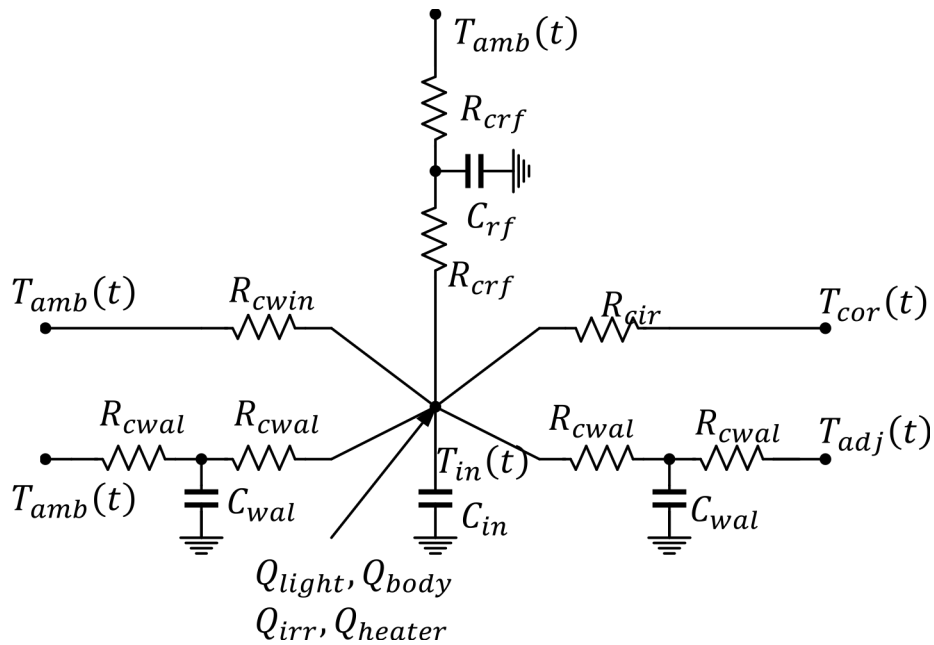


図 16 1 部屋の RC 回路表現

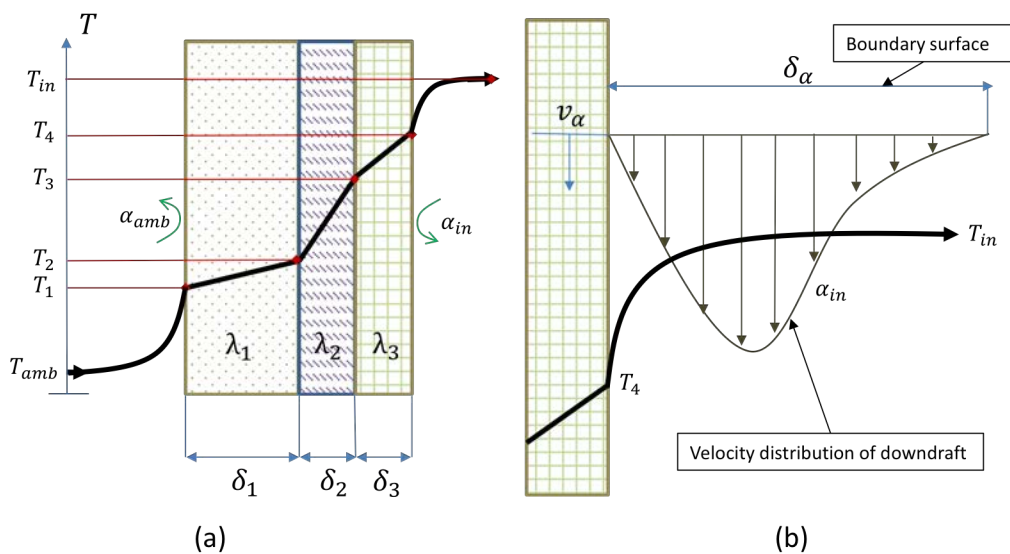


図 17 (a)壁面の温度変化モデル. (b)室内側の対流層

内に存在する Hard furniture (木材・石材を素材とした物体)と Soft furniture (布や綿を素材とした物体)の水蒸気容量, 人体や水面からの水蒸気発生量, 除湿器による水蒸気減少量, これらすべてを考慮する必要がある. 加えて水蒸気量と室温をもとに動的に湿り空気のエントルピーを算出しなければならず, 計算負荷が大きくなる. また, 今回制御対象とする教室には人体以外に水蒸気を発生させる物体が存在しないことから, 本研究では潜熱を考慮せず, 顕熱のみ取り扱ふと仮定する.

- 壁面

表 10 自然対流熱伝達率 $\bar{\alpha}_c$

部位	c値	$\bar{\alpha}_c$		備考
		$\Delta\theta = 5[^\circ\text{C}]$	$\Delta\theta = 10[^\circ\text{C}]$	
暖房時の天井面	2.67	4.0	4.8	自然対流作用大
暖房時の床表面	0.64~0.87	0.9~1.4	1.0~1.5	自然対流作用小
垂直壁表面	1.98	2.9	3.5	

室内の温度を一定に保つために最も重要な、壁面モデルについて図 17(a)にて表した。左側が外壁(ambient), 右側が内壁(inside)である。ここでは冬場の暖房状態について考える。高温側の室内から低温側の建物外へと熱が流出していくが、その熱量は(4-13)の総合熱貫流率 $K$ を用いて算出される。この中で、総合熱伝達率 $\alpha$ は対流成分と放射成分を含む。

対流による移動熱量はニュートンの冷却則(4-7)から求めることができる。しかし、図 17(b)の対流による温度分布の変化からもわかる通り、室内では下降気流、建物外では上昇気流が境界面で生じており、 $\alpha_c$ の値は流体の種類、流速、温度条件により大幅に異なるため、その都度算出することは現実的ではない。そこで、室内は自然対流と仮定して建築壁体で汎用的に用いられる、自然対流伝達係数 $\bar{\alpha}_c$ を(4-20)にて表す。

$$\bar{\alpha}_c = c(\theta_s - \theta_f)^{0.25} \quad (4-20)$$

さらに、表 10 にあるように、温度差が5 [°C]と10 [°C]の場合を比較すると、 $\bar{\alpha}_c$ が $(\theta_s - \theta_f)$ から受ける影響が小さいことがわかる。そのため、4.0~4.8 [W/m<sup>2</sup>・K]程度の定数として取り扱うことが多い。

また、外壁は強制対流と仮定して、ユルゲスの実験から求めた強制対流熱伝達 $\bar{\alpha}_{cv}$ を用いて(4-21)として算出される。こちらは一般的には平均風速を3 [m/s]として17.5~18.8 [W/m<sup>2</sup>・K]として見積もることが多い

$$\begin{aligned} & \text{普通面} \\ & \begin{cases} \bar{\alpha}_{cv} = 5.6 + 3.9v \quad (v \leq 4.9 \text{ [m/s]}) \\ \bar{\alpha}_{cv} = 7.2v^{0.78} \quad (v > 4.9 \text{ [m/s]}) \end{cases} \\ & \text{粗面} \begin{cases} \bar{\alpha}_{cv} = 6.2 + 4.3v \quad (v \leq 4.9 \text{ [m/s]}) \\ \bar{\alpha}_{cv} = 7.6v^{0.78} \quad (v > 4.9 \text{ [m/s]}) \end{cases} \end{aligned} \quad (4-21)$$

一方、放射による熱移動量は(4-9)、放射熱伝達率は(4-11)として表される。室内では、単位面積から他のすべての壁体への放射熱量を考えると $\bar{\varphi}_{12} = 1$ となる。また、 $T_2$ と $T_1$ はあまり大きく変わらないため、 $T_2 = T_1$ とすれば、(4-22)となる。

$$\begin{aligned}\alpha_r &\cong \varepsilon_1 \varepsilon_2 \delta \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \\ &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 C_b \left\{ \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \right\}\end{aligned}\quad (4-22)$$

(4-22)において、{中かっこ}の中は温度係数 $\beta$  [ $\text{K}^3$ ]と呼ばれる値であり、常温では $\beta \cong 1 \pm 0.1$ とされている。したがって、放射熱伝達率 $\alpha_r$ として、室内の仕上げ素材は $\varepsilon = 0.9$ 程度であるから、 $\alpha_r = 0.9 \times 0.9 \times 5.67 \times 1 = 4.6$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]と近似することができる。そして、建物外壁の熱放射の計算では、外気温と同じ温度の黒体の天空が覆うものとするので、外壁側の放射熱伝達率 $\alpha_{or}$ は $\alpha_{or} = 0.9 \times 1 \times 5.67 \times 1 = 5.1$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]となる。

以上の熱対流・熱放射の説明から、室内壁と外壁の総合熱伝達率は定数として示す。

$$\text{室内側} \quad \alpha_i \cong 4.6 + 4.4 = 9$$

$$\text{外壁側} \quad \alpha_o \cong 5.1 + 17.9 = 23$$

さらに、総合熱伝達率を定数として扱うことにより、RC 等価回路にて用いる熱貫流抵抗 $R$ が壁面の熱伝導率と厚さから算出することが可能となる(4-23)。

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (4-23)$$

また、建物の床面は直接地面に密着しているため、土間床の貫流熱損失(4-24)を採用する。

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_e}{\lambda_e}} \quad (4-24)$$

ここで、 $\delta_e$ は土の厚さであり、1[m]とする。 $T_e$ は1[m]下の地温 11.5 [ $^{\circ}\text{C}$ ]であり、農林水産省の資料<sup>76</sup>を参考にした。地温の決定には 22 年間の横浜での平均値を採用した。各年の冬期(1, 2, 12 月)の地中 1[m]での月平均温度は年間を通して変動がないと仮定し、また土の伝導率 $\lambda_e \cong 0.6$  [ $\text{W}/\text{mK}$ ]、土の上には厚さ $\delta_1$ のコンクリートが存在すると仮定している。

- 建物外の熱取得

建物外との熱交換は、窓から入射する太陽光線と、外壁や窓からの熱伝導の2つがあげられる。前者は日射量と窓の性質により決定され、後者は外気温・熱放射を考慮に入れた熱移動を考える必要がある。ここでは、初めに日射のモデル化について記述し、次に窓モデルについて触れる。最後に外気温と放射を考慮した SAT (Solar-Air Temperature)について述べる。

- 日射

太陽光線は主に 1. 直達日射(Direct radiation), 2. 天空日射(Diffusion radiation), 3. 反射日射(Reflected radiation)の3つに分類することができる. それぞれを $J_d$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $J_s$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $J_r$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]として次式に示す.

$$J = J_d + J_s + J_r \quad (4-25)$$

すべてを合わせた全天空および地上からの太陽光線の日射量 $J$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]を全天日射量という. さらに, 日射により温められた大気は地表面へ長波長の電磁波を照射するため, これを実効放射という. 通常, 外気から室内への熱貫流は, 外気温だけでなくこれら全天日射と実効放射の影響を多分に受けるため, 以上すべてを考慮した外気相当温度として, SAT を用いる.

直達日射とは, 太陽から大気を通過し, 平行光線として地表に到達した日射である. 図 18 のように, すべての直達日射は大気中のある一点の法線面から照射する法線面直達日射 $J_0$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]を基準とし, 太陽が高度 $h$ に位置する場合との大気質量の比 $m_0/m'_0$ を考える. また,  $J'_{dn}/J_0$ を大気透過率 $P$ とし,  $m_0/m'_0 = 1/\sin[h]$ として(4-26)のように表す. これを Bouguer の式と呼ぶ.  $J_0$ は太陽定数と呼ばれ, 年平均値として通常 $J_0 = 1353$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]を用いる. 大気透過率は, 各地での直達日射量の観測から逆算され, 理科年表<sup>77</sup>を元に算出した. 大気透過率は, 大気中の水蒸気量と埃などの影響を受け, 日本では冬より水蒸気が多い夏の値が小さくなり, また, スモッグ, 塵などの多い都会は, 地方より値が小さくなる. また, 建物の鉛直面が受ける直達日射は, (4-27)で表される. この式において,  $A$ は太陽方位角,  $A_v$ は鉛直面の方位角である.

$$J_{dn} = J_0 \left( \frac{J'_{dn}}{J_0} \right)^{\frac{m_0}{m'_0}} = J_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \quad (4-26)$$

$$J_{av} = J_{dn} \cos h \cos(A - A_v) \quad (4-27)$$

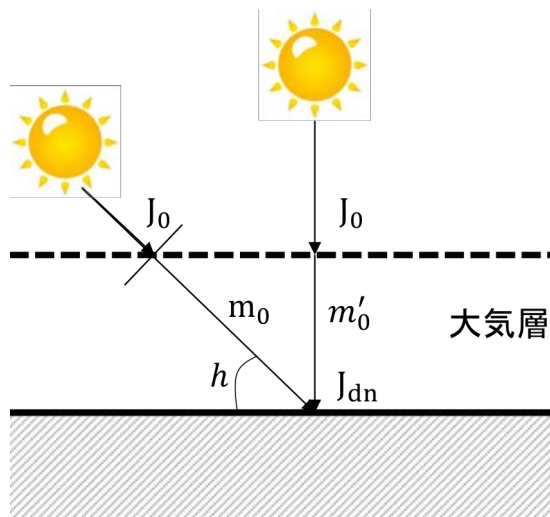


図 18 直達日射と大気層



日射が大気中で散乱されたのち、全天空から地表に到達する成分を天空日射と呼ぶ。理論的には雲のない日の青空光を主に扱う。天空日射は Berlage の式(4-28)で求められ、天空を等光度拡散面と仮定している。

$$J_{sh} = \frac{1}{2} J_0 \sin \left( h \frac{1 - P \sin h}{1 - 1.4 \ln P} \right) \quad (4-28)$$

天空日射は直達日射と異なり、大気透過率  $P$  が大きいほど小さくなる特徴がある。また、傾斜角  $\theta$  の傾斜面の受ける天空日射量  $J_{s\theta}$  は、(4-29)により与えられる。

$$J_{s\theta} = \frac{1 + \cos \theta}{2} J_{sh} \quad (4-29)$$

斜面は対向する地物から反射日射を受けるが、その量は地物の配置、反射率、指向性、直達日射の方向などで大きく変化し、取り扱いが困難である。そこで、通常(4-31)で傾斜角  $\theta$  の傾斜面の反射日射量  $J_{r\theta}$  を計算している。

$$J_{r\theta} = \left( 1 - \frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \rho_G (J_{dh} + J_{sh}) \quad (4-30)$$

$$J_{rv} = \frac{1}{2} \rho_G (J_{dh} + J_{sh}) \quad (4-31)$$

ここで、 $\left( 1 - \frac{1 + \cos \theta}{2} \right)$  は地面の形態係数であり、 $\rho_G$  は地面の日射反射率(アルベード)と呼ばれる。本研究では、「乾いた灰色の地表面」として定義されている ( $25 < \rho_G < 30$ ) の平均値として 27 を採用した。

地表面から宇宙空間へ放射する熱のことを実効放射、または夜間放射という。日中は大気から地表へ届く放射(大気放射)の方が大きいため、結果的に実効放射量は負の値となり地表の温度は上昇する。一方、夜間になると地表への日射がなくなるため、大気温度が地表温度より低くなるため、実効放射が正となる。快晴の大気から地表面への長波長放射量、つまり大気放射量は、Brunt の式(4-32)で求められる。

$$J_a = \sigma T_a^4 (0.526 + 0.076 \sqrt{f}) \quad (4-32)$$

ここで、 $T_a$  [K] は地表付近の空気の絶対温度、 $f$  [mmHg] は地表付近の空気の水蒸気分圧である。(4-32)のように、大気放射量  $J_a$  は、気温だけでなく大気の水蒸気分圧の影響を大きく受ける。これは、実際に大気放射を照射しているのは水蒸気分圧の低い水蒸気であり、大気中に水蒸気の量が少ないと、低空から高空の水蒸気までが寄与するためである。一方、地表面からの熱放射量、つまり実効放射量は、地球を黒体と仮定すると、シュテファンボルツマンの式(4-8)で

表される。(4-8), (4-32)から, 地表面が受ける快晴時の実行放射量は, (4-33)である。また, 傾斜角 $\theta$ の面からの実行放射  $J_{e\theta}$ は(4-34)で求めることができる。

$$J_{eh} = \sigma T_a^4 (0.474 - 0.076\sqrt{f}) \quad (4-33)$$

$$J_{e\theta} = \left(\frac{1 + \cos \theta}{2}\right) J_{eh} \quad (4-34)$$

ここで, どちらの式も雲のない快晴時を表していることに注意しなければならない。大気中に雲がある場合, 地表面は低空に存在する宇宙空間より温度の高い雲と放射交換をすることから, 実行放射量は減少する。雲量 $c$ の時の実効放射量  $J_{ehc}$ は(4-35)となる。  $k$ は雲の高さにより決まる修正定数であり, 上層雲 ( $k=0.8$ ), 中層雲 ( $k=0.3$ ), 低層雲 ( $k=0.15$ )となる。

$$J_{ehc} = J_{eh} \left\{ 1 - (1 - k) \frac{c}{10} \right\} \quad (4-35)$$

- SAT(相当外気温度)

外気から外壁表面に伝達される熱量は(4-13)で示した総合熱貫流率として表現したが, 実際には外壁面への熱的外乱には日射量と実行放射を考慮する必要がある。ここで, 外壁面に短波長放射である全日射量  $J$ (4-25)が入射し, 長波長放射である実行放射量  $J_{ehc}$ (4-35)が放出されるとして, 外壁表面へ流入する熱量を計算すると, 次式が得られる。

$$\begin{aligned} q &= \alpha_0(\theta_0 - \theta_f) + \alpha_s J - \epsilon J_e \\ &= \alpha_0 \left\{ \left( \theta_0 + \frac{\alpha_s}{\alpha_0} J - \frac{\epsilon J_e}{\alpha_0} \right) - \theta_s \right\} \\ &= \alpha_0 (SAT - \theta_s) \end{aligned} \quad (4-36)$$

$$SAT = \theta_0 + \frac{\alpha_s}{\alpha_0} J - \frac{\epsilon J_e}{\alpha_0} \quad (4-37)$$

SAT(4-37)は相当外気温度と呼ばれる。外気温 $\theta_0$ の代わりにSATを使えば, 日射と実効放射のある外壁の貫流熱量を算出することが可能となる。

- 窓

窓ガラスは外壁と異なり, 日射熱のある部分は室内に直接太陽光が透過し, 残りはガラスに吸収されて再放射される。このような窓ガラスの熱取得を考えるには, まず初めにガラス, カーテン, ブラインドなどの, 半透明体と呼ばれる遮蔽体の組み合わせ時の実効的な透過率, 吸収率を知る必要がある。また, 半透明体の組み合わせの種類により透過率, 吸収率, 反射率をそれぞれ算出し, それらを合わせた総合値を算出することになる。さらに, 半透明体への日射角度を考慮する必要もある。このような理由から, すべての値を算出すると計算が煩雑となるため, 一般には冷暖房時負荷の軽減を理由に日射遮蔽係数(SC)と呼ばれる定数が用いられることが多い。

表 11 SC と SHGC の値<sup>79</sup>

Glass thickness [mm]	SC	SHGC
3	0.977	0.85
4	0.959	0.835
5	0.942	0.82
6	0.944	0.821
8	0.903	0.768

SC (shading coefficient)とは、標準とする 3 [mm]厚普通透明板ガラス1 [m<sup>2</sup>]を通して室内に流入する日射熱量に対する、実際に用いる熱線吸収ガラスや遮蔽物付きの窓ガラス1 [m<sup>2</sup>]を通して室内に流入する日射熱量の比であり、 $0 < SC \leq 1$ の値である。この SC は、理論計算で求める場合と、実験によって求める場合がある。このように SC を用いることで、透過率、吸収率、反射率と日射の入射角を考慮すべき複雑な計算を定数にして扱えるようになるため、複雑な熱流入を簡略化することが可能となる。

さらに、より詳細な日射熱量を算出する場合は、SC の代わりに SHGC (Solar Heat Gain Coefficient)または g-value(4-38)が用いられている<sup>78</sup>。

$$g - value = \frac{\text{total solar heat gain}}{\text{incident solar radiation}} \quad (4-38)$$

SC は窓からの透過・吸収・反射の比率を考慮した係数であるが、加えて窓ガラスのフレームが日射を遮る影響と、ガラスに吸収された日射の一部が室内と屋外に発する熱を考慮した指標が SHGC および g-value (ISO 9050)である。(4-38)のように、SC より詳細にモデル化されているため、本研究においても g-value を採用する。なお、SHGC と g-value はそれぞれ米国と欧州を中心に採用されており、空気の比重の定義がわずかに異なるが、一般的には同じ値として扱われることが多い。

また、単純化のため、SC へ 0.87 を乗算することで算出する場合もある<sup>78</sup>。Ismailら<sup>79</sup>は、詳細な実測により SC, SHGC を計測したが(表 11)、この単純化がおおよそ正しいことも証明されているため、本研究では表 11 の厚さ 3 [mm]を窓ガラスのモデルとして採用する。

## 4.6 4 章のまとめ

本章では、室内の温度・CO<sub>2</sub> 濃度が知的生産性へ与える影響について、ASHRAE, 村上ら, 伊香賀らの実証実験を中心に紹介した。また、室内温度, CO<sub>2</sub> 濃度変化へ支配的な熱・空気の流出入について、田中らの文献をもとに紹介した。今日までの知的生産性に関する研究動向について、表 12 へ年表として示す。

1970 年以降、Fanger らによる PMV の提案、および建築物内での空気質環境の具体的な指標が決定し、これらのパラメータが室内での知的生産性へ与える影響について示唆されていた。1997 年の京都議定書以降、世界的な環境意識の向上に伴い、2000 年初頭には建物の空調機器制御をターゲットとした EMS に関する研究が始まった。特に応答性が高く電力需要が大きい

夏季・冬季の空調機器が省エネの制御対象とされるケースが多く見られたが、一方で過度な制御による室内環境の悪化により知的生産性を大きく減少させる結果が D. Wyon・P. Wargocki らにより示された。これにより、スマートグリッドでの建物の EMS が単なる省エネを考慮するだけでなく、在室者の住環境・知的生産性も総合的に向上させる必要性が認識された。2000 年半ばには、村上ら、伊香賀ら、ASHRAE に代表される研究結果から、室内の温度・換気量・CO<sub>2</sub> 濃度が、知的生産性へ与える影響についてより具体的に評価され始めた。村上らは、温熱快適性(室温, PMV)との間に二次関数的な関係を持ち、空気質(CO<sub>2</sub> 濃度, 換気量)の間には対数的な関係を持つことを示した。そして、伊香賀らは室温・CO<sub>2</sub> 濃度と、作業効率への直接的な関係性を3次元マップにて示した。ASHRAE は CO<sub>2</sub> 濃度が9種類の作業へ与える影響の大きさについて、3つの CO<sub>2</sub> 濃度(600, 1000, 2500 ppm)にて実験し、1,000 ppm を超える CO<sub>2</sub> 濃度では7種類の作業効率が著しく低下することを示した。

伊香賀らが示した室温と CO<sub>2</sub> 濃度の関係性を示す作業効率のマップは、村上らが示した PMV・CO<sub>2</sub> 濃度とテスト結果の関係式へ大まかには合致している。しかし、サンプル数不足による応答曲面の歪さにより、一部(室温 25.5 [°C], CO<sub>2</sub> 濃度が 770 ppm 付近)では村上らの示した関係式に合致しない点が存在する。また、知的生産性(作業効率, テストの点数)を評価するにあたり、温熱快適性として単純な室温ではなく在室者の温冷感を考慮した PMV をもとに算出する必要がある。

本研究がスマートなエネルギーサービスの一つとして提案する、教育施設の空調機器制御では、村上らが PMV と CO<sub>2</sub> 濃度を独立に関係式を示した学習効率指標を統合し、室内環境の評価指標として活用する。そこで本研究が提案するエネルギーサービスでは、統合した学習効率指標を利用した冬季空調機器制御により、空調機器の省エネ効果を実証する。本エネルギーサービスの貢献として、①マルチベンダからなるビル設備機器を統合制御する目的で2011年に採択された国際技術標準 IEEE1888 に基づき、2012年に EMS の環境構築を行った点と、②在室情報を取得するセンシング技術、教育環境に適した室内環境評価指標を組み合わせ、教育施設での EMS を活用した省エネ化を評価した点である。

①に関しては、複数のベンダ機器からなるビル設備を IEEE1888 に基づいたプロトコルを用いて統合し、実際に省エネ効果の評価した。これにより IEEE ビジョンプロジェクトに対し EMS を用いた省エネ実験事例として貢献した<sup>80</sup>。

②に関しては、教育施設で構築した EMS にて、室内評価指標・センシングといった既存の問題を解決しつつ省エネ効果の評価した。教育環境の空調機器制御を行うに当たり、室内環境評価指標は室温、もしくは PMV が中心であった。そこで本研究では、知的生産性へ影響を及ぼす CO<sub>2</sub> 濃度まで考慮した学習効率指標を活用した。さらに、学習効率指標を算出するために必要となる在室人数情報は、プライバシーや導入コストの理由から既築の教育施設では把握が困難であった。そこで、安価な CO<sub>2</sub> 濃度センサを用いて在室人数を推定する人数推定手法を導入し、室内環境評価の算出に活用した。これらを用いて IEEE1888 に即した制御環境にて、総合的な省エネ効果の評価した。

表 12 室内環境が知的生産性へ及ぼす影響に関する研究年表

年	温熱環境・知的生産性に関する研究	周辺の状況
1970	Fanger らが, PMV を提案	
1979	D. Wyon らが, 高い室温が子供の学習効率を低下させる結果を示す	
1997		第3回気候変動枠組条約国会議(COP3)にて, 京都議定書が採択 <sup>4</sup>
2001		ローレンスバークレー研究所 Chris Marney 博士がマイクログリッドを提唱 <sup>6</sup>
2004	D. Wyon らが, コールセンターの換気量が知的生産性へ与える影響を推定	
	P. Wargocki らが, 換気状態と従業員の作業効率との関係を示す	
2005		世界的にスマートグリッドの実証実験が開始
2006	村上らが, 日建学院にて一級建築士確認テストの点数を元の実証実験を実施	
	P. Wargocki らが, 室温低下と回答速度向上の関連性を示す	
2007		米国にて成立した EISA(エネルギー自給・安全保障法)により, スマートグリッドの研究開発が加速 <sup>7</sup>
2008	伊香賀らが, 室温・CO <sub>2</sub> 濃度と作業効率の関係を示す	
2009		我が国のスマートシティ(横浜市・豊田市・けいはんな学園研究都市, 北九州市)に関する研究開発が開始 <sup>13, 14</sup>
2010		長崎県五島市福江島にて「長崎 EV&ITS プロジェクト」を開始
2011		東日本大震災(日本)
		スマートグリッドの国際標準家が進む (IEEE 1888, IEEE2030) <sup>24</sup>
2012	ASHRAE が, 作業効率と室内 CO <sub>2</sub> 濃度の関係性を示す	
2013	本論文の提案	慶應義塾大学にて, 学習環境に特化した EMS が実装・実験
		第2次安倍内閣が EMS・ストレージシステムの開発・性能向上を重視したロードマップを発表 <sup>5</sup>
2016	E. Finell らが, 空気質環境が中学生の知能レベルへ与える影響を発表	我が国で電力小売自由化が開始
2017		我が国で都市ガス小売自由化が開始

---

## 第5章 ファジィ制御を用いた仮想蓄電池の実装提案

### 5.1 本エネルギーサービスの動機

本研究がスマートなエネルギーサービスの一つとして提案する、大規模施設付帯の駐車場における電力充電インフラ制御では、Spinning reserveとPeak powerへのEVバッテリーの活用を目標とする。具体的には、数秒から1日の電力負荷平準化効果を実証する。3.1.2で述べた通り、我が国では2030年までに大型商用施設約3,000店舗へEV0.9万台分、宿泊・公共施設等を含めるとEV2万台分の充電インフラを導入する目標を設定している。実際の評価環境として長崎県福江島を用いる。福江島は、未来のEV普及モデル確立、および低炭素化とQoLを両立するエネルギーサービスの創出を目的として、2.2.1で述べたEV・PHVタウン構想が2009年に提案され、翌年に「長崎EV&ITSプロジェクト」として実証地域へ採択された。そこで本研究では、長崎EV&ITSの一環として、福江島の主要な交通施設である福江港ターミナルビル周辺の情報管理を行うEMSを構築し、電力充電インフラ制御を活用した電力負荷平準化効果の評価することで、EV・PHVタウンにおけるスマートなエネルギーサービスの可能性を検討することとした。

福江港ターミナルビルは、島の主要な交通施設であり、多くの電力を消費するため、その需要平準化は重要な課題である。また、太陽光発電やEV用急速充電器が導入され、将来のEV・PHVタウンの縮図が構築されている。福江島の面積は326[km<sup>2</sup>]、人口は4万人であり、福江島には20～50[km<sup>2</sup>]間隔で急速充電器が設置されている。この島に、MITSUBISHI MOTORSが製造した商用EVであるi-MiEVが150台導入された。全国各地において最もEVが普及した島といえる。EVバッテリーはi-MiEVのために設計されたリチウムイオン電池が使用されている。また、福江港ターミナルビルへ構築したEMSでは、センサからの情報(建物の受電電力、温湿照度、CO<sub>2</sub>濃度、急速充電器の利用データ、EVの運転履歴)を管理サーバのデータベースに蓄えており、これらの情報を用いたスマートエネルギーサービスの提案が可能である。

本エネルギーサービスで議論する仮想電力ストレージとして、固定リチウムイオンバッテリー(FLIBS)、そして3.1.4にて述べたEV無線給電の議論に基づいた交換可能EVバッテリー(IEVBS)、交換不可能EVバッテリー(MEVBS)の三つの場合を想定する。制御手法として、計算資源の限られた想定環境での利用に適したファジィ制御手法、そして福江港ターミナルビルの利用傾向を考慮して設計したコスト関数を制御毎に逐次計算する制御手法、これら2つの手法を提案する。交換不可能なEVバッテリーシステムに関しては、各EVの充電状態を考慮した指令値分配手法についても提案する。そして、それぞれのストレージに対し、電力負荷平準化に必要な最小ストレージ導入量、長期運用シミュレーションによる最大・最小受電電力差削減の評価を行う。

### 5.2 提案研究の概要とモデリング

## 5.2.1 想定システム概要

表 13 モデリング対象の名称と分類

分類	名称	属性	実在の有無
Plant モデル	大規模商用電力系統	電源	現実
	太陽光発電システム	電源	現実
	福江港ターミナルビル	需要家	現実
	リチウムイオンバッテリー	ストレージ	仮想
	交換可能 EV バッテリー	ストレージ	仮想
	交換不可能 EV バッテリー	ストレージ	仮想
Controller モデル	ストレージ制御コントローラ	コントローラ	仮想

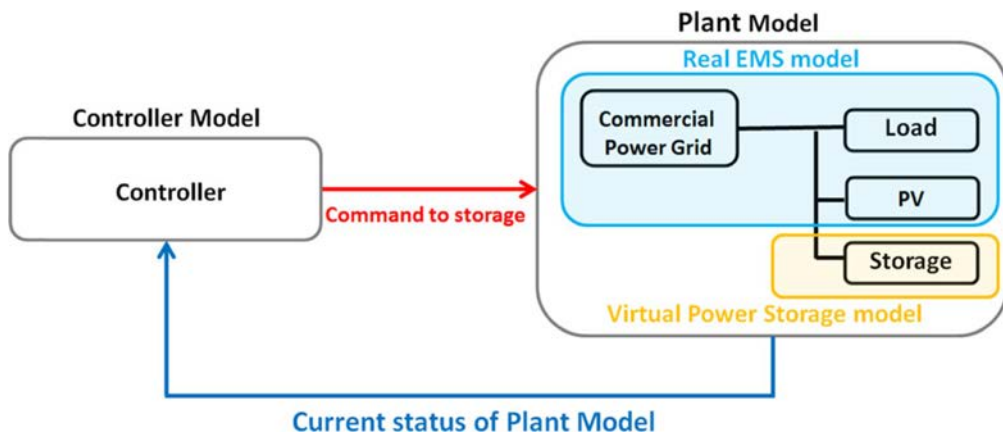


図 19 提案するシミュレーションモデルの概要図

今回のモデリング対象は長崎県五島市の福江港ターミナルビルとその周辺の関連付帯設備である。福江港ターミナルビルへの仮想ストレージ導入について議論するため、電力負荷平準化を達成する必要最低限のストレージ容量について評価する必要がある。そこで、福江港ターミナルビルの EMS から取得した実際の環境情報、メーカーとの技術協定により取得した EV ストレージの物理パラメータを用いた内部抵抗モデルを構築した。このモデルにより詳細なバッテリーパラメータを利用できるが、コンフィデンシャルな内容を含むため、契約履行上その詳細は割愛する。急速充電器はコントローラの指令に応じて要求する電力量をいつでも充放電可能であるとし、複数の EV ストレージを統合する際のエネルギー効率低下について考慮しない。

制御において秒単位での制御間隔を、また 2012 年当時の組み込み機器にて構築可能な充放電制御システムを想定している。我が国では、30 分同時同量に基づき 30 分間隔の積算電力で料金が決定するため、電力負荷平準化を達成するには 3.2.1 にて紹介した周波数調整ほどの短い制御時間は要求されない。しかし、V2G を通じた電力平準化には秒単位での充放電制御が要求されるため、ストレージへの制御指令を決定する時間は数秒単位での制御間隔を想定している。なお、想定する Peak power および Spinning reserve への利用においては、十分な制御遅延である。さらに、対象となる環境をクラウドで管理する場合、管理サーバには毎日 200 万エントリー近いデータが蓄えられるため、近年問題となっているクラウドへのアクセスの一極集中を増長させる可能性がある。また、クラウドにて制御システムを福江港ターミナルビルへ新たに

表 14 提案するシミュレーションモデルの概要図

パラメータ名	値
シミュレーション全般	
シミュレーションステップ間隔 [s]	$2.083 \times 10^{-3} = 1/60/8$
周波数 [Hz]	60
内部状態の出力間隔 [s]	20
シミュレーション時間 [s]	86400(24 時間)
太陽光発電システム	
PV パネル数	96
PV パネルの最大出力 [VA]	130
PV パネルの出力マップ $\begin{bmatrix} \text{入力} [\frac{W}{m^2}] \\ \text{出力} [\%] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 400 & 600 & 1000 \\ 0 & 35 & 57 & 100 \end{bmatrix}$
パワーコンディショナの最大出力 [W]	20000
パワーコンディショナの効率マップ $\begin{bmatrix} \text{入力} [\%] \\ \text{出力} [\%] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 12.5 & 25 & 50 & 75 & 100 \\ 0 & 85.55 & 90.05 & 92.23 & 92.54 & 92.71 \end{bmatrix}$
リチウムイオン電池(33 [kWh]単位)	
定格容量 [Wh]	33000
最大 SOC [%]	90
最小 SOC [%]	10
定格電圧 [V]	414.4
定格内部抵抗 [ $\Omega$ ]	0.112
インバータの最大出力 [VA]	50000
インバータの効率マップ $\begin{bmatrix} \text{入力} [\%] \\ \text{出力} [\%] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 25 & 50 & 75 & 100 \\ 80 & 88 & 92 & 93 & 93 \end{bmatrix}$
EV バッテリー(i-MiEV 1 台)	
定格容量 [Wh]	16000
最大 SOC [%]	90
最小 SOC [%]	10
定格電圧 [V]	333
定格内部抵抗 [ $\Omega$ ]	1.08
インバータの最大出力 [VA]	50000
インバータの効率マップ $\begin{bmatrix} \text{入力} [\%] \\ \text{出力} [\%] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 25 & 50 & 75 & 100 \\ 80 & 88 & 92 & 93 & 93 \end{bmatrix}$

構築するには、通信インフラの維持費運用コスト、一般回線とは独立した制御用通信回線の増築コスト、そしてクラウドの契約コストを考慮する必要がある。これらの理由から、福江港ターミナルビルの EMS は、2011 年時点の組み込み機器を用いた、ビル内で完結する制御環境で構築された。

本エネルギーシステムで考慮する設備を表 13 へ、各モデルの概略図を図 19 に示す。ソフトウェア要件は、MATLAB Version 7.11.0.584(R2010b), Simulink Version 7.6, SimPowerSystems Version 5.3(交流電気回路シミュレーション用)としている。更に、シミュレータ構築に使用した主なパラメータを表 14 に示す。



## 5.2.2 Plant モデル

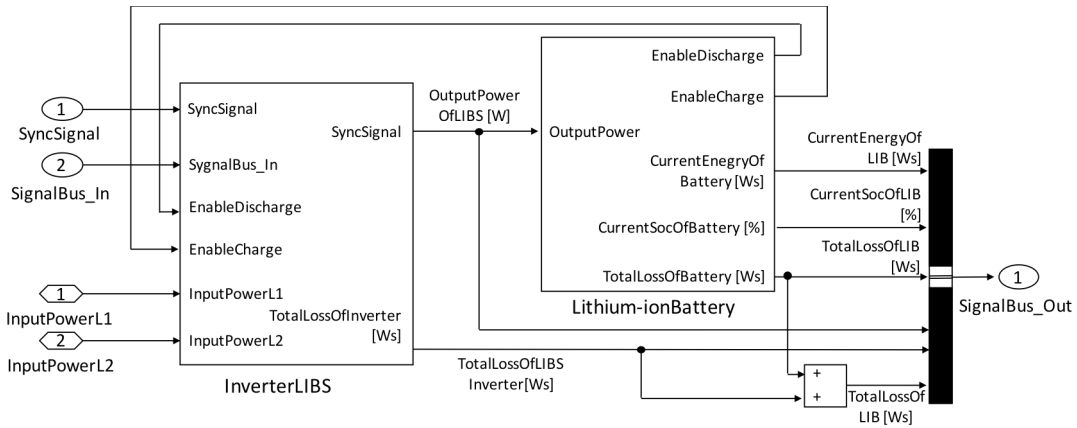


図 20 FLIBS モデルの全体図

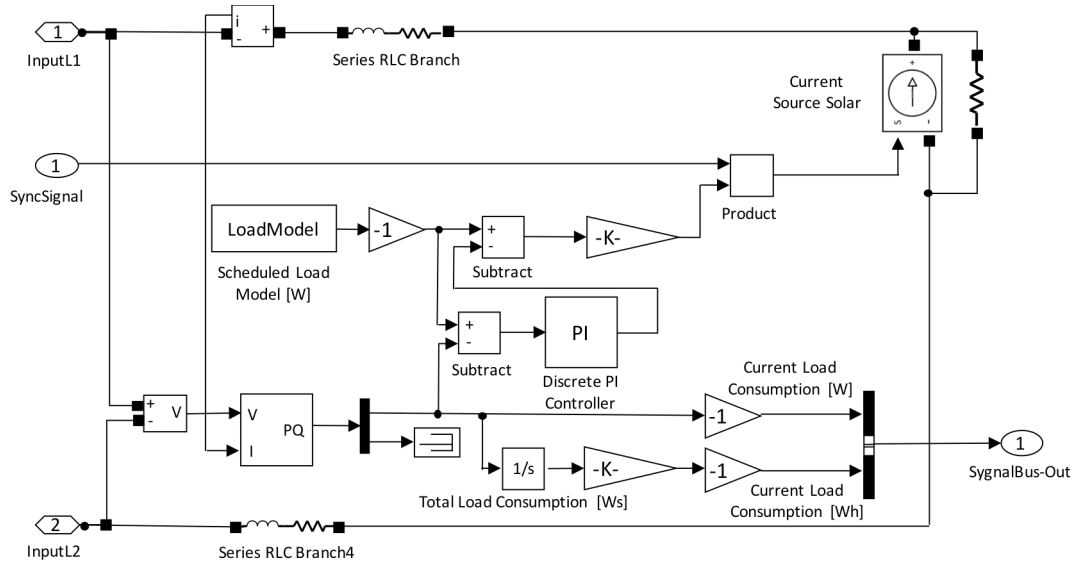


図 21 FLIBS のリチウムイオンバッテリーモジュールモデル図

Plant モデルは大きく、ストレージモデル(Virtual Power Storage model)とEMS モデル(Real EMS model)の 2 種類に分類される。ストレージモデルは、固定リチウムイオンバッテリー(FLIBS)、交換可能 EV バッテリー(IEVBS)、交換不可能 EV バッテリー(MEVBS)についてモデル化する。また、EMS モデルでは、系統電源、需要家、太陽光発電システムについてモデル化する。

### a) 固定リチウムイオンバッテリーシステム (FLIBS: Fixed Lithium Ion Battery System)

FLIBS モデルは、三菱重工業株式会社から提供された実システムのパラメータから一部を抽出した、福江港ターミナルビルに実在しない仮想ストレージである。このモデルは”リチウムイオンバッテリーモジュール”と”インバータモジュール”の 2 つのモデルで構築され、上位コントローラからの充放電指令に従い、電力の充放電を行う。図 20 にこのモデルの全体図を示す。

リチウムイオンバッテリーモデルでは、ステップ毎に入力される電力を積算して蓄電池に蓄えられるエネルギーを計算する。入力される電力は、蓄電池の内部抵抗による損失を考慮している。(5-1)はバッテリー蓄積エネルギーの計算式、(5-2)はバッテリーのエネルギー損失の計算式

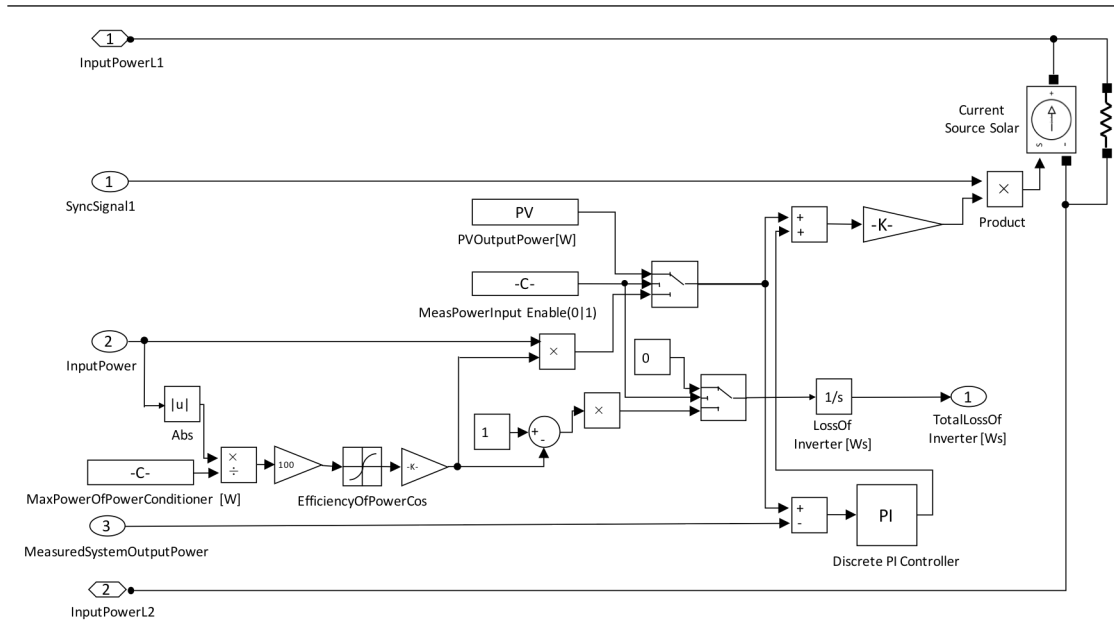


図 22 FLIBS のインバータモジュールモデル図

である。但し、 $P_{out}$  はバッテリーシステムの出電力[W]、 $B_{loss}$  はバッテリー損失 [W]、 $R_{nominal}$  はバッテリー内部抵抗 [ $\Omega$ ]、 $V_{nominal}$  はバッテリー定格電圧[V]である。図 21 にて蓄電池モジュールモデルの図を示す。

$$E_B = \int_0^t (P_{out}(t) - B_{loss}(t))dt \quad (5-1)$$

$$B_{loss} = R_{nominal} \left( \frac{P_{out}}{V_{nominal}} \right)^2 \quad (5-2)$$

インバータモデルでは、上位コントローラからの指令により、リチウムイオンバッテリーと福江港ターミナルビルの双方向で電力のやり取りを行う。インバータは、SimPowerSystemsの”Controlled CurrentSource”ブロックの電流源をコントロールすることで模倣した。また、後述するLoadの場合と同様、”Discrete PI Controller”を使用したPI制御により出力電力をフィードバックして電流を制御している。電源と同位相でコントロールすれば充電モード、逆位相なら放電モードになる。インバータにおける損失は、SOC [%]に対する効率マッピングにより計算している。図 22 にてインバータモデルの図を示す

b) 交換可能 EV バッテリーシステム(IEVBS: Interchangeable EV Battery System)

IEVBS モデルでは、到着した EV の電池を電源に接続し、出発時にフル充電の電池と交換することにより、駐車場に常に相当数の蓄電池が存在する場合をモデル化している。このモデルは、三菱自動車工業株式会社の EV である”i-MiEV”のパラメータを元に、福江港ターミナルビルの駐車場にある急速充電器を介して、双方向に電力をやり取りできるように変更した仮想モデルで

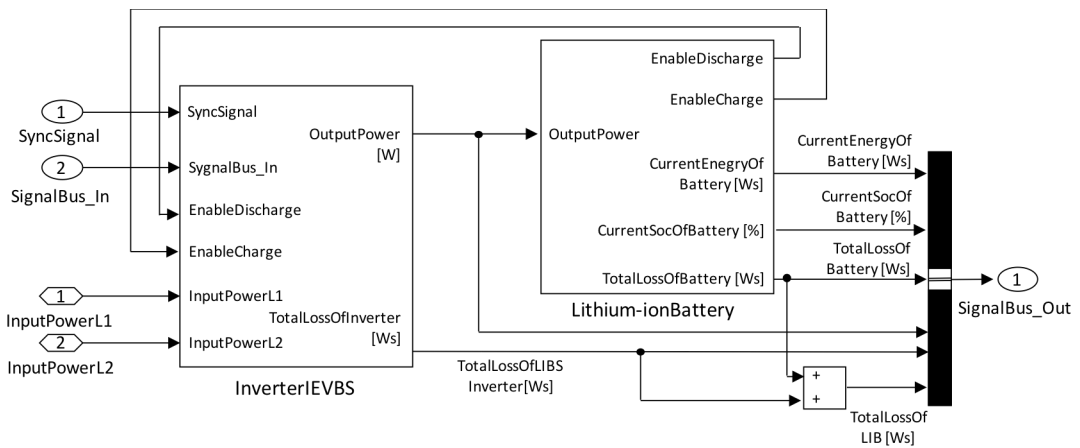


図 23 IEVBS モデルの全体図

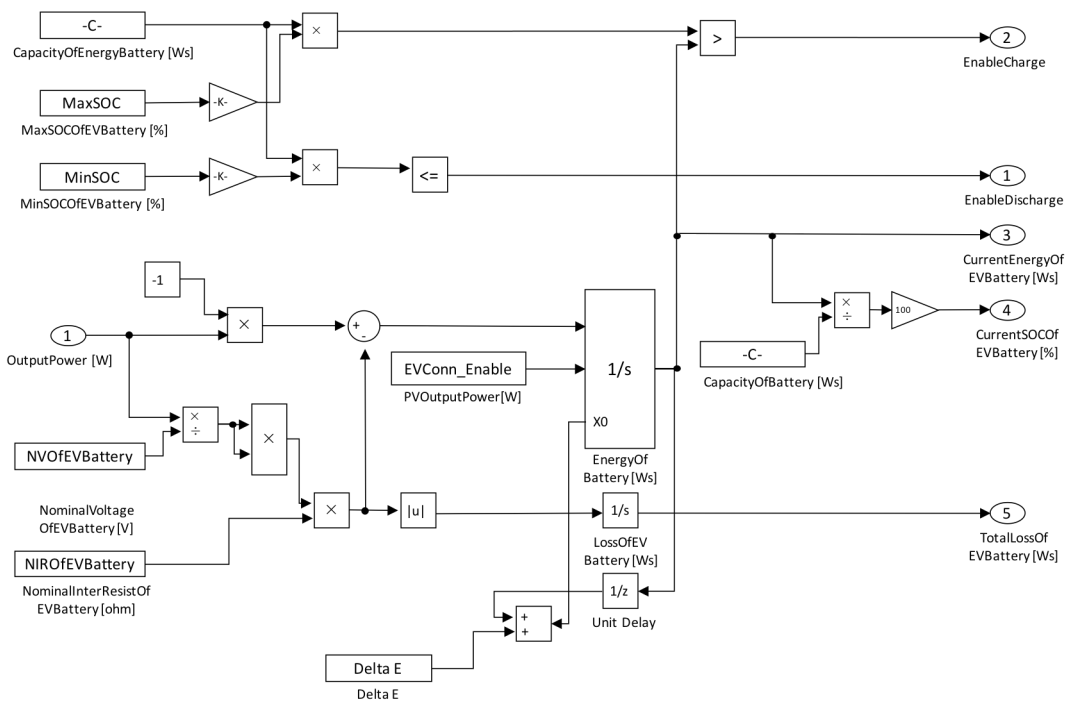


図 24 EV バッテリーモジュールモデル図

ある。このモデルでは駐車中の複数の EV に搭載された電池を大きな単一の集積電池として扱う。その集積電池は、コントローラからの充放電指令に従い、電源へ電力供給または消費するように制御される。EV は駐車場到着時に、バッテリーとその内部のエネルギーを集積電池に供給し、駐車場出発時にそのバッテリーとその内部エネルギーを持ち去る形で表現する。これは予め福江港ターミナルビル駐車場の実利用データから決定した利用スケジュールに沿い、仮想電池の総充電量を 15 分毎に不連続に変化させる事により実現する。駐車および出庫の最低周期を 15 分とした理由について、ターミナルビルの管理組合より入手した駐車場設置カメラの動画より駐車状態のデータを取得したが、管理組合より、利用者のプライバシーを考慮し、動画の解析を 15 分毎とすることが指示されたためである。より短い時間も想定できるが、実際に 15 分以内に駐車と出発を繰り返すケースがかなり稀であったことや、日本の電力需給同時同量制度が 30 分とされており、それより短い値を採用していること、さらに別途福江港ターミナルビル内の電力需要

機器制御を行っているが、その制御周期を勘案すれば十分な時間であり、結果的に 15 分間隔で正規化した場合でも実験結果に大きな影響を与えないと判断されたためである。IEVBS モデルは”EV バッテリーモジュール”と”EV インバータモジュール”の 2 つのモデルから成る。図 23 は IEVBS モデルの全体図である。

EV バッテリーモジュールモデルでは、ステップ毎に入力される電力を積算して EV バッテリーに蓄えられるエネルギーを計算する。入力される電力は、EV バッテリー内の内部抵抗による損失を考慮している。”EnergyOfEvBattery”の積分器は EV の接続情報”EvConn Enable”が 0 から 1 に変化したときを EV の発着の瞬間とみなし、EV バッテリーの充電量を”deltaE”の値に準じてリセットする。(5-3)に EV バッテリーの接続中のエネルギー計算式を、図 24 にて蓄電池モジュールモデルの図を示す。ここで、 $P_{out}$  は EV バッテリーの出力電力 [W]、 $B_{loss}$  は EV バッテリー損失 [W]、 $R_{nominal}$  は EV バッテリーの内部抵抗 [ $\Omega$ ]、 $V_{nominal}$  は EV バッテリー定格電圧、 $t_0$  は直前の EV の接続状況が変化した時刻[s]、 $t$  は現在の時刻 [s]をそれぞれ表す。なお、EV の発着によりリセットをかける際のエネルギー計算式については、5.3.1 で説明する。

EV インバータモジュールモデルは、上位コントローラからの指令により EV バッテリーと電源を双方向に電力受給する。SimPowerSystems の”Coltrolled Current Source”ブロックの電流源を制御する事でインバータを模倣している。この制御には SimPowerSystems の”Discrete PI Controller”を利用した PI 制御を用い、交流回路上の出力電力をフィードバックして電流制御を行う。システムは、電源と同位相で電流を制御すれば充電モード、逆位相ならば放電モードとして動作する。また、インバータの損失は SOC [%]と変換効率のマッピングにより計算する。図 24 にモデル図を示す。

c) 交換不可能 EV バッテリーシステム(MEVBS: Multi-EV Battery System)

MEVBS モデルは、駐車場に到着した EV がインバータを通じて電源に接続し、各 EV が駐車中にグリッド内の電力制御へ参加するモデルである。基本的な MEVBS の動作やモデル構成は

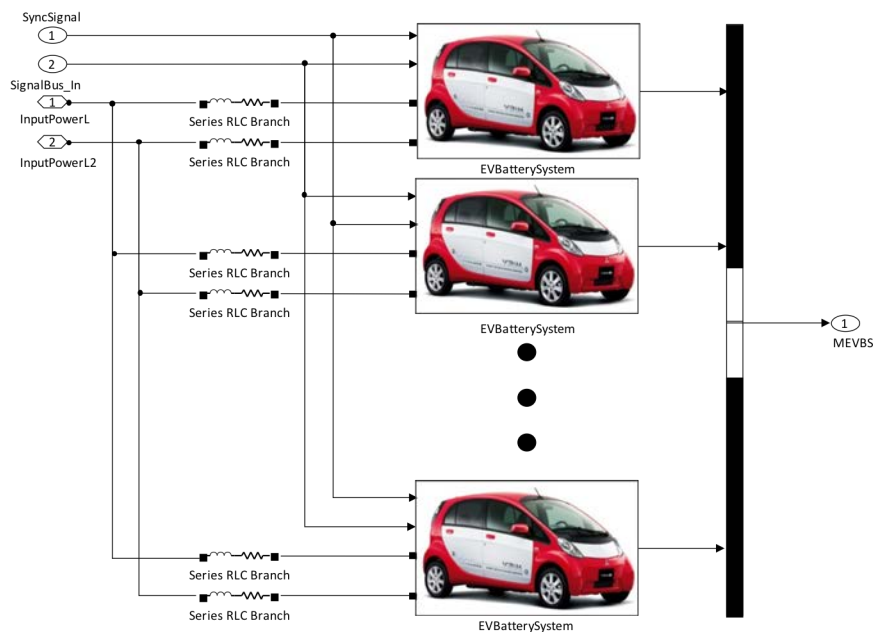


図 25 MEVBS モデルの全体図

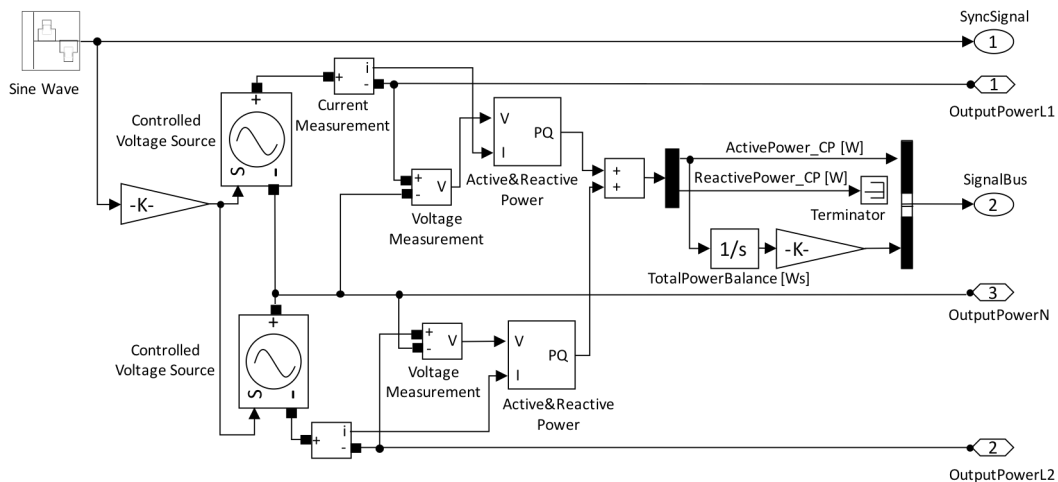


図 26 系統電源モデル

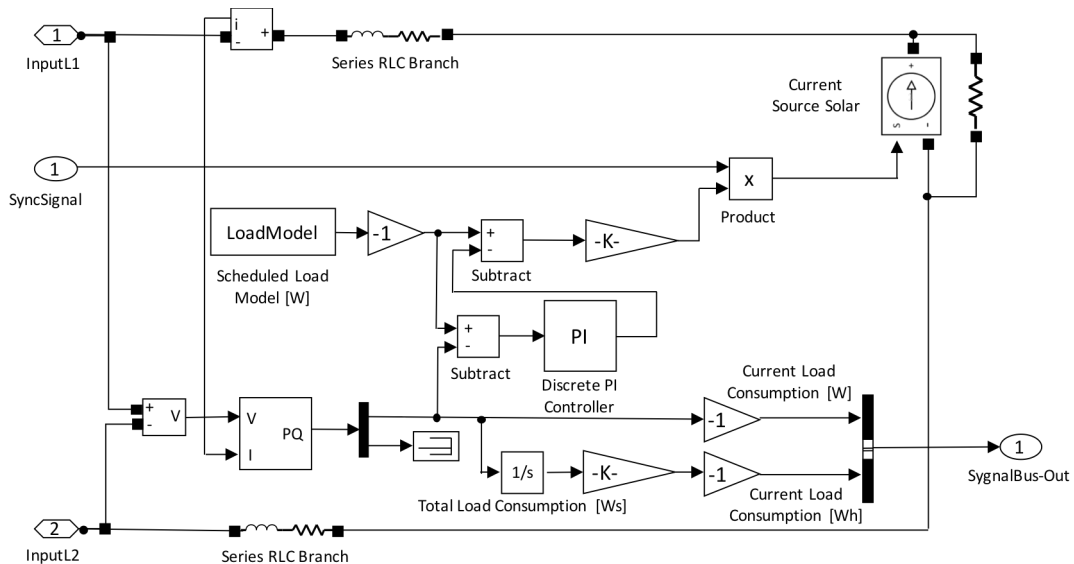


図 27 負荷モデル

IEVBS と同様であるが、出発時にフル充電の EV ストレージを受け取る IEVBS と異なり、各 EV の SOC を回復させつつ電力制御へ参加する必要がある。そのため、MEVBS には後述する充電指令値分配コントローラが必要となる。

本モデルは複数の”i-MiEV”モジュールからなり、”i-MiEV モジュール”は”i-MiEV バッテリー”と”i-MiEV インバータ”の 2 種類のモデルから成る。また、各々の”i-MiEV モジュール”に対して、予め決定した利用スケジュールに沿い、充電量を 15 分毎に不連続に変化させる事により、EV の発着を模倣する。図 25 は MEVBS モデルの全体図である。

i-MiEV バッテリーモデルでは、ステップ毎に入力される電力を積算してバッテリーに蓄えられるエネルギーを計算する。入力される電力には、EV バッテリー内の内部抵抗による損失を考慮している。本モデルでは、複数 EV に対して、各々の発着状態を考慮したスケジュールファイルを読み込む事で、電池の充電状態を判定し EV を模倣する。このため、”EnergyOfEvBattery”の積分器には EV の接続スケジュール情報”EvConn Enable”が 0 から 1 に変化したときを EV の

従来の瞬間とみなし、EV バッテリーの初期値スケジュール信号”InitialEnergyOfEvBattery”の値を積分器の初期値としてリセットする。EV バッテリーのエネルギー計算式は (5-3) で示しており、エネルギー計算の側面では IEVBS と同様である。また、i-MiEV インバータモデルも、IEVBS の EV インバータモジュールモデルと同様である。

$$\Delta E_B = \int_{t_0}^t (P_{out}(t) - B_{loss}(t)) dt \quad (5-3)$$

d) 系統電源

系統電源は無限大母線と仮定し、SimPowerSystems ライブラリの”Controlled Voltage Soucre”ブロックを利用した電圧源とした。モデリング対象は西日本の商用電源であるため、振幅 $100\sqrt{2}$ 、周波数 60 [Hz] の Sin 波を入力し実現している。また、単相 3 線式の配電線を模倣するために、このブロックを 2 つ直列に接続し、100 [V] (L1-N, L2-N), 200 [V] (L1-L2) が取り出せるようにした。図 26 に系統電源のモデルを示す。

e) 負荷(需要家)

福江港ターミナルビル内で消費される総電力負荷として、このモデルでは SimPowerSystems ライブラリの”Controlled Current Source”ブロックの電流源を使用する。予め負荷データである csv ファイルの内容を読み込んでおいた loadmodel パラメータからの電力指示値により、電源から電流を引くように電流源をコントロールし、負荷として模倣する。また、同様に SimPowerSystems の”Discrete PI Controller”を使用した PI 制御により、交流回路上の負荷電力(負荷電力としての実現値)をフィードバックして電流をコントロールする。図 27 にこの負荷モデルを示す。

f) PV

PV システムモデルは、”PV パネル”と、”パワーコンディショナ”の 2 つのモデルから構成される。このモデルには 3 つの動作モードが存在し、1 つ目は日本気象協会から提供されている標準気象データ METPV-3 にある日照量から動作するモード、2 つ目は実際の PV システムの出力電力の計測値を入力し動作するモード、3 つ目は任意の出力電力指令値を入力し動作するモードである。図 28 に PV モデルの全体図を示す。

PV パネルのモデルは、METPV-3 の日照量データ ( $0.01 [MJ/m^2]$ )を( $1 [W/m^2]$ )に単位変換して日射量-発電マップに入力し、単位 PV パネル当たりの発電量を計算する。パネルの枚数を変更する事で発電規模の変更が可能である。図 29 に PV パネルのモデル図を示す。

PV のパワーコンディショナモデルは、PV パネルの出力を入力としてパワーコンディショナの効率マップから損失分を差し引いた電力を SimPowerSystems の”Controlled CurrentSource”ブロックを用いて電流源として出力している。SimPowerSystems の”Discrete PIContorller”を使用した PI 制御により、交流回路上の出力電力をフィードバックして電流を制御している。図 30 にパワーコンディショナのモデル図を示す。

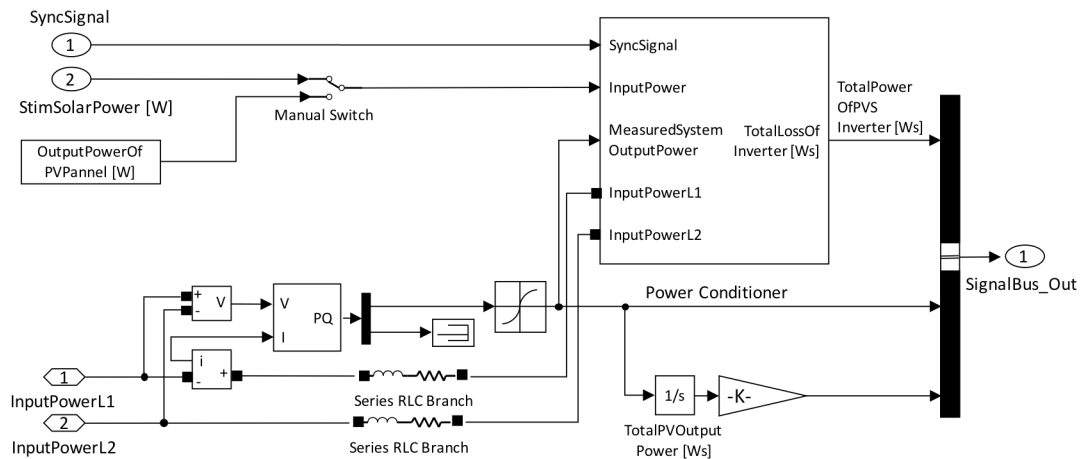


図 28 PV システムの全体図

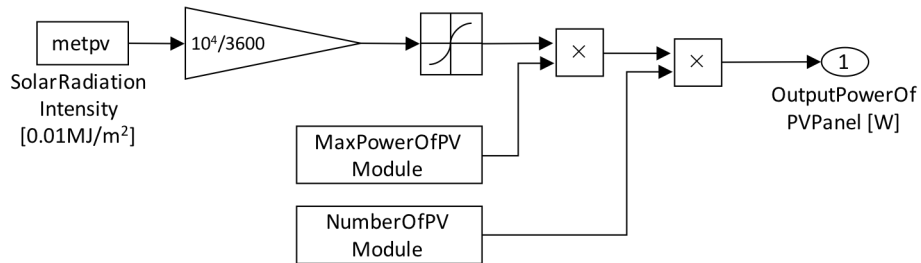


図 29 PV パネルのモデル図

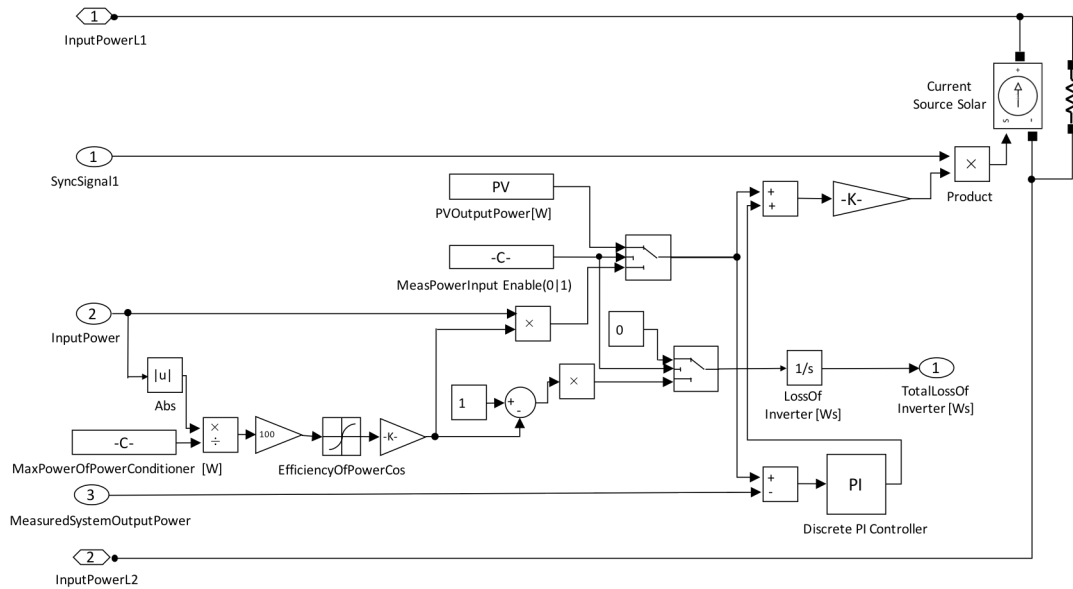


図 30 パワーコンディショナのモデル図

### 5.2.3 コントローラモデル

設計するコントローラの主な目的は、効率的かつ連続的なストレージ機能を達成することである。その目的を達成するため、福江港ターミナルビルの受電電力を平準化し、一日の中で事前に設定した SOC まで回復させるコントローラを設計する。また、ストレージを効率的かつ継続的に運用するため、副目標として蓄電池の SOC を目標値(50%)まで回復させるという目標も考慮する。これにより、予期せぬ負荷の変動を吸収する能力が高まり、電池の効率的利用につながる。福江港ターミナルビルの EMS から取得した情報を活用し、ストレージへの制御指令を適切に決定するコントローラを設計し、これらの目標達成を目指す。

先に紹介した IEVBS と MEVBS は、駐車場に駐車した EV を仮想的に統合された集積電池として扱うことを考える。そこでコントローラモデルとして、1) 集積電池を制御するバッテリーコントローラ、2) バッテリーコントローラがけ停止した指令値を各 EV へ分配する制御指令値分配コントローラを設計する。ここで、1) バッテリーコントローラは充放電指令を決定するため全ての蓄電池 (FLIBS, IEVBS, MEVBS) で使用するが、2) 制御指令値分配コントローラは EV ストレージの SOC に応じて指令値を分配する MEVBS のみに使用する。

### 5.2.3.1 バッテリーコントローラ

EV ストレージはモデルの種類 (IEVBS, MEVBS) にかかわらず、統合された単一の集積電池として考える。バッテリーコントローラの目的は、この集積電池と固定蓄電池 (FLIBS) の充放電制御指令を決定し、電力負荷平準化と SOC 回復を両立することにある。ここでは、全てのバッテリーモデルに対して、2 つの制御手法 (ファジィ制御手法、逐次制御手法) を提案する。本研究では制御に伴うコストを極力低減させることを目指しており、PLC など工業用途において頻繁に利用されるシンプルかつ高信頼なコントローラ上で実行可能な制御モデルを構築することを目指している。これは、実際にターミナルに実装した際に、コントローラ自体の利用電力量が効果に大きな悪影響を与えることを避けるためである。これらの観点から、まずモデルに忠実に数値解析的かつ逐次的に推定しつつ制御を行うモデルを構築する。この場合においても、計算量は PLC に搭載できることを前提に設計する。比較対象として、同様に低コストなファジィ制御を利用する。簡便な制御手法であり PLC や、より非力なマイクロコントローラでも実現可能である。具体的には、実際にターミナルビルにおける電力機器制御にも用いたコントローラユニット KEYENCE KV-1000 およびその開発環境である KV-BULIDER によって設計可能であることを前提とした。本研究は、バッテリーの実装方式の違い、すなわち固定リチウムイオンバッテリー (FLIBS)、交換可能 EV バッテリー (IEVBS)、交換不可能 EV バッテリー (MEVBS) の比較評価がメインであり、多くの研究がテーマとする、より優れた制御方式を追求することではない点に留意されたい。

まず、各手法について議論する前に、共通する議論について簡単に紹介する。次に、提案手法であるファジィ制御手法と逐次制御手法について述べる。

仮想蓄電池の SOC は、IEVBS(5-4) と MEVBS(5-5) でそれぞれ次式として表される。

$$SOC_{IEVBS}(t) = \frac{E_{IEVBS}(t)}{\sum_{i=1}^N C_i} \times 100 \quad (5-4)$$

$$SOC_{MEVBS}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N SOC_i(t) \cdot C_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^N C_i} \quad (5-5)$$

$E_{IEVBS}(t)$  は IEVBS に蓄積された時刻  $t$  [s] のエネルギー量 [kWh]、 $N$  は駐車スロットの数、 $C_i$  は



表 15 バッテリー制御コントローラにおける変数

名称	説明
$t$	時刻変数 [s]
$\Delta t$	1 タイムスロットの時間 [s]
$S(t)$	時刻 $t$ の受電指令値 [W]
$S_{min}$	$S(t)$ の許容最小値定数 [W]
$S_{max}$	$S(t)$ の許容最大値定数 [W]
$SOC(t)$	時刻 $t$ の充電パーセント [%]
$L(t)$	時刻 $t$ の需要電力 [W]
$PV(t)$	時刻 $t$ の太陽光発電電力 [W]
$B_{total}(t)$	時刻 $t$ のストレージへの放電指令値 [W]
$Gin(t)$	時刻 $t$ の受電電力 [W]
$\alpha(t)$	時刻 $t$ のファジィ出力 [-]
$fuzzy()$	ファジィ関数
$S$	受電指令値の決定変数 [W]
$S_{vector}(S)$	受電指令値履歴配列 [W, W, ..., W]
$Var()$	標本分散
$average()$	平均
$\beta$	SOC での目的間の重要度比定数 [-]
$SOC_f(t)$	時刻 $t$ の予測 SOC(t)
$SOC_{set}(t)$	時刻 $t$ の目標 SOC(t)

$i$  番目の EV 蓄電池の容量 [kWh],  $SOC_i(t)$  は  $i$  番目の EV の SOC,  $f_i$  は  $i$  番目の EV の駐車フラグである。

受電電力の平準化と最終 SOC の回復を達成するには、次式のように、受電指令値  $S(t)$  [W] を適切に制限するアプローチが有効である。受電指令値  $S(t)$  の許容範囲を定数で制限することにより、受電電力の平準化を行う。

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (5-6)$$

$S_{min}$ ,  $S_{max}$  は需要家の負荷、およびバッテリーでのロス等から決定される時間に依らない定数であり、5.4 で詳しく議論する。理想的には、 $S_{min} = S_{max}$  であり、このように一定の受電電力で受電できれば、最も平準化性能が高いといえる。実際には、需要予測の誤差等から充電不足が生じるなどにより、需要のピークが発生しうる。また、この場合、副目標である SOC の回復制御も困難となる。この為、ある程度の平準化を犠牲にしつつ安定的に需給調整を行う必要がある。なお、バッテリーコントローラでは、現在の状態(時刻  $t$ )から 30 分後の指令値  $S(t + \Delta t)$  を決定し、その後線形補完を利用して各時刻の受電指令値  $S(t)$  を決定する。ここで、 $\Delta t$  は 30 分を示す。また、今後使用するパラメータの名称とその説明を表 15 に示す。線形補完よりも、より詳細な補完手法を用いることも可能であるが、PLC で利用することを想定していることから、簡便な予測手法が適していること、逐次制御手法において、簡便な線形予測でも十分実用的であることを示すことができると考えたため選択した。特に、過去の同時刻における実負荷データの変化量を平均化した値をもとに線形で予測しており、最も推定精度が高かった 14 日平均を用いていることから、その制度は十分に高いといえる。なお、実際に 30 分同時同量制御において、同様の補完手法が優れていることは[81]において示されている。

a) ファジィ制御手法 (CDCF: Charge Discharge Control using Fuzzy)

CDCF では、受電電力指令値  $S(t)$  を決定する問題を、ファジィ制御を利用して解決する。制御指令値  $S(t)$  の CDCF を用いた決定は 30 分毎に行う。

一般にファジィ制御では、入力変数セットのファジィ化、ファジィルール適用、出力変数セットの非ファジィ化という 3 段階のプロセスを経て出力変数セットを得る。バッテリーコントローラでは、現在の充電状態である  $SOC(t)$  と現在の時刻  $t$  から 30 分後の受電指令値  $S(t+\Delta t)$  を決定し、線形補完することにより、かく制御指令値  $S(t)$  を決定する。また、受電指令値の定数制限を反映する為、(5-7)、(5-8)のように  $S(t)$  を定義し、 $S(t)$  決定問題を  $\alpha(t)$  決定問題に置き換えた。

$$S(t) = (1 - \alpha(t)) \cdot S_{min} + \alpha(t) \cdot S_{max} \quad (5-7)$$

$$\alpha(t + \Delta t) = fuzzy(SOC(t), t) \quad (5-8)$$

ここで、 $\alpha(t)$  は時刻  $t$  のファジィ出力、 $fuzzy()$  はファジィ制御の出力決定プロセスを表している。(5-8)では、ファジィコントローラの入力引数を時刻  $t[s]$ 、 $SOC(t)$  とし、出力変数(決定変数)を  $(t+\Delta t)$  とした。簡便化するため、ファジィコントローラへの入力は  $t+\Delta t$ 、 $SOC(t+\Delta t)$  で、出力も  $(t+\Delta t)$  とし、(5-9)を用いて同じ時刻での対応関係に直すことで対応した。

$$SOC(t + \Delta t) = 2 \cdot SOC(t) - SOC(t - \Delta t) \quad (5-9)$$

以下、この2つの変数( $t$ ,  $SOC$ )とファジィ出力  $\alpha$  に対するメンバシップ関数の決定を行う。ここで、入力変数を  $SOC(t)$ ,  $t$  の二つとしたのは、ストレージにとっての理想的な時刻別の利用履歴が考えられ、それに合わせ込むように受電電力を決定することにより、安定的な制御性能が期待できると考えられる。特に、EMS で取得した電力需要データの結果から、福江港ターミナルビル<sup>82</sup>の電力需要 6 時から 18 時までが高需要、それ以外の時間が低需要という特性が明らかとなった。そこでこの需要特性を制御へ反映させることで、主目標の受電電力平準化と副目標の  $SOC$  回復を目指す。以下では実際に決定した変数ごとのメンバシップ関数を示す。

$SOC$  のメンバシップ関数には、図 31 のように台形型と三角形型のメンバシップ関数を利用した。ここで台形型のメンバシップ関数を利用したのは、クリスプな表現である台形の上底分と、ファジィな表現である台形の斜辺部分が組み合わさっている事で、より現実対象に適した制御を可能とするためである<sup>82</sup>。また、Z4 の 50%中心の急な三角形メンバシップ関数を利用する事で、シミュレーション終了時に  $SOC$  を 50%付近に収束させる事ができる。またこれと同じ理由により、Z1 と Z2 の重なり部分、Z6 と Z7 の重なり部分を急斜面にする事で制御の切り替えを可能にしている。クリスプな変数をファジィなメンバシップ関数を用いてあいまいに記述する際、区間を細かく分けるとよりよい制御が可能となる。しかし一方で、区間を細かく分ける事は制御を複雑にさせるというトレードオフの関係にあるため、試行錯誤の結果、今回の制御対象については、図 31 の様な 7 区間分割に決定した。

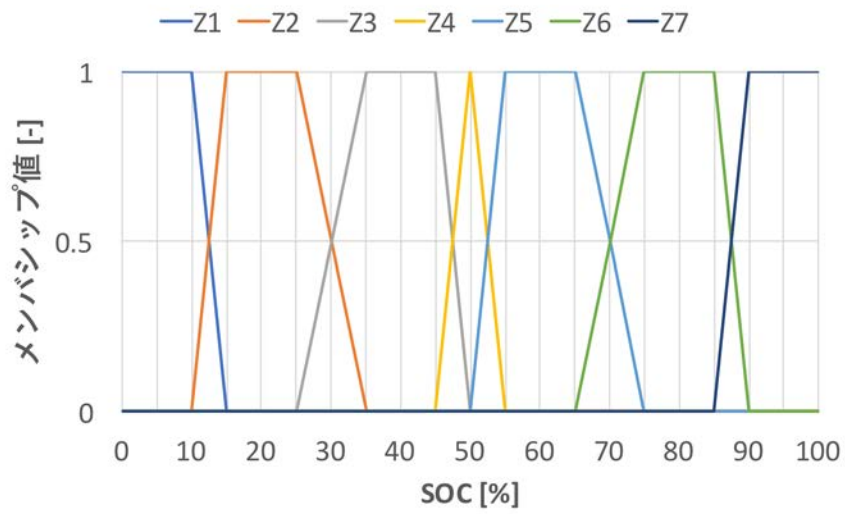


図 31 SOC のメンバシップ関数

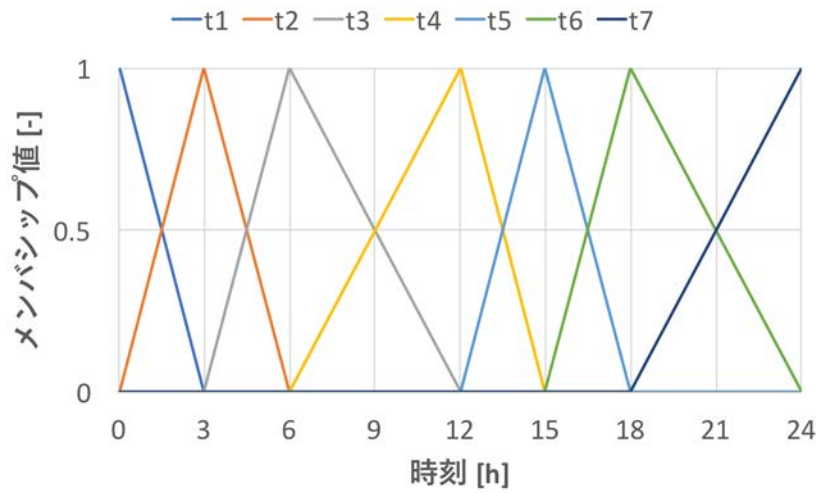


図 32 時刻 t のメンバシップ関数

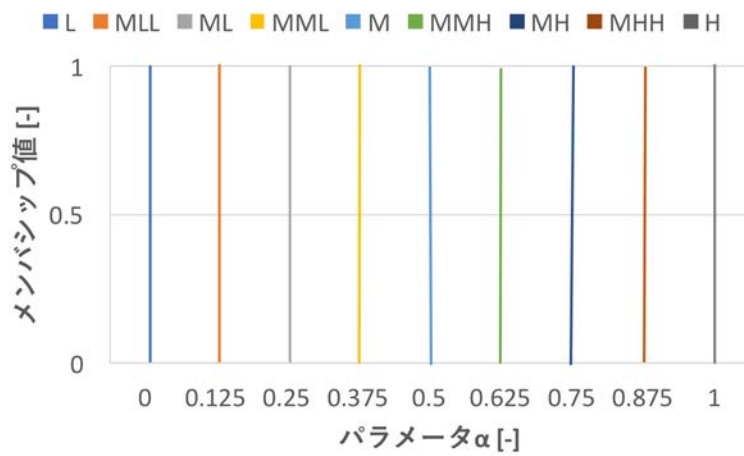


図 33  $\alpha$  のメンバシップ関数

シミュレーション経過時間  $t$  のメンバシップ関数は、図 32 に示す通り三角形型のメンバシップ関数だけを利用した。これは、需要家の需要特性が、時間によって比較的明確に決まっていることを考慮した結果である。  $3 \leq t \leq 6$ ,  $15 \leq t \leq 18$  において隣の区間と重なりが急であるのは、この区間の SOC が充放電の限界が近くなりやすい時刻であり、制御を慎重に行う必要があることが需要解析で分かったためである。更に、制御対象の受電電力特性が大まかに見て6時間毎に変化することから、 $t$  を大きく分けて、6時間ずつ分割した。以上により、図 32 の様な7区間分割のメンバシップ関数を採用した。

出力パラメータ  $\alpha$  のメンバシップ関数は図 33 に示す通り、簡略化の観点から[0 1]の範囲を8分割し、シングルトン関数を出力変数のメンバシップ関数として採用した。シングルトンとは幅がなく高さのみの概念から成るファジィ関数であり、しばしばファジィ制御の簡略化の目的で用いられる。

次に設定したメンバシップ関数に基づいたファジィルールについて説明する。ファジィルールはメンバシップ関数によりファジィ化された入力変数を元に、出力変数のファジィなセットを得るための if-then ルールである。このルールの設計がファジィ制御の制御性能を大きく左右する。ファジィルールは制御対象の特徴を反映させる必要がある。SOC の制御方針として、低負荷時に極力充電し、高負荷時に充電量を使い切らないようにぎりぎりまで使い切り、再び低負荷時に目標 SOC まで充電するというモデルケースが理想的であると考えられる。前述したように、福江港ターミナルビルでは6時から18時までが高需要、それ以外の時間が低需要である。以下では図 32 で表した時間帯( $t1$  から  $t7$ )、並びに図 31 で表した SOC の状態( $Z1$  から  $Z7$ )に関するルールを紹介する。

- 区間  $t1$  のとき: 低負荷の初期段階であるため、 $Z4$  を目標にする。
- 区間  $t2$  のとき:  $Z5 \sim Z6$  を目標とする。
- 区間  $t3$  のとき: 低負荷から高負荷の推移状態であるため、 $Z7$  を目標とする。
- 区間  $t4$  のとき: 高負荷かつ放電の中間点であるため、 $Z4$  を目標とする。
- 区間  $t5$  のとき:  $Z3 \sim Z2$  を目標とする。
- 区間  $t6$  のとき: 高負荷から低負荷への推移状態であるため、 $Z2 \sim Z1$  を目標とする。
- 区間  $t7$  のとき: 低負荷かつシミュレーション終了が近づいているので、 $Z4$  を目標とする。

これらの目標を元に、 $\alpha$  が1に近いほど充電になりやすく、 $\alpha$  が0に近いほど放電になりやすい事を踏まえて(5-7)、以下の図 34 様なファジィルールを決定した。なおこのルールは例の一つであり、5.2.2 で紹介した負荷、PV パネルの状態をもとに必要に応じて微調整を行う。

入力されたファジィセットは区間名(言語表現)とそのメンバシップ値の対によって構成される。例えば SOC = 30% に対しては、(区間名:  $Z2$ , メンバシップ値: 0.5), (区間名:  $Z3$ , メンバシップ値: 0.5)といった具合に構成する。これが時刻  $t$  についてもあるので、今回の SOC,  $t$  のメンバシップ関数では、メンバシップ値が0でない SOC,  $t$  の区間名の組み合わせは4種類存在する。これらすべての組み合わせに並行してファジィルールを適用し、図 34 から対応する出力変数  $\alpha$  のファジィ言語表現を得る。また、これに対応する  $\alpha$  のメンバシップ値は、SOC と  $t$  のメンバシップ値を Minimum 演算をする事により決定される。この処理により、 $\alpha$  のファジィな区間名と、メン

t1    t2    t3    t4    t5    t6    t7

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
Z1	H	H	H	H	H	H	H
Z2	H	H	H	H	MHH	MH	H
Z3	MH	H	H	H	MHH	M	MH
Z4	M	H	H	MHH	M	ML	ML
Z5	MML	MHH	H	MH	MML	L	L
Z6	ML	MMH	H	M	MLL	L	L
Z7	L	L	MH	L	L	L	L

図 34 CDCF で用いるファジィルールの例

バシッ値のセットが 4 つ得られる事になる。α とメンバシッ値は、重心法を利用し、α のクリスプな表現に変換した。これは、メンバシッ値に対応する区間名の代表値を合計したものを、メンバシッ値の数で割ってクリスプな値を出力する方法である。

b) 逐次制御手法(CDCS: Charge Discharge Control using Sequential method)

CDCS では、コスト関数の定義と 30 分毎の逐次計算により、受電電力指令値 S(t) を決定する。線形予測された 30 分後の受電電力から、30 分後にコスト関数を最小化する指令値 S(t+Δt) を算出する。以下に、CDCS で最小化するコスト関数(5-10)、拘束条件を示す。

$$\min_S J = \left( \frac{\sqrt{\text{Var}(S_{\text{vector}}(S)) \times 100}}{\text{average}(S_{\text{vector}}(S))} \right)^2 + \beta \tag{5-10}$$

$$\cdot \{SOC_f(S, t + \Delta t) - SOC_{\text{set}}(t + \Delta t)\}^2$$

subject to  $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$

ここで、(5-10) の第一項は受電電力変動抑制項、第二項は SOC 回復項である。S は 30 分後から 1 日終了まで一定とした受電指令値、受電電力  $S_{\text{vector}}(S)$  は受電指令値の履歴から成る配列、β は二つの目的間の重要度を決定づける定数である。受電電力変動抑制項(第一項)は受電指令値  $S_{\text{vector}}$  での 1 日の受電電力変動係数の二乗、 $SOC_f(S, t + \Delta t)$  は受電指令値が S の時における 30 分後の予測 SOC、 $SOC_{\text{set}}(t + \Delta t)$  はこれまでの電力データから決定した 30 分後の目標 SOC である。

次に、CDCS に必要なパラメータ( $S_{\text{vector}}(S)$ ,  $SOC_f(S, t + \Delta t)$ ,  $SOC_{\text{set}}(t + \Delta t)$ ) の決定を行う。なお、拘束条件での  $S_{\max}$ ,  $S_{\min}$  は 5.5.1 で各々のストレージの場合について決定し、β は 5.5.1 の CDCF により決定されたストレージ最小導入量に基づき決定する。

- 受電指令値履歴配列:  $S_{\text{vector}}(S)$  の決定

本エネルギーサービスは 1 日の受電電力平準化を目指しているため、評価指標として 1 日の受電電力の変動係数を考慮するのが妥当である。時刻 t 以降に対してはそれ以降の履歴は得

られないため、過去の履歴と一定の指令値  $S$  からなる  $S_{\text{vector}}(S)$  を以下のように定義する。

$$S_{\text{vector}}(S) = [S(0), S(\Delta t), S(2\Delta t), \dots, S(t), S, S, \dots, S] \quad (5-11)$$

ここで、 $\Delta t$  は 30 分を示し、 $S_{\text{vector}}$  は 49 次元の配列である。また、変動係数は標本分散の二乗根を標本の平均値で除して求めた無次元の値である。

- 予測 SOC:  $SOC_f(S, t + \Delta t)$  の決定

SOC の予測値に関しては、線形需要予測法<sup>83</sup>を利用した。まず、現在時刻  $t$  の電力情報から、時刻  $t + \Delta t$  での実負荷( $L_r(t + \Delta t) = L(t + \Delta t) - PV(t + \Delta t)$ )の予測を行う。この予測は、(5-12) に示す通り、過去の同時刻における実負荷データの変化量を平均化することにより(5-13)から決定される。ここで、平均化の対象となる適切な日数は需要家により異なる可能性があるため、実際に用いたデータについては後述するが、データ取得を行った全期間内において、最も予測誤差が小さかった 14 日間の区間長および評価区間として定めた。

$$\Delta L_r = \frac{1}{14} \cdot \sum_{i=1}^{14} (SL_{r,i}(t + \Delta t) - SL_{r,i}(t)) \quad (5-12)$$

$$L_{r,f}(t + \Delta t) = L_r(t) + \Delta L_r \quad (5-13)$$

以下では実負荷電力を  $L_r(t)$  と定義し利用する。 $\Delta L_r$  は過去 14 日間のデータから求めた 30 分間の平均実負荷電力変化 [W]、 $SL_{r,i}(t)$  は  $i$  番目のサンプリング日の実負荷電力 [W]、 $L_{r,i}(t + \Delta t)$  は時刻  $t$  での実負荷情報をもとに算出した 30 分後の予測実負荷電力である。

次に、(5-15)により 30 分後の SOC の予測を行う。

$$H = S - \frac{L_{r,f}(t + \Delta t) + L_r(t)}{2} \quad (5-14)$$

$$SOC_f(S, t + \Delta t) = \begin{cases} SOC(t) + 100 \cdot \frac{H \cdot \Delta t \cdot \eta}{C_{\text{total}}}, & H \geq 0 \\ SOC(t) + 100 \cdot \frac{H \cdot \Delta t}{C_{\text{total}}}, & \text{else} \end{cases} \quad (5-15)$$

$S$  は 30 分後の受電電力の一次元決定変数、 $C_{\text{total}}$  は仮想集積電池の総容量 [Ws]、 $\eta$  はストレージのインバータ効率 [%] である。

- 目標 SOC:  $SOC_{\text{set}}(t + \Delta t)$  の決定

福江港ターミナルビルの電力需要は時間的な傾向があり、6 時から 18 時までが高需要、それ以外の時間が低需要という特性を持っている。その傾向に基づき SOC の目標を設定することで、安定的なストレージ運用が期待できる。そこで、目標 SOC ( $SOC_{\text{set}}(t + \Delta t)$ ) を決定する。需要家

の傾向から、時間別の(5-16)で定義した。

$$SOC_{set}(t + \Delta t) = \begin{cases} SOC(t) + \frac{(80 - SOC(t)) \cdot 0.5}{6 - t}, & (0 \leq t < 6h) \\ SOC(t) + \frac{(20 - SOC(t)) \cdot 0.5}{18 - t}, & (6h \leq t < 18h) \\ SOC(t) + \frac{(50 - SOC(t)) \cdot 0.5}{24 - t}, & (18h \leq t < 24h) \end{cases} \quad (5-16)$$

本エネルギーサービスでは、30分毎での指令値の決定を行っており、目標値の定義域は24時間とする。また、目標SOCの値域を[20, 80]としたのは、目標から外れた時にも安全性を確保する為である。

### 5.2.3.2 制御指令値分配コントローラ

ストレージのタイプがMEVBSの場合、各EVの状態に合わせた制御指令値を決定しなければならない。そこで、駐車場の発着情報を考慮した制御指令値分配コントローラ (SPDC: Set point distribution controller), さらに比較対象となる単純指令値分配法(SSPDC: Simple set point distribution controller)を設計する。

- SPDC の提案

SPDCでは、バッテリーコントローラにより受電指令値 $S(t)$ が決定された後、各EVへの指令値を分配する。まず、ストレージとその他のモデルとの関係から(5-17)が成立する。

$$B_{total}(t) = L(t) - PV(t) - S(t) \quad (5-17)$$

なお、 $L(t)$ ,  $PV(t)$ ,  $S(t)$ ,  $B_{total}(t)$ は時刻 $t$ における負荷電力、太陽光発電電力、受電指令値、そして集積電池への放電指令値である。

次に、放電(5-18)と充電(5-19)の関係式(5-20)により放電指令値 $B_i(t)$  [W]を決定する。そのため、集積電池全体から見て放電している場合でも、あるEVに関してはその状況に応じて充電の指令を与えることが可能である。これにより、EV毎のSOC、そして駐車状態を考慮した充電指令値の決定が可能となる。

$$A = \frac{(SOC_i(t) - SOC_{min})f_i C_i P_i(t)}{\sum_{i=1}^N (SOC_i(t) - SOC_{min})f_i C_i P_i(t)} \quad (5-18)$$

$$B = \frac{(SOC_{max} - SOC_i(t))f_i C_i P_i(t)}{\sum_{i=1}^N (SOC_{max} - SOC_i(t))f_i C_i P_i(t)} \quad (5-19)$$

$$B_i(t) = \begin{cases} \{\theta A - (\theta - 1)B\} \cdot B_{total}(t), & (B_{total}(t) \geq 0) \\ \{-(1 - \theta)A - \theta B\} \cdot B_{total}(t), & (B_{total}(t) < 0) \end{cases} \quad (5-20)$$

ここで、 $P_i(t)$ はアーラン分布から成る予測駐車確率密度関数、 $SOC_{min}$ と $SOC_{max}$ はそれぞれ10%, 90%である。本エネルギーサービスでは、 $i$ 番目の駐車スペースのEV利用者から利用予約

時間  $\tau_i$  を受けつけ  $\lambda_i$  を算出し (5-21), 予測駐車確率密度関数  $P_i(t)$  をアーラン分布から決定する (5-22). この予測駐車確率を表現する分布として様々考えられるが, 一般に用いられるのは指数分布もしくは, これをより現実的な分布モデルに改良したアーラン分布である. 指数分布では時刻 0 における事象発生確率, この場合では出発確率が最大となるため相応しくないと考えられる. アーラン分布では, 係数  $k$  が 0 の場合は指数分布となり, それ以外の場合は, 平均値に向かって徐々に確率が増大し, その後も滑らかに減少するという性質を持つ. また, 一般に待ち行列におけるモデルとして頻繁に利用され, 実際の待ちのモデルともよく一致することが知られている.

$$\lambda_i = \frac{1}{\tau_i} \quad (5-21)$$

$$P_i(t) = 1 - \int_{t_{0,i}}^t \frac{(k\lambda_i)^k (\tau - t_{0,i})^{k-1}}{(k-1)!} \cdot \exp(-k\lambda_i(\tau - t_{0,i})) dt \quad (5-22)$$

$t_{0,i}$  は  $i$  番目のスロットに EV が到着した最新時刻,  $\tau_i$  は利用予約時間から算出される定数,  $k$  は実施のデータからフィッティングした整数定数 ( $k = 1.75 \times 10^4$ ) である. また, EV の駐車スロットから, 実際の駐車状態  $f_i$  (駐車:1, 空車:0), 駐車している EV の充電状態  $SOC_i(t)$ , 最大バッテリー容量  $C_i$  [Ws] を取得出来る状況を想定している. なお, SSPDC における重み係数  $\theta$  は単一の  $\theta = 2$  とした.

- SSPDC の提案

次に比較対象として SSPDC を設計する. SSPDC は, 受電電力  $S(t)$  を考慮せず, 駐車中の EV 各々に対し個別に充電のみを行なう手法である. (5-23) に定義を示す.

$$B_i(t) = \begin{cases} -\frac{\{SOC_{target} - SOC_i(t)\} \cdot C_{total} \times 3600 \cdot f_i}{100 \cdot \tau_i(t)}, & \tau_i > 0 \\ 0, & else \end{cases} \quad (5-23)$$

ここで,  $SOC_{target}$  [%] は目標充電 SOC,  $\tau_i$  は  $i$  番目の駐車スロットに駐車中の EV の予約駐車時間 [s] である. この分配法では, 受電電力を考慮せず, EV 予約時間から指令値を決定する方法である. なお, この手法は EV ストレージを利用する IEVBS, MEVBS へ利用する. また, SSPDC における  $SOC_{target}$  は, 後述する実データでの出発時充電量の平均値である  $E_{out} = 11.74$  [kWh] に相当する 73.4% とした.

### 5.3 最も厳しい運用スケジュール

本エネルギーサービスでは, ストレージの導入量を最小化する議論を行う. ストレージの最小導入量を決定するためには, ストレージにとって最も厳しい条件で議論を行う事が不可欠である. そこで, 現実に起こりうる中でストレージにとって最も厳しい条件について考察し, ストレージの導入量を決定する. 想定している EMS において, 管理者が操作できない不確定要素が存在する



表 16 充電台から得られた情報

	平均値	分散値
到着時充電量 [kWh]	6.46	3.04
出発時充電量 [kWh]	11.74	1.85

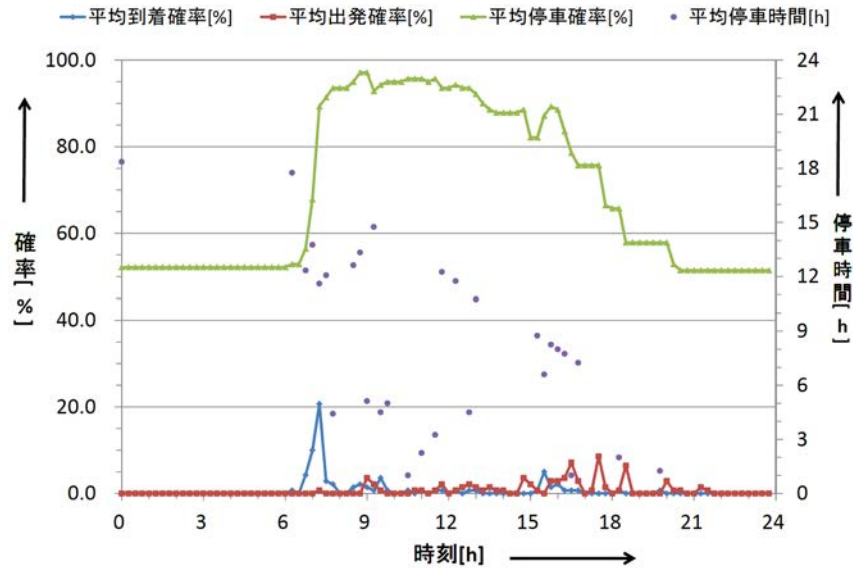


図 35 カメラ情報から得た EV 利用情報(2011/9/9～9/15, 10/9～10/15 のデータ)

対象は、負荷電力、PV パネル(発電電力)、EV の利用(スケジュール)である。以下では、最も厳しい負荷・太陽光発電スケジュール、最も厳しい IEVBS 利用スケジュール、そして最も厳しい MEVBS 利用スケジュールを決定する。そして最後に、各ストレージに利用形態をまとめる。

### 5.3.1 EV の発着スケジュール

対象となる福江港ターミナルビルの駐車場は、一般利用客が利用する公共施設・大型商用施設の駐車場であり、EV だけでなくガソリン車も駐車する。本エネルギーサービスでは、EV が十分に普及し駐車場を通じて充放電が可能になる状況を想定している。そこで、実際に福江港ターミナルビルの EMS において得られた情報を元に、EV の利用状況を模倣するスケジュールを決定する必要がある。以降では、駐車場を利用している自動車が全て EV であり、かつ駐車場を通じて充放電が可能であるとする。なお、EV の普及率が 100%でない場合についても普及率で割ることにより最小導入量や運用特性の議論が行えるため、普及率 100%の状況を想定する。

福江港ターミナルビルの EMS では、電力情報、EV の急速充電台の利用履歴、そして駐車場のカメラ情報を同時に管理している。急速充電台情報、駐車場のカメラ情報により得られた情報をまとめると、表 16、図 35 の通りである。表 16 の値は、2011 年 1 月 11 日～4 月 11 日、6 月 4 日～12 月 31 日の期間に取得され、イベント総数は 1,084 であった。往来時の充電状態に関しては充電台利用情報から決定した。さらに、時間別の到着の頻度および駐車時間に関しては、先にも述べた通り、実際に駐車場を監視しているカメラ情報から決定した。

作成したランダムスケジュールから算出した駐車確率、実際にカメラ情報から得た時刻ごとの

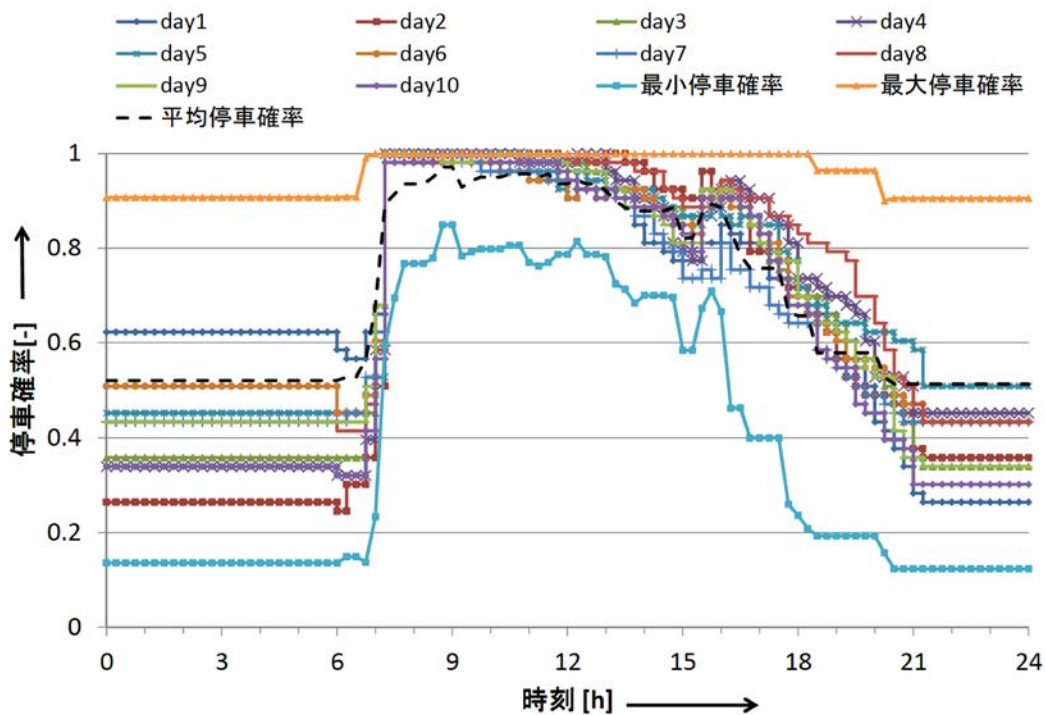


図 36 作成したランダムスケジュールから算出した駐車確率と実際の駐車確率の比較

平均駐車確率, 最大駐車確率(平均+2×分散), 最小駐車確率(平均-2×分散)を図 36 に示す. ここで, 駐車確率の分布は, 実データから算出した駐車台数に様々な分布を検討した結果, 実際の駐車データに最も近い正規分布を採用した. グラフから読み取れるように, 実際の EV の利用情報をよく反映したスケジュールが作成できたことが確認できる. また, 図 37 に EV の利用スケジュール作成プロセスを示す. このプロセスにより, EV の発着・初期充電量スケジュール, EV の駐車時間, EV の平均到着・出発確率スケジュールが作成される. スケジュール作成の際の主な仮定条件は以下のようなものである.

- 到着事象は, 各空車スロットに対して[0 1]の一定分布のランダム試行とデータの平均到着確率の大小で決定する
- 到着事象の決定の際, 平均到着確率は算術平均値を(1-平均駐車確率)で割った値を利用する
- 到着 EV の駐車時間は, カメラ情報から算出した駐車時間の平均と分散を引数とする正規分布の試行により決定する
- 到着 EV の予約時間は, 決定した駐車時間を平均値に, 分散を 1 時間にした正規分布のランダム試行により決定する
- 到着 EV の初期 SOC は, [10 90] で一定分布のランダム試行から決定する

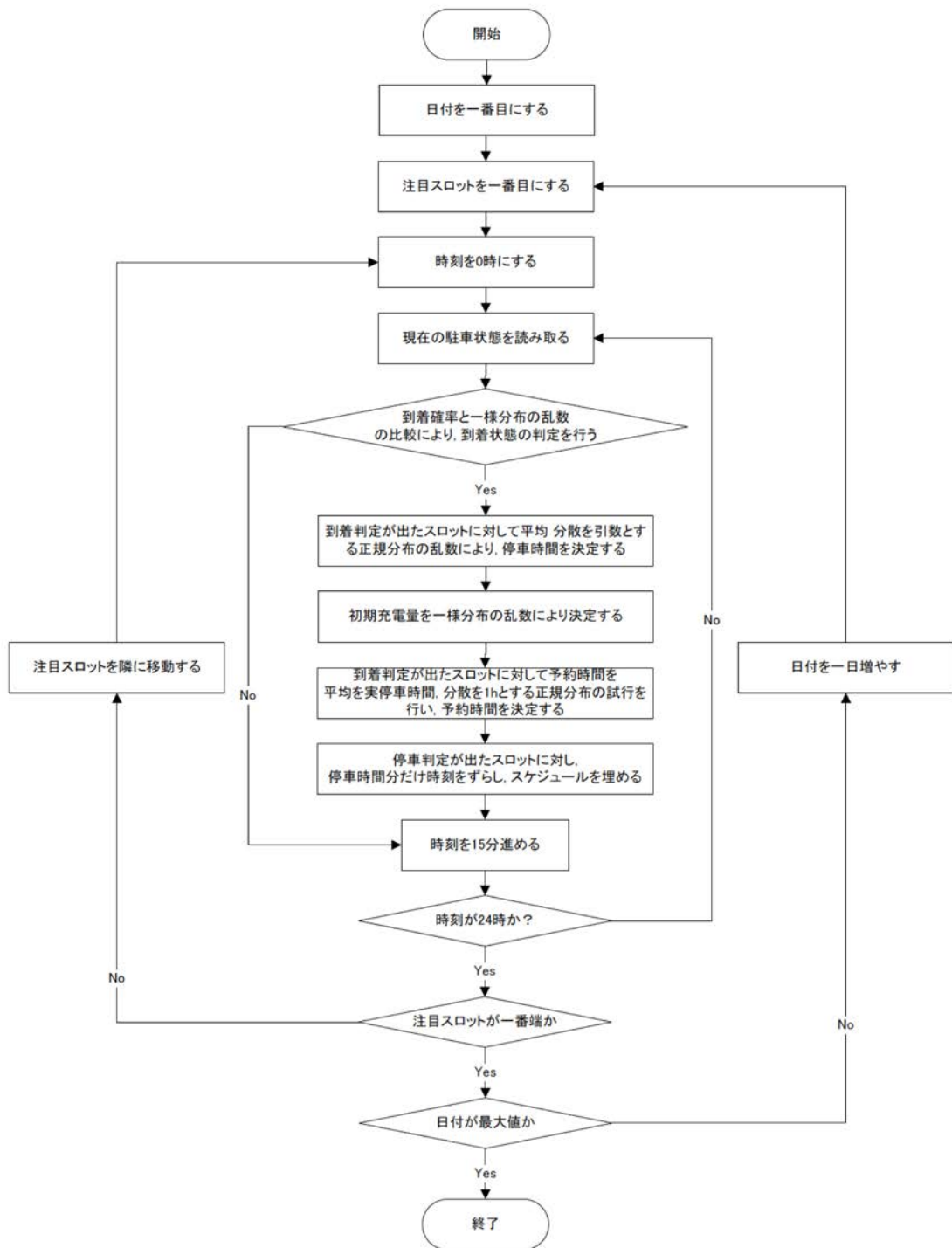


図 37 EV 利用スケジュール決定プロセス

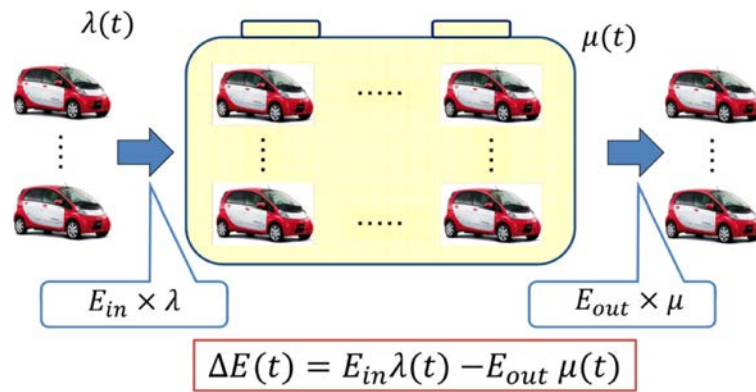


図 38 IEVBS の EV 利用状況反映の参考図

IEVBS モデルで利用する平均到着・出発確率モデルを図 38 に示す。IEVBS では EV は駐車場到着時にその EV ストレージを取り外して駐車場に提供し(初期充電量  $E_{in} = 6.46$  [kWh]), 出発時にフル充電( $E_{out} = 11.74$  [kWh]) の蓄電池を持ち去ることを想定する。MEVBS との比較を可能とするため、IEVBS と MEVBS の利用スケジュールは、平均到着確率、平均出発確率を共有する。IEVBS の仮想集積蓄電池の充電量は以下の (5-24), (5-25), (5-26)を利用して充電エネルギーを 15 分毎に再計算する。

$$\Delta E(t) = E_{in} \cdot \lambda(t) - E_{out} \cdot \mu(t) \quad (5-24)$$

$$\lambda(t) = \text{floor}(N_M \cdot P_{arrival}(t)) \quad (5-25)$$

$$\mu(t) = \text{floor}(N_M \cdot P_{departure}(t)) \quad (5-26)$$

ここで、 $\Delta E(t)$ は EV 発着時の集積電池の蓄積エネルギーの変化分[kWh],  $E_{in}$ は充電台情報から得た到着 EV の平均充電量 [kWh],  $E_{out}$ は出発 EV の平均充電量 [kWh],  $P_{arrival}(t)$ は EV の到着確率 [%],  $P_{departure}(t)$ は EV の平均出発確率 [%],  $N_M$ は EV の導入台数[-],  $\text{floor}()$ は引数の整数部分を取り出す関数である。同様に、図 39 に IEVBS の EV 発着時の蓄積エネルギー変化のイメージを示す。

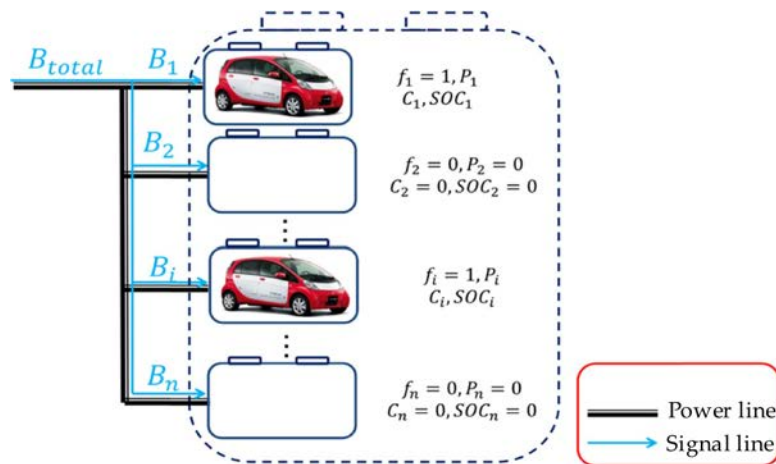


図 39 MEVBS の EV 利用状況反映の参考図

表 17 最も厳しい EV 利用スケジュールの決定で利用した変数

名称	説明
$P_{parking,min}(t)$	時刻 $t$ の駐車場確率サンプルから算出した最小駐車確率
$P_{parking,average}(t)$	時刻 $t$ の駐車場確率サンプルから算出した平均駐車確率
$\sigma_{P_{parking}}(t)$	時刻 $t$ の駐車確率サンプルから算出した駐車確率の標準偏差
$P_{arrival,hardest}(t)$	決定すべき時刻 $t$ における EV の最も厳しい到着確率
$P_{departure,hardest}(t)$	決定すべき時刻 $t$ における EV の最も厳しい出発確率
$\delta t$	駐車確率のサンプル周期(=15 分)
$P_{discrete,parking,min}(t)$	$P_{parking,min}(t)$ を離散化した最小駐車確率
$P_{discrete,arrival,hardest}(t)$	時刻 $t$ における EV の最も厳しい到着確率
$P_{discrete,departure,hardest}(t)$	時刻 $t$ における EV の最も厳しい出発確率
$\lambda(t)$	時刻 $t$ における 10 スロット分の到着 EV 数
$\mu(t)$	時刻 $t$ における 10 スロット分の出発 EV 数

IEVBS の利用スケジュールに必要な項目は、時刻毎の EV の到着確率・出発確率である。最も厳しい状況は、EV の駐車確率が最も低い場合である。従って本研究では、統計情報から決定した時刻毎の最小駐車確率となる到着確率・出発確率を採用する。なお前述した通り、時刻  $t$  は 15 分毎の離散値とする。2011/9/9～9/15, 10/9～10/15 のカメラ情報を元に、最小駐車確率を(5-27)を利用して計算する。次に、(5-28), (5-29)を利用し管理者にとって最も厳しい到着確率, 出発確率の組み合わせを決定する。実際に算出した結果を図 40 へ、利用した変数の名称と説明を表 17 へ示す。

$$P_{parking,min}(t) = \min\{P_{parking,average}(t) - 2 \cdot \sigma_{P_{parking}}(t), 0\} \quad (5-27)$$

$$P_{arrival,hardest}(t) = \begin{cases} \max\{P_{parking,min}(t) - P_{parking,min}(t - \delta t), 0\} \\ 0 \end{cases} \quad (5-28)$$

$$P_{departure,hardest}(t) = \begin{cases} \max\{P_{parking,min}(t - \delta t) - P_{parking,min}(t), 0\} \\ 0 \end{cases} \quad (5-29)$$

MEVBS 利用スケジュール決定のために必要なのは、各駐車スロットの EV の到着時刻, 駐車時間, 駐車予約時間, 到着時充電量である。また, IEVBS のケースと同様に, 管理者にとって最も厳しい EV 利用状況は, EV の駐車確率が最も低い場合である。そこで駐車確率が最小となる EV の到着時刻, および駐車時間を決定する。

まず, EV の到着時刻, 駐車時間を決定する。簡単のため, 時刻毎の最低駐車確率を離散化する。次に離散化した駐車確率に合わせて 10 スロット分の MEVBS 利用スケジュールを作成する。この時, (5-30), (5-31)を利用して, 駐車確率が増加する場合は到着判定を, 駐車確率が減少する場合は出発判定を行う。

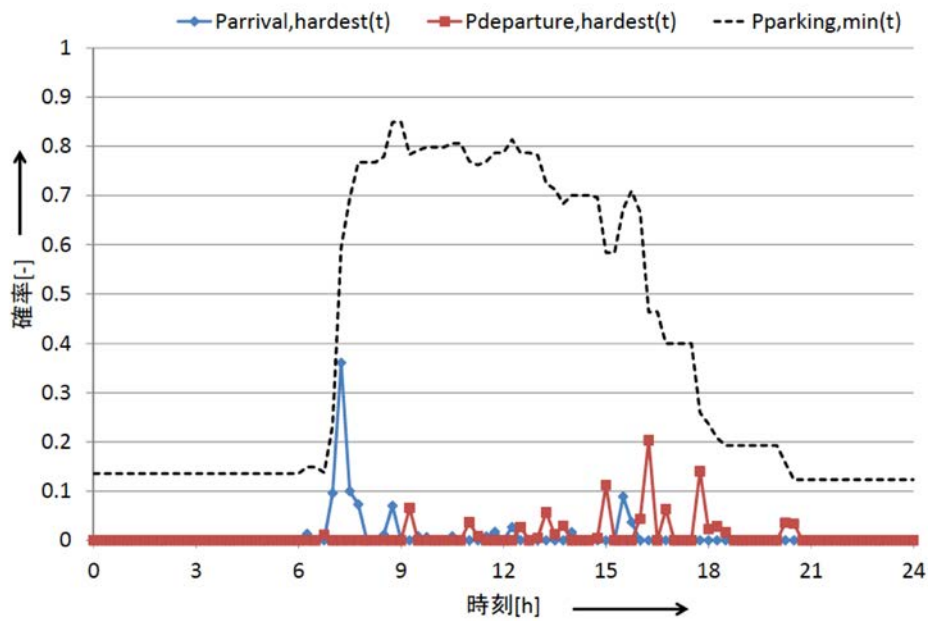


図 40 最も厳しい駐車確率，到着・出発確率(IEVBS)

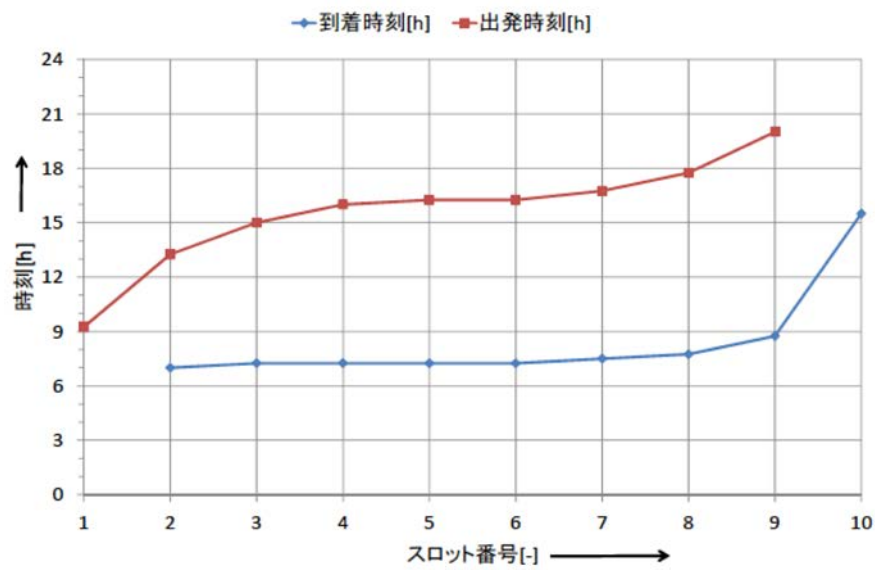


図 41 最も厳しい MEVBS 利用スケジュール(10 スロット分)

$$\lambda(t) = \begin{cases} \max\{(P_{discrete,parking,min}(t) - P_{discrete,parking,min}(t - \delta t) \times 10, 0\} \\ 0 \end{cases} \quad (5-30)$$

$$\mu(t) = \begin{cases} \max\{(P_{discrete,parking,min}(t - \delta t) - P_{discrete,parking,min}(t) \times 10, 0\} \\ 0 \end{cases} \quad (5-31)$$

ここで，これらの式はスロット数が 10 スロット分のケースを示している．また，出発する EV の選

表 18 最も厳しい電力条件決定のためのパラメータ

名称	説明
$d$	日付 [-]
$L(d, t)$	日付が $d$ で時刻 $t$ の負荷電力 [W]
$PV(d, t)$	日付が $d$ で時刻 $t$ の太陽光発電電力 [W]
$L(d)$	日付が $d$ の 1 日間の平均負荷電力 [W]
$PV(d)$	日付が $d$ の 1 日間の平均太陽光発電電力 [W]
$L_{ave}$	ある期間の $L(d)$ の平均値 [W]
$\sigma_{load}$	ある期間の $L(d)$ の標準偏差 [W]
$L_{max}$	ある期間の統計的に決定した最大の $L(d)$ [W]
$L_{min}$	ある期間の統計的に決定した最小の $L(d)$ [W]
$PV_{ave}$	ある期間の $PV(d)$ の平均値 [W]
$\sigma_{pv}$	ある期間の $PV(d)$ の標準偏差 [W]
$PV_{max}$	ある期間の統計的に決定した最大の $PV(d)$ [W]
$PV_{min}$	ある期間の統計的に決定した最小の $PV(d)$ [W]
$Lr_{max}$	ある期間の統計的に決定した最大の 1 日間の平均実負荷電力 [W]
$Lr_{min}$	ある期間の統計的に決定した最小の 1 日間の平均実負荷電力 [W]

扱は 10 スロットの中で最も長く駐車している EV を選択した。作成した 10 スロット分の MEVBS 利用スケジュールにおける到着，出発時刻を図 41 に示す。また，同じスケジュールを 5 単位，計 50 スロット分用意し，ストレージの最小導入量を決定する際に利用する。

### 5.3.2 最も厳しい負荷・太陽光発電スケジュール

負荷および太陽光発電のスケジュールには，事前に予測することは難しい不確定要素が多く含まれる。そこで統計的な手法を利用して，負荷・太陽光発電電力一日平均値の上端と下端を決定し，その条件に合わせて負荷・太陽光発電電力のスケジュールを決定する。また，各変数を表 18 に示すように定める。なお，本小節以外での  $L(t)$ ， $PV(t)$  は日付の番号  $d$  を省略して記載している。

まず，検証対象の EMS において蓄積された電力データ(2011/1/1～4/11，2011/6/4～2012/3/31)を解析し，負荷電力  $L(d, t)$ ，太陽光発電電力  $PV(d, t)$  の一日の平均値， $L(d)$ ， $PV(d)$  を決定する。計測期間は，途中で通信機器の問題が発生しデータの蓄積が正常に動作しなかった期間を除いたため不連続である。各データを検討した結果，負荷  $L(d)$  は季節による変化が顕著であり，日による変化も比較的安定している。一方，太陽光発電電力  $PV(d)$  は， $L(d)$  と同様に季節による変化が顕著であるものの， $L(d)$  に比べて日による変化が大きいことがわかる。これは，太陽光発電が天気による影響を受けやすい為であると考えられる。従って，本エネルギーサービスでは負荷電力と太陽光発電電力は分けて議論を行う。

まず，各計測日の直近2週間分(2012/3/17 ～ 3/31)を対象に，最大一日平均負荷  $L_{max}$ ，最小一日平均負荷  $L_{min}$ ，最大一日平均発電  $PV_{max}$ ，最小一日平均発電  $PV_{min}$  の値を決定する。以下に，算出に用いた(5-32)から(5-35)を示す。

$$L_{max} = L_{ave} + 2 \cdot \sigma_{Load} \quad (5-32)$$

$$L_{min} = \max(L_{ave} - 2 \cdot \sigma_{Load}, 0) \quad (5-33)$$

$$PV_{max} = PV_{ave} + 2 \cdot \sigma_{pv} \quad (5-34)$$

$$PV_{min} = \max\{PV_{ave} - 2 \cdot \sigma_{pv}, 0\} \quad (5-35)$$

ここで、以下に示す通り、直近 2 週間という区間長は、後述する対象データで区間長を変化させて試行し、上下限を外れる確率が最も低い計測区間とした。

$$L_{min} \leq L(d) \leq L_{max}$$

$$PV_{min} \leq PV(d) \leq PV_{max}$$

次にこれらの値から、一日平均実負荷電力の最大値  $Lr_{max}$ 、最小値  $Lr_{min}$  を(5-36)、(5-37)を利用して決定する。

$$Lr_{max} = L_{max} - PV_{min} \quad (5-36)$$

$$Lr_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, 0\} \quad (5-37)$$

図 42 は取得したデータを1日単位で平均したグラフである。多くの場合で一日平均実負荷電力が統計上下限値の間に存在することが確認できた。また、一日平均実負荷の上限値  $Lr_{max}$  が最大値 87.1 [kW]を取るのは、2011/8/17 であることがわかった。なお、この値は 2011/8/4～8/17 のデータに基づき計算されている。次に、同期間の統計最大負荷電力スケジュール  $L_{max}(t)$ 、統計最小負荷電力スケジュール  $L_{min}(t)$  は、一日のうち 30 分間平均負荷の最大値と最小値の差が最も大きな 8/16、その差が小さな 8/4 を利用する。また、最大太陽光発電電力スケジュール  $PV_{max}(t)$ 、最小太陽光発電電力スケジュール  $PV_{min}(t)$  は、一日の平均値が最大となる 8/10 と、最

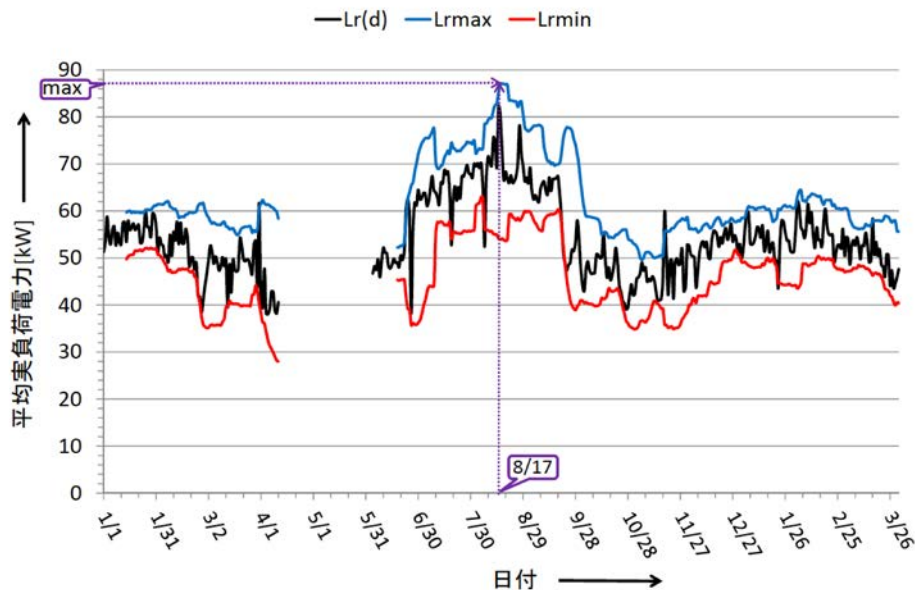


図 42 一日単位での平均実負荷電力  $Lr(d)$  と統計上下限値



表 19 2011/8/4～8/17 の統計上限値

名称	値[W]
$L_{max}$	$8.71 \times 10^4$
$L_{min}$	$5.79 \times 10^4$
$PV_{max}$	$3.79 \times 10^4$
$PV_{min}$	0
$Lr_{max}$	$8.71 \times 10^4$
$Lr_{min}$	$5.41 \times 10^4$

表 20 ストレージ容量決定の際に定義した変数

名称	説明
$maxloss$	計測期間内での一日間のエネルギーロスの最大値[Ws]
$C_{total}$	仮想集積蓄電池の総容量[Ws]
$C_0$	i-MiEV 一台の蓄電池の容量[Ws]
$N_{start}$	初期駐車台数
$N_M$	IEVBS での最大導入 EV 数
$N$	MEVBS での最大駐車台数
$T$	シミュレーション時間[s] (= 24)

小となる 8/14 を利用した. なお, 最大最小電力スケジュールとは, 平均電力が統計上下限値に一致するスケジュールのことである. 例えば, 統計最大負荷スケジュールは 8/16 日の負荷電力履歴を利用し, 電力の一日平均値が平均負荷電力の上限値  $L_{max} = 87.1$  [kW]である電力スケジュールのことである. また, 統計最大最小負荷電力スケジュール作成に関しては, 高受電となる 6時から 20時の間だけを定数倍することにより作成を行った. これは, 最大負荷と最小負荷の差が大きいほど, ストレージにとって厳しい条件となることを考慮したためである. なお, この期間の統計上下限値を表 19 に示す.

### 5.3.3 ストレージ導入容量決定条件

ストレージの最小導入量を決定するため, 5.3.2 では最も運用の厳しい 2011/8/4 ~ 8/17 に着目し基本的なパラメータを決定した. そこで, 各々のストレージに合わせたシミュレーションの利用形態について説明・整理する. 5.3.3 で用いる変数の名称と説明は表 20 に示す. これらの条件のもと, 30分間の平均受電電力が  $S_{max}$  を超えない最小のストレージサイズを最小導入量として決定する. この時, 各ストレージの最小単位であるストレージ容量に基づき導入量を決定する. また, SPDC で用いる重み係数  $\beta$  に関しては, CDCF の最小ストレージ導入量にて算出して固定し, CDCS と共有するものとする.

FLIBS の場合のストレージ容量決定条件は以下に示す通りである. なお, これらの値は 2011/8/4 ~ 8/17 までの2週間のサンプリングにおいて算出した値である.

- 負荷電力:  $L(t) = L_{max}(t)$
- 太陽光発電電力:  $PV(t) = PV_{min}(t)$
- 最大エネルギーロス:  $maxloss = 5.0 \times 10^8$  [Ws]
- 最大許容受電電力:  $S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{C_{total} \cdot (SOC_{set}(T) - SOC_{min})}{100 \cdot T}$

- 
- 最小許容受電電力:  $S_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, 0\}$
  - 初期受電電力指令値:  $S(0) = S_{max}$
  - 初期 SOC:  $SOC(0) = SOC_{min} = 10$
  - ストレージサイズの最小単位: 33 [kWh]

同様に, IEVBS のストレージ容量決定条件を以下のように設定した.

- 負荷電力:  $L(t) = L_{max}(t)$
- 太陽光発電電力:  $PV(t) = PV_{min}(t)$
- IEVBS 利用スケジュール: 最も厳しい発着スケジュール(5.3.1 参照)
- 最大エネルギーロス:  $maxloss = 5.0 \times 10^8$  [Ws]
- 最大許容受電電力:  $S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{N_M \cdot (E_{out} - C_0 \cdot SOC_{min}/100)}{T}$
- 最小許容受電電力:  $S_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, 0\}$
- 初期受電電力指令値:  $S(0) = S_{max}$
- 初期 SOC:  $SOC(0) = \frac{N_{start} \cdot E_{in}}{N_M \cdot C_0} \times 100$  ((5-4)参照)
- ストレージサイズの最小単位: 16 [kWh]

MEVBS のストレージ容量決定条件を以下のように設定した.

- 負荷電力:  $L(t) = L_{max}(t)$
- 太陽光発電電力:  $PV(t) = PV_{min}(t)$
- MEVBS 利用スケジュール: 最も厳しい発着スケジュール(5.3.1 参照)
- 最大エネルギーロス:  $maxloss = 5.0 \times 10^8$  [Ws]
- 最大許容受電電力:  $S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{N \cdot (E_{out} - C_0 \cdot SOC_{min}/100)}{T}$
- 最小許容受電電力:  $S_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, 0\}$
- 初期受電電力指令値:  $S(0) = S_{max}$
- 初期 SOC:  $SOC(0) = \frac{N_{start} \cdot E_{in}}{N \cdot C_0} \times 100$  ((5-5)参照)
- ストレージサイズの最小単位: 10 slot (=160 [kWh])

## 5.4 シミュレーションの運用・評価条件

5.3 では、最も負荷の大きい 2011/8/4 ~ 8/17(2 週間)のデータを元に、最も運用の厳しいスケジュールから考える最小ストレージ導入量について述べた。次に、算出されるストレージの最小導入量に基づき、2011/8/18 ~ 2012/3/31 までの電力データを用いて電力収支シミュレーションを行い、蓄電池(FLIBS, IEVBS, MEVBS)、バッテリーコントローラ(CDCF, CDCS)と電力負荷平準化効果との関係性を検証する。そこでここでは、電力収支シミュレーションを運用する上での初期条件・更新条件・評価点について紹介する。以下で紹介するシミュレーションの運用条件は、初期条件と更新条件に分けられる。なお、初期条件に関しては、全て 2011/8/4 ~ 8/17 のデータを用いている。

シミュレーションで利用する過去2週間分の負荷  $L(d, t)$ 、太陽光発電電力  $PV(d, t)$ 、日毎のエネルギーロス  $loss(d)$  のデータについて、シミュレーションの終了時に最新の値に更新する。さらに、更新した  $L, PV, loss$  を元に  $L_{max}, L_{min}, PV_{max}, PV_{min}, maxloss$  も同様に更新する。

### 5.4.1 FLIBS の運用条件

FLIBS の初期条件は以下に示す通りである。

- 負荷電力:  $L(t) = L(2011/8/18, t)$
- 太陽光発電電力:  $PV(t) = PV(2011/8/18, t)$
- 最大エネルギーロス:  $maxloss = 5.0 \times 10^8$  [Ws]
- 最大許容受電電力:  $S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{C_{totla} \cdot (SOC_{set}(T) - SOC_{min})}{100 \cdot T}$
- 最小許容受電電力:  $S_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, L(t) - PV(t)\}$
- 初期受電電力指令値:  $S(0) = S_{max}$
- 初期 SOC:  $SOC(0) = SOC_{min}$  (=10%)

日付が進む際の更新条件は以下の通りである。

$$S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{C_{totla} \cdot (SOC_{set}(T) - SOC_{min})}{100 \cdot T} \quad (5-38)$$

$$S_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, L(t) - PV(t)\} \quad (5-39)$$

$$S(0) = S(d - 1, T) \quad (5-40)$$

$$SOC(0) = SOC(d - 1, T) \quad (5-41)$$

$$L = L(d, T) \quad (5-42)$$

$$PV(0) = PV(d, T) \quad (5-43)$$

#### 5.4.2 IEVBS の運用条件

IEVBS の初期条件は以下に示す通りである。

- 負荷電力:  $L(t) = L(2011/8/18, t)$
- 太陽光発電電力:  $PV(t) = PV(2011/8/18, t)$
- IEVBS 利用スケジュール: 2011/8/18 の利用スケジュール
- 最大エネルギーロス:  $maxloss = 5.0 \times 10^8$  [Ws]
- 最大許容受電電力:  $S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{N_M \cdot (E_{out} - C_0 \cdot SOC_{min}/100)}{T}$
- 最小許容受電電力:  $S_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, L(t) - PV(t)\}$
- 初期受電電力指令値:  $S(0) = S_{max}$
- 初期 SOC:  $SOC(0) = \frac{N_{start} \cdot E_{in}}{N_M \cdot C_0} \times 100$  ((5-5)参照)

$S_{max}$  (5-44) 以外の日付が進む際の更新条件は, (5-39)から(5-43)と同様である。

$$S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{N_M \cdot (E_{out} - C_0 \cdot SOC_{min}/100)}{T} \quad (5-44)$$

#### 5.4.3 MEVBS の運用条件

MEVBS の初期条件は以下に示す通りである。

- 負荷電力:  $L(t) = L(2011/8/18, t)$
- 太陽光発電電力:  $PV(t) = PV(2011/8/18, t)$
- IEVBS 利用スケジュール: 2011/8/18 の利用スケジュール
- 最大エネルギーロス:  $maxloss = 5.0 \times 10^8$  [Ws]
- 最大許容受電電力:  $S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{N \cdot (E_{out} - C_0 \cdot SOC_{min}/100)}{T}$
- 最小許容受電電力:  $S_{min} = \max\{L_{min} - PV_{max}, L(t) - PV(t)\}$
- 初期受電電力指令値:  $S(0) = S_{max}$
- 初期 SOC:  $SOC(0) = \frac{N_{start} \cdot E_{in}}{N \cdot C_0} \times 100$  ((5-5)参照)

$S_{max}$  (5-45) 以外の日付が進む際の更新条件は、(5-39)から(5-43)と同様である

$$S_{max} = L_{max} - PV_{min} + \frac{maxloss}{T} - \frac{N \cdot (E_{out} - C_0 \cdot SOC_{min}/100)}{T} \quad (5-45)$$

#### 5.4.4 シミュレーションの評価条件

蓄電池(FLIBS, IEVBS, MEVBS), バッテリーコントローラ(CDCF, CDCS)は、シミュレーション結果から以下の特性値を比較することにより評価する。対象とする特性値は、電力履歴の特性値、そしてストレージの状態である。以下では、これら2つの定義と条件について述べる。

##### 5.4.4.1 電力履歴に関する特性値の決定条件

本エネルギーサービスでは、電力履歴の特性値として、受電電力の変動係数、最大受電電力、受電電力の負荷率、受電電力の電力料金の4つに注目する。以下ではこれらの定義について述べる。

$$G_{in,vector} = \left[ \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} G_{in}(t) dt, \dots, \frac{1}{\Delta t} \int_{47 \cdot \Delta t}^{48 \cdot \Delta t} G_{in}(t) dt \right] \quad (5-46)$$

$$average(G_{in,vector}) = \frac{1}{48} \cdot \sum_{i=1}^{i=48} G_{in,vector}[i] \quad (5-47)$$

$$var(G_{in,vector}) = \frac{1}{48} \cdot \sum_{i=1}^{i=48} \{G_{in,vector}[i] - average(G_{in,vector})\}^2 \quad (5-48)$$

$$C.V.(G_{in,vector}) = \frac{\sqrt{var(G_{in,vector})}}{average(G_{in,vector})} \times 100 \quad (5-49)$$

$$Max(G_{in,vector}) = \max \{G_{in,vector}[1], G_{in,vector}[2], \dots, G_{in,vector}[48]\} \quad (5-50)$$

$$loadrate(G_{in,vector}) = \frac{average(G_{in,vector})}{Max(G_{in,vector})} \times 100 \quad (5-51)$$

シミュレーションモデルは 20 秒毎に内部状態を出力する。シミュレーションの評価には、モデルから出力された 20 秒毎の受電電力  $G_{in}(t)$  の履歴を利用し、30 分間の平均値を格納した配列として  $G_{in,vector}$  を定義する。次にこの配列を利用し受電電力の変動係数  $C.V.(G_{in,vector})$ 、最大受電電力  $Max(G_{in,vector})$  [kW]、受電電力の負荷率  $loadrate(G_{in,vector})$  以上の電力履歴の特性値を算出する。

福江港ターミナルビルの契約電力会社である九州電力株式会社が公開する電力価格から <sup>84</sup>,

表 21 業務用季時別電力 A 契約の電力価格

標準電圧		基本料金 円/kW		電力料金 円/kW	
		ピーク	夏季昼間	その他季昼間	夜間
6,000V	1,953 円 00 銭	14 円 37 銭	12 円 02 銭	11 円 10 銭	6 円 84 銭
20,000 V	1,848 円 00 銭	12 円 84 銭	10 円 75 銭	9 円 95 銭	6 円 42 銭
60,000 V	1,785 円 00 銭	12 円 70 銭	10 円 63 銭	9 円 85 銭	6 円 35 銭

業務用季時別電力 A の 6000 V 契約の電力価格を利用し、電力料金を算出した。実験時(2012年)の電力価格を以下の表 21 に示す。但し、夏季とは 7/1～9/30 の期間を指し、ピーク時間とは夏季の 13 時～16 時、昼間時間とは 8 時～22 時のピーク時間以外の時間帯の事を指す。この電力価格に従って、1日の電気料金を決定する。なお、電力基本料金は前月から昨年の前月までの 1 年間のうち、最も高い受電電力であった 30 分間の平均受電電力をもとに計算される。これに従量料金が付加されて支払う電力利用料金が求められる。ここでは簡単の為、2011/8/18～8/31 の最大受電電力を利用し、9 月以降の基本料金を決定した。実際、2011/9/1～2012/3/31 までの最大受電電力が 2011/8/18～8/31 の最大受電電力を超えておらず、年間の電力消費ピークが夏の暑い日中に迎えることが、実験環境である福江港ターミナルビル管理事務局との事前協議により判明しているため、正しい電気料金が計算されることが考えられる。

#### 5.4.4.2 ストレージの状態に関する特性値の決定条件

ストレージ状態の特性値として、最終 SOC(SOC(T))、最大 SOC(maxSOC<sub>vector</sub>)、最小 SOC(minSOC<sub>vector</sub>)、SOC 利用域(maxSOC<sub>vector</sub>～minSOC<sub>vector</sub>)の 4 つを用いる。これらは、モデルの出力である 20 秒毎の SOC(t)履歴から算出した。以下に定義式を示す。ここで、SOC<sub>vector</sub> は 20 秒毎の SOC を収めた 4321 次元の配列である。

$$SOC_{vector} = [SOC(0), SOC(20), \dots, SOC(T)] \quad (5-52)$$

$$\max SOC_{vector} = \max \{SOC(0), SOC(20), \dots, SOC\} \quad (5-53)$$

$$\min SOC_{vector} = \min \{SOC(0), SOC(20), \dots, SOC\} \quad (5-54)$$

## 5.5 提案研究のシミュレーション結果と評価

### 5.5.1 ストレージ容量決定シミュレーションの結果と評価

#### 5.5.1.1 ストレージ容量の決定

シミュレーションを元に最小ストレージ容量を決定した。条件には 5.4.4 にて紹介した要件を採用した。

- FLIBS において、CDCF ではストレージ導入量が 396 [kWh] (12 units)の時に  $G_{in}$  が  $S_{max}$  を超えたため、最小ストレージ導入量は 429 [kWh] (13 units)となった。CDCS も CDCF と同様の理由から、最小ストレージ導入量は 396 [kWh] (12 units)となった。
- IEVBS において、CDCF ではストレージ導入量が 448 [kWh] (28 EVs)の時に  $G_{in}$  が

$S_{max}$  を超えたため、最小ストレージ導入量は 464 [kWh] (29 EVs)となった。CDCS も CDCF と同様の理由から、最小ストレージ導入量は 464 [kWh] (29 EVs)となった。

- MEVBS において、CDCF ではストレージ導入量が 624 [kWh] (39 slots)の時に  $G_{in}(t)$  が  $S_{max}$  を超えたため、最小ストレージ導入量は 640 [kWh] (40 slots)となった。CDCS では、ストレージ導入量が 464 [kWh] (29 slots)の時に  $G_{in}$  が  $S_{max}$  を超えたため、最小ストレージ導入量は 480 [kWh] (30 slots)となった。

### 5.5.1.2 パラメータ $\beta$ の決定

CDCS(5-10)での目的間の重要度比は、受電電力の平準化と最終 SOC の回復の二つの目標間の重要度を決定する無次元パラメータ  $\beta$  で決定される。 $\beta$  は需要家の安全志向を表す無次元の値であり、需要家を変えない限り変化しないと考えた。したがって、FLIBS の場合に決定した値を IEVBS, MEVBS の場合でも利用する。 $\beta$  の決定のため、以下の 6 つのシミュレーション条件において電力収支シミュレーションを行い、受電電力の最大値を 6 つの条件について平均し、その値が最小値となるを採用した。なお、 $\beta$  を決定するためのシミュレーションにおいて、ストレージ導入量は CDCF で決定したストレージ最小導入量(429 [kW] = 13 unit)と設定した。図 43 は6つの条件における最大受電電力  $G_{in}$  の平均値と  $\beta$  の関係を表すグラフである。図 43 から分かるように、 $\beta=40$  において最大受電電力の平均値が最小化された。そこで本エネルギーサービスでは、 $\beta=40$  を採用する。

- 統計情報から算出した最大負荷  $L_{max}$  で初期 SOC 10%
- 統計情報から算出した最大負荷  $L_{max}$  で初期 SOC 50%
- 統計情報から算出した最大負荷  $L_{max}$  で初期 SOC 90%
- 統計情報から算出した最小負荷  $L_{min}$  で初期 SOC 10%
- 統計情報から算出した最小負荷  $L_{min}$  で初期 SOC 50%
- 統計情報から算出した最小負荷  $L_{min}$  で初期 SOC 90%

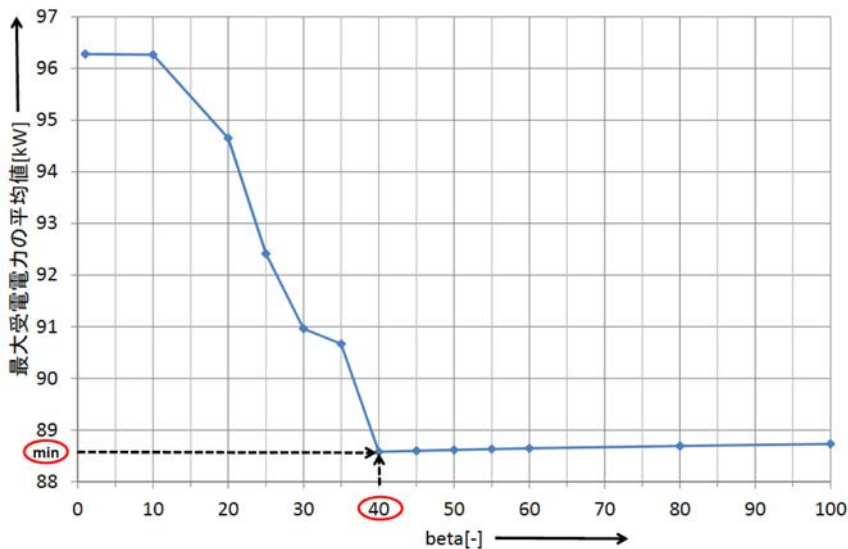


図 43 最大受電電力の平均値と  $\beta$  の関係

## 5.5.2 長期運用シミュレーション結果と評価

5.4 でのシミュレーション条件において、各蓄電池(FLIBS, IEVBS, MEVBS)で 2011/8/18～2012/3/31 までの計 227 日の運用シミュレーションを行った。制御手法として、CDCF, CDCS, 制御がない場合の 3 手法で制御結果を比較する。シミュレーションの初めは先月の最大受電電力を決定するキャリブレーション期間と捉え、2011/9/1～2012/3/31 までの合計 213 日のシミュレーション結果を表 22～表 25 に示す。評価対象となる電力料金, 変動率, SOC 等については 5.4.4 にて紹介した。また, CDCS で用いる重み係数は  $\beta=40$  とした。

EMS 管理者側の最大のメリットは電気料金の削減であるため, まず電気料金に注目する。また, 実際に本エネルギーサービスの利用が始まった時でも, この削減された電気料金から, EV のオーナーに報酬金を支払う事により, 持続的に EMS 管理が可能になると考えられる。

### 5.5.2.1 FLIBS モデル

シミュレーションのストレージ容量は, 5.5.1.1 で決定した 429 [kWh] (13 unit)とした場合のシミュレーションを行った。さらに, CDCS の場合のみ 5.5.1.1 で決定された 396 [kWh] (12 unit) の場合でシミュレーションを行った。

表 22 において, 電力料金は提案手法である CDCF, CDCS どちらの場合でも, 制御がない場合と比べて一日に 1,500 円程度の削減が確認できる。また, 二つのバッテリーコントローラ (CDCF, CDCS)の比較では, 容量が 396 [kWh] (12 unit)と同じ場合と同程度であると言える。しかし, CDCS では CDCF と比べて導入容量を 33 [kWh] (1 unit)削減でき, 容量を削減した場合 (396 [kWh] ,12 unit)では容量削減前(429 [kWh],13 unit)の場合と同等の電気料金削減が確認できる。

次に電力料金以外の項目に注目する。一日の受電電力の変動係数について, 制御がない場合と比較して, CDCF や CDCS の制御を行った場合, およそ半減することができている。また, CDCS の結果が CDCF と比べて 5%程度優位である事がわかる。次に最大受電電力については, 制御がない場合と比べて, CDCF と CDCS での一日平均で 15 [kW] 程削減されており, 両手法では大きな違いはない。これは負荷率についても同様の傾向が見られる。最終 SOC については, CDCS では目標である 50%付近に保たれている一方で, CDCF では平均 60%以上と過充電の傾向にあることが確認できる。更に, 一日の最大 SOC と最小 SOC の差をとったストレージの実利用領域幅は CDCS の方が広く, ストレージを有効利用できていることが確認できる。最後に

表 22 FLIBS 運用シミュレーションの結果

バッテリー制御手法	単位	制御なし	CDCF	CDCS	
ストレージ容量	kWh		429	429	396
1日の平均電力料金	円	19,900	18,400	18,400	18,300
1日の受電電力変動係数の平均値	%	35.4	19.2	13.7	13.1
1日の最大受電電力の最大値	kW	115	100	100	100
1日の受電電力負荷率の平均値	%	65.8	78.6	79.5	80.3
最終 SOC の平均値	%		61.4	53.9	53.3
最大 SOC の平均値	%		87.8	71.6	70.9
最小 SOC の平均値	%		56.5	38.1	36.6
最大 SOC-最小 SOC	%		31.3	33.5	34.3
制御破綻率	%		0	0	0



表 23 IEVBS 運用シミュレーションの結果

バッテリー制御手法	単位	制御なし	CDCF	CDCS
ストレージ容量	kWh		464	464
1日の平均電力料金	円	19,900	19,800	19,700
1日の受電電力変動係数の平均値	%	35.4	18.6	13.9
1日の最大受電電力の最大値	kW	115	106	106
1日の受電電力負荷率の平均値	%	65.8	78.4	77.2
最終 SOC の平均値	%		56.5	49.2
最大 SOC の平均値	%		89.1	81.9
最小 SOC の平均値	%		51.5	32.4
最大 SOC-最小 SOC	%		37.7	49.5
制御破綻率	%		0	0

表 24 IEVBS 運用結果と SSPDM の結果の比較

バッテリー制御手法	単位	SSPDM	CDCF	CDCS
ストレージ容量	kWh	464	464	464
1日の平均電力料金	円	24,500	22,900	22,700
1日の受電電力変動係数の平均値	%	36.2	18.9	11.9
1日の最大受電電力の最大値	kW	122	106	106
1日の受電電力負荷率の平均値	%	66.9	78.2	78.0
最終 SOC の平均値	%	26.7	57.3	49.6
最大 SOC の平均値	%	60.1	91.8	83.5
最小 SOC の平均値	%	22.8	51.8	29.2
最大 SOC-最小 SOC	%	37.3	40.1	54.3
制御破綻率	%		0	0

受電電力  $G_{in}$  が最大許容受電電力  $S_{max}$  を超える制御破綻率は、CDCF と CDCS とともに 0%であったことから、両手法ともに安定的なストレージの利用ができた事が確認できる。

#### 5.5.2.2 IEVBS モデル

表 23 において、電力料金は CDCF と CDCS どちらの場合でも、制御がない場合と比べて一日平均で 100~200 円程度の削減が確認できる。FLIBS の場合と比べて、制御による電力削減の効果が小さく見えるのは、EV により持ち去られたエネルギーが存在し、その分余計に充電しているためである。すなわち、持ち去る電力を確保しながら達成した値であるといえる。また、CDCF と CDCS の比較では、CDCS の方が僅かであるが一日平均 100 円優位であることが確認できる。

次に電力料金以外の項目に注目する。一日の受電電力の変動係数は、電池がない場合と比べて平均で 16.8%改善している。また CDCF と CDCS では、CDCS が 4%程度優位である事がわかる。次に、最大受電電力については、電池がない場合と比べて、CDCF と CDCS は一日平均で 9 [kW]程度削減できており、両手法間では同程度であった。これは、受電電力の日負荷率にも同様の傾向が確認できる。この結果、基本料金に押し上げられる形で、電気料金は両手法間で大きくは変わらなかったと考えられる。最終 SOC については、CDCS では目標である 50%付近に保たれている一方、CDCF では平均 55%以上と過充電の傾向にあると確認できる。更に、一日の最大 SOC と最小 SOC の差をとったストレージの実利用領域幅は、CDCS の方が平均で 10%以上広く、ストレージが有効利用されたと確認できる。最後に受電電力  $G_{in}$  が最大許容受電電力

表 25 MEVBS 運用シミュレーションの結果

バッテリー制御手法	単位	なし	CDCF	CDCS
制御指令値分配法		SSPDM	SPDM	SPDM
ストレージ容量	kWh	640	640	640(480)
1日の平均電力料金	円	25,100	23,800	23,300
1日の受電電力変動係数の平均値	%	36.6	31.4	30.9
1日の最大受電電力の最大値	kW	125	110	106
1日の受電電力負荷率の平均値	%	66.5	68.6	71.1
最終 SOC の平均値	%	26.7	35.5	35.6
最大 SOC の平均値	%	60.1	68.4	67.3
最小 SOC の平均値	%	22.8	28.8	27.9
最大 SOC-最小 SOC	%	37.3	39.6	39.4
制御破綻率	%		0	0

$S_{\max}$  を超える制御破綻率は、両手法ともに 0%であったことから、どちらも安定的なストレージ利用が達成できたと確認できる。

次に、2011/9/1～9/31 における IEVBS の指令値分配コントローラの制御手法として SSPDM (バッテリー制御手法なし) を利用した場合と、その運用結果について他の手法と比較した結果を表 24 に示す。CDCF と CDCS は SSPDM と比較し、電気料金が一日平均で CDCS が約 1,800 円、CDCF が約 1,600 円削減できた。また、他の評価値についても、CDCF と CDCS の方が優れており、ストレージ資源を有効に利用している事が確認できる。

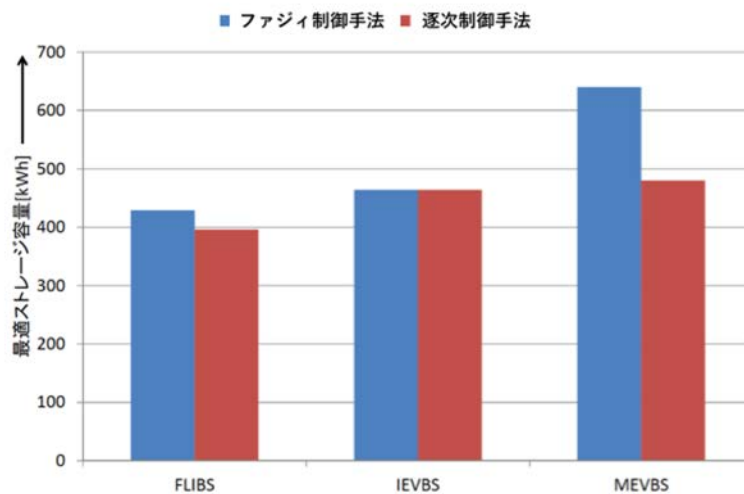
### 5.5.3 MEVBS モデル

表 25 において制御手法として、CDCF と SPDM、CDCS と SPDM、そして SSPDM(バッテリー制御手法なし)の3通りのシミュレーションを行った。SSPDM を利用した場合と電力料金については、CDCS が SSPDM と比べて一日平均で 1,800 円程度の削減が確認できる。また、両手法間の比較では、CDCS の方が一日平均 500 円程、優位であることが確認できた。さらに、必要ストレージ容量も CDCS の方が少なく、CDCS が総合的に優位である事が確認できる。

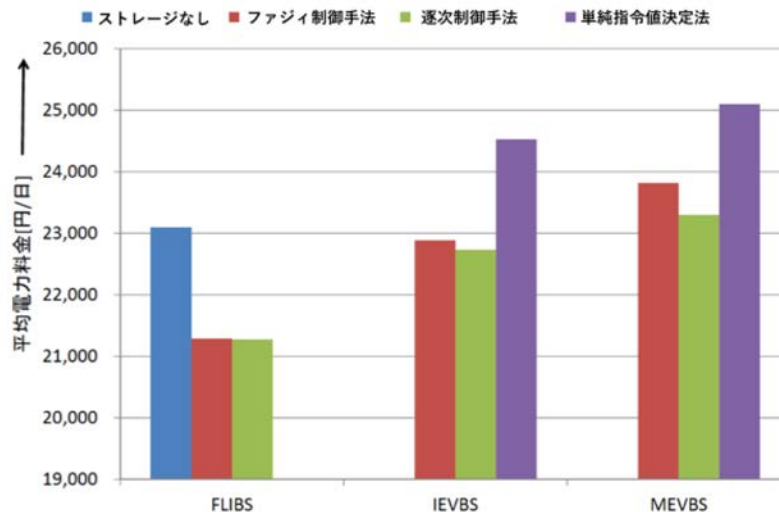
他の制御項目については以下の通りである。一日の受電電力の変動係数であるが、CDCS の場合 SSPDM と比べて平均で 6%程度改善している。また CDCF でも、5%程改善した事が確認できる。次に受電電力の 30 分間の平均値の最大値について、CDCS を用いた場合 19 [kW]、CDCF を用いた場合 15 [kW]程の削減が確認される。受電電力の日負荷率は SSPDM と比べて、CDCS で 5%程度、CDCF で 2%程度優位である事が確認できた。最終 SOC については、CDCS、CDCF ともに 35%付近となっており、目標である 50%に届いていない。これは、駐車中の EV の台数が足りないためである。更に、一日の最大 SOC と最小 SOC の差をとったストレージの実利用領域幅は、CDCS と CDCF で同程度であった。最後に受電電力  $G_{in}$  が最大許容受電電力  $S_{\max}$  を超える制御破綻率は、両手法ともに 0%であったことから、どちらも安定的なストレージ利用ができた事が確認できる。

### 5.5.4 考察

ストレージ容量決定の結果について、ストレージ毎にまとめたものを図 44(a)に示す。CDCF は



(a)



(b)

図 44 ストレージ毎の比較 (a) 運用手法毎の容量決定. (b) 運用手法毎の料金設定

ファジィ制御手法, CDCS は逐次制御手法としている. ストレージ容量については, 一般に FLIBS, IEVBS, MEVBS の順に必要なストレージ容量が大きくなることが読み取れる. また, 必要なストレージ容量は一般に CDCS の方が CDCF に比べて少ないことが確認できた. この点から CDCS はストレージ導入の初期コストに対して, CDCF より優れている.

シミュレーションの運用について, 平均電気料金をストレージ毎にまとめたものを図 44(b)に示す. ただし, ストレージの種類を超えた比較をするため, 運用結果については, 2011/9/1~9/30 の計 30 日間のデータを示した. この結果を見ると, 一般に FLIBS に比べて IEVBS, MEVBS の利用形態の方が, 電気料金が高くなっていることがわかる. これは, EV を含んだモデルでは EV により出発時に持ち去られる電気量があるためである. また, 拘束条件が厳しい MEVBS の方が IEVBS の場合よりも電気料金が高くなることが予想され, 結果もその予想に従っている. しかし本エネルギーサービスにおいて, MEVBS は出発時 SOC に関する制御を行っておらず, 持ち去ら

れる電力量が IEVBS よりも MEVBS の方が少ないことを留意する必要がある。バッテリーコントローラに関しては CDCF よりも CDCS の方が、平均電力料金が低いことが読み取れる。従って、CDCS の方が CDCF に比べて電力料金削減の点で優れていると考えられる。また、シミュレーションの結果から、どのバッテリーコントローラ、ストレージ利用形態においても、充電が足りず、需要のピークが出る制御破は起きていないため、すべての手法で安定的に負荷平準化が可能であると考えられる。

以上の議論から、評価シミュレーションを通じて、ストレージシステム導入のボトルネックである、導入コスト、運用コストの面で、CDCS の方が CDCF に対して優れていることが分かった。また、削減した電力料金を利用してシステムの初期導入コストを回収し、EV 利用者のサービス提供に対して対価を支払うまたは受け取ることで、持続的に EV を含んだストレージの負荷平準化制御への利用が可能であると考えられる。

### 5.5.5 提案手法の拡張可能性について

今回想定した環境では、福江港ターミナルビルの電力需要変動を集積蓄電池により平準化することを想定した。このように、需要家ごとに所有する蓄電システムを利用する状況では、必然的に要求されるバッテリー容量・充電器数が増加する。一方、2.2.1 にて紹介したマイクログリッド、さらには充放電インフラを統合した BEMS・HEMS を多数内包する CEMS での運用を前提とすれば、より効率的に電力ピークとバッテリー導入コストを同時にカットできると考えられる。例えば、電力系統内の複数の需要家や発電機が存在する状況を想定すれば、昼に電力ピークが来る福江港ターミナルビルのような大型商用施設や、早朝・夜間に電力ピークが来る一般家庭の需要が合計され、需要家群での合計負荷の平準化、ストレージの導入量削減、さらには化石燃料に依存しない再生可能エネルギーの導入量増加が見込まれる。

マイクログリッドや再生可能エネルギーといった、動的に変化する要因を考慮した省エネ・優れた住環境の両立は、BEMS・HEMS の得意とする領域であり、すでに多数の実証実験が世界中で行われている。一般的に、電力需要が逼迫する夏冬では、ビル管理者や居住者の省エネ行動は室内住環境の悪化を招き得る。しかし、室内環境と在室者情報を観測しつつ総合的な電力需要機器運用スケジュールを逐次決定する統合制御システムを建物に導入すれば、ビル管理者の意思を反映した様々な制御プラン(例えば、ダイナミックプライシングに応じた電力コストカット優先プラン、駐車中の EV を積極的/消極的に電力需要平準化へ活用するプラン、室内環境の向上を一時的に最優先するプランなど)を容易に変更可能となる。さらに、一般家庭の電力需要がピークを迎える早朝・夕方時間帯で、今回想定した福江港ターミナルビルのような大型商用施設の蓄電システムを一般家庭へ貸し出すといったプランを提示すれば、3.1.3 にて紹介した Peak power, Spinning reserve の電力市場へ電力需要家側から貢献ができるようになる。

以上の理由から、本章にて提案したエネルギーサービス、センサ情報とマルチベンダの電力需要機器を統合した BEMS・HEMS の連携により、電力需要・供給側双方に大きなメリットがもたらされ、このような環境の構築がスマートグリッド・コミュニティの提供する未来の一端といえる。

## 5.6 本章のまとめ

本エネルギーサービスでは、駐車場の充電インフラ制御を行った。EV の利用状況を考慮した

---

需要電力平準化手法の提案と評価を行った。ストレージを FLIBS, IEVBS, MEVBS の三つの利用形態を想定し、需要電力平準化制御手法を提案し、実際の測定データを用いた電力収支シミュレーションによる評価を行った。シミュレーションによる評価の結果、検証対象として採用した福江港ターミナルビルの EMS に対しては検証対象期間の 2011/8/18～2012/9/30 において、提案制御手法により少なくとも一日平均で 1,300 円以上の電力料金を実験環境内で削減できる可能性を示した。

制御手法の基幹であるバッテリー制御手法に関しては CDCF と CDCS を提案し、ストレージの導入容量、電気料金の削減の点で、CDCS が優位であることを示した。更に、提案した制御手法ではストレージの充電量不足による受電電力のピークも発生せず、安定的な運用が可能である結果を示した。

MEVBS に対する制御手法では各々の EV の利用状況を考慮し制御指令を決定する SPDM を提案し、その有効性と安定性を確認した。この手法を拡張することで、EMS よりさらに広域でのマイクログリッドにおける EV バッテリー電力の共有と需要電力平準化の利用が期待できる。

---

## 第6章 建物の知的生産性指標と制御手法の提案

### 6.1 本エネルギーサービスの動機

本研究におけるスマートなエネルギーサービスの一つとして提案する、教育施設の空調機器制御として、建物の利用環境に適した室内環境評価指標を用いて、室内環境維持と省エネ化効果を実証する。2.1.3 で述べたとおり、我が国では温室効果ガスを2020年までに2005年度比で3.8%の削減することを目指している。この削減を達成する上で、電力の消費削減を改善する技術の重要な要素として既築の建物を対象としたEMSの実装と省エネ化による効果が期待されている。そこで、2009年に経済産業省により国際技術標準規格に基づいたEMSの構築、そして建物の様々な情報を活用する新しいエネルギーサービスの創出を目指した、次世代エネルギー社会システム実証地域が選定された。このような背景から、本研究では、50 [kWh]の大規模な空調機器が設置された大学の教育棟へEMSを構築し、スマートなエネルギーサービスとして空調機器制御を活用した知的生産性維持と省エネ化の効果を評価した。実験環境は複数のベンダ機器が設置されており、大中小16部屋からなる、総延べ床面積1991.38 m<sup>2</sup>となる教育棟である。教育棟へ構築したEMSでは、センサからの情報(建物の受電電力、室外機的气体流量、温湿照度、CO<sub>2</sub>濃度)と、エアコン・換気扇の稼働状況が管理サーバのデータベースに蓄えられる。空調機器はマルチベンダで構成されており、2011年に採択されたビル設備を統合制御する国際標準規格IEEE1888に基づいた統合制御環境が構築されている。

本エネルギーサービスで議論する知的生産性指標として、2006年に村上らが初めて実験したPMV・テスト結果から得た知的生産性指標(PMV)と、換気量・テスト結果から得られた知的生産性指標(換気量)を合わせ、PMVとCO<sub>2</sub>濃度から算出する新たな知的生産性指標を使用した。さらに、教育施設では換気量の測定に必要な在室人数の取得が導入コスト・プライバシーの問題から困難であったため、EMSのセンサとして設置されているCO<sub>2</sub>濃度センサの情報から在室人数を推定する手法を採用した。これら知的生産性指標と人数推定手法を活用し、エアコンと換気扇のピークカット制御により室内環境維持と省エネ効果を評価した。

### 6.2 室内環境評価指標

室内環境快適性の指標として利用されているPMVは、温熱快適性のみに着目しており、知的生産性が重視される教育施設やオフィスでは不十分であるといえる。そこで本エネルギーサービスでは、温熱快適性だけでなく空気質環境を考慮に入れた評価指標を考える。

#### 6.2.1 従来の室内環境評価指標

第4章では、Fangerらによる温熱快適性指標、ASHRAEのCO<sub>2</sub>濃度と作業効率に関する実証実験、D. WyonらやWargockiらによる室温・換気扇フィルターの状態が知的生産性へ与える

影響について紹介した。既存研究が示すように、温熱・空気質環境の適切な制御により、教室の総合的な学習効率の向上が可能となる。在室者の知的生産性へ影響を与える支配的な要因は、温熱快適性(室温・PMV)と CO<sub>2</sub> 濃度である。4.4 で紹介した実地実測では、温熱快適性 (PMV)と CO<sub>2</sub> 濃度を入力とし、独立にテスト結果と比較することで、近似式である(4-3), (4-4)得られた。さらに、4.4.3 では CO<sub>2</sub> 濃度と室温が作業効率(主観調査)に及ぼす影響を図示した、応答曲面モデル(図 14)を紹介した。

4.6 で述べた通り、応答曲面モデル(図 14)は大まかには近似式(4-3), (4-4)へ合致しているものの、サンプル数不足による応答曲面の歪さにより、一部(室温 25.5[°C], CO<sub>2</sub>濃度が 770 ppm 付近など)では近似式(4-3), (4-4)の関係に合致しない点が存在する。また、知的生産性を評価するにあたり、温熱快適性として単純な室温ではなく在室者の温冷感を考慮した PMV をもとに算出する必要がある。さらに、実際の制御では室内の CO<sub>2</sub> 濃度が 1000 ppm を超える場合も存在するが、図 14 は 900 ppm を上限としており、実際の教育施設・オフィスでの制御に十分対応できない場合がある。そこで以降では、これらの問題を考慮した CO<sub>2</sub>濃度・PMV から算出する相対学習効率指標について考える。

4.3.1 にて紹介した(4-3)を活用し、室内の換気量と知的生産性の関係を評価する。ここで、(4-3)の理解を容易とするため、x を ven, y を RLE<sub>ven</sub> とする。

$$RLE_{ven} = 0.04\ln(ven) + 1.00 \quad (6-1)$$

RLE<sub>ven</sub> はテスト結果をもとに算出された相対学習効率指標であり、換気量が不足し CO<sub>2</sub> 濃度が上昇した場合に悪化する知的生産性指標である。ven m<sup>3</sup>/h は一人当たりの室内換気量を示しており、部屋全体の換気量を在室人数で割ることにより算出している。つまり、RLE<sub>ven</sub> の導出には在室人数の推定が必要となる。

4.4.2 にて紹介した(4-4)を活用し、PMV と知的生産性の関係を評価する。ここで、(4-4)の理解を容易とするため、x を pmv, y を RLE<sub>pmv</sub> とした。

$$RLE_{pmv} = -16.2pmv^2 - 8.0pmv + 80.8 \quad (6-2)$$

RLE<sub>pmv</sub> はテスト結果をもとに算出された相対学習効率指標であり、最大値を PMV<0 にもつ二次関数として表現された知的生産性指標である。pmv は、センサから得た環境情報(温度, 湿度)と固定値(Met 値, clo 値, 風速)から算出される温熱快適性であり、ISO-7730 の国際規格として 0 を最も快適とする無次元の値である。つまり、RLE<sub>pmv</sub> の導出には、季節と実験環境に合わせて固定値(Met 値, clo 値, 風速)を決定し、室内の温度・湿度を環境センサで測定する必要がある。

次に、(6-2)の最大値を1となるよう修正した結果を次式と図 45 に示す。

$$RLE_{pmv} = -0.201pmv^2 - 0.098pmv + 0.988 \quad (6-3)$$

(6-1), (6-3) を統合することで、PMV と CO<sub>2</sub> 濃度から相対学習効率の評価指標を構築する。

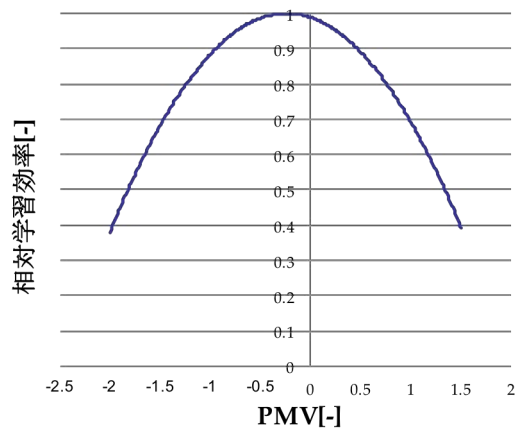


図 45 PMV と相対学習効率の関係<sup>59</sup>

先に述べた通り, (6-1)では一人当たりの換気量  $ven$  を用いて相対学習効率を算出しているため,  $CO_2$  濃度から相対学習効率を算出するには, 室内の人数情報を取得する必要がある。

### 6.2.2 $CO_2$ 濃度の変化から導出する在室人数推定

室内の人数情報を取得する手法として, 入退室管理システムを利用した手法やカメラから取得する手法がある。入退室管理システムを既築の建物へ導入するコストは高く, 複数人同時に入退室を行うため人数情報の取得が困難である。また, カメラを使用した手法では映像管理が必要となるため, システムの導入コストが高く, プライバシーの保護が難しいなどの問題がある。そこで, 低導入コストかつプライバシーを保護した在室人数推定手法として,  $CO_2$  濃度センサを用いた在室人数推定手法を採用する<sup>85</sup>。

まず, 室内外の汚染質濃度の変化を示すザイデルの式<sup>52</sup>について考える。微小時間  $dt$  での室内汚染質の変化量との関係式は, 次式ようになる。

$$C_0 \cdot Q \cdot dt + M \cdot dt - C \cdot Q \cdot dt = V \cdot dC \quad (6-4)$$

ここで,  $C_0$  [ppm]は汚染質の発生がない室外の汚染質濃度,  $Q$  [ $m^3/h$ ]は部屋の換気量,  $M$  [ $m^3/h$ ]は汚染質発生量,  $C$  [ppm]は室内の汚染質濃度,  $V$  [ $m^3$ ]は部屋の容積である。左辺第一項は室外から流入する汚染質量, 第二項は室内で発生する汚染質量, 第三項は室外へ流出する汚染質量を示しており, 右辺は室内での汚染質の変化量を示している。さらに, (6-4)の微分方程式は次式のように考えることができる。

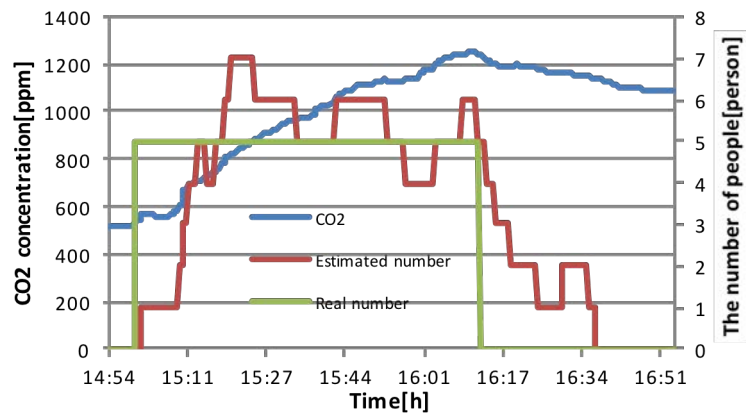
$$C_t = C_0 + (C_{t-\Delta t} - C_0) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{V}\Delta t\right) + \frac{M}{Q} \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{Q}{V}\Delta t\right)\right\} \quad (6-5)$$

ここで,  $C_t$ は時刻  $t$  での室内  $CO_2$  濃度 [ppm],  $\Delta t$  ( $0 < \Delta t$ )はサンプリング間隔,  $Q/V$ は室内の空気を喚起する換気回数 [回/h]である。ただし, 本エネルギーサービスではセンサのサンプリング間隔  $\Delta t$ は20秒としている。そして, 汚染質発生量を  $CO_2$  とすると汚染質発生量  $M$ は, 教育施設での一人当たりの  $CO_2$  排出量  $k$  [ $m^3/h$ ]と, 室内の人数  $n$ の積として算出できるため, 結

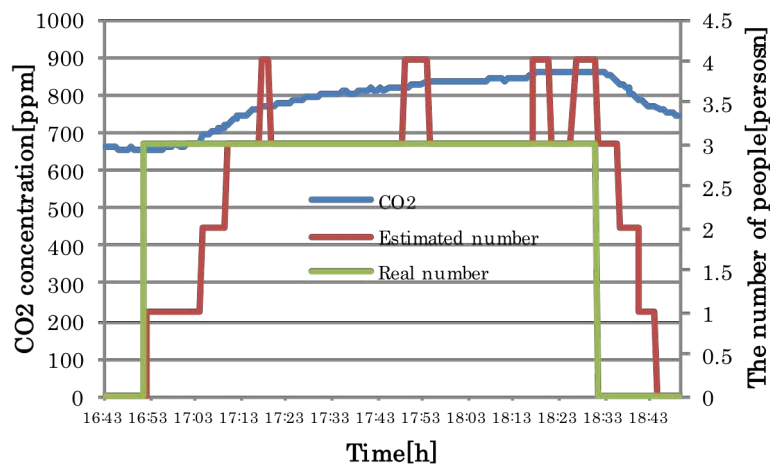


表 26 在室人数推定の各種パラメータ

パラメータ	単位	説明	算出方法
$C_s$	ppm	初期の汚染質濃度	事前に計測
$C_0$	ppm	汚染質の発生がない環境下での汚染質濃度	事前に計測(550)
$M$	$m^3/h$	汚染質発生量	$k, n$ から算出
$V$	$m^3$	部屋の容積	事前に計測
$Q$	$m^3/h$	換気量	トレーサガス法から計測
$i, s$	h	時刻	計測
$k$	$m^3/h$	一人当たりの $CO_2$ 排出量	定数を使用(0.02)
$n$	-	室内の人数	推定



(a)



(b)

図 46 換気量別人数推定結果 (a) 0[Hz] (b) 20[Hz]<sup>85</sup>

果として次式を得る.

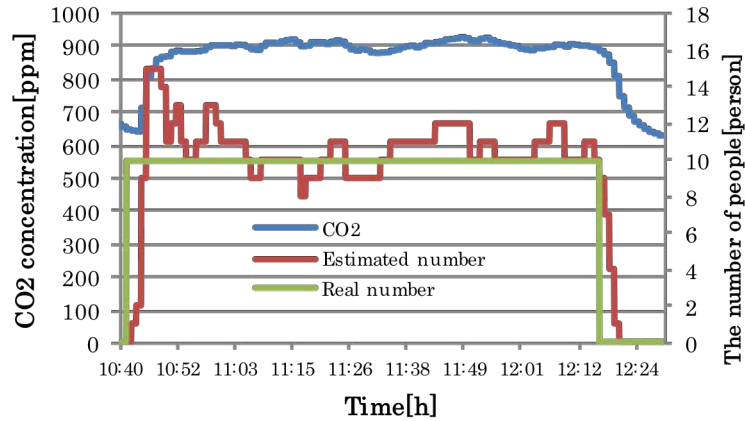
$$C_t = C_0 + (C_{t-\Delta t} - C_0) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{V}\Delta t\right) + \frac{k \cdot n}{Q} \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{Q}{V}\Delta t\right)\right\} \quad (6-6)$$

さらに、(6-6)を人数  $n$  について求めると、次式を導くことができる。各パラメータの説明を表 26 示す。

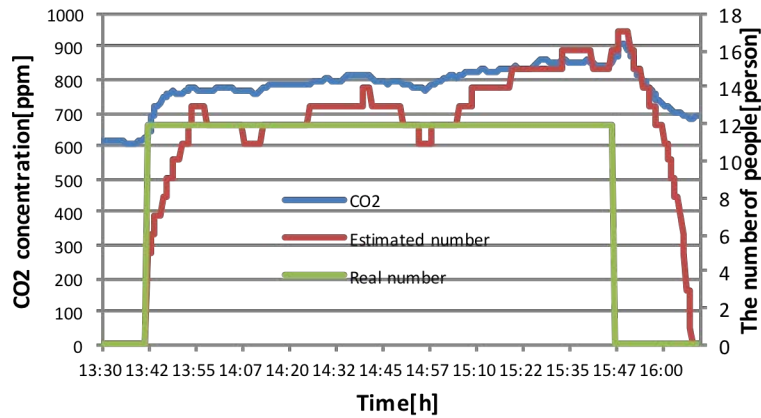
$$n = \frac{Q}{k \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Q}{V}\Delta t\right) \right\}} \left\{ C_t - C_0 - (C_{t-\Delta t} - C_0) \exp\left(-\frac{Q}{V}\Delta t\right) \right\} \quad (6-7)$$

本エネルギーサービスでは、 $C_0$  は計測結果から 550 ppm、一人当たりの  $\text{CO}_2$  排出量  $k$  は軽い事務作業時の成人一人当たりの排出量 0.02 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]とした。

$\text{CO}_2$  濃度を用いた在室人数推定手法の実験結果を図 46 および図 47 に示す。実験では、床面積 33.0 [ $\text{m}^2$ ]、容積 112.4 [ $\text{m}^3$ ]の環境下において、換気扇による換気量を変化させ(0 [Hz], 20 [Hz], 36 [Hz], 50 [Hz])、在室人数推定結果と実際の人数を比較した。単位人数あたりの  $\text{CO}_2$  排出量  $k$  は平常時の平均的な排出量<sup>86</sup>を採用し、窓とドアを閉じつつ換気扇が動作していない自然換気量  $Q$  はあらかじめトレーサガス法により計測している。トレーサガス法とは、室内に  $\text{CO}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{SF}_6$  等のガスを送入し、その濃度変化の計測から間接的に換気量を測定する手法である<sup>87, 88</sup>。実験に用いた  $\text{CO}_2$  濃度センサは非分散型赤外線吸収法を用いた小型センサであり、定常



(c)



(d)

図 47 換気量別人数推定結果 (c) 36[Hz] (d) 50[Hz]<sup>85</sup>

表 27 換気量と推定誤差

出力周波数 [Hz]	0	20	36	50	0 → 20	0 → 36	0 → 50
在室人数	5	3	10	12	5	4	11 → 12
平均推定誤差	1.19	0.43	1.29	1.59	1.62	0.94	2.29
相対平均推定誤差	0.24	0.16	0.13	0.13	0.32	0.24	0.20

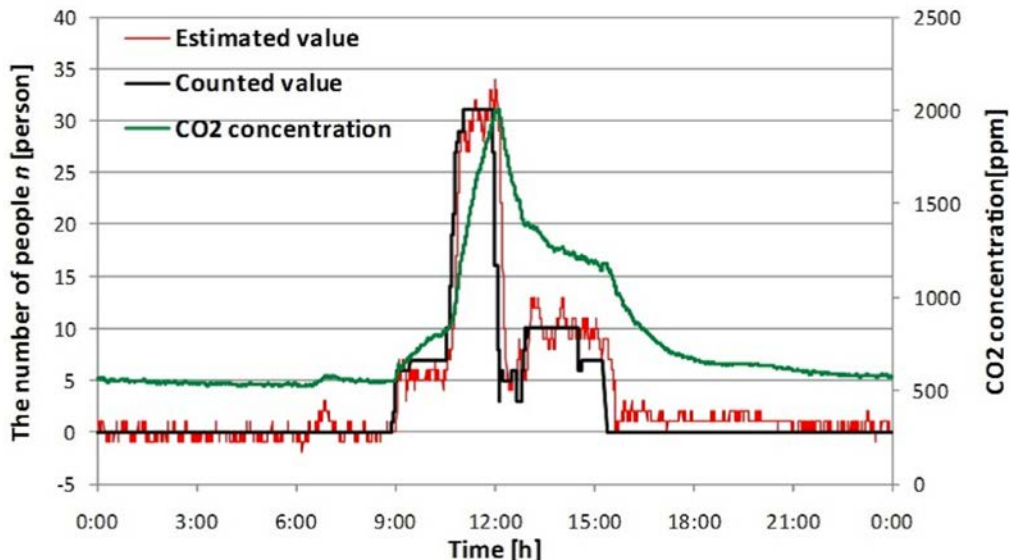


図 48 大教室における人数推定結果

時において 10%の誤差, 測定値には高周波成分をノイズに持つ. そこで, センサの計測結果を安定させるため, 約 1 分単位の移動平均を用いた. なお, 10%の誤差はあるが定常誤差が殆どであり, 実際に CO<sub>2</sub> 濃度が変化した際には, これを正確に検出できる. この変化に対する検出誤差はおよそ数%と見込んでいる.

換気量を変化させつつ推定した結果を表 27 に示す. 表 27 において, 出力周波数は換気扇のインバータ出力を示し, 周波数が増加するごとに室内の換気量が増加する(0 [Hz]: 89.5 [m<sup>3</sup>/h], 20 [Hz]: 247.3 [m<sup>3</sup>/h], 36 [Hz]: 611.7 [m<sup>3</sup>/h], 50 [Hz]: 957.0 [m<sup>3</sup>/h]). さらに, 0→20, 0→36, 0→50 は, 実験的に計測途中でインバータ出力を変化させている. 平均推定誤差は, 人がいる計測期間の推定人数・実測人数の差を絶対値を平均した値である. また, 相対平均推定誤差は, 実測人数に対する平均推定誤差を実測人数で割った値である.

平均推定誤差は, 出力周波数 20 [Hz], 0 [Hz]の順で小さくなる, 出力周波数 50 [Hz]では平均推定誤差が最大となるが, 相対平均推定誤差は出力周波数 0 [Hz]より小さい. さらに, 途中で出力周波数を変化させた場合の相対平均推定誤差は, 0 [Hz]から 20 [Hz]に変化させると最大となり, 0 [Hz]から 36 [Hz]に変化させると出力周波数 0 [Hz]の場合と等しくなる. このように, 換気扇の出力周波数は出力の変化に関係なく, 在室人数推定において(6-7)が有効であるとわかる.

図 46 および図 47 から明らかなように, 入退室時に最も誤差が大きくなる. これは, ドアの開閉に伴う室内 CO<sub>2</sub> 濃度の急激な変化が原因である. ドアの開閉が起こると, 室内の空気の流れが発生し CO<sub>2</sub> 濃度が一時的に上昇しその後急激に減衰する. (6-7)では自然換気, 換気扇の強

制換気双方において換気量が一定としており、ドアの開閉から発生するCO<sub>2</sub>濃度の不均一性が推定結果を悪化させる原因となる。

さらに、これらの結果を踏まえた上で、対象となる環境を大人数・大容量の教室へと移し検証を実施した。床面積 104.9 [m<sup>2</sup>]、容積 327.2 [m<sup>3</sup>]、定員 83 人、換気量一定の 330 [m<sup>3</sup>/h]の環境下において、在室人数推定結果と実際の人数を比較した結果を図 48 へ示す。室内人数が最大 31 人となった場合においても、先ほどの検証結果と同様の傾向が見て取れる。人数変化が安定している際には推定結果に高周波成分が含まれており、人数の増減が発生した直後では推定に遅れが見られる。また、平均推定誤差は 3.17 人となり、実際の在室人数で割った相対推定誤差は 0.10 人となった。表 27 の相対推定誤差と比較すると、大教室での実験は最も低い相対推定誤差となった。これは、在室人数が増加することにより、誤差が平準化されたためと考えられる。逆に、数人程度の少人数・小規模な環境下での本手法の人数推定では、空調機器制御が在室者へ与える影響が大きくなるため、小部屋での推定精度向上と無人状態の正確な推定を補完する試みが必要と考えられる。

さらに、推定精度を向上させる上で、推定結果の高周波成分を取り除くローパスフィルタの使用が考えられる。ローパスフィルタのサンプル数を増加させると、急激な人数の変動は検出できなくなるが、高周波成分が取り除かれるため推定結果の分散が低下する。そこで、推定の応答性と高周波成分の除去を両立するサンプル数を選択する必要がある。今回の実験においては、7 分のサンプルにてローパスフィルタを設計した結果、推定結果の分散値が最小化された。このように、対象空間の大きさ・換気量・許容人数に合わせたサンプル数を選択すれば、より安定した人数情報が取得可能となる。

以上の実験結果から、CO<sub>2</sub>濃度を用いた在室人数推定手法は、人の入退室が激しい室内環境では推定結果が悪化する傾向にあり、逆に教室や図書館といった滞在時間が比較的長く、また容積の大きい室内環境での利用に適しているとわかる。また、建物の EMS で頻繁に発生する換気扇の動的な制御にも適している。これらの理由に加え、安価な CO<sub>2</sub>濃度センサを用いる点、空調機器の利用期間中はドアや窓の開閉が少ない点、高いプライバシー保護を達成できる点からも、本エネルギーサービスでは CO<sub>2</sub>濃度を用いた在室人数推定手法を採用した。

### 6.2.3 提案する学習効率指標

CO<sub>2</sub>濃度から算出した人数情報(6-7)、そして室内換気量を用いて、(6-1)の算出が可能となる。室内換気量はあらかじめトレーサガス法にて取得しており、次式より換気量から算出される学習効率  $RLE_{ven}$  が算出される。ここで、 $Q$  は室内換気量であり、 $n$  は(6-7)より予測した在室人数である。

$$RLE_{ven} = 0.04 \ln \left( \frac{Q}{n} \right) + 1.00 \quad (6-8)$$

以上より、温熱快適性から算出された学習効率指標  $RLE_{pmv}$ (6-2)、さらに換気量から算出された学習効率指標  $RLE_{ven}$  (6-8)を得た。本エネルギーサービスで用いる室内評価指標として、PMVとCO<sub>2</sub>濃度からそれぞれ算出した学習効率の合算を最大化する空調機器制御を目指す。ここで、類似した既存研究として室温とCO<sub>2</sub>濃度から作業効率(主観調査)を図示した図 14 と、提案する室内環境評価指標を比較する。

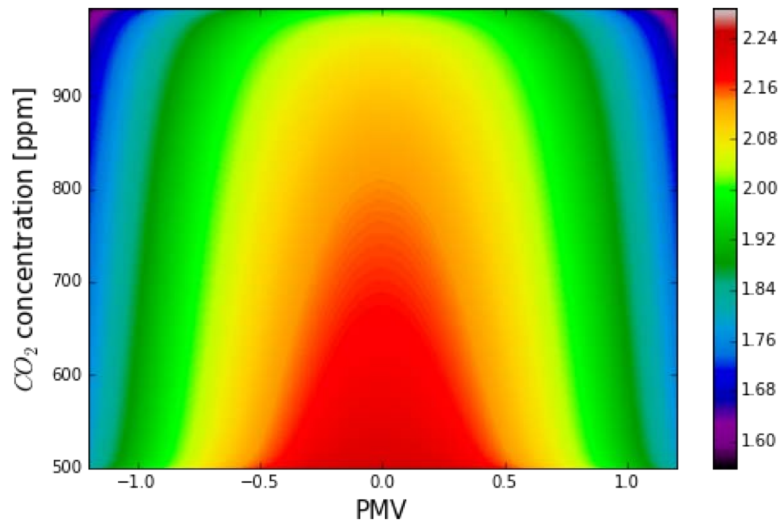


図 49 RLE<sub>pmv</sub> と RLE<sub>ven</sub> の合算から算出した学習効率指標

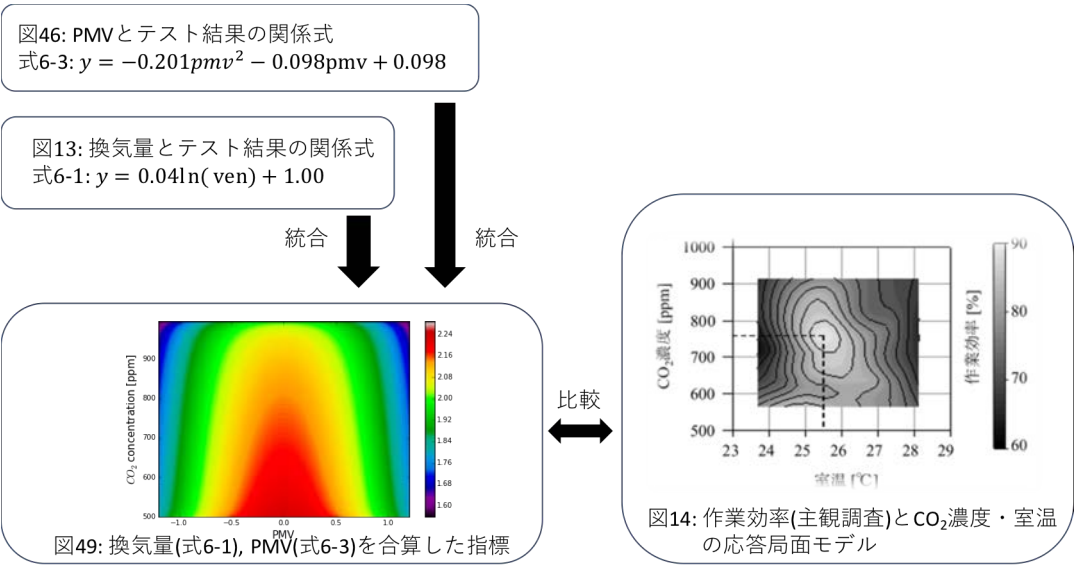


図 50 室内評価指標として使用する指標(図 49)と既存研究の関係図

(6-1)の換気量 ven を CO<sub>2</sub> 濃度として表現するため, (6-8)の換気量 Q を ven へ代入して次式を得る.

$$C_t = C_0 + (C_{t-\Delta t} - C_0) \exp \left\{ -\frac{t}{V} \exp \left( \frac{RLE_{ven} - 1.00}{0.04} \right) \right\} + \frac{n \cdot k}{\exp \left( \frac{RLE_{ven} - 1.00}{0.04} \right)} \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{t}{V} \exp \left( \frac{RLE_{ven} - 1.00}{0.04} \right) \right\} \right] \quad (6-9)$$

(6-9)の理解を容易とするため, 室内在室人数 n=1, サンプル感覚 t=1 [h], 室外 CO<sub>2</sub> 濃度 C<sub>0</sub>=500 ppm, 1サンプル前の CO<sub>2</sub> 濃度 C<sub>t-Δt</sub>=1000 ppm, 容積 V=1000 [m<sup>3</sup>], 単位時間あたりの CO<sub>2</sub> 排出量 k=0.02 [m<sup>3</sup>/h]とし, これらの値を用いて(6-9)をもとに RLE<sub>ven</sub> と C<sub>t</sub> の関係を解析的に

算出した。そして(6-2)と合算した結果を図 49 へ示す。図 49 において、横軸は PMV、縦軸は計測時の CO<sub>2</sub> 濃度である。

さらに、図 50 へ PMV・CO<sub>2</sub> 濃度を考慮した知的生産指標と既存研究の関係を示す。室温・CO<sub>2</sub> 濃度と作業効率の関係図(図 14)と図 49 の横軸は異なる指標を用いているが、PMV 算出において温度以外のパラメータを固定値とすると、室温との比較が可能となる。快適域(PMV=-0.24)と 25.5 [°C]を合わせて比較すると、温熱指標・CO<sub>2</sub> 濃度の変化と知的生産性の低下が良い一致を示していることがわかる。また、図 49 では PMV=-0.24 で学習効率が最大となっており、CO<sub>2</sub> 濃度の増加に伴い対数的に学習効率が低下する。このように、サンプル数の不足により 25 [°C]周辺で CO<sub>2</sub> 濃度が低下すると作業効率が低下する図 14 の課題を解消している点、CO<sub>2</sub> 濃度が 900 ppm 以上まで計測可能な点、そして温熱評価指標として室温ではなく PMV を採用している点から、本エネルギーサービスでは、(6-1)、(6-3)を合計した学習効率指標を用いて教育施設の空調機器を制御する。

### 6.3 実験環境

本節では、実験環境として用いる矢上キャンパス 12 棟、そして EMS の実装に用いたセンサ、ネットワーク、制御システムの紹介を行う。構築した EMS では、室内に設置したセンサの環境情報収集に、分散協調型デマンドサプライコントロールシステム (KNIVES)とよばれる組み込み端末を開発、導入している。センサモジュールは SII (セイコーインスツルメンツ)社製の環境センサを使用し、温度、湿度、照度、CO<sub>2</sub> 濃度、人感データを取得した。これらのセンサはアドホックにワイヤレスで相互に通信を行う。温湿照度センサは内蔵電池により 10 年間動作するよう設計した。また風速に関しては、実験の対象である教室では窓を開けて外気流を取り込まない限り風速が発生しないとすることが多く<sup>89</sup>、0 を固定値とした。次に平均放射温度であるが、室内温度と同一の値を採用している場合が多く、本エネルギーサービスにおいてもその方法を利用した<sup>90</sup>。



図 51 矢上キャンパス 12 棟. 左上:外観. 右上:大教室. 左下:中教室. 右下:小教室

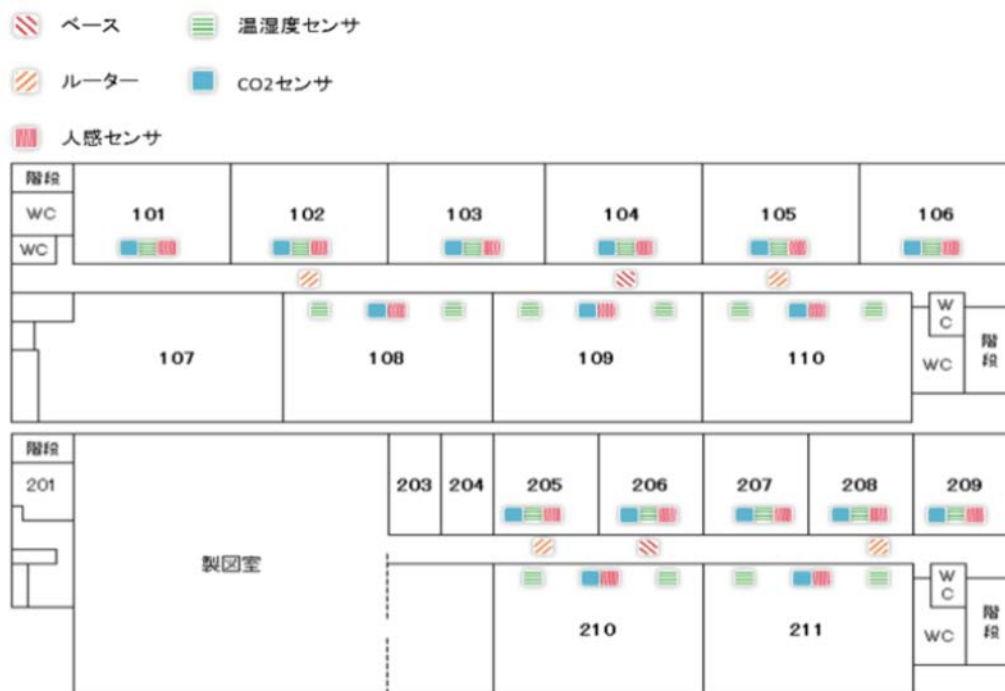


図 52 矢上キャンパス 12 棟の 1F(上図)と 2F(下図)の間取り

### 6.3.1 建物とセンサ類

6.2.3 で作成した学習効率指標に基づいた制御を行うため、実際に建物のエネルギー消費量と温度変化を測定・制御できる EMS を構築した。神奈川県横浜市の慶應義塾大学矢上キャンパス、教室棟 12 棟を EMS 構築の対象とした。本エネルギーサービスの EMS 構築は、環境省平成 24 年地球温暖化対策技術開発等事業(大学キャンパスの省 CO<sub>2</sub>化に向けたキャンパスエネルギーマネジメントの実証研究)委託業務の一環として行われた。

施設の外観と室内の様子を図 51 に示す。12 棟は教室棟であり、教員および学生が自由に出入り可能である。12 棟は 2 階建ての建物であり、特徴的な構造としては北西から南東に続く廊下を軸として、北東側と南東側に大中小の教室が並んでいる。今回 EMS 構築の対象とする部屋は、12 棟 1 階および 2 階の大教室・中教室・小教室、合計 16 部屋である。各部屋の大きさと、トレーサガス法を用いて実測した換気量を表 28 に示す。

矢上キャンパス 12 棟にセンサ、通信機器、制御環境を実装した。図 52 に実験環境の見取り図とセンサの設置個所を示す。図中のベース・ルーター・人感センサ・環境センサ・及び CO<sub>2</sub> センサは、室内の環境情報を取得するために設置した各種センサである。16 部屋それぞれに温湿度センサ、CO<sub>2</sub>センサ、人感センサを最低1種類ずつ設置している。センサはセイコーインスツル株式会社の SW-3XXX シリーズを用いる<sup>83</sup>。図 53 は実際の設置の様子である。センサは無線環境ネットワークを構築しており、自律的にネットワークを構築する。ベース・ルーター・ノード間の通信は特定小電力無線を使用しており、ベース1台につき最大100台のルータまたはセンサノードが設置可能である。通信間隔はノードそれぞれに独立して設定でき、Li 電池寿命は 5～

表 28 制御対象となる部屋の情報

教室の種類	縦幅 [m]	横幅 [m]	高さ [m]	体積 [m <sup>3</sup> ]	自然換気量 [m <sup>3</sup> /h]	強制換気量 [m <sup>3</sup> /h]
大教室	16.8	11.8	3.13	619.5	525.9	740.6
中教室	12.3	8.60	3.13	331.2	79.5	328.5
小教室	8.53	8.60	3.13	229.3	87.5	253.8

表 29 ガスヒートポンプの定格情報

型番	冷房能力 [kW]	暖房能力 [kW]	冷房消費電力 [kW]	暖房消費能力 [kW]	冷房ガス消費量 [kW]	暖房ガス消費量 [kW]
YMCJ560M	56.0	67.0	1.35	1.42	59.6	56.4
YNZP355	35.5	40.0	0.73	0.68	25.4	26.2

10年である。

各部屋にはそれぞれ小教室で4台、中教室で6台、大教室で8台の全熱交換器(図 54(a)), MITSUBISHI 製 VL-140EU が設置されており、消費電力は 37 [W]である。空調室外機(図 54(b))には 2 社の製品が用いられており、1 台はヤママー製のガスヒートポンプ YNZP355E2, 他 13 台はヤマハ製のガスヒートポンプ YMCJ560M である。それぞれ暖房ガス消費量は 56 [kW], 25 [kW]である。また、室内機はヤマハ製天井カセット型 YMEJ71LMD もしくは YMEJ56-LMV が小教室に 2 台、中教室に 3 台、大教室に 8 台設置されている。ガスヒートポンプ、全熱交換器の定格情報を表 29, 表 30 へ示す。



図 53 SII センサの設置図



(a)



(b)

図 54 制御対象機器 (a)全熱交換器 (b) 室外機



表 30 全熱交換器の定格情報

表記	単位	値
風量(排気)	m <sup>3</sup> /h	13.7
風量(給気)	m <sup>3</sup> /h	126
騒音値	dB	42
外形寸法	mm	620
外形寸法	mm	168
製品重量	kg	6.5
電圧	V	100
定格電流	A	0.35
定格入力	W	35
熱交換率	%	53



(a)



(b)

図 55 制御環境構築 (a) OpenBlocksAX3 と PLC, (b) G150AD

従来は異なるメーカーの空調機がそれぞれ独立して管理されていたが、本エネルギーサービスでは異なるベンダの機器を統合するため、2.2.2.2 にて紹介した IEEE1888 を用いて機器制御を行う。まず、MITSUBISHI 製空調を制御するため、その集中コントローラである MJ-103MTR-B にシーケンサ MELSEC-Q を増設し、これに独自に構築した MELSEC-Q の制御コマンドと IEEE1888 を相互に変換するシステムを結合した。次に、ヤンマー製空調を制御するため、OEM 提供元であるダイキンによる V-up コントローラを増設し、同様に独自に構築した V-up コントローラの制御コマンドと IEEE1888 を相互変換するシステムを結合した。これらにより、IEEE1888 を用いて両空調を等価に制御可能とした。制御側のシステムには、DBMS (Data Base Management System)により管理された制御用テーブルがあり、SQL を用いてこのテーブルに情報を書き込むことにより、インターネットを介してあらゆる空調が制御可能である。

図 55 は EMS を構築するため実装した制御機器を示している。図 55(a)は実際に OpenBlocksAX3 を矢上キャンパスに設置した様子である。右下にあるように、小さく堅牢なボデー

イーを持つため、配線板などでも活用できる。さらに MITSUBISHI 製シーケンサ PLC, MELSEC-Q を図 55(a)のように設置することで、リレー制御を通じて既設の集中コントローラへの介入を可能とした。集中コントローラとして、図 55(b)にある MITSUBISHI 製 G150AD を設置した。ベンダによって呼び方が異なるが、集中コントローラはタッチパネル式の空調管理用コントローラであり、エアコンの管理、スケジュール運転等の設定が可能である。しかし実際の運用では特にコントローラでスケジュールリングすることではなく、温度設定を一定にする管理を行った。次に、この集中コントローラと PLC 間の通信方式を解析し、変換テーブルを用意することで室内機情報及び制御パラメータを変更ならびに利用可能としつつ、そのフォーマットを統一した。これによりデータベース上の制御用テーブルへの書き込みに従い、インターネットを介しあらゆる空調の容易な管理を可能とただけでなく、サーバ上でデータを分析し最適な運転を行うコマンドを自動で送信することが可能になった。

慶應義塾大学矢上キャンパスのエネルギー利用は、空調室外機にガスヒートポンプを使っているため、ガスと電力の 2 種類がある。電力の基本料金は過去 1 年における 30 分間のピーク積算電力量で決まる。したがって、本エネルギーサービスにて 30 分間のピーク積算電力を削減することで、月の従量利用料金だけでなく基本料金も削減できる。一方、ガスは年間使用量が 10 万  $\text{m}^3$  以上となる大口契約を選択しているため、電力料金とは異なり、時間変動を考慮しない年間を通した一律の利用料金が定められている<sup>91</sup>。

### 6.3.2 システムの全体図

構築した EMS のネットワークシステムの概要を図 56 に示す。システム構成は、研究室室内へ設置しているサーバと、12 棟に設置した KNVIES クライアント端末群、および制御対象機器の制御端末からなる。6.3.1 で述べた通り、12 棟には異なる 2 つのベンダからなるガスヒートポンプが設置されている。さらに全熱交換器も含めたすべての HVAC 機器を IEEE1888 に基づいた制御環境を構築することで、一括制御が可能である。また、後述するが、ウェブサイト、スマートフォンからアンケート回答の収集が行えるようにした。

設定可能な制御項目としては ON/OFF、運転モード変更（冷房、暖房、送風、除湿、自動、温調）、設定温度（15 [°C]～30 [°C]）、風向（水平、斜め 0、斜め 1、斜め 2、垂直、スイング、自動）、風量（微弱、弱、中 2、中 1、強、自動）の制御パラメータを実装した。本エネルギーサービスでは実験環境を統一するため、運転モードは暖房のみとし、設定温度は学内で規定されていた 22.0 [°C]、風向はスイング、風量は初期値として強に設定した。ON/OFF は室内より自由に行うことができるが、慶應義塾大学矢上キャンパスの電力逼迫時には運転を自動的に停止し、反対の場合は運転を再開、もしくは運転状態を維持する。実際の管理画面を図 57 に載せる。

外部アクセスを含むこれらの機能の実現と IEEE1888 のプロトコル変換の実現には、マイクロサーバ OpenBlocksAX3 を利用した。これは、Dual Core Marvell ARMADA XP 1.33 GHz を搭載し、Debian GNU/Linux を運用可能な小型低消費電力組込サーバである。小さく信頼性が高いため、WEB のフロントエンドサーバーやセキュリティ対策、HTTP Proxy やネットワーク監視等、幅広い用途での使用実績がある。

## 6.4 優先度付き空調制御手法の提案

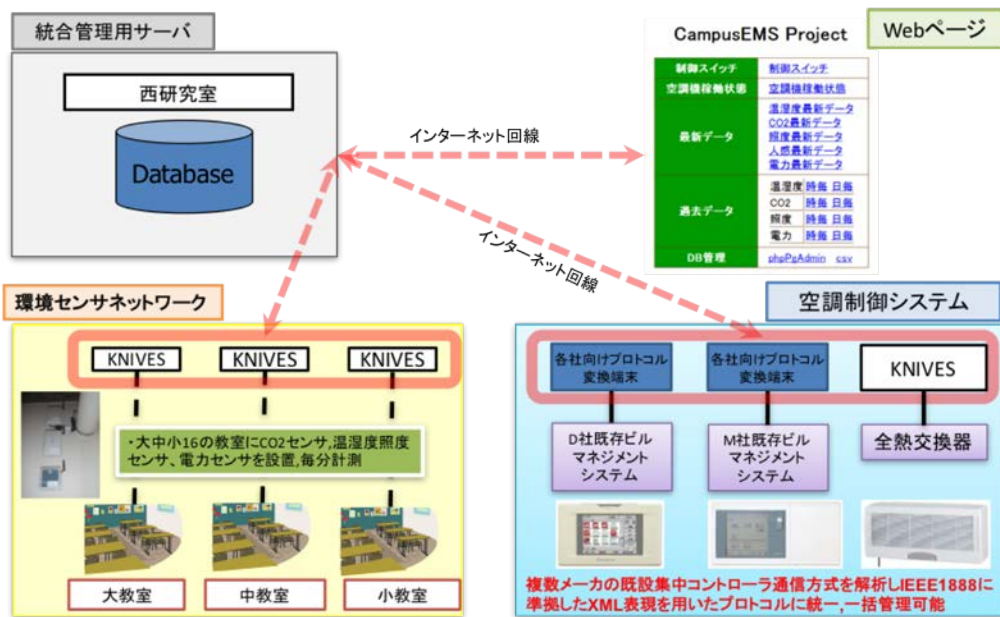


図 56 構築した EMS の概要図

ID	control28	control29	control30	control32	control33	control34	control35	control36	control37
対象	357B	357C	358	101	102	103	104	105	106
制御可否	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効
稼働状態				停止	停止	停止	停止	停止	停止
設定温度				22°C	22°C	22°C	22°C	22°C	22°C
風量				強	弱	弱	弱	強	強
更新日時				2015/01/06 19:16:01	2015/01/06 19:16:04	2015/01/06 19:16:06	2015/01/06 19:16:08	2015/01/06 19:16:11	2015/01/06 19:16:13
ID	control38	control39	control40	control41	control42	control43	control44	control45	control46
対象	107	108	109	110	202製図室	203	204	202CAD	CAD準備
制御可否	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効
稼働状態	停止	停止	停止	不明	不明	停止	停止	停止	運転
設定温度	22°C	22°C	22°C	9999°C	9999°C	22°C	22°C	22°C	26°C
風量	強	弱	強	9999	9999	強	強	中1	強
更新日時	2015/01/06 19:16:15	2015/01/06 19:16:18	2015/01/06 19:16:20	2015/01/06 19:15:22	2015/01/06 19:15:24	2015/01/06 19:15:26	2015/01/06 19:15:29	2015/01/06 19:15:31	2015/01/06 19:15:34
ID	control47	control48	control49	control50	control51	control52	control53	control55	control56
対象	CAD車庫	205	206	207	208	209	210	日吉D203①	日吉D203②
制御可否	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効
稼働状態	運転	停止	停止	停止	停止	停止	停止		
設定温度	26°C	22°C	22°C	22°C	22°C	22°C	22°C		
風量	強	強	弱	強	中2	弱	強		
更新日時	2015/01/06 19:15:36	2015/01/06 19:15:38	2015/01/06 19:15:41	2015/01/06 19:15:43	2015/01/06 19:15:45	2015/01/06 19:15:48	2015/01/06 19:15:50		
	control58	control59	control60	control61	control62				

図 57 空調稼働状態

#### 6.4.1 空調機の制御手法

制御時間は授業が行われている午前 9 時から午後 6 時、1 時限目から 5 時限目までとした。授業は 1 時限あたり 90 分間である、また、休憩時間や昼食時は制御時間対象外とした。6.3.1 で述べたように、実験環境のエネルギー利用形態はガスと電力の 2 種類があるが、ガスは完全従量制であるため、どのタイミングで制御しても同じ利用料金削減効果が得られる。それに対し

て電力は、利用料金の削減に効果的な、ピークカットを実現する空調機器制御手法を用いた。これにより、空調機器にガスヒートポンプを使用していないオフィスやキャンパスにおいても本手法は有効であり、電力消費が中心となる環境においても汎用性があるといえる。

空調機器の制御方法として、30分同時同量の原則に基づく30分間の線形予測を用いて需要電力使用量を推定する<sup>92</sup>。また、授業開始15分間は電力消費量を予測するため制御を行わない。次の15分間は3分ごとに電力消費量を予測しつつ、優先度に基づいて室内機の運転を適切な台数分停止させる。これは、空調の運転や停止といった制御を行う上で、空調機器保護の観点から3分の運転・停止状態の最低維持時間制限があるためである。なお、室内環境の著しい悪化による授業の学習環境への影響を避けるため、停止可能な台数をすべて停止しても電力ピークを超える場合、それ以上の室内機を停止させないように制御した。米国の電力会社PG&Eが提供するデマンドコントロールサービスについても、同様に室内環境保全の観点から15分以上の制御は行わない<sup>93</sup>。この30分間を制御周期とし、1時限90分間で3回繰り返す。

(6-10)は予測需要電力量  $P_{forecast}$  [Wh]の値を算出する15分時点、その後3分ごとに用いる線形予測式である。

$$P_{forecast} = \begin{cases} 2W_t & \text{if } t = 15 \\ \frac{30-t}{3}(W_t - W_{t-3}) + W_t & \text{if } t > 15 \end{cases} \quad (6-10)$$

ここで  $t = 15, 18, 21, 24, 27, 30$ 、また  $W_t$  は  $t$  分時点での積算電力量 [Wh] である。まず、(6-10)によって  $P_{forecast}$  の値が求まる。この、予め設定した目標値  $P_{forecast}$  および最大需要電力量  $P_{limit}$  の差がカットすべき電力量  $P_{target}$  である。 $P_{forecast}$  が  $P_{limit}$  の値を超えた場合、室内機を適切な台数停止し、超えていない場合は次の線形予測タイミングまで停止制御を行わない。 $P_{peak}$  はあらかじめ測定した日の中で最も電力を使用した日の 7.789 [kWh] とし、 $P_{limit}$  は  $P_{peak}$  を 10% 削減した 7.010 [kWh] に設定した。また、各教室のセンサの値から学習効率を一分ごとに算出し、部屋ごとに優先度を設けた。優先度は PMV または学習効率が高い程高く、電力消費量ピーク時に優先的に停止する。この優先度付けに PMV を用いた制御が「PMV を考慮した ON-OFF 制御」、6.2.3 で提案した学習効率を用いた制御が「学習効率を考慮した ON-OFF 制御」である。

#### 6.4.2 全熱交換器の制御手法

過剰換気は換気のみならず空調の消費電力を増大させるため、CO<sub>2</sub> 濃度センサを用いて全熱交換器を適切に制御することが必要である。建築基準法により室内の CO<sub>2</sub> 濃度が 1,000 ppm 以下であることが義務付けられている。そこで、この値を基準として 1,000 ppm を超えた場合には自動で室内のすべての換気扇を作動させ、基準を下回ると換気扇を停止させる。

夏季・冬期においては、換気による室内の温熱環境の悪化を考慮するべきである。しかし図 49 から明らかなように、PMV にて快適域とされる -0.5 から +0.5 では、CO<sub>2</sub> 濃度が学習効率へ与える影響のほうが、PMV の影響よりも重要となる。また、全熱交換器は換気によって失われる温度と湿度を交換回収して室内へ戻すことが可能なため、全熱交換器を用いた換気による PMV の悪化は比較的小さいといえる。そこで、CO<sub>2</sub> 濃度が 1000 ppm を超えないようにする換気扇制御を最優先とし、その上で最大電力使用量である  $P_{limit}$  を超えないよう空調機器の運転を行った。これにより、換気扇と空調機器の制御による、消費エネルギー削減と CO<sub>2</sub> 濃度の改善、PMV 快適域の維持を目指す。

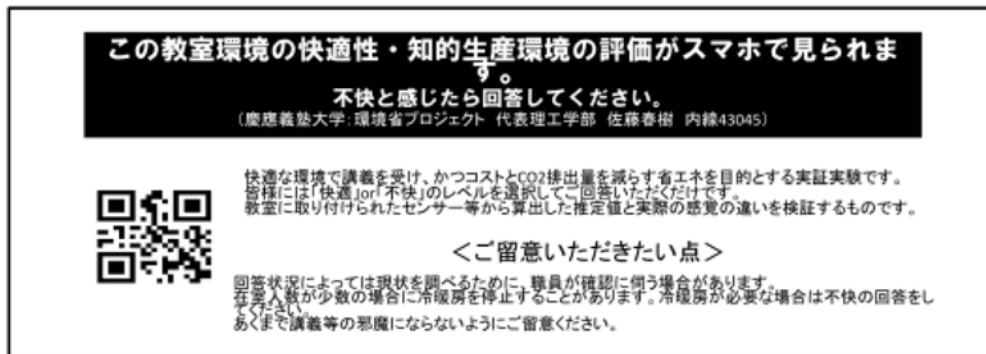


図 58 アンケート調査ご協力のお願いと QR コード



図 59 アンケートフォーム

### 6.4.3 アンケートによる快適性の調査

センサの値から算出した PMV と、在室者が感じる温熱快適性について比較を行うため、空調制御実験と同時に温熱快適性についてのアンケート調査を実施する。教室に図 58 のような QR コードを提示し WEB サイトへ誘導しする。これにより、スマートフォン等の端末を通じてアンケート画面を表示し(図 59)、在室者から回答を収集した。アンケート調査画面では、「快適性は理論値の通りでしょうか？今のみなさんの率直な気持ちを下図でタップ(クリック)してください」という文章とともに、ISO 規格が定める PMV の指標と同様、7 段階(かなり寒い、寒い、少し寒い、快適、少し暑い、暑い、かなり暑い)で回答する。また、実際に授業中に実験するため、事前に授業を担当する講師の先生に実験の許可を取った。さらに、実験に協力いただいた講師の先生へ、快適性と学習効率に関するヒアリングを行った。

## 6.5 室内温度変化の要因とシミュレーションによる検証

建物の温熱特性を把握することは、空調機器を適切に制御する上で不可欠なプロセスである。そこで、実験環境のセンサから取得したデータを用いて、温熱収支に関するシミュレーションを構築・評価した。基本的なモデルは 4.5 で紹介した一般的な室内温熱モデルを使用する。まず、取得した環境データを元にパラメータのチューニングを行う。次に、シミュレータを構築し、最後にシミュレーションの結果を実験環境から取得したデータと比較し検証する。

### 6.5.1 実験環境特有の温熱モデル設計

シミュレータを設計するにあたり、いくつか実験環境に依存する温熱モデルが存在する。具体的には、メーカーの設計や、室内の用途、センサ情報の取得状況に応じて適宜モデルの修正を行う。

#### 6.5.1.1 空調機

制御対象であるガスヒートポンプと全熱交換器は、ガス・電気を消費して稼働する空調機である。ここでは、それぞれのエネルギー消費量とその効果をモデル化する。

ガスヒートポンプは室外機と室内機から構成されており、その間を冷媒が循環し熱エネルギーを交換する<sup>94</sup>。ここで、室内機から発生する熱エネルギーの正確な量を測定するには、室内機へ流入する冷媒の温度、室内機から流出する冷媒の温度、そして冷媒の流量が必要となる。加えて、実験環境では室外機と室内機が1対多数で設置されている場合が多いことから、これらのセンサによる動的な各室内機に関する情報取得は困難であった。以上の理由から、本研究では室内機から吹き出す温風の温度を計測し、(6-11)により $q_{heater}$ を定数として取り扱った。

$$q_{heater} = c_p \rho v (T_{heat} - T_0) \quad (6-11)$$

実測の結果、 $T_0 = 13.9$  [°C]、 $T_{heat} = 27.3$  [°C]であったため、(6-11)から算出した各部屋の室内機における総暖房能力は、部屋番号 101 ~ 106 では 31 [kW]、部屋番号 108 では 30 [kW]、部屋番号 109, 210, 211 では 42 [kW]、そして 205 ~ 209 では 21 [kW]とした。各部屋の室内機の型番、設置されている台数が異なるため、部屋ごとに異なる暖房能力を示している。通常、室内機には温度センサが備え付けてある。このため、暖房時に室内温度が設定温度を上回ると、自動的に送風へと切り替わるよう制御されている。そこで室内機のモデルは、設定温度である 22 [°C]を上回ると自動的に $q_{heater}$ がゼロとなるようにした。

また、ガスヒートポンプの消費エネルギー量は、室内機の暖房時での消費電力と、室外機のガス・電気消費量を合算した値を用いる。暖房時での室外機のガス流量は $7.17 \times 10^{-3}$  [m<sup>3</sup>]消費電力量は $5.5 \times 10^{-4}$  [kWh]、室内機 1 台当たりの消費電力は $5.0 \times 10^{-5}$  [kWh]以上を kg-CO<sub>2</sub>として換算し、1 台当たりのエネルギー消費量を $2.02 \times 10^{-3}$  [kg-CO<sub>2</sub>]とした。ここで、ガスの排出係数は $N = 1$ 、すなわち標準状態であると仮定した。

#### 6.5.1.2 発熱体

室内における発熱体として、照明器具と人体があげられる。いずれも発熱量としては大きくはなく、熱貫流やすきま風による熱移動と比較しても非常に小さい。しかし、設置されている照明器具の数が多く、そして許容収容人数に近い在室者で授業を行う講義が存在することから、以下ではこれらの要素を考慮した。

- 電灯

12 棟へ設置されている照明の数は、大教室で 60, 中教室で 36, 小教室で 24 である. 照明器具のメーカーはすべて TOSHIBA 製を使用しており, 消費電力は蛍光灯 40 [W]と安定器が 5 [W]である. メーカーが公開する照明器具のエネルギー変換内訳によると<sup>95</sup>, 消費した電力の内 40%が発熱として消費されている. 加えて, 長波長である赤外線と短波長である可視光線のほとんどは内壁へと照射され, 温められた内壁は室内の温度上昇へと寄与する. 正確には放射された光がすべて室内温度の熱エネルギー流入へ変換するわけではないが, 簡単のため次のように仮定し, 熱量を算出した. また, 授業中はすべての照明が点灯しているものとする.

$$[\text{照明器具の消費電力}] + [\text{安定機の消費電力}] \cong [\text{室内の熱流入}] \quad (6-12)$$

- 人体

人体から発生する熱量には潜熱と顕熱が考えられるが, 4.5.2 で述べたように顕熱のみ着目考慮する. 一人当たりから発生する熱量 $\delta_{th}$ は, 在室者の体重を 50kg, 室内で着席しているときの MET 値を 1 と仮定すると<sup>96</sup>, (6-13)により58.1と算出される.

$$\delta_{th} = 1000\text{MET} \times \frac{1}{3600} \times 50 \times 4.18 = 58.1 \quad (6-13)$$

### 6.5.2 パラメータの設定

実験環境の建築設計, センサから取得したデータを元に, 6.5.1 紹介した温熱モデルのパラメータを設定する. はじめに, 日によって変化しないパラメータを表 31 表 32 に示す

表 31 すきま風を表すパラメータ

部屋タイプ	$C_{th}$	$R_{inf}$ (natural ventilation)	$R_{inf}$ (forced ventilation)
大教室	$8.03 \times 10^5$	267	189
中教室	$4.29 \times 10^5$	118	29.0
小教室	$2.97 \times 10^5$	91.0	32.0

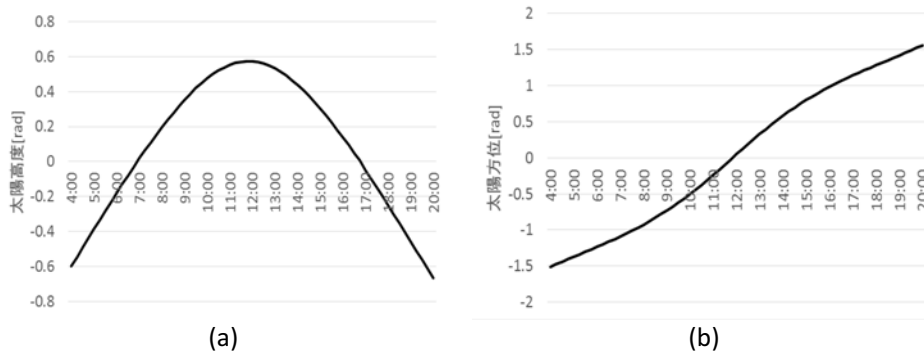


図 60 太陽の軌道 (a) 太陽高度 (b) 太陽方位

次に、時間に依存して動的に変化するパラメータについて紹介する。シミュレータ構築に用いたデータは 2015 年 1 月 13 日(火)にモニタリングした結果である。センサにより取得した在室人数、当日の太陽高度と太陽方位<sup>97</sup>、全日日射量と SAT 値、各教室の室温変化、空調の稼働状況をそれぞれ図 60 図 61 へ示す。

在室人数は CO<sub>2</sub> 濃度から推定した人数情報であり、6.5.1.2 で述べた人体の発熱量から室内への熱流入量を算出する。太陽高度、太陽方位は、日射量を算出するために用いており、対象

表 32 壁面, 窓の熱抵抗, 熱容量, g-value

場所	パラメータ	大教室	中教室	小教室
室外	length	$1.50 \times 10^{-1}$	$1.50 \times 10^{-1}$	$1.50 \times 10^{-1}$
	size	$1.28 \times 10$	9.60	6.40
	R <sub>out</sub>	$2.04 \times 10^{-2}$	$2.73 \times 10^{-2}$	$4.09 \times 10^{-2}$
	C <sub>out</sub>	$3.90 \times 10^5$	$2.91 \times 10^5$	$1.94 \times 10^5$
廊下	length	$2.00 \times 10^{-1}$	$2.00 \times 10^{-1}$	$2.00 \times 10^{-1}$
	size	$4.75 \times 10$	$3.56 \times 10$	$2.38 \times 10$
	R <sub>cor</sub>	$6.26 \times 10^{-3}$	$8.35 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-2}$
	C <sub>cor</sub>	$1.92 \times 10^6$	$1.44 \times 10^6$	$9.62 \times 10^5$
隣接する部屋	length	$3.00 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-1}$
	size	$2.68 \times 10$	$2.56 \times 10$	$2.16 \times 10$
	R <sub>adj</sub>	$1.11 \times 10^{-2}$	$1.17 \times 10^{-2}$	$1.38 \times 10^{-2}$
	C <sub>adj</sub>	$1.09 \times 10^6$	$1.03 \times 10^6$	$8.74 \times 10^5$
窓	length	$3.00 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$
	size	$3.47 \times 10$	$2.60 \times 10$	$1.74 \times 10$
	R <sub>win</sub>	$4.54 \times 10^{-3}$	$6.05 \times 10^{-3}$	$9.08 \times 10^{-3}$
	G	$3.02 \times 10$	$2.27 \times 10$	$1.51 \times 10$
天井	length	$3.00 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-1}$
	size	$1.98 \times 10^2$	$1.06 \times 10^2$	$7.34 \times 10$
	R <sub>top</sub>	$2.02 \times 10^{-3}$	$3.79 \times 10^{-3}$	$5.46 \times 10^{-3}$
	C <sub>top</sub>	$1.20 \times 10^7$	$6.42 \times 10^6$	$4.45 \times 10^6$
地面	length	$3.00 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-1}$	$3.00 \times 10^{-1}$
	size	$1.98 \times 10^2$	$1.06 \times 10^2$	$7.34 \times 10$
	R <sub>gnd</sub>	$1.00 \times 10^{-2}$	$1.88 \times 10^{-2}$	$2.72 \times 10^{-2}$
	C <sub>gnd</sub>	$1.20 \times 10^7$	$6.42 \times 10^6$	$4.45 \times 10^6$

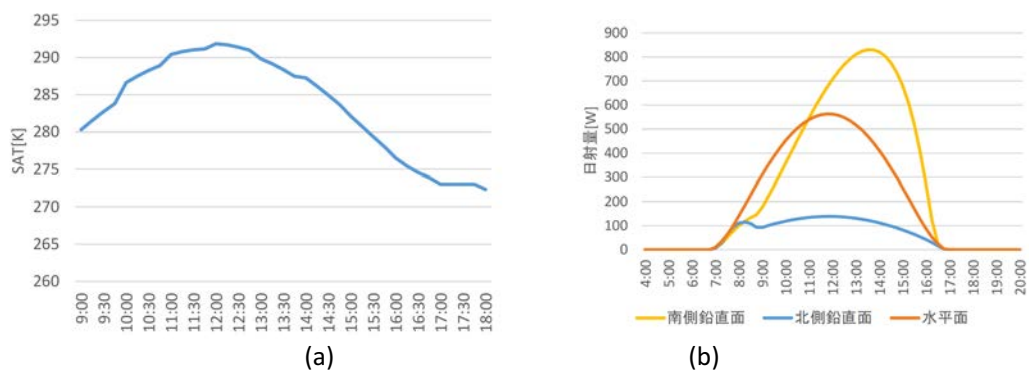


図 61 室内環境 (a) SAT (b) 全日日射量



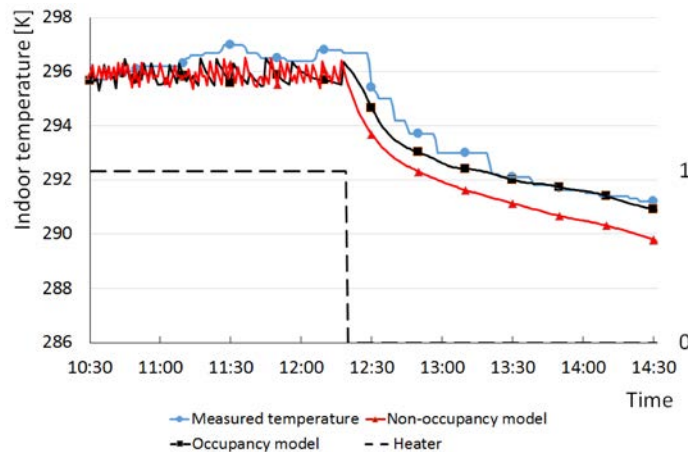


図 62 ガスヒートポンプの稼働状況と温熱収支モデルのシミュレーション結果

となる日は終日雲量が 0 であったため、雲による日射の遮りはないものとして扱う。SAT は、気象庁から取得した当日の室温情報、そして算出した日射量情報を、(4-28)へ代入して算出した。なお、パラメータ設定に用いた環境情報を取得する期間は一切の制御を行っておらず、室内機の運転は在室者が決定している。

### 6.5.3 シミュレーション結果

シミュレータ構築には Dymola を用いた<sup>98</sup>。Dymola は複数エンジニアリング分野のシミュレーションに用いられる。ライブラリには Berkeley lab が提供する、Modelica Building library を使用した。シミュレーションのサンプリング間隔は 1 秒とし、室温の観測値は 1 分間隔、欠損値が発生した場合は直近で取得した観測値を使用する。

在室人数を考慮した温熱収支モデルを用いて、10 時半から 14 時半までの 4 時間を対象にシミュレーションを実行した。図 62 で示した温熱変化は部屋番号 101 にて計測・予測した温熱変化の様子である。在室人数を考慮した温熱モデルに加え、考慮していない温熱モデルの予測結果も記述している。破線は空調機の動作状況を 1 or 0 で示しており、12 時 20 分まで 296 Kelvin を目標として動作している。在室人数を考慮した温熱モデルと、考慮していない温熱モデルは、それぞれ 0.5, 1.0 Kelvin の誤差で、実測値と一致している。つまり、在室人数を活用した温熱モデルは、従来の在室人数を考慮していない温熱モデルと比較し、予測精度が優れていることがわかる。

## 6.6 空調機器制御による提案指標の評価

前節までの実験環境の解析を踏まえ、学習効率指標を用いた空調機器制御の省エネ効果に関して実証実験を行う。まず、提案する学習効率指標の温熱快適性について、実験室環境での検証結果に基づき評価を行う。快適性に対する信頼性を実験室実験で証明したのち、矢上キャンパス 12 棟にて実験を行う。

### 6.6.1 学習効率指標に関する事前実験

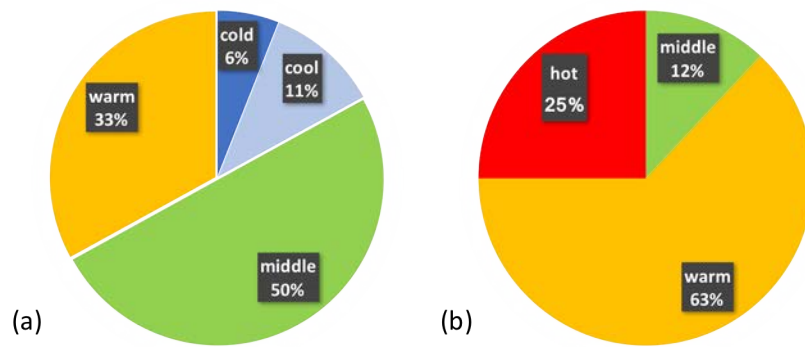


図 63 提案指標の事前実験 (a) 提案学習効率指標 (b) PMV

提案した学習効率指標では、PMV が $-0.24$  の場合に学習効率が最大となるため、室内の PMV が $-0.24$  となることを目標として空調機器を制御することを目的とする。PMV は 0 が最も快適ではあるが、学習効率を考慮した場合の PMV はやや低めであり、さらに制御状況や外的要因により PMV がある程度変動する。場合によっては不快に感じることも想定されるため、被験者が快適と体感するかを検証した。

事前実験として、学習効率指標と PMV を用いた温熱環境の体感を検証するため、夏季に確認実験を行った。CO<sub>2</sub> が 1,000ppm を上回らないよう換気扇制御を行い、PMV が $-0.24$  となるよう 5 分ごとに空調機を制御した。室内に 6 人在室する状態で 60 分間制御を行い、15 分ごとにアンケートをとった結果が図 63(a)である。また比較対象として同様の環境で PMV が 0 となるように体感の確認実験を行った結果が図 63(b)である。学習効率指標は「寒い」「やや寒い」と答えた人がいるのに対し、PMV では「暑い」「やや暑い」と答えた人が多い結果となった。

以上の内容から、学習効率指標は PMV と比較して涼しく感じる温度であることがわかった。また、事前実験では部屋を冷やし過ぎる傾向があるため、夏季にはエネルギー消費量が高くなると考えられる。反対に気温が低い冬季では、適切な制御を行うことにより、涼しく感じるが知的生産性が高い環境を省エネ化とともに実現することが可能となる。つまりは、室内快適性と学習効率のどちらを優先するのか、目的に応じた選択が求められることが想定され、システムがどちらの選択も提供できることが必要である。

## 6.6.2 実験と評価

実験室実験での快適性の評価を踏まえ、本エネルギーサービスで提案する、知的生産性指標を活用した空調機器制御による省エネ効果の評価を行った。比較対象として、室内評価指標へ PMV を用いた場合、制御を行わなかった場合も同様に評価を行い、結果を比較検討する。それらの結果を、(1)電力削減量、(2)ガスの消費量と電力消費量を勘案した CO<sub>2</sub> 削減量、そして (3)室内環境維持についてそれぞれ比較した。

6.6.1 で述べたように、本エネルギーサービスが提案する学習効率指標は、外気温の低い冬季に消費電力の削減効果が見込まれる。そこで、第 3 章にて構築したシステムを用いて 2013 年 12 月 10 日、18 日、25 日の 3 日間冬季実験を行った。実験の評価として、6.4.1 で述べた以下 3 つの制御手法を用いた。まず空調機への介入を一切しない制御なし、次に PMV を考慮した

表 33 冬季実験の結果

日付	優先度 つき指標	平均気温 (最高気温) [°C]	積算 電力量 [kWh]	積算ガス 流量 [m <sup>3</sup> ]	延べ 人数	学習 効率	CO <sub>2</sub> 換算 (電力) [kg-CO <sub>2</sub> ]	CO <sub>2</sub> 換算 (ガス) [kg-CO <sub>2</sub> ]	CO <sub>2</sub> 換算 (合算) [kg-CO <sub>2</sub> ]
12/25	PMV	6.5(8.6)	64.6	34.9	802	1.99	29.9	79.9	110
12/18	学習効率	6.2(7.8)	55.1	33.5	1176	2.02	25.5	76.7	101
12/10	制御なし	6.8(8.9)	70.6	38.5	1301	1.97	32.7	88.2	121

ON-OFF 制御, 最後に学習効率を考慮した ON-OFF 制御である. その結果を表 33 へ示す. 表 33 において, 積算消費電力は施設全体の消費電力量の積算値であり, 積算ガス流量はガスヒートポンプによるガス消費量である. また延べ人数は, CO<sub>2</sub> 濃度センサより推定した授業中に在室した人数の平均を 1 時限目から 5 時限目まで累計した人数である. 平均学習効率は, 学習効率指標の平均値である. また, 対象となる環境ではガスヒートポンプによる空調機器が導入されており, 総エネルギー削減量の比較をするため, 表 33 において CO<sub>2</sub>換算を行なった. ガスおよび電力の換算係数は, それぞれ東京ガス<sup>99</sup>から 2.19 [kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>], 環境省事業者別排出係数等一覧<sup>100</sup>から  $4.63 \times 10^{-1}$  [kg-CO<sub>2</sub>/kWh]を使用した.

- 電力削減量の結果

積算電力量は, 学習効率指標を用いたピークカット制御では 55.1 [kWh]であり, 制御しない場合と PMV を用いたピークカット制御ではそれぞれ 70.6 [kWh], 64.6 [kWh]となった. 室内環境評価指標の比較では, 目標温度が低い学習効率指標が PMV を用いてピークカット制御した場合と比べて 14.8%省エネ化できた. さらに, ピークカット制御による省エネ効果は, 少なくとも PMV で室内環境評価した場合に 8.49%の削減効果があった. 加えて, 学習効率指標と PMV どちらの場合もピーク電力を 10.0%削減できたことから, 本エネルギーサービスを導入して 1 年間制御を継続した場合, 大教室 5 部屋, 中教室 6 部屋, 小教室 5 部屋, 総延べ床面積 1991.38 [m<sup>2</sup>]からなる大学の教室棟において, 年間の基本料金を約 130 万円削減することが可能である.

- CO<sub>2</sub>削減量の結果

積算ガス流量は, 学習効率指標では 33.5[m<sup>3</sup>]であり, 制御しない場合と PMV 制御手法ではそれぞれ 34.9 [m<sup>3</sup>], 38.5[m<sup>3</sup>]となった. 同様に, 積算電力量と積算ガス流量をそれぞれ CO<sub>2</sub> に変換し合算した結果, それぞれ 101 [kg-CO<sub>2</sub>], 121 [kg-CO<sub>2</sub>], 110 [kg-CO<sub>2</sub>]となった. 室内環境評価指標の比較では, 学習効率指標が PMV を用いてピークカット制御した場合と比べて, 8.20%の CO<sub>2</sub> 削減効果があることがわかった. さらに, ピークカット制御による CO<sub>2</sub> 削減効果は, 少なくとも PMV で室内環境評価した場合に 9.10%の削減効果があった.

PMV の快適域は PMV=+0.5 を上限としており, 部屋を必要以上に暖めることがない. そのため, 常に空調機を動作させることがなくなり, 結果的に CO<sub>2</sub> 削減量が增大した. また, PMV と学習効率指標はそれぞれ PMV=0, PMV=-0.23 を超えると空調機が停止する. そのため冬期実験では学習効率指標で室内環境を評価した方が, 暖房の消費エネルギー量が小さくなる. 実際には, 学習効率指標は在室者の影響を受ける CO<sub>2</sub> 濃度の測定値も加味されるが, それよりも PMV による影響がより顕著に結果へ表れたと考えられ, 結果として, 学習効率指標がより多く CO<sub>2</sub> 排出量削減を達成したといえる.

- 室内環境維持に関する評価

次に、各制御手法における学習効率とPMVについて検討を行う。表 33 において、それぞれの学習効率を比較すると、学習効率指標を室内環境指標として用いたピークカット制御では、PMV を指標にした制御より在室人数が増加しているにもかかわらず、学習効率が PMV の 1.99 に比べて 2.02 とわずかながら向上した。学習効率が著しく改善しなかった理由として、全熱交換器の換気能力不足があげられる。在室人数が多いため換気が追い付かず、CO<sub>2</sub> 濃度を 1,000ppm 以下に保つことが困難であった。このため、実験環境においてさらに学習効率を改善するためには、適切な換気能力を持った換気扇の導入か、利用人数に応じた適切な広さの教室を選択するなどの対策を講じる必要がある。なお、図 59 に示した WEB アンケートを実験期間中に公開し、在室者は誰でもアンケート回答ができる環境を提供した。アンケート結果より、空調制御に関する苦情、制御改善を求める回答など提案システムの改善を求める要望はなかった。本結果から、実験中に室内の快適性が損なわれなかったといえる。また、授業を担当した講師や教授とのヒアリングにおいても、特に不快といった意見はなかった。温熱環境として不快を感じる場合、エアコンのコントローラを操作して室内環境を変化させようとする行動が発生するため、ある程度環境の不満足度を知ることができる。この点でも、他の制御を行わない日程と比較して、空調制御において特徴が生じるということはない。

## 6.7 本章のまとめ

本エネルギーサービスでは、教育施設への空調機器制御による省エネ効果を実証した。

知的生産性が求められる場所での空調制御の従来手法では、電力量や温熱環境に焦点を当てていたが、本提案では空気質環境を考慮に入れた学習効率に必要な評価指標を検討しつつ、指標に基づいた換気を含む空調制御を行う手法を実装した。検証環境として大学の教室棟を利用し、IEEE1888 による異機種統合制御や、温・湿・照度に加えて CO<sub>2</sub> 濃度測定を行うセンサネットワークを構築した。本実験では既存研究から有効性が示されている学習効率指標を改善し、実際に学習環境における空調制御に応用した場合の快適性維持の検証した。具体的には各教室における学習効率に基づき、空調制御の優先度を決定しエネルギー分配する実証実験を行った。また、提案した空調制御手法の有効性を確認するために、WEB サイトから温熱快適性のアンケート調査を実施した。比較対象として、予測温冷感申告 PMV を指標として空調機制御を行った場合と、システムに介入しない通常運転の場合を用いた。

実験結果から、大教室 5 部屋、中教室 6 部屋、小教室 5 部屋、総延べ床面積 1991.38 [m<sup>2</sup>] からなる、50 [kWh]の室外機が設置された教育棟において、PMV と学習効率指標のどちらもエネルギー削減に効果的であり、特に外気温の低い冬期は学習効率指標の方が PMV よりエネルギー削減量が CO<sub>2</sub> 換算で 8.20%優れていることが示された。また、学習効率指標はやや寒く感じるため、快適性を重視するか知的生産性を重視するかを利用者が選択する必要があることが確認できた。また、CO<sub>2</sub> 濃度センサの情報をもとに全熱交換器の制御をすることにより、学習効率を維持しつつ、空調機への負荷を低減した。以上より、学習効率指標を用いたピークカット制御は、教育施設という知的生産性が求められる場所でのエネルギーサービスの一つとして、有効であるということがわかった。

## 第7章 結論

本研究では、近年世界的に国際標準化、実証実験が進むスマートグリッドの周辺サービスとなる2つのスマートなエネルギーサービスについて提案、実証した。まず、世界的な環境意識の向上により、次世代電力網の研究が着目されている状況について第1章および第2章で述べた。気象変動に関する政府間パネル(IPCC)の発表により、人為起源の温室効果ガス排出と気候変動の関係性が示唆される中、パリ協定およびSDGsに代表される様々な国際的合意が進んでいる。特にエネルギー面においては、ICTを導入した分散型電源インフラであるスマートグリッドの積極的な活用が、CO<sub>2</sub>排出量削減に貢献すると期待されている。スマートグリッドの実証実験は2000年半ばから各国で始まり、これら実験経験に基づいた国際標準化案件が進んだ結果、機能インターフェースやデータフローの規定が進んだ。このような背景から、我が国では、国内12都市を対象として2009年にEV・PHVタウン、および次世代エネルギー社会システム実証地域へ選定が決定し、低炭素化とQoLの両立を目指した実証実験が開始した。スマートグリッドにてエネルギーサービスを提案する上で重要な制御技術となるのが、電気自動車のストレージを系統安定化へ応用したV2G、そして建物の電力需要機器を統合制御したEMSである。スマートグリッドにおける国際標準規格を議論する上で、人・物・場所の特性を活用したエネルギーサービスの実証経験がますます重要となった2010年～2013年の状況を踏まえ、スマートグリッドにて提供されるスマートなエネルギーサービスの提案および実証を行った。

第3章および第5章では、一つ目のエネルギーサービスとして、五島列島での主要な交通施設である福江港ターミナルビルの駐車情報を利用し、EVストレージを用いた電力負荷平準化効果をシミュレーションにより評価した。第3章では、近年注目が集まるEVの導入動向、および国際標準化案件について述べた。走行距離や無線給電技術の向上、さらには環境負荷軽減の目的から、先進国では積極的なEVの導入目標を設定している。政府主導のEV普及モデルを確立する上で重要となるのが十分な充電インフラの設備環境構築であり、2030年に向けて多くの主要な交通施設、公共設備、大規模商用施設等を対象に積極的な充電インフラ設置が計画されている。このような充電インフラは、スマートグリッドのエネルギーサービスとしても注目を集めており、特に30分毎のバッテリー制御を前提とした予備電源としての可能性が注目されている。このように、国際的な導入目標・規格化が具体化するとともに、EVの無線給電に関する国際的な議論が勧められた。2012年ごろには、無線給電の標準化に関する議論において、バッテリーのモジュール化による交換方式に関する問題が取り上げられた。異なるバッテリー方式を議論する上で、各方式がV2Gへ及ぼす影響について議論する必要がある。このような理由から、第5章では、実在する福江港ターミナルビルの駐車情報を利用した、V2Gによる電力負荷平準化効果について検証した。EV・PHVタウンの一つに選定された長崎県福江島を対象とし、当時世界初であった大容量リチウムイオン二次電池を搭載したEVを150台導入し、その利用状況に基づき福江港ターミナルビルの電力需要平準化効果を評価するシミュレート環境の構築と実験を行った。

仮想ストレージのモデル化に際して、2012年に国際的に議論がされていたEVバッテリーが取り外し可能な方式と、バッテリーの取り外しが不可能な方式、それぞれについてモデル化を行った。また、大容量リチウムイオン二次電池を搭載したEVの現実的な物理パラメータを、メーカ

一との技術協定により活用した精度の高い評価を行った。2012 年時点で、同様のレベルで EV バッテリーに関する評価を行った例はなく、有用な評価結果であり、IEEE・EVWPT 標準化委員会において影響を与える評価結果となった。具体的には、無線給電モジュールを標準化する際、バッテリーと可換にするべきかどうかの議論があったが、本エネルギーサービスが評価した電力負荷平準化効果に関する結果を受けて、可換な方法についても検討することとなった。なお、EVWPT は無線給電方式が乱立しているという現状や、技術的な評価やモデル、説明において多数の提案が行われた経緯を踏まえ、現時点において確定的な標準を定めるべきではないとの判断から、IEEE 標準化委員会では現在も標準化活動中として扱われている。なお、その実態は上記の判断に基づく休止中の状態にある。今後、これらの EV 無線給電技術に関連するモデルや技術が確定するに伴い、活動が再開されると考えられる。

仮想ストレージの制御手法として、ファジィを用いた制御手法、コスト関数を用いた制御手法を使用した。そして、仮想ストレージ全体の放電指令を分配する分配コントローラを各 EV の充電状態に応じて分配できるように設計した。その他の駐車情報、太陽光発電量、各種パラメータは福江港ターミナルビルへ実際に構築したセンシング環境より取得した長期間の運用データをもとに決定した。シミュレーションの結果、バッテリー交換が不可能な場合では 40 台、可能な場合では 31 台分の EV を活用すると、対象となる福江港ターミナルビルにおいて少なくとも一日約 1300 円の電気料金を削減できる結果を示した。福江港ターミナルビルのような交通の中継地となる大規模施設では、2030 年に向け充電インフラが充実する予定であり、スマートグリッドにおいて電力インフラの維持・運営コスト削減だけでなく、再生可能エネルギーの地産地消、電力小売り業者の新たなエネルギーサービス創出といった効果が期待される。

第 4 章および第 6 章では、二つ目のエネルギーサービスとして、教育施設を対象とした空調機器制御を行った。知的生産性を考慮した室内評価指標を活用し、冬期ピークカット制御により空調機器の省エネ効果を評価した。第 4 章では、1990 年代から続く室内環境評価と様々な効率指標との関係性について述べた。室内の環境を評価する研究は、社会的意義の大きい初等教育の学習効率改善や、経済的効果の見込まれるコールセンターのサービス処理時間の短縮効果を狙った取り組みが中心となり始まった。初等教育の学習効率に関しては、室温が高温になると短期記憶能力が急激に悪化する等の結果が観測され、コールセンターのサービス処理時間に関しては、過密状態で換気扇を弱めた場合と換気フィルターが劣化していた場合に徐々に悪化する傾向が見られた。このような研究事例を、空調機器制御による実証実験と大規模な模擬試験の比較により定量化する試みが 2000 年半ばより行われた。さらに今日に至るまで、大規模な実証実験やアンケート調査による様々な労働内容、環境条件との関係性が世界中で示され、人間関係・健康状態など幅広い視点から評価が行われている。一方で、評価対象となる教育現場やオフィスでは、プライバシーの高さから特定の情報取得が困難となる場合が少なくない。例えば、人数情報は室内環境を評価するいくつかの指標で活用されているが、オフィスや教育環境へのウェブカメラの設置は EMS 構築の際においても機密上設置を拒否される場合が多い。さらに、建物を対象とした電力需要サービスを提供する場合、マルチベンダから構成された多数の電力需要機器を統合制御する標準プロトコルが必要となり、その標準プロトコルとして 2011 年に採択された国際標準化案件 IEEE 1888 が応用可能かどうかの議論も必要であった。以上のように、スマートグリッドにおける主要な電力需要家と言える大型施設にてエネルギーサービスの普及モデル確立を達成するには、空間の用途に応じた室内評価指標、機密性の高い環境下で評価指標の算出に必要な情報のセンシング、そして国際的な議論に基づいた制御システムを統合した環境構築が必要である。このような背景から第 6 章では、PMV と CO<sub>2</sub> 濃

度から算出した学習効率指標を用いて、マルチベンダからなる大学施設の空調制御によりピークカット制御を実施した。従来、温熱快適性と換気量から各々独立して評価されていた学習効率指標を統合し、PMVと換気量から算出する新たな学習効率指標を提案した。本提案指標は、温冷感域がわずかに涼しいと感じる領域において学習効率が最大化される特徴を有しており、冬季にPMV指標において最も快適と思われる室温まで暖房するよりも、低い温度設定、つまり弱い暖房で目標が達成できる。また、提案指標の算出に必要な人数情報を取得するため、CO<sub>2</sub>濃度の時間変化により人数を推定する人数推定手法を採用した。安価かつ広く普及しているCO<sub>2</sub>濃度センサを活用するため導入コスト削減が見込まれ、プライバシー性の問題においてもウェブカメラより望ましい。さらに、建物のEMS構築にて課題となる国際的議論に基づいた制御システムの構築も行った。対象環境において、マルチベンダからなる空調機器・通信機器の統合制御を実現するデータフロー、および制御インターフェースを実装した。以上の環境実装を用いて、提案する学習効率指標で有効なエネルギーサービスとなりうる冬期空調実験を行った。空調機器の制御手法として、当時デマンドレスポンスサービスとして利用されていた15分毎のピークカット制御を用いた。実験の結果、大教室5部屋、中教室6部屋、小教室5部屋、総延べ床面積1991.38[m<sup>2</sup>]からなる大学の教室棟において、室内の知的生産性を維持しつつ、電力ピークカット効果により10%の年間電力ピーク削減、さらには一般的な温熱快適性指標と比較し一日9.5[kWh]電力削減できる結果を示した。既築の建物へ構築可能な本EMSは、知的生産性の維持と快適性を両立する教育施設・オフィスへ応用可能であり、スマートグリッドの省エネ効果を底上げする上で有効な手段と言える。

本研究は、今後のスマートコミュニティ開発の動向に注目しシステムを構築し実験を行った意義も大きいといえる。2000年後半から、ICT技術を活用した複数インフラ横断型のサービス創出が世界的に検討されている。当初は電力インフラのみをサービス提供の対象としたスマートグリッドは、そのサービスの提供場所を広げ、例えばサービスプロバイダーとなる電力小売り業者がスマートメーターの電力需要情報に基づいて様々なエネルギーサービスを電力需要家に提供することなど、利用者に対するサービスも検討されるようになった。この流れは、ICTの普及、組み込み機器の高性能化、高機能かつ安価なセンサの開発により拡大し、地域に住む住民のヘルスケア、セキュリティ、ユーティリティ等を含む、大規模かつ複雑なデータの利活用へと変化した。このように、系に存在する機器が多様化するに従い、電力以外の環境データを活用するエネルギーサービスへの拡張、そして国際標準規格に基づいた相互運用性・相互接続性の保証がますます重要となる。本研究の貢献は、IEEE 1888, 2030をはじめとした多くの国際標準案件に基づき、人の行動・感覚へ対応可能な制御システムの構築とモデル化を提案・評価した点にある。これにより、スマートグリッドの周辺サービスとなりうるエネルギーサービスを実験により実証しただけでなく、スマートコミュニティインフラにて想定される各種サービスの具体化、それに伴う第3者への個人情報売買といった想定すべき課題の発掘などに貢献したと言える。加えて、今後普及が想定される充電ステーション・EVも含め、様々な制御対象機器を取り扱い、既存建物を対象として実験が行われた点は重要である。ゼロエミッションのアイデアで近年話題となっている新築の建物や、その中に設置された特殊な冷暖房、専用のデバイスやセンサを有しない環境に対して、組み込み系を中心とした必要最低限のシステムを導入し、有力なエネルギーサービスを提案できるという結果を示した点は、先進5カ国で最も住宅寿命の短い日本のみならず、それよりはるかに長いアメリカ、イギリス、フランス、ドイツといった既築の建物が多数を占める環境においてさらに効果的であると言える。

教育施設での空調制御では、知的生産性に着目したピークカット制御について取り組んだが、

その効果が期待できる場所として教育機関が想定される。そこで、全国国立の小、中、高等学校、大学、図書館を対象として、波及効果の見積もりを行なった。我が国の知的生産性を考慮すべき施設の面積は、文部科学省の報告書によると<sup>101, 102</sup> 公立学校施設での校舎の総面積が  $1.8 \times 10^8$  [m<sup>2</sup>]、公立図書館が  $3.9 \times 10^6$  [m<sup>2</sup>] そして内閣府調査会の発表では<sup>103</sup> 国公立大学および研究機関が  $6.0 \times 10^7$  [m<sup>2</sup>]となる。そのため概算となるが、全ての施設が温熱快適性指標に基づいた制御を実施していると仮定し、本環境で延べ床面積 1991.38 [m<sup>2</sup>]にて一日 9.5 [kWh]電力削減した結果から、全施設にて本エネルギーサービスを実施することで1日約 1.1 [GWh]の電力削減効果が見込まれる。

さらに、駐車場情報を用いた充電インフラ制御の波及効果に関する見積もりを同様に行った。経済産業省の報告書<sup>31</sup>から、EV および充電インフラが 100%導入した場合の削減見積もりを算出する。2030年目標の充電インフラ導入量が、大型商用施設では 3,000 店舗(EV0.9 万台分)、宿泊施設では 12,000 店舗(EV0.5 万台分)、観光施設では 890 施設(EV0.1 万台分)、遊戯施設では 2,500 施設(EV0.2 万台分)、公共施設では 93,000 施設(0.3 万台分)となっている。そのため、大型商用施設に分類される福江港ターミナルビルにて最も条件の厳しい MEVBS で平準化したところ、最大需要電力が 5 [kW]平準化できたことから、本エネルギーサービスを用いた充電インフラ制御により全体で 33 [MW]分の最大受電電力平準化が期待できる。電力需要機器制御を通じて、以上の波及効果が得られることがわかった。これらの考察から、本研究において提案した技術、評価結果は、今後の省エネ社会におけるコア技術の一端を担うと考えられる。



## 参考文献

- [1] F. T. Stocker, Q. Dahe, P. Gian-Kasper et al., “Summary for policymakers,” Cambridge University Press, 2013.
- [2] International Energy Agency, “Energy Technology Perspectives 2017,” 2017.
- [3] World Health Organization, “*Monitoring health for the SDGs*,” 2016.
- [4] 西宏章, 井上恒一, 戸越俊郎 他, “次世代自動車を中核にしたスマートコミュニティ最新動向 2012,” インプレスR&D, 2012.
- [5] 総合科学技術・イノベーション会議, “環境エネルギー技術革新計画,” 2008.
- [6] A. Caragliu, C. Del Bo, and P. Nijkamp, “Smart Cities in Europe,” *Journal of Urban Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 65-82, Apr. 2011.
- [7] US Government Printing Office, “*Energy independence and security act of 2007*,” 2007.
- [8] F. Rahimi and A. Ipakchi, “Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm,” *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 82-88, Jun. 2010.
- [9] A. Mohsenian-Rad, Vincent W. S. Wong, J. Jatskevich et al., “Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid,” *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 320-331, Dec. 2010.
- [10] M. Pedrasa, T. D. Spooner, and I. F. MacGill, “Scheduling of Demand Side Resources Using Binary Particle Swarm Optimization,” *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1173-1181, Aug. 2009.
- [11] B. Ramanathan and V. Vittal, “A Framework for Evaluation of Advanced Direct Load Control With Minimum Disruption,” *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 1681-1688, Nov. 2008.
- [12] S. J. Kang, J. Park, K. Oh et al., “Scheduling-based real time energy flow control strategy for building energy management system,” *Energy and Buildings*, vol. 75, pp. 239-248, Jun. 2014.
- [13] 北九州スマートコミュニティ創造協議会, “次世代エネルギー・社会システム実証 北九州スマートコミュニティ創造事業マスタープラン,” 2010.
- [14] T. Ida, K. Ito, and M. Tanaka, “Using dynamic electricity pricing to address energy crises: Evidence from randomized field experiments,” *The 36th Annual National Bureau of Economic Research Summer Institute*, 2013.
- [15] 経済産業省, “EV・PHVタウンとは.” [Online]. Available: <http://www.meti.go.jp/policy/automobile/evphv/town/about.html>. [Accessed: 18-Jan-2018].
- [16] S. Bush, S. Goel, and S. Georges, “*IEEE Vision for Smart Grid Communications: 2030 and Beyond Roadmap*,” IEEE, 2013.

- [17] National Energy Technology Laboratory, “Modern Grid Initiative,” 2008.
- [18] Next Generation Power and Energy, “Building for the future: Interview with Andres Carvallo, CIO – Austin Energy Utility,” 2008.
- [19] S3C, “INOVGRID Gamification – Stakeholder Engagement – Meter Installation – Home Energy Management.” [Online]. Available: <http://www.s3c-project.eu/News/96/InovGrid.html>. [Accessed: 18-Jan-2018]
- [20] B. Loeff, “Demanding standards: Hydro One aims to leverage AMI via interoperability,” *Electric light & Power*, 2007. [Online]. Available: <http://www.elp.com/articles/2007/10/demanding-standards-hydro-one-aims-to-leverage-ami-via-interoperability.html>. [Accessed: 19-Jan-2018].
- [21] T. Robert, “Model City Mannheim,” *Grid innovation online*, 2011. [Online]. Available: <http://www.gridinnovation-on-line.eu/articles/library/model-city-mannheim-moma.kl>. [Accessed: 19-Jan-2018].
- [22] 和樹稲葉, “電気自動車用普通充電設備の紹介,” 電気設備学会誌, vol. 33, no. 10, pp. 740-743, Oct. 2013.
- [23] 落合秀也, 江崎浩, “インプレス標準教科書シリーズ スマートグリッド対応IEEE1888プロトコル教科書,” 2012.
- [24] Green University of Tokyo Project, “IEEE1888(FIAP)システムの概要.” [Online]. Available: <https://www.gutp.jp/fiap/outline.html>. [Accessed: 06-Nov-2017].
- [25] International Energy Agency, “*EV City Casebook – A look at the Global Electric Vehicle Movement*,” 2012.
- [26] 経済産業省製造産業局自動車課, “平成28年度エネルギー使用合理化促進基盤整備委託費 (EV・PHVの充電インフラに関する調査),” 2017.
- [27] 清水浩, “温暖化防止のために 一科学者からアル・ゴア氏への提言. 武田ランダムハウスジャパン,” 2007.
- [28] International Energy Agency, “Energy Technology Perspectives 2012,” 2012.
- [29] 電力中央研究所, 次世代自動車更新センター, 構造計画研究所, “急速充電ステーション最適配置に関する解析調査,” 2015.
- [30] アユダンテ株式会社, “場所だけじゃない! 待ち時間までお知らせ。充電スポット検索サービス【EVsmart】バージョンアップ.” [Online]. Available: <http://www.ayudante.jp/release/release150121.htm>. [Accessed: 01-Feb-2018].
- [31] 経済産業省EV・PHVロードマップ検討会, “EV・PHVロードマップ検討会報告書,” 2016.
- [32] W. Kempton and J. Tomić, “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue,” *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 268-279, Jun. 2005.
- [33] K. Willett and K. Toru, “Electric-drive vehicles for peak power in Japan,” *Energy Policy*, vol. 28, no. 1, pp. 9-18, 2000.
- [34] K. Willett and E. L. Steven, “Electric vehicles as a new power source for electric utilities,” *Transportation Research Part D Transportation and Environment*, vol. 2, no. 3, pp. 157-175,

- 1997.
- [35] K. Willett, T. Jasna, and L. Steven, "Vehicle-to-grid power: battery, hybrid, and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in California," 2001.
  - [36] J. M. Miller, P. T. Jones, J.-M. Li et al., "ORNL Experience and Challenges Facing Dynamic Wireless Power Charging of EV's," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 40-53, 2015.
  - [37] T. U. Daim, X. Wang, K. Cowan et al., "Technology roadmap for smart electric vehicle-to-grid (V2G) of residential chargers," *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, vol. 5, no. 1, p. 15, Dec. 2016.
  - [38] 経済産業省日本自動車研究所, "平成20年度海外動向調査報告書," 2009.
  - [39] K. Willett, U. Victor, H. Ken et al., "A test of vehicle-to-grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system," 2008.
  - [40] H. Salman, K. Muhammad, and R. Umar, "Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks – A review," *Journal of Power Sources*, vol. 277, no. 1, pp. 205-214, 2015.
  - [41] S. J. Gunter, K. K. Afridi, and D. J. Perreault, "Optimal design of grid-interfaced EV chargers with integrated generation," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1-8, 2012.
  - [42] 太田豊, 谷口治人, 中島達人 他, "ユビキタスパワーネットワークにおけるスマートストレージの提案," *電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌)*, vol. 130, no. 11, pp. 989-994, 2010.
  - [43] Y. Hida, R. Yokoyama, J. Shimizukawa et al., "Operation of Battery Energy Storage System in Demand Side using Local Load Forecasting," *IEEE Transaction on Power and Energy*, vol. 130, no. 11, pp. 995-1001, Nov. 2010.
  - [44] A. I. Dounis and C. Caraiscos, "Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 13, no. 6-7, pp. 1246-1261, Aug. 2009.
  - [45] 空気調和衛生工学会, "図解 空調・給排水の大百科," オーム社, 1998.
  - [46] 亀田健一, 伊藤一秀, 深尾仁 他, "学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究(その13)学習意欲, 学習効率に対する温熱環境の影響に関する現地実測," 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 平成18年, pp. 2009-2212, 2006.
  - [47] P. O. Fanger, "*Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*," Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
  - [48] 日本冷凍空調学会, "PMVとPPD指標," *JSRAE*. [Online]. Available: <http://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/66.html>. [Accessed: 10-Nov-2017].
  - [49] ISO 7730 (International Standard), "Moderate thermal environments -- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort," 1994.
  - [50] Y. Huang, N. Li, Y. Yi et al., "Fuzzy Model Predictive Control for a Comfort Air-Conditioning System," *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 530-533, 2006.

- [51] M. Feldmeier and J. A. Paradiso, “Personalized HVAC control system,” *Internet of Things (IOT)*, pp. 1-8, 2010.
- [52] 厚生労働省, “建築物環境衛生管理基準について.” [Online]. Available: <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>. [Accessed: 10-Nov-2017].
- [53] M. S. Goromosov, “The physiological basis of health standards for dwellings,” 1968.
- [54] D. H. Mudarri, “Potential correction factors for interpreting CO<sub>2</sub> measurements in buildings,” *Transaction-American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, vol. 103, pp. 244-255, 1997.
- [55] U. Satish, M. Mendell, K. Shekhar *et al.*, “Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, no. 12, pp. 1671-7, Dec. 2012.
- [56] S. Krishnamurthy, U. Satish, T. Foster *et al.*, “Components of Critical Decision Making and ABSITE Assessment: Toward a More Comprehensive Evaluation,” *Journal of Graduate Medical Education*, vol. 1, no. 2, pp. 273-277, Dec. 2009.
- [57] P. WARGOCKI, D. P. WYON, J. SUNDELL *et al.*, “The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity,” *Indoor Air*, vol. 10, no. 4, pp. 222-236, Dec. 2000.
- [58] State University of New York, “Strategic Management Simulations.” [Online]. Available: <http://www.upstate.edu/psych/research/sms.php>. [Accessed: 10-Nov-2017].
- [59] 亀田健一, “教室の室内環境と学習効率のメカニズム解明に関する研究,” 慶應義塾大学大学院修士論文, 2007.
- [60] D. P. Wyon, “The effects of indoor air quality on performance and productivity,” *Indoor Air*, vol. 14, no. s7, pp. 92-101, Aug. 2004.
- [61] P. Wargocki, D. P. Wyon, and P. O. Fanger, “The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates,” *Indoor Air*, vol. 14, no. s8, pp. 7-16, Dec. 2004.
- [62] N. NISHIHARA and S. TANABE, “SUBJECTIVE EXPERIMENTS ON PRODUCTIVITY UNDER MODERATELY HOT ENVIRONMENT,” *Journal of Environmental Engineering (Transactions AIJ)*, vol. 68, no. 568, pp. 33-39, Jun. 2003.
- [63] D. P. WYON, I. ANDERSEN, and G. R. LUNDQVIST, “The effects of moderate heat stress on mental performance,” *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, vol. 5, pp. 352-361, 1979.
- [64] D. P. Wyon and P. WARGOCKI, “Indoor air quality effects on office work,” *Creating the Productive Workplace*, Taylor & Francis, pp. 193-205, 2006.
- [65] D. P. Wyon and P. WARGOCKI, “Room temperature effects on office work,” *Creating the Productive Workplace2*, Taylor & Francis, pp. 181-192, 2006.
- [66] 亀田健一, 金子隆昌, 村上周三 他, “H-51 学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究: (その13)学習意欲、学習効率に対する温熱環境の影響に関する現地実測,” pp. 2209-2212, Sep. 2006.

- [67] 金子隆昌, 村上周三, 伊藤一秀 他, “現地実測による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討: 学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究(その1),” 日本建築学会環境系論文集, vol. 71, no. 606, pp. 43-50, 2006.
- [68] 橋本哲, 寺野真明, 杉浦敏浩 他, “室内環境の改善によるプロダクティビティ向上に関する調査研究,” 空気調和・衛生工学会 論文集, vol. 29, no. 93, pp. 67-76, Apr. 2004.
- [69] 小林弘造, 北村規明, 田辺新一 他, “G-59 コールセンターの室内環境が知的生産性に与える影響,” 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 平成17年, pp. 2053-2056, Jul. 2005.
- [70] K. W. Tham and H. C. Williem, “Temperature and Ventilation Effects on Performance and Neurobehavioral-Related Symptoms of Tropically Acclimatized Call Center Operators Near Thermal Neutrality,” *ASHRAE Transaction*, vol. 111, no. 2, pp. 687-698, 2005.
- [71] 内田匠子, 伊香賀俊治, 村上周三 他, “F-62 オフィスの知的生産性と省エネルギー性を考慮した最適空調制御手法の研究,” 学術講演会論文集, vol. 20, no. 3, pp. 1995-1998, 2008.
- [72] 多和田友美, 伊香賀俊治, 村上周三 他, “実オフィスの室内環境が知的生産性に及ぼす影響(その1) 被験者属性別の温熱環境と作業効率の関係,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1143-1144, 2008.
- [73] 垂水弘夫, “熱と空気のデザイン,” 建築環境学テキスト, 株式会社井上書院, pp. 105-111, 2007.
- [74] P. A. Fritzon, “*Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 2.1*,” John Wiley & Sons, 2004.
- [75] G. Platt, J. Li, R. Li et al., “Adaptive HVAC zone modeling for sustainable buildings,” *Energy Buildings*, vol. 42, no. 4, pp. 412-421, Apr. 2010.
- [76] 農林水産省, “地中温度等に関する資料,” 農業気象資料, vol. 3, p. 291, 1982.
- [77] 東京天文台, 国立天文台, “理科年表,” 丸善出版, 2013.
- [78] ASHRAE Standard Committee, “*ASHRAE handbook: fundamentals 2013*,” ASHRAE, 2013.
- [79] K. A. R. Ismail and J. R. Henriquez, “Thermally effective windows with moving phase change material curtains,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, no. 18, pp. 1909-1923, 2001.
- [80] IEEE STANDARDS ASSOCIATION, “Standards Related Products,” [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/findstds/prod/research/index.html>. [Accessed: 19-May-2018].
- [81] 細江貴博, “スマートコミュニティにおけるデータ二次利用を想定した時系列データの欠損値補間手法,” 慶應義塾大学大学院修士論文, 2018.
- [82] Aihua Wang and Weizi Yang, “Design of Energy Management Strategy in Hybrid Vehicles by Evolutionary Fuzzy System Part I: Fuzzy Logic Controller Development,” *6th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, pp. 8324-8328, 2006.
- [83] 上吉悠斗, “協調型エネルギーマネジメントシステムのマルチタイムスケール需給調整,” 慶應義塾大学大学院修士論文, 2012.
- [84] 九州電力, “業務用電力A.” [Online]. Available: [http://www.kyuden.co.jp/agreement\\_rate\\_gyomua\\_h26\\_5.html](http://www.kyuden.co.jp/agreement_rate_gyomua_h26_5.html). [Accessed: 10-Nov-2017].
- [85] S. Ito and H. Nishi, “Estimation of the number of people under controlled ventilation using a

- CO2 concentration sensor,” *IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4834-4839, 2012.
- [86] 田中俊六, 寺尾道仁, 武田仁 他, “最新建築環境工学,” 井上書院, 2014.
- [87] 絵内正道, 荒谷登, S. Chia-yu, “多種トレーサガス法に基づく多数室換気量の算定: 第1報-濃度変動の解析解と妥当な算定時刻への応用,” *空気調和・衛生工学会 論文集*, vol. 18, no. 51, pp. 15-27, Feb. 1993.
- [88] 檜崎正也, 咸鎮植, 山中俊夫 他, “トレーサガス法による換気量算定法の精度に関する研究,” *空気調和・衛生工学会 論文集*, vol. 14, no. 41, pp. 31-39, 1989.
- [89] 国土交通省大臣官房官庁営繕部 設備・環境課, “官庁施設におけるクールビズ/ウォームビズ空調システム導入ガイドライン,” 2009.
- [90] T. Handa, C. Roesener, J. Ichimura et al., “KNIVES: Network based Demand and Supply Control System – Enhancement for Network and Environmental Affinity,” *5th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 1171-1176, 2007.
- [91] 東京ガス, “ガス料金表,” 2017. [Online]. Available: <http://eee.tokyo-gas.co.jp/service/gas/charge/list.html>. [Accessed: 10-Nov-2017].
- [92] 柘原幸郎, “一般家庭向けエネルギーマネジメントにおける家庭機器制御手法の提案と評価,” 慶應義塾大学大学院修士論文, 2011.
- [93] M. Sullivan, J. Bode, B. Kellow et al., “Using Residential AC Load Control in Grid Operations: PG&E’s Ancillary Service Pilot,” *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 1162-1170, Jun. 2013.
- [94] 東京ガス, “GHP(ガスヒーポン)ビル用マルチ.” [Online]. Available: <http://eee.tokyo-gas.co.jp/product/ghp.html>. [Accessed: 10-Nov-2017].
- [95] TOSHIBA, “照明の熱計算.” [Online]. Available: [http://www.tlt.co.jp/tlt/lighting\\_design/design/basic/data/57\\_60.pdf](http://www.tlt.co.jp/tlt/lighting_design/design/basic/data/57_60.pdf). [Accessed: 19-Jan-2018].
- [96] B. E. Ainsworth, W Haskell M Witt *et al.*, “Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities.,” *Medicine and Science in Sports Exercise*, vol. 32, no. 9 Suppl, pp. S498-504, Sep. 2000.
- [97] 長沢工, “日の出・日の入りの計算—天体の出没時刻の求め方,” 地人書館, 1999.
- [98] A. Elsheikh, E. Widl, and P. Palensky, “Simulating complex energy systems with modelica: A primary evaluation,” *6th IEEE Internatioal Conference on Digital Ecosystems Technologies (DEST)*, pp. 1-6, 2012.
- [99] 東京ガス, “都市ガスの種類・熱量・圧力・成分.” [Online]. Available: <http://home.tokyo-gas.co.jp/gas/userguide/shurui.html>. [Accessed: 19-Jan-2018].
- [100] 環境省地球環境局地球温暖化対策課, “平成23年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について,” 環境省, 2012. [Online]. Available: <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15912>. [Accessed: 19-Jan-2018].
- [101] 文部科学省, “公立学校施設実態調査報告,” 2017. [Online]. Available: [VI](https://www.e-stat.go.jp/stat-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

search/files?page=1&layout=datalist&tstat=000001016713&cycle=0&tclass1=000001112435&second2=1. [Accessed: 08-Feb-2018].

- [102] 文部科学省, “日本の公共図書館,” 諸外国の公共図書館に関する調査報告書, 2005. [Online]. Available: [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shougai/tosho/houkoku/06082211/002.pdf](http://www.mext.go.jp/a_menu/shougai/tosho/houkoku/06082211/002.pdf). [Accessed: 08-Feb-2018].
- [103] 内閣府, “大学, 国立試験研究機関等の施設の現状と設備のための施策,” 総合科学技術・イノベーション会議, 2001. [Online]. Available: <http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/system/haihu04/siry01-1.pdf>. [Accessed: 08-Feb-2018].

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、博士審査の副査を務めてくださった萩原将文教授、満倉靖恵教授、岡野邦彦教授に感謝いたします。また、日頃から御指導、御鞭撻を賜りました西宏章教授にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

Austrian Institute of Technology にて3か月に渡り多大な御指導をいただきました Prof. Peter Palensky, Dr. Edmund Widl, Dr. Atiyah Elsheikh, Dr. Khan Sohail, Dr. Tarik Ferhatbegovic に心より御礼申し上げます。さらに、SGC プロジェクトとして共同研究を行ったエネルギーマネジメントグループの松岡様、ならびに株式会社日立情報通信エンジニアリングの清水様、松平様には、数多くの御助言と御助力を頂きました深く感謝いたします。

博士課程リーディングプログラムにて御助言を頂きました小林光教授、植田利久教授、倉林修一様、泰岡顕治教授、三上益弘教授、岡野邦彦教授、秋元琢磨様、松永光平様、黒田亮子様、富士野督子様には大変お世話になりました。ここに感謝申し上げます。

研究に対する御助言、サポートを頂きました戸越俊郎先輩、松井加奈絵先輩、石田慎一先輩、林泰正先輩、井上 恒一先輩、井原 克先輩、Janaka Wigekoon 先輩、Rajitha Tennekoon 先輩、伊藤誠也先輩、川島大地先輩、他氏に感謝いたします。

最後になりましたが、大学生活を送るにあたり、日頃から深い愛情で著者を支えて下さった家族に深く感謝申し上げます。

2017年12月18日