

修士論文

家庭用エアコンによる電力需給調整 ポテンシャルに関する研究

The Effect of Residential Air-Conditioning
Load Management on Power System

2013年2月5日提出

指導教員 岩船 由美子 准教授

東京大学大学院工学系研究科

電気系工学専攻

学籍番号 37116493

山田 雄吾

内容梗概

現在の電力システムでは需要が所与として考えられ、それに応じて供給側が電力供給を行い、需給バランスを保っている。近年、二酸化炭素排出量削減など環境面への配慮から、クリーンな電源として太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が促進されている。しかしこれらは間欠性電源であり大きな出力変動が生じるため、これまでのように供給側のみが需給バランスを担うシステムでは、電力の安定供給実現が困難となる。この問題を解決するために、蓄電池の導入などの対策が考えられているが、高価なため実現へ向けてはさらなる技術進歩を必要とする。より効率的な方法として、需要制御という考え方が提唱されている。需要を制御対象とすることで、電力需給バランスを需要側・供給側双方が協調し保つことにより、再生可能エネルギーの大量導入時に予測される大きな出力変動への対処だけではなく、負荷平準化を実現しベース電源を有効に活用する事で全体として最適な運用が可能となる。

家庭の需要としては、需要ピーク時において割合の高い空調負荷に関する検討が、給湯器に比べ不十分である。これは、家庭用エアコンの消費電力を詳細にシミュレーションできる手法が確立されていない点や、需要家の利便性の評価を行う事が困難であるなどの理由が考えられる。

そこで本研究では、家庭部門の空調負荷(ヒートポンプ式エアコン)を制御した際の需要家の利便性を条件として用いた上で、エアコン消費電力の評価を行う。快適性を制御の条件として用いる点は本研究の特徴であると言える。また、COMMAハウスを用いた実験結果を利用し、シミュレーション制御の向上を実現し、需要家の快適性を変数として用いてアンケート結果を踏まえた評価を行うことによって、家庭のエアコン制御によって得られる需要削減ポテンシャルに関する定量的な評価を行う。

本研究は第1章から第7章からなる。

第1章では、本研究における研究背景・目的について述べている。

第2章では、エアコン使用実態・制御されることに対する機器使用者の感覚を明らかにすることを目的としたアンケート結果について述べている。

第3章では、解析に用いた熱負荷シミュレーション・エアコン熱源特性のモデルについて説明している。

第4章では、COMMAハウスにおける実験結果とシミュレーション結果の比較を行い、シミュレーション精度に関する評価を行っている。

第5章では、エアコンの運転決定モデルについて説明し、エアコン1台における制御結果について評価を行っている。

第6章では、電力系統の電力需要ピークを最小化するモデルを用いて、ピーク削減結果について検討を行っている。

最後に第7章で本研究の結論としている。

目次

1	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	地球温暖化	1
1.1.2	再生可能エネルギー	2
1.1.3	分散エネルギーマネジメント	3
1.1.4	家庭部門の空調機器	4
1.2	研究目的	6
2	アンケート	7
2.1	目的とアンケート内容[9]-[11]	7
2.2	質問内容と基礎情報	8
2.3	結果	11
2.3.1	普段のエアコン使用実態	11
2.3.2	プレクーリング	13
2.3.3	設定温度変更	13
3	エアコン消費電力と室内環境評価モデル	15
3.1	シミュレーションモデル概要	15
3.2	住宅構造	16
3.2.1	COMMA ハウス概要	16
3.2.2	COMMA ハウスパラメータ	17
3.3	熱負荷シミュレーション[13][14]	18
3.4	CADIEE エアコンの熱源特性モデル[16]	20
3.4.1	概略	20
3.4.2	冷媒蒸発温度推定方法	21
3.4.3	冷媒凝縮温度	23
3.4.4	機器固有パラメータの決定	24
3.5	温熱指標[22]	26
3.5.1	予測平均温冷感申告(PMV)	27
3.5.2	PMV 計算パラメータ	28
4	実験住宅 COMMA ハウス実験	30
4.1	実験概要	30
4.1.1	熱電対	30
4.2	冷房時室温分布	31
4.2.1	空間室温分布	31

4.2.2	平面室温分布	33
4.2.3	空間平均室温と人体感知高さにおける平均室温	34
4.2.4	冷房時における実測値とシミュレーション結果の比較.....	35
4.3	暖房時室温分布.....	37
4.3.1	空間室温分布	37
4.3.2	平面室温分布	38
4.3.3	空間平均室温と人体感知高さにおける平均室温	39
5	ピーク需要削減を目的としたエアコン運転方法	40
5.1	エアコン制御方針概要.....	40
5.2	室温基準運転モデル.....	41
5.3	PMV 基準運転モデル.....	42
5.4	暖房時の評価.....	44
5.4.1	運転開始時間	44
5.4.2	需要ピーク時削減運転	46
6	ピーク需要削減と経済性評価モデル	48
6.1	評価モデル概要.....	48
6.1.1	目的関数	48
6.1.2	燃料費	49
6.2	冷房時結果.....	50
6.2.1	想定した運転方法	50
6.2.2	結果	52
6.2.3	考察	54
6.3	アンケート結果組み込みモデル.....	54
6.3.1	目的関数	54
6.3.2	制約条件	55
6.4	結果	58
6.4.1	プレクーリングを行わない場合	58
6.4.2	プレクーリングを行う場合	61
7	結論	63
7.1	まとめ	63
7.2	今後の課題.....	64

1 序論

1.1 研究背景

1.1.1 地球温暖化

近年、石油資源の大量消費を主要因とする地球温暖化対策として、二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量削減の機運が世界中で高まっている。1992年には、「気候変動に関する国際連合枠組条約」が採択され、地球温暖化対策に世界全体で取り組んでいくことが合意された。1997年には、京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)において、1990年を基準として2008年から2012年の5年間の排出量を6%削減するという目標が我が国日本に課された。しかし、国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスによる[1]、2008年における排出量は基準年比1.6%増、2010年においても0.3%減に留まり、目標の達成には最大限の努力を要するという現状にある。一方で、GDPあたりの総CO₂排出量は2010年において7.5%となっている。国の発展とともに産業が発展し、消費が増加するためCO₂排出量を削減する事は困難となっている事がわかる。しかし、昨今の国際情勢において先進国としての責務を果たさねばならない事も事実である。部門別CO₂排出量の推移を図1.1に示す。経済産業省によると[2]、1998年度の産業部門におけるCO₂排出量は、日本の排出量の約40%を占めており鉄鋼、化学工業、窯業・土石、紙・パルプの主要4業種の排出量は、産業部門全体の排出量の約6割を占める。1998年度の産業部門のCO₂排出量は基準年比で3.2%となった。産業部門では、鉄鋼などの基礎素材型産業から金属機械などの高付加価値型産業にシフトし、産業のサービス化が進展した事によって排出量が減少傾向にある。産業部門では、生産量の変化に伴う設備稼働率の変動や、社会経済状況の変化に伴う製造業の海外移転などの要因に因って表面上の温室効果ガス排出量が変化する可能性が高い。今後は、規制緩和や優遇税制などによって省エネルギー投資を促進させ、廃棄物から得られるエネルギー

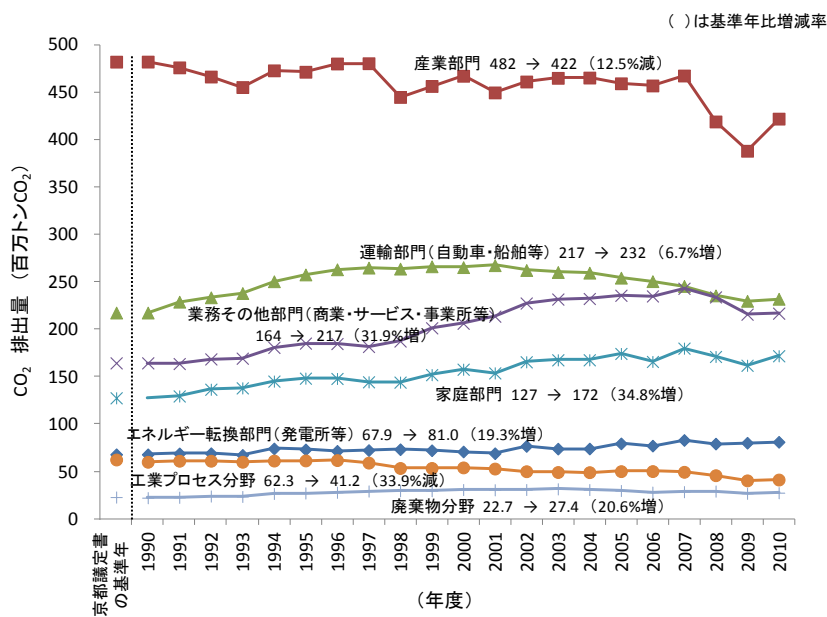


図 1.1 部門別排出量の推移[1]

の有効利用や、高付加価値化やサービス化などの循環型社会に合致した産業の育成により、温室効果ガス排出の少ない産業構造へと政策的な誘導を図るなどの抜本的な解決方法が望まれる。業務その他部門では、業態別にみると卸小売が 21 %、事務所ビルが 18 %、官公庁等その他が 17 %、ホテル・旅館が 12 % を占める。用途別では、冷暖房が 30 %、給湯・厨房が 30 %、動力・照明等が 40 % となっているが、90 年の値と比較すると冷暖房の割合が減少する一方で、OA 化等の影響から動力・照明等の電力需要の割合が増加している。床面積当たりのエネルギー消費は業種や営業形態・地域ごとに大きく異なる事から、事業者が実態を把握し適切な対策を講じていくことが必要とされる。2001 年度の排出量を 1990 年度基準と比較すると約 23 % 増加している。内訳としては、電力排出係数が 26 % 分、床面積当たり原単位が 8 % 分改善し、床面積が 134 % 分の増加要因となっている。削減ポテンシャルとしてはトップランナー規制対象機器の導入による、機器効率の改善や建築物の断熱性能の向上、エネルギー需要管理(BEMS)などが挙げられる。家庭部門においては、動力他(TV・照明・OA 機器など)の消費量が 36 %、給湯の消費量が 29 % を占めており両部門で全体の 6 割以上を占めている。また、冷暖房による消費量は併せて約 3 割となっている。1990 年度の排出量:9000 万 t-CO₂ から 2001 年度:10300t-CO₂ に増加している。電力 CO₂ 排出原単位が 31 %、機器効率が 29 % 改善しているのに対し、機器の使用料・保有台数がそれぞれ 84 % 分、76 % 分の排出増要因となっている。つまり効率の面では改善されているが、生活様式の多様化により使用機器が多様化したため総合的な排出量に増加が見られる。削減ポテンシャルとしては業務部門と同様に、トップランナー規制対象機器の導入による機器効率の改善や建築物の断熱性能の向上、エネルギー需要管理(HEMS)などが挙げられるが、生活習慣などの個人により変化する要素が大きいため、画一的な施策を行う事が難しいと言える。

1.1.2 再生可能エネルギー

現在世界中で、地球温暖化や石油燃料などの問題を背景として、再生可能エネルギーへの注目が集まっている。図 1.2 に示すように世界における再生可能エネルギーの導入割合は、2011 年において太陽光発電:74 %、風力発電:20 %、などのように著しい伸びを見せている。累積導入量は、水力発電が 970 GW 風力が 238 GW、太陽光発電が 70 GW となり、特に太陽光発電は図 1.3 に示すように最近 5 年間における導入量の伸びが著しくなっている。我が国日本においても、大きな

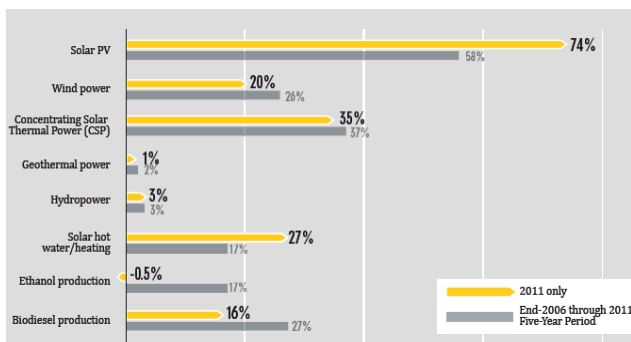


図 1.2 再生可能エネルギーの年平均増加割合[3]

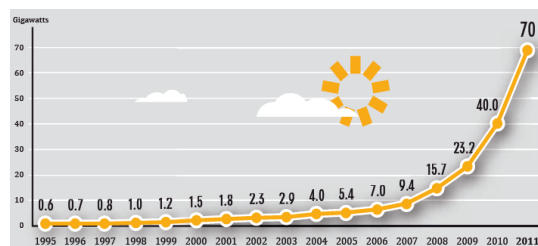


図 1.3 世界の太陽光発電導入量[3]

導入目標が掲げられている。また、2012年7月より始まった固定価格買取制度により、再生可能エネルギーの導入を計画する企業や地方自治体が増加し、今後も導入の勢いが増していく事が考えられる。しかし、投機目的での導入量増加はドイツやスペインのように制度の破綻を招く危険性があり、動向を詳細に把握し適切な施策を講じる必要がある。

日本では、特に太陽光発電(PV: Photovoltaics)システムの大量導入が期待されており、特に住宅用太陽光発電の導入が期待されている。2020年に2800万kW、2030年に5300万kWという高い導入目標が設定されている[4]。太陽光発電システムは、季節や時刻による規則的な変動や、気候の変化による影響を受けるため、発電量を制御する事が出来ない間欠性電源として知られている。このような特徴により、日本においてPVの大量導入時には以下のような課題が生じる事が予想されている[5]。

- ・配電網の電圧上昇による逆潮流の困難化：太陽光発電から系統に電力が逆流した場合の配電系統の電圧上昇を抑制するため、出力抑制を行う必要があるため、大量導入時には発電電力量が減少する可能性がある。
- ・周波数調整力の低下：天候などの影響で変動する出力を予測するのは困難であるため、電力需要の変動に対する調整力(LFC 容量)の不足や太陽光出力の大幅な変動に備えて、バックアップ電源が必要となる。
- ・余剰電力の発生(需給バランス)：需要の少ない時期(中間期)に、ベース供給力等と太陽光による発電量が需要を上回り、電力の余剰が発生する。また、系統側の電源設備・流通設備とも稼働率が低下することによって、コストアップが発生する。

電圧上昇対策として、電圧調整装置の設置や柱上変圧器の分割設置、細い伝線の太線化などによって逆潮流可能量の増加や、6千Vの配電系統を2万V化することが考えられる。余剰電力に関しては、蓄電池の導入により充電を行う事が考えられるが現状では蓄電池は非常に高価なものであり、太陽光発電設備が1000万kWを超える場合蓄電池に係る費用は、約6兆円と試算されている。蓄電池の導入や新たな発電所の建築による供給力・調整力の増強などが考えられるが、いずれの方法においても大きなコストが発生してしまう。また、揚水発電の活用によって余剰電力を吸収する方法も考えられるが、立地の確保や追加費用の発生などの課題が残る。このような問題を背景として、次節で述べる分散型エネルギーマネージメントに関する研究が盛んに行われている。

1.1.3 分散エネルギーマネージメント

現在次世代電力網としてスマートグリッドに注目が集まっている。スマートグリッドの概念図を図1.4に示す。エネルギー資源庁主催の低炭素電力供給システムに関する研究会では、スマートグリッドを「従来からの集中電源と送電系統の一体運用に加えて、情報通信ネットワークにより分散型電源やエンドユーザーの情報を統合・活用して、高効率・高品質・高信頼度の電力供給システムの実現を目指すもの」と定義されている。今後、分散型電源の導入が進むと、集中型電源との併用運用や、供給側と需要側が協調して効率的な電力システムを実現して行くことが求められる。このスマートグリッドにおいて重要な役割を担うのが、分散型エネルギーマネージメン

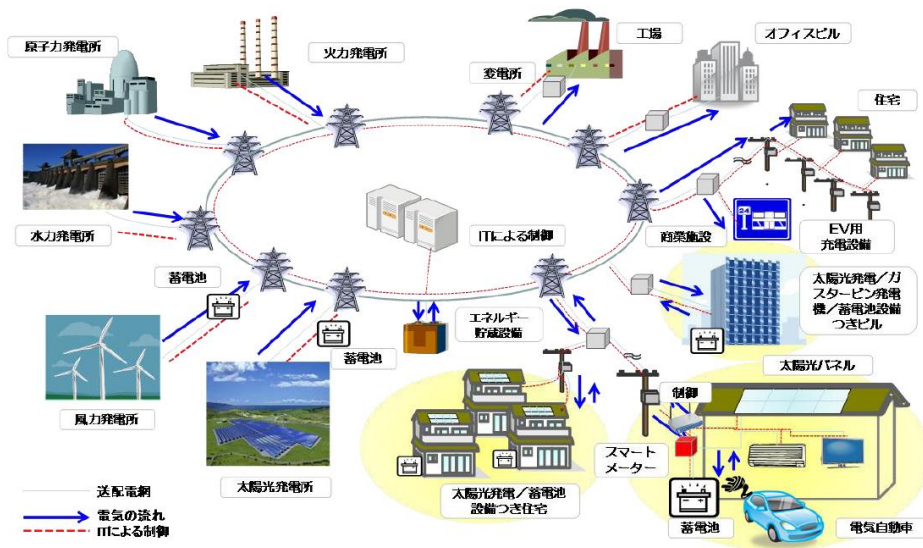


図 1.4 スマートグリッド概念図[6]

ト: HEMS(Home Energy Management System),BEMS(Building Energy Management System)である。特に HEMS においては、モニターやパソコン、タブレット端末などを利用した「エネルギーの見える化」によって消費者にエネルギー消費の実態を認識させる事で省エネルギー実現を目的とする。更に通信機能を併せ持ち、電力会社からの信号に従って家庭内の機器(エアコン・照明・ヒートポンプ式給湯機等)を電力系統に協調して管理する事で、需給バランス逼迫時や再生可能エネルギーの出力変動への対応により、電力システム全体としての経済性の向上を目指すものである。

1.1.4 家庭部門の空調機器

家庭部門における空調機器の普及率に関するデータを図 1.5[7]示す。家庭のエアコンは 90 % 程度の普及率となっている。更に 100 世帯あたりの保有数量は 259.9 台となっており 1 つの家庭が、平均して約 3 台のエアコンを保有していることがわかる。また、図 1.6 に東京電力管内における夏季需要ピーク日の在宅世帯電力使用量推計データを示す。これによると、夏期需要最大日にお

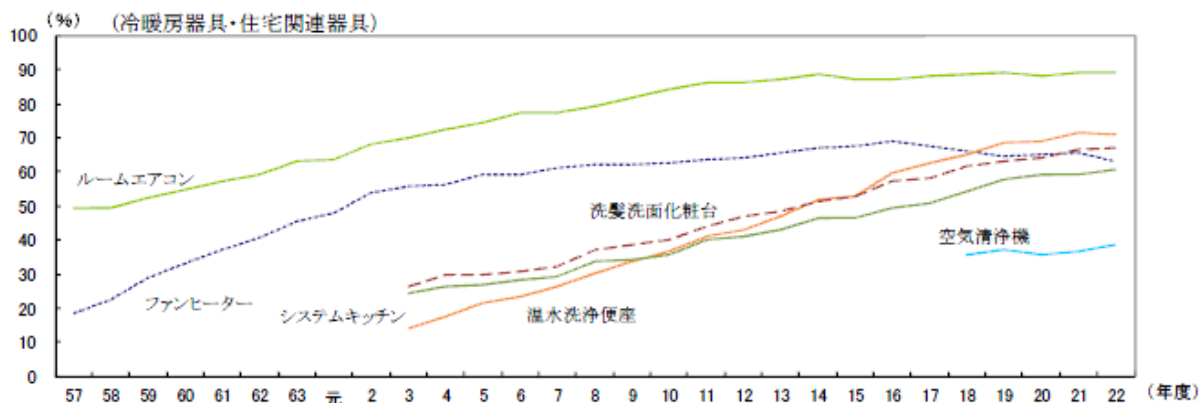


図 1.5 一般世帯におけるエアコン普及率[7]

【在宅世帯】

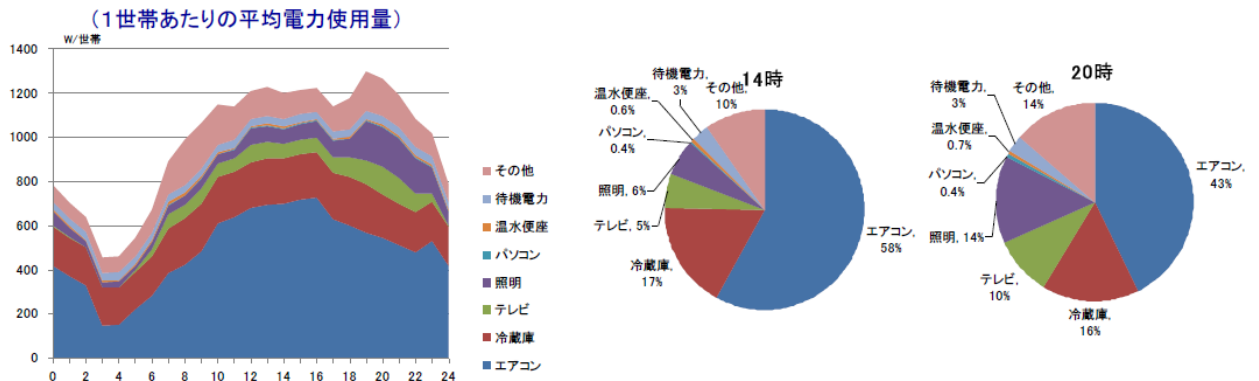


図 1.6 夏期需要ピーク時の在宅世帯電力使用量推計データ[8]

いて、家庭における消費電力の約半分はエアコンによるものであり、特に一日のうちで需要が最大となる 14 時前後の消費電力は最も高くなっている。これは、夏期において需要が最大となるのは、空調需要の増加によるものであることを原因とする。つまり、夏期における電力需給バランスに貢献をするという観点で家庭のエアコン制御を考える場合、需要を制御したい時間帯と、エアコンによる需要が増加する時間帯が合致していることになり、更にその容量も大きなものであるため制御対象として有用なものであると言える。冬期においては、東京電力管内の需要は夕方以降の照明・暖房需要増加時に最大となるが、この場合においても夏期と同様に家庭のエアコン需要は増加していると考えられ、制御対象として有用なものであると考えられる。

1.2 研究目的

本研究では、HEMS の制御対象機器の一つである家庭部門の空調負荷(エアコン)に注目し、これを制御する事によって電力システムに与えるメリットに関する評価を行う事を第一の目的とする。一般に、需要を制御する場合に考慮すべき点として、以下の3点があげられる。

- 1 機器の制御によって使用者の利便性が著しく損なわれない事
- 2 制御する機器の容量が十分である事
- 3 外部からの指令に対して機器の消費電力の応答が十分に速い事

使用者の快適性に関しては、家庭部門のエアコンの研究では実測を基礎とするものや、定性的な評価に終始したものが多い。そこで本研究では PMV(Predicted Mean Vote: 3.5 節)の値を制約条件として与え、その条件を満たす場合のみ、機器の使用者が制御を許すという仮定の元に評価を行う。これにより、機器使用者の許容性を考慮した上で電力システムに与えるメリットを評価する事ができる。2 に関しては前節で述べたように家庭のエネルギー消費のうち需要最大日・最大時間における冷暖房の占める割合は大きく十分な容量があると考えられる。応答速度に関しては、本研究ではエアコンの制御によって得られる電力需給バランスへの貢献を評価対象としており、その目的を達成するためには数分程度の応答速度であれば十分であると言えるので、現在普及している家庭用エアコンはこれを満たしていると考えられる。

以上のような点を考慮し、現在普及しているエアコンの設定(設定温度)を変更させることによって、ピーク需要削減を目的とした制御を行った場合に得られるメリットに関して、COMMA ハウスにおける実験やアンケートを利用し、実態を反映させた評価を行う。これによって得られた知見は、家庭の空調機器を制御する際の料金制度等を含めたシステム設計に際して、基礎的な指針となる数値を与えるものと考えられる。

2 アンケート

2.1 目的とアンケート内容[9]-[11]

家庭のエアコンを制御する事によって電力システムに与えるメリットに関する評価を行う際、居住者はエアコンを使用する事によって得られる温熱環境の快適性を提供する(犠牲にする)ことによって、環境貢献という社会的責任を果たすと共に、経済的メリットを対価として要求するものと考えられる。そのようにエアコンの運転を制御される(変更される)ことを居住者がどのように感じるかに関して、実態を把握した上でシミュレーションを行う必要があると言える。

一般には市場で取引されていない事象に関する経済的価値を算出する方法として、仮想評価法(Contingent Valuation Method: CVM)が知られている。仮想評価法を用いて、WTA(willingness to accept)やWTP(willingness to pay)を求めることによって、一定の政策が作成されると同時にその妥当性の一つの根拠となる。しかし、以下のような理由により本研究においてCVMを用いた場合でも精度の高いWTA/WTPの値を得る事が困難であると判断し、CVMを用いないこととした。

- ・人の温熱環境に対する判断基準は感覚に因るところが大きい。
- ・日常生活において生活空間の詳細な温熱に関する数値を把握しておらず、相対的な基準に従って判断する要素が大きい。
- ・現状では、エアコンを制御されるという行為は非現実的なものであり、それに対する反応は実際に大規模な実証実験等を行って判断する必要がある。

そこで、エアコンを制御されること(プレクーリング・設定温度緩和)に関する居住者の許容率を明らかにすることを主な目的としたアンケートを実施する。つまり、運転されているエアコンの中で制御しても良いと使用者から許可されるエアコンの台数を明らかにすることを目的とする。

2012年11月30日～同年12月3日にインターネット調査を実施し、各アンケートパターンについて約600の有効回答数を得た。アンケートの回答者は、年収の割合が偏らないように抽出した。また、本研究では家庭のエアコンを制御することによって、夏季ピーク需要削減効果に関して定量的な評価を行うことを最大の目的としている。東京電力管内において夏季ピーク需要が最大となる時間帯は平日の14時前後であるため、制御対象として考えるエアコンは当該時間帯に運転されている必要がある。この事から、以下の3点によってスクリーニングを行い、制御可能エアコン(夏季ピーク需要発生時に運転されている可能性があるエアコン)の所有者をアンケート回答者として抽出した。

- 1 居住地(東京電力管内:1都6県)
- 2 平日の在宅日数・時間(2012年夏季、平日11時から17時に3日以上在宅)
- 3 エアコン使用時間(11時から17時にエアコンを使用する可能性有)

2.2 質問内容と基礎情報

質問内容として以下の設問を設定した。質問内容は全て夏季の冷房時を想定したものである。

- 1 普段のエアコン使用方法に関する質問
- 2 夏の暑い時期にエアコンを利用している際に、設定温度や利用時間を制限されることに関する感覚
- 3 プレクーリングを行うことに関する感覚
- 4 ある条件でエアコンの設定温度を変化させることとそれに対する謝礼に対する感覚

以上の質問に対し、7段階評価(1:全く許せない~7:問題なく許容できる)で評価した。また、4つめの質問に関しては、設定温度の変更値とそれに対する謝礼をそれぞれ3通り用いて設定温度の変更値と価格に対するエアコン利用者の応答に関して評価を行う。設定温度の変更値とそれに対する謝礼のアンケートパターンを表 2.1 に示す。パターン 4 では、謝礼としてお金が貰えるのではなく、電気代を値引くという形で報酬を与えることとした。これは、本研究の趣旨とは合致しないが、報酬の形態が消費者行動に与える影響に関して評価を行うためのものである。また、パターン 5 に関しては、報酬を与えることなく社会的意義を訴えることによってエアコン制御の協力を求めるものである。パターン 1~3 の質問を以下に示す。夏期のピーク需要削減を目的とした制御を行うため、外気温が最も暑くなるような1日を想定した質問にしている。また、シミュレーションによって家庭のエアコン制御によって得られるピーク削減値は 100 万 kW 程度と評価されており、2010 年度の東京電力管内の需要実績値において、年間ピーク(600 万 kW)より 100 万 kW 低い 500 万 kW 以上の需要発生日が 3 日間であったことを考慮し、エアコン制御発生日は 3 日間であると想定している。

夏季(7月~9月)の間で、 35℃を超える暑い日のうち最大で3日間、
13時~16時 の間の数時間、冷房の設定温度を普段の設定温度より _____ 上げる。

このように ご協力いただいた場合、ひと夏(7月~9月)合計で、_____ 円の謝礼が支払われます。

なお、冷房の温度の設定変更は
自動的に行われ、ご自身で設定して頂く必要はないと想定してください。

表 2.1 質問 4 のアンケートパターン

アンケートパターン	パターン 1			パターン 2			パターン 3			パターン 4			パターン 5		
設定温度変更値 [°C]	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
謝礼 [円]	温度×100			温度×200			温度×400			- 温度×400			社会的意義		

パターン4では謝礼の部分が電気代の値引きという文面に変更されている。また、パターン5の質問内容は以下のように設定した。

夏季(7月～9月)の間で、 35℃を超える暑い日のうち最大で3日間、
13時～16時 の間の数時間、冷房の設定温度を普段の設定温度より _____ 上げる。

このような協力を 東京電力管内のすべての世帯 がしてくれた場合、停電回避できるのみならず、
夏の暑い時期のみ利用する 効率の悪い発電所 _____ を停止でき、省エネに役立ちます。

なお、冷房の温度の設定変更は
自動的に行われ、ご自身で設定して頂く必要はないと想定してください。

また、質問4以外の3つの質問に関しては、各アンケートパターンにおいて同様の質問としている。以下に、アンケート回答者に関する基礎情報を示す。各アンケートパターンにおいて、母集団には顕著な差異はなく、したがって回答の質が異なるものとして、今後の分析を進めることとする。

表 2.2 各パターンの有効回答数

パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
604	603	606	603	602

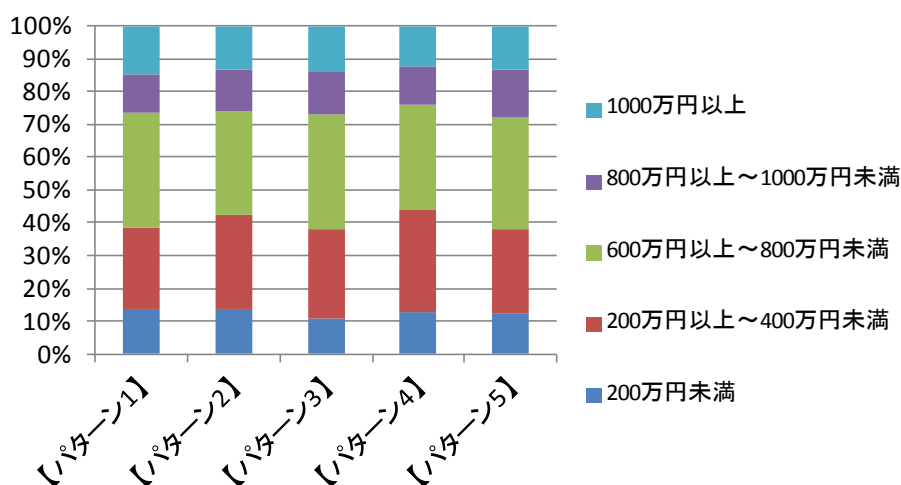
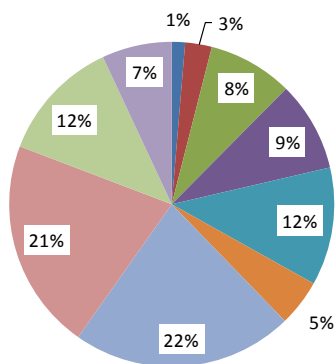
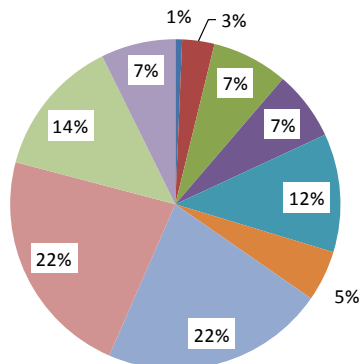


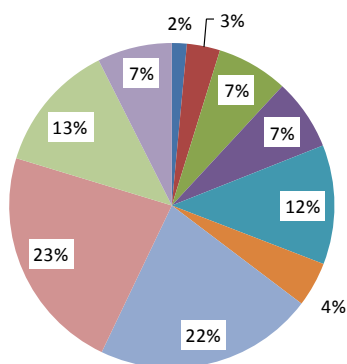
図 2.1 各アンケートパターンにおける年収分布



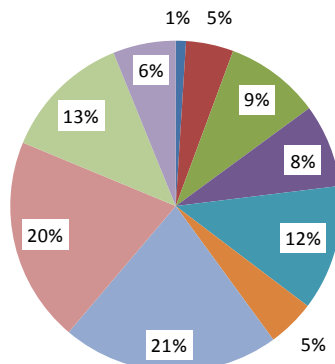
アンケートパターン 1



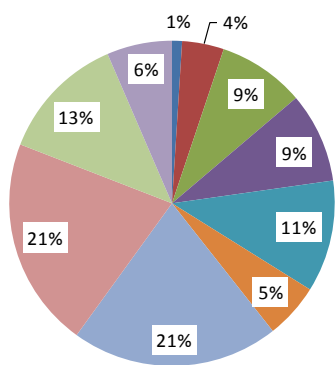
アンケートパターン 2



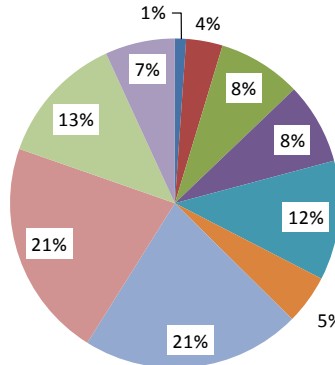
アンケートパターン 3



アンケートパターン 4



アンケートパターン 5



合計

図 2.2 回答者の男女・年齢構成

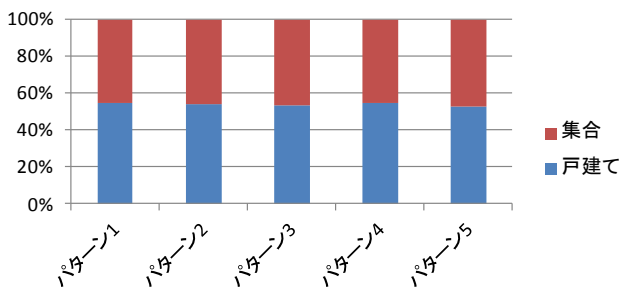


図 2.3 住宅種構成

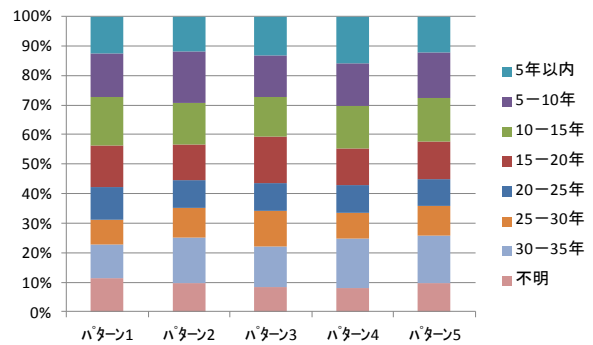


図 2.4 築年数構成

2.3 結果

2.3.1 普段のエアコン使用実態

図 2.5 に各時間帯においてエアコンを使用する可能性のあるエアコン使用率を示す。深夜における使用率は低くなっており、外気温の増加とともに、使用率が上がっている。外気温が最も高くなるのは、14 時前後の時間帯であるが、使用率が最も高くなるのは夕方以降の時間帯になっている。これは、昼間と比較し夕方以降の在宅率が高くなるためであると考えられる。また、この設問において 11 時～14 時・14 時～17 時の 2 つの時間帯において使用すると答えた回答者のみを抽出してアンケート回答者とした。これは、夏のピーク需要削減に貢献するためには 14 時前後においてエアコンを使用している必要があるからである。

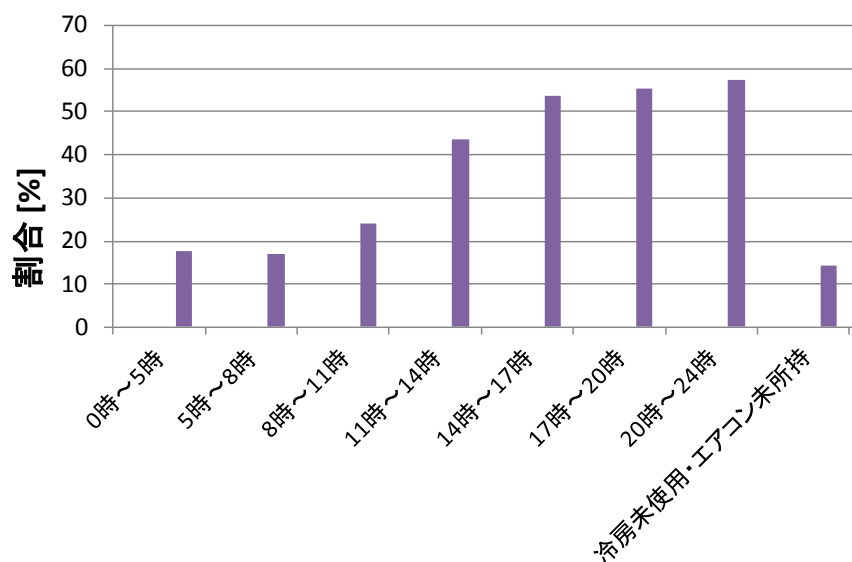


図 2.5 各時間帯におけるエアコン使用率

次に、普段最も頻繁に用いる設定温度と快適だと思う温度に関する結果を図 2.6 に示す。また、快適だと思う温度を基準として設定温度の値に対する割合を図 2.7 に示す。設定温度の平均値: 26.5 °C, 快適だと思う温度の平均値: 25.5 °C となった。約 4 割の人は快適だと思う温度と設定温度が一致していた。全体的な傾向として快適だと思う温度よりも約 1 °C 高い温度を設定温度として用いていることがわかった。設定温度を快適だと思う温度よりも高く設定した理由として、省エネ・節電を理由とする人が過半数を占めたことから、原子力発電所の稼働停止を理由とした電力不足に対する人々の意識の高さが影響した可能性があることに注意が必要である。また、小さな子供がいる場合や、寒がりである等個人的な事情によるものも散見された。反対に、快適だと思う温度よりも設定温度を低く設定した人の割合はわずかなものであった。その理由としては、設定温度の値まで室内が冷え切らないことがあげられており、熱負荷とエアコンの定格能力の不一致が原因と考えられる。

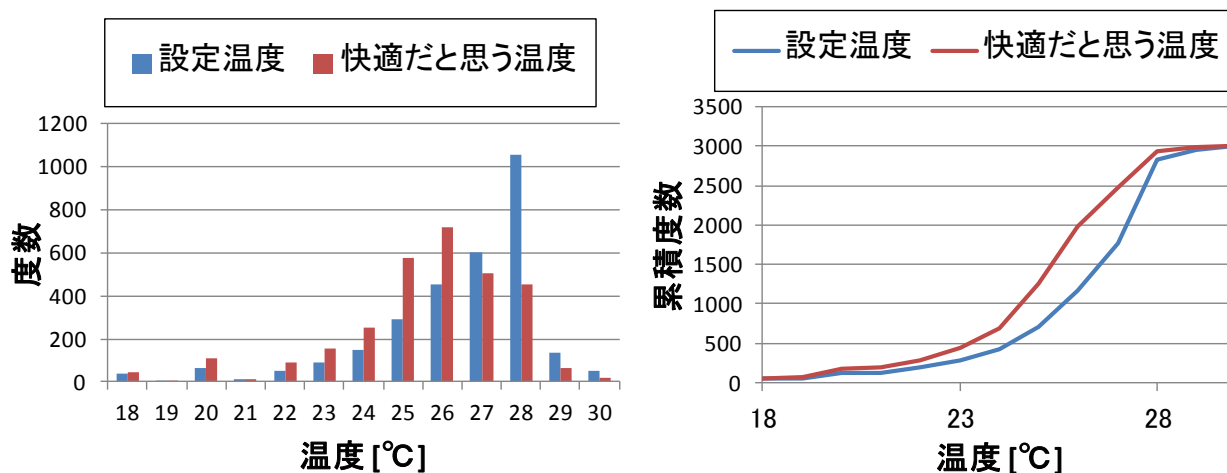


図 2.6 設定温度と快適だと思う温度分布

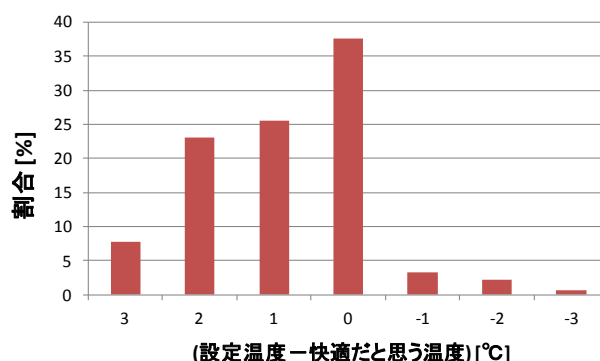


図 2.7 設定温と快適だと思う温度差の分布

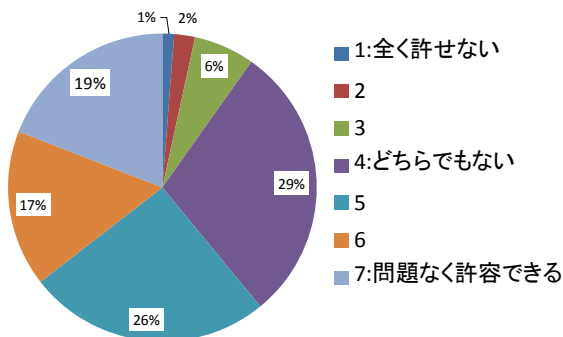


図 2.8 プレクーリングを行うことに対する感覚

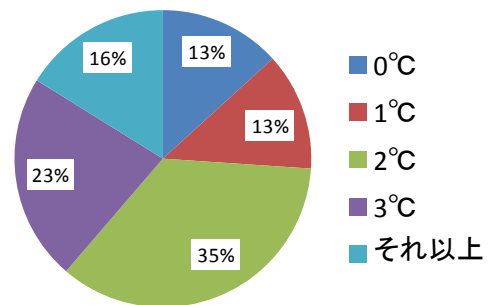


図 2.9 プレクーリングの際に下げる温度

2.3.2 プレクーリング

プレクーリングを行うことに関するアンケート結果を図 2.8(プレクーリングを行うことに対してどのように感じるか)と図 2.9(プレクーリングを行う際に通常よりも何度設定温度を下げるができるか)に示す。プレクーリングに対して否定的な感覚を持つ人の割合は9%となった。これは、エアコンの設定温度と快適だと思う温度との比較において、快適であると思う温度よりも設定温度を高く設定している人の割合が多いことと合致する結果となった。普段は、省エネや節電などを理由に快適である温度よりも暑い設定にしているため、設定温度を下げるプレクーリングを行うことは、エアコン利用者にとって快適性を著しく損なうものではないという可能性があると言える。また、プレクーリングを行う場合に下げられる設定温度に関しては、2℃以下の割合が48%となり、約半分を占めることが分かった。2℃程度であれば普段設定温度を高めに設定しているため、快適性に大きな影響を与えることはないが、4℃以上になると許容できないほど室内が寒くなると感じる人の割合が多いものと考えられる。

2.3.3 設定温度変更

設定温度を夏期の暑い日の13時から16時に変更されることに対するアンケート結果を図 2.10に示す。7段階の選択肢において5・6・7(4:どちらでもない, 7:問題なく許容できる)を選択した回答者の割合を許容率として用いた。通常と比べて、設定温度を1℃高く設定する場合には、報酬を与えることなく社会的意義に訴える事で協力を求めることが有効である結果がしめされた。また、パターン1(報酬100円)からパターン2(報酬200円)へと報酬が大きくなった場合でも許容率は変化しないことから、報酬に対する弾力性は小さいものと言える。これは、設定温度を1℃高くすることは快適性の悪化に繋がらない(快適だと感じる温度と設定温度の関係より)と想像されるため、それに対する対価を望むことなく電力の安定供給という社会的意義を満たすために需要家が行動すると推察される。それに対し、設定温度を3℃高く設定する場合には、者氣的意義により協力を求めるケースの許容率が最も小さくなっていることから、大きく快適性が損なわれ

るような運転方法の変化に対しては、それに対する対価を要求することが明らかになった。また、報酬を支払わないケース(パターン 5)では、設定温度変更値が大きくなるに応じた、許容率の減少傾向が報酬を支払うケースと比較して顕著に表れた。

また、報酬の形式による差異(報酬・電気料金の値引き)に関しては、回答者を環境意識等の属性に分類した統計的推計が必要であると考えられるが、本研究の最終目的とは合致しないためここでは評価を行わないこととする。しかし、このようなアンケートによって得られる知見は、実際の需要家の行動が反映されたものであるため、シミュレーション結果や実証実験との差異に関して比較・検討を行うことは、より効率的なシステムの実現に必要な不可欠なものであると考えられる。

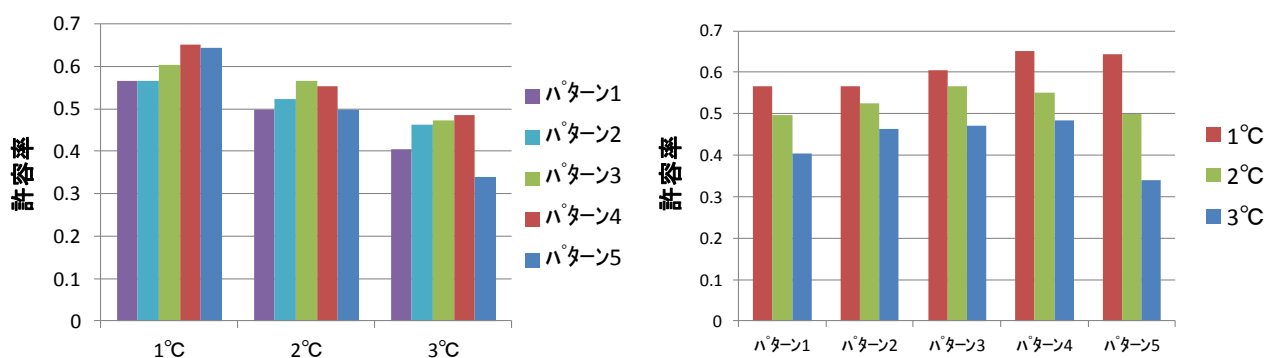


図 2.10 設定温度を変更されることに対する許容率

3 エアコン消費電力と室内環境評価モデル

3.1 シミュレーションモデル概要

本研究におけるシミュレーションモデルの概略図を図 3.1 に示す。本研究では熱負荷シミュレーションソフトとして電力中央研究所の開発した「CADIEE[12][16]」を用いた。「CADIEE」は、室内の放射・対流・伝導による伝熱減少を三次元的に模擬し、居住者の温熱快適性および空調負荷を定量的に評価し、放射伝熱が温熱快適性に与える影響を高精度に扱えるという特徴を有している。また、家庭用エアコンの熱源特性モデルが組み込まれていることも特徴であり、本研究ではこの機能を活用する。このモデルは、特定機種の実測データから入出力特性を模擬したのではなく、冷凍サイクルの理論効率に着目した汎用的なものである。機種の特有値として、定格出力や室内機・室外機の風速など、メーカー公表値のみを入力することで対象機種の入出力特性を得ることが可能であり、様々な機種に適応可能である。更に COMMA ハウスにおける実測結果(第 4 章)を用いてシミュレーション結果と比較してフィードバックを行い、シミュレーション条件を変化させる事で、より実態に合致したエアコンの消費電力・室内の温熱環境を計算する事を可能にした。図に示すように、室内の温熱環境の計算および、エアコンに関する計算に CADIEE を用いる。このモデルによって得られた室温・湿度などのデータを用いて快適性指標である PMV を求め、エアコン使用者の利便性に関する評価を行う。これは、実際にエアコン使用者が許容する

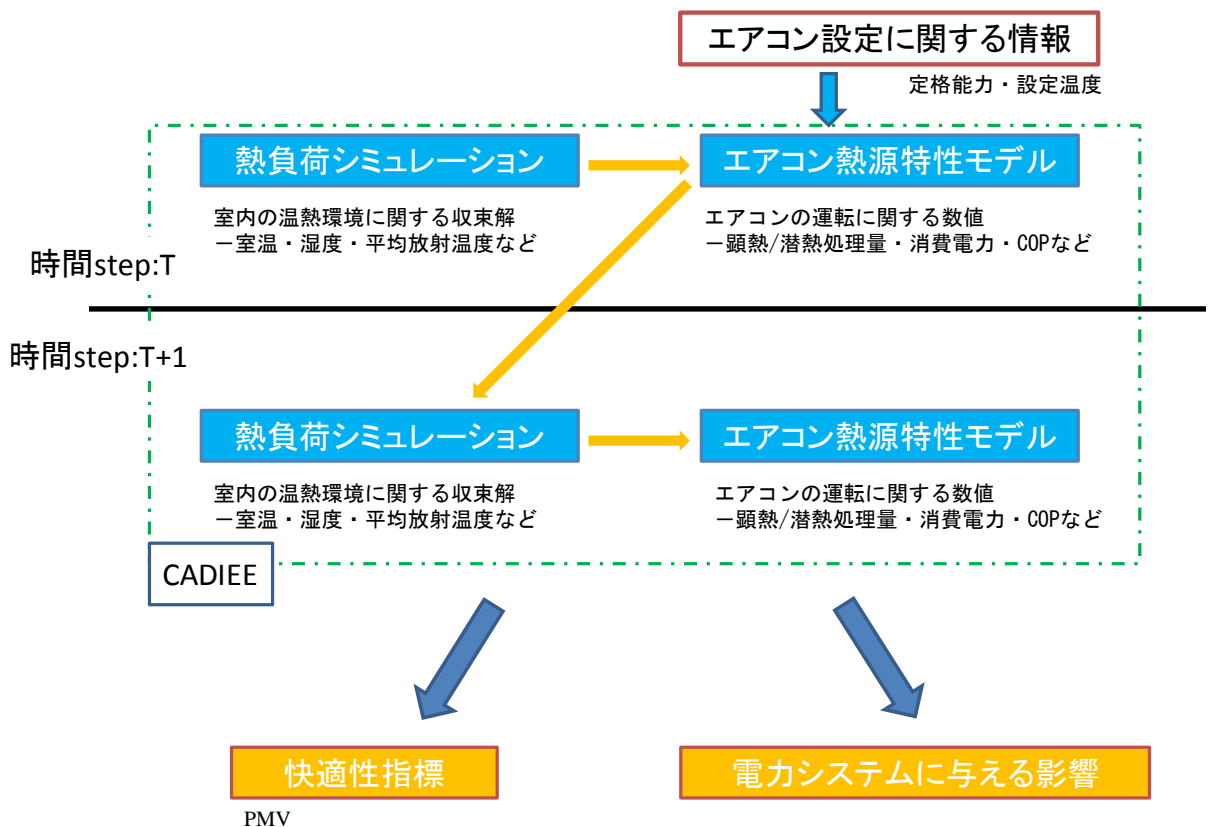


図 3.1 シミュレーションモデルの概略図

ような運転を行った場合に得られるメリットに関して評価を行うためである。また、得られた消費電力の値を用いて実際にエアコンの運転を変化させた場合に、電力需給バランスに与える影響に関する評価を行う。上のようなモデルを用いることによって、家庭部門のエアコンを制御した場合に電力システムに与える影響に関して定量的な評価を行う事が可能となる。表 3.1 にシミュレーションに共通するパラメータを示す。計算時間間隔が 6 分であるため、気象データは線形補間して用いる。

表 3.1 シミュレーションに共通するパラメータ

計算時間間隔	6 分
気象データ	拡張アメダスデータ 7月23日(東京)
住宅構造	COMMA ハウス

3.2 住宅構造

3.2.1 COMMA ハウス概要

本研究では、シミュレーションによって得られる消費電力・室内温熱環境に関するデータの精度を向上させるため、COMMA ハウス(COMfort Management Housuse) [20]において実機を用いた実験を行った。そのため、シミュレーションにおいても住宅構造として COMMA ハウスを用いた。COMMA ハウスとは 2020 年に普及する住宅を想定し、機密・断熱・耐熱性能に優れた構造体に、風・光・熱を制御可能な開口部商品を組み合わせ、持続可能なエネルギーシステムと HEMS を備えたものがある。断熱性能を変化させ様々な条件のもとで、住宅の快適性や省エネ設備の最適運転特性、建築による省エネ効果を測定し、分散エネルギーマネジメントの実証実験を行う事を目的としている。図 3.2 に COMMA ハウスの見取り図と外観写真を示す。屋根上には太陽光発電・太陽光集熱器が設置されており、自然エネルギーを有効に活用する事が出来る。建物の南面はダブルスキン構造となっており、外付けの可動ルーバーが設置されている。ダブルスキンとは、二重

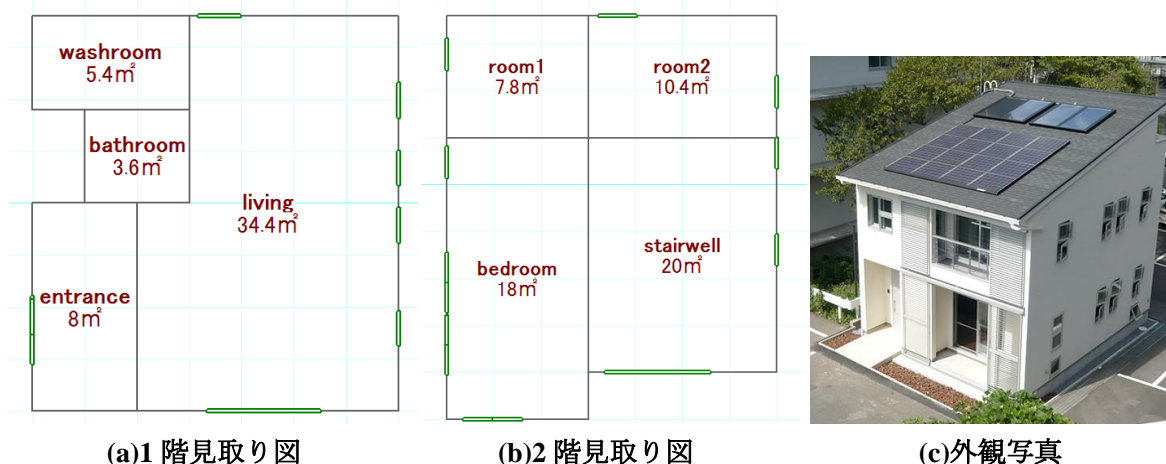


図 3.2 COMMA ハウスの見取り図と外観写真

の外壁とその間の干渉空間によって、建物の温熱環境を向上させる手法である。電動サッシと連動させ、自然エネルギーの効果的な利用方法と提案すると共に、通風を効果的に取り入れるための開口部の制御方法の検証を行う。これは、住宅の断熱性能が向上した場合冬期における暖房負荷の軽減に関してメリットを与えるが、夏期においては、反対に冷房負荷を増加させる要因になってしまうという問題を解決する方法の一つとして考案されたものである。また、主に夏期において環境制御(日射遮蔽・通風)と室内からの眺望コントロールを行う事が出来る。更に、最新の超節水トイレ・センサーで出止水するキッチン用水栓やセンサーの電力を水の流れてまかなう自動水栓を設置し、水の使用量が計測可能である。これらの構造に加え、分電盤における回路別電力消費量を1分単位で計測する事により使用用途を分析・把握する。家庭におけるエネルギー消費パターンを把握する事によって、見える化による無駄な消費の発見に寄与し、需要予測などのエネルギーマネジメントシステムのための基本となる情報を提供する。

3.2.2 COMMA ハウスパラメータ

表 3.4 と表 3.3 に COMMA ハウスの壁・窓に関するデータを示す。これらのデータを用いて CAD ツール上で各部屋構造を再現する事によって実際の COMMA ハウスにおける熱伝導の様子をシミュレーション上で再現する事が可能となる。COMMA ハウスの窓には、2重構造となっている部位と断熱スクリーンが設置されている部位があり、これらを変化させる事によって COMMA ハウスの断熱性能を表す Q 値は $1.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ から $2.4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ までの値で変化させる事が可能となっている。

表 3.2 にリビングのエアコン仕様を示す。これらの値を CADIEE に入力する事によって部分負荷率によって変化するエアコンの COP の変化を模擬する事が可能となる。

表 3.4 COMMA ハウス各壁の構成要素

部位	材質	熱伝導率 [W/m・K]	厚さ[mm]
外壁	石膏ボード	0.220	12.5
	硬質ウレタンフォーム	0.026	100
	OSB	0.016	9
	通気層		18
屋根	OSB	0.160	9
	硬質ウレタンフォーム	0.026	140
	OSB	0.160	9
基礎	押出法ポリスチレンフォーム 3 種	0.028	100

表 3.3 COMMA ハウス窓の構成要素

窓種類	構造	材質	U 値 [W/m ² ・K]
①	外窓のみ	一般複層	4.13
	外窓+内窓	一般複層+Low-E 遮熱	1.46
②	外窓のみ	Low-E 遮熱	2.33
	外窓+断熱スクリーン	Low-E 遮熱+スクリーン	1.75
③	外窓のみ	Low-E ガス入り	2.10

表 3.2 リビングのエアコン仕様

冷房・暖房時 定格能力 [kW] (最小能力-最大能力)	5.6(0.2-5.8)・6.7(0.2-10.1)
冷房時・暖房時 COP	2.49・3.76
冷房時・暖房時 室内機風速 [m ³ /min]	15.5・43.6
冷房時・暖房時 室外機風速 [m ³ /min]	43.6・41.2

3.3 熱負荷シミュレーション[13][14]

熱負荷計算は、一般的に冷暖房負荷計算の略で、ある設計条件にあわせて詳細に熱負荷を積み上げ計算する方法と簡易に計算する方法がある。熱負荷は温度だけが変化する顕熱と、個体・液体・気体へと状態変化するとき九州または放出する熱量である潜熱に分類される。空調の熱負荷要素は以下の6つがある。

①ガラス窓からの日射熱負荷(顕熱)：太陽からの放射熱が窓ガラスを通過して室内に入ることによって生じる熱負荷。

- ②外壁・屋根・ガラス窓などから貫流熱負荷(顕熱)：建物内外の温度差による貫流熱量と日射熱により、躯体表面温度が上昇しその温度差により室内に入ってくる新入熱量の和により求められる熱負荷。
- ③内部発熱として人体発熱・照明熱負荷・コンセント熱負荷(顕熱・潜熱)：照明器具や人体、家電製品等から生じる発熱のことで、冷房負荷の要因となる熱負荷。
- ④すきま風による熱負荷(顕熱・潜熱)：建物に存在する出入口や窓のすきまから侵入するすきま風によって、外気の温湿度状況によって生じる熱負荷。
- ⑤新鮮外気負荷(顕熱・潜熱)：建物内に生活する人々のために健康上必要と考えられる新鮮外気を導入することによって生じる熱負荷。
- ⑥空調停止による蓄熱負荷(顕熱)：一般にオフィスビルなどでは、夜間や休日は空調設備を停止する間欠空調が行われており、非空調時における熱の流出入によって主に床や壁などの構造体に熱が蓄熱されて建物自体の温熱変動を引き起こす。これによって、空調開始時に構造体からの放熱の影響により 24 時間連続空調を行っている場合よりも負荷が大きくなってしまふことを原因とする熱負荷。

以上のような、熱負荷を考慮し、壁や床などの構造体や窓の熱還流率を考慮し室内に生じる熱負荷を計算する。その際、図 3.3 に示すように同一空間を 1 質点として扱い、隣接する計算点間の熱収支に関する微分方程式を解くことによって各計算点における気温等を求めることができる。

このような熱負荷シミュレーションを行うソフトは数多く開発されている。芝原らは開発した「BEST」と他のシミュレーションツールにおける熱負荷の比較を行い、精度よく結果が一致することを示している[17]。外気や内部から生じる熱負荷算出方法に関しては一定の精度で計算する手法が確立されていると言える。この生じた熱負荷をエアコン機器によって処理した際の消費電力を求める手法に関しては、現在も様々な課題を解決するために研究が盛んにおこなわれている。

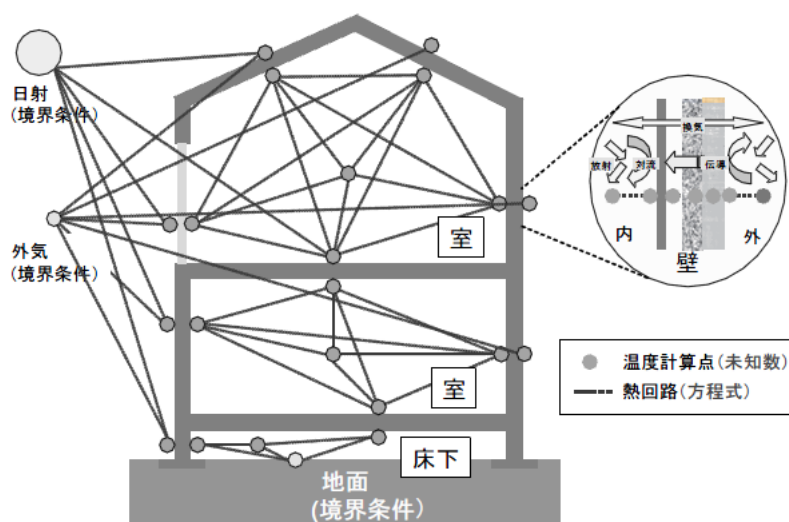


図 3.3 熱負荷計算のイメージ図[15]

特に、家庭のエアコンに関しては、使用状況や住宅構造によってエネルギー消費効率(COP)が変化する[18]だけでなく、エアコンの作成メーカーによってもその熱源特性が異なるため汎用的な計算方法の確立が困難となっている。そこで、細川らは実測によって得られたエアコンの特性を用いて、様々な条件における消費電力の計算が可能な数値計算モデルを作成した[19]。しかし、このモデルは実測により機器の熱源特性を求めているため異なる機器に対して用いることができないという問題点がある。そこで、本研究では実測に因る機器の熱源特性を用いたモデルではなく、冷凍サイクルの理論効率に注目した CADIEE に組み込まれているモデルを用いることとした。更に、COMMA ハウスにおける実測結果を用いてその精度を向上させエアコンの消費電力等の計算を行う。次節にて、CADIEE に組み込まれているエアコンの熱源特性モデルに関する説明を行う。

3.4 CADIEE エアコンの熱源特性モデル[16]

3.4.1 概略

本研究で使用したシミュレーションソフト CADIEE に組み込まれている、家庭用エアコンの熱源特性モデル(以下 CADIEE モデル)の概要を図 3.4 に示す。家庭用エアコンの熱源特性のシミュレーションに関する研究は盛んに行われているが、その大部分は実測によって機器の特性に関するパラメータを取得し、それを用いる事によって幾つかの条件における消費電力などを計算するモデルとなっている。このようなモデルでは、様々な条件・様々なエアコン機器における消費電力・処理熱量等を計算することが困難となる。一方 CADIEE モデルは既存モデル[21]を改良し、コンプレッサの負荷特性を考慮したモデルであり、特定機種の実測データから入出力特性を模擬したものではなく、冷凍サイクルの理論効率に着目した汎用的なモデルである。この特徴によって、機種の特有値として、メーカー公表値(定格出力・定格能力・室内機風速等)のみを入力す

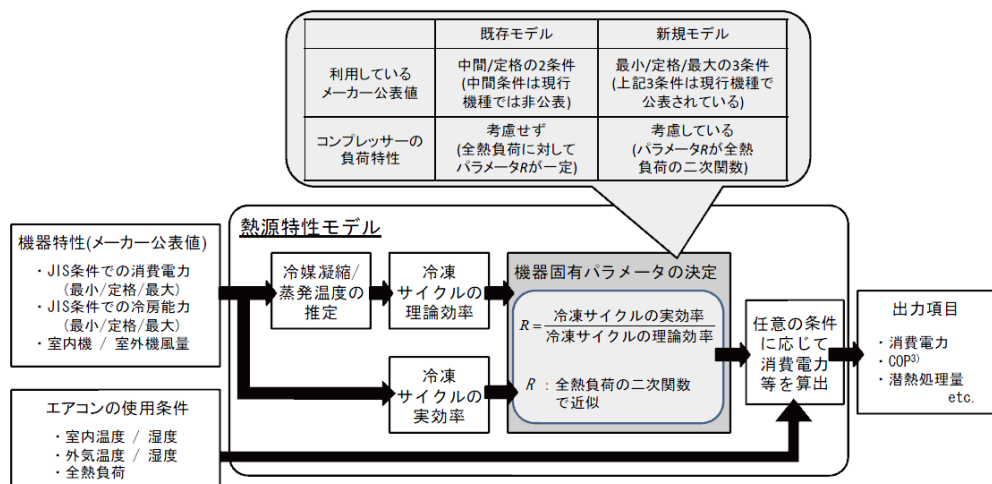


図 3.4 CADIEE モデルの概要[16]

ること対象機種の入出力特性を得る事が可能となり、様々な機種に適用可能という特徴を持つ。

CADIEE モデルにおける冷房時・暖房時の熱源特性に関する考え方は同様であるため、以下は冷房時の場合についてのみ記す。

エアコンでは室外機と室内機の間を冷媒が往復し、圧縮・熱交換・膨張・熱交換を繰り返す事によって、熱の移動を行う。エアコンの消費電力・成績係数・冷凍サイクルのみの効率はそれぞれ以下のように表される。

$$P = P_v + P_C \quad (3.1)$$

$$COP = Q / P \quad (3.2)$$

$$\eta_{rl} = Q / P_v \quad (3.3)$$

P:エアコン消費電力 [W], P_v:冷凍機で消費される電力 [W], P_C:ファン等で消費される電力[W]

COP:エアコンの成績係数, Q:室内から除去されるエネルギー [W]

η_{rl}:冷凍サイクルのみの効率

以上の式より、

$$\eta_{rl} = COP \cdot Q / (Q - COP \cdot P_C) \quad (3.4)$$

が導かれる。次に、冷凍サイクルの理論効率(逆カルノーサイクルの効率) η_{th}を冷媒蒸発温度 T_{evp} [K]と冷媒凝縮温度 T_{cnd} [K]を用いて表すと以下の式のようになる。

$$\eta_{th} = T_{evp} / (T_{cnd} - T_{evp}) \quad (3.5)$$

ここで、冷凍サイクルの理論効率とエアコンの実際の効率の比を R とすると

$$\eta_{rl} = R \cdot \eta_{th} \quad (3.6)$$

となり、式(3.4)から(3.6)より

$$R \cdot T_{evp} / (T_{cnd} - T_{evp}) = COP \cdot Q / (Q - COP \cdot P_C) \quad (3.7)$$

が成り立つ。従って、エアコンをある条件で運転させた場合の COP(成績係数)および Q(室内から除去されるエネルギー)の値が既知で、冷媒蒸発温度 T_{evp} と冷媒凝縮温度 T_{cnd} が推定する事が出来れば式(3.7) は未知数 R と P_C の関係を表す式となる。よって CADIEE モデルでは、冷媒蒸発温度と凝縮温度を推定する事によって未知数 R および P_C を求める。

3.4.2 冷媒蒸発温度推定方法

冷房時における冷媒は、室内機熱交換器内でエアコン室内機から吸い込まれた室内空気から熱交換器を介して熱を吸収し、液体から蒸気に相変化する。この時、室内機に吸い込まれた室内空気のうち、ある一定の割合の空気は熱交換器と全く触れずに素通りし、そのまま室内へと吐き出

される。これを考慮すると、熱交換器と接する空気および、素通りする空気の量は以下の式で表される。

$$M_{evp} = (1 - BF) \cdot M_r \quad (3.8)$$

$$M_{through} = BF \cdot M_r \quad (3.9)$$

M_{evp} :熱交換器と接する室内から吸い込まれた空気量 [kgDA/s]

$M_{through}$:熱交換器と接しない室内から吸い込まれた空気量 [kgDA/s]

M_r :エアコンの吸い込み口に入る空気の量 [kgDA/s]

ここで、冷媒蒸発温度 T_{evp} と室内熱交換器の表面温度が等しいという仮定を置く。まず、熱交換器表面にて結露が生じず、空気と熱交換器表面温度との熱伝達が行われる場合を考える。この場合、絶対湿度は変化せず空気温度の低下のみで熱交換が行われるため、エアコンの処理熱量 Q は湿り空気比熱 C_a [kJ/kgDA°C]とエアコン室内機の吸込口に入る空気(室内空気)の温度 T_r [°C]を用いて以下のように表す事ができる。

$$Q = M_{evp} \cdot C_a \cdot (T_r - T_{evp}) \quad (3.10)$$

したがって、冷媒蒸発温度は

$$T_{evp} = T_r - Q / (M_{evp} \cdot C_a) \quad (3.11)$$

となる。図 3.5 に結露が生じない場合の状態推移フローと空気線図を示す。図に示すように室内から吸い込まれた空気①はその一部②が熱交換器と接触し空気温度が低下する。その後、熱交換機と接触しなかった室内空気と混合し、結果として混合空気③が室内に吹き出される。

一方結露が生じる場合の状態推移フローと空気線図は図 3.6 のようになる。熱交換器と接触した空気は、飽和絶対湿度を超える絶対湿度の値となっているため、熱交換器表面にて余分な水分を結露する。結露にともなう空気温度と絶対湿度の関係は等エンタルピー線で表されるため、結露後の空気の状態は、飽和水蒸気圧曲線と等エンタルピー線との交点で表される。したがって、熱交換器と接触した室内空気は結露しない場合と比較すると温度が高い④の状態へと変化し、熱交換器と接触しなかった室内空気と混合し③の状態になり、室内へと吹き出される。

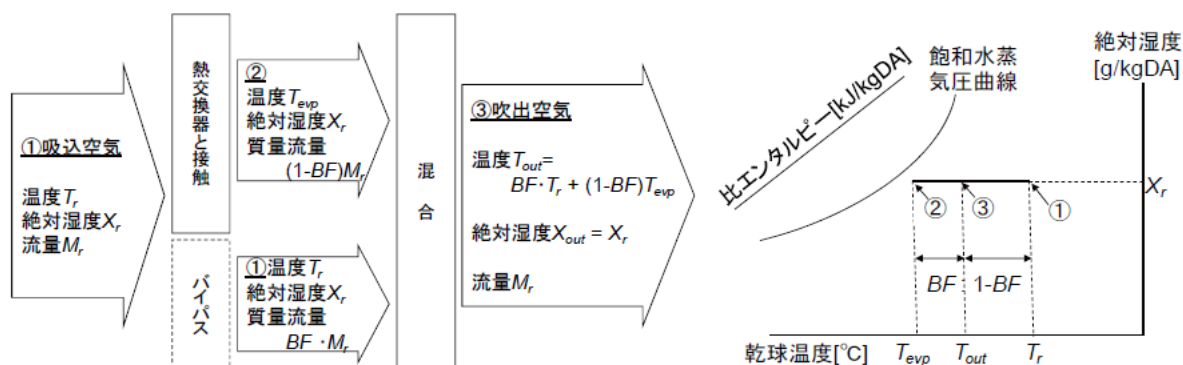


図 3.5 室内空気の状態推移フローと空気線図(結露なし)[16]

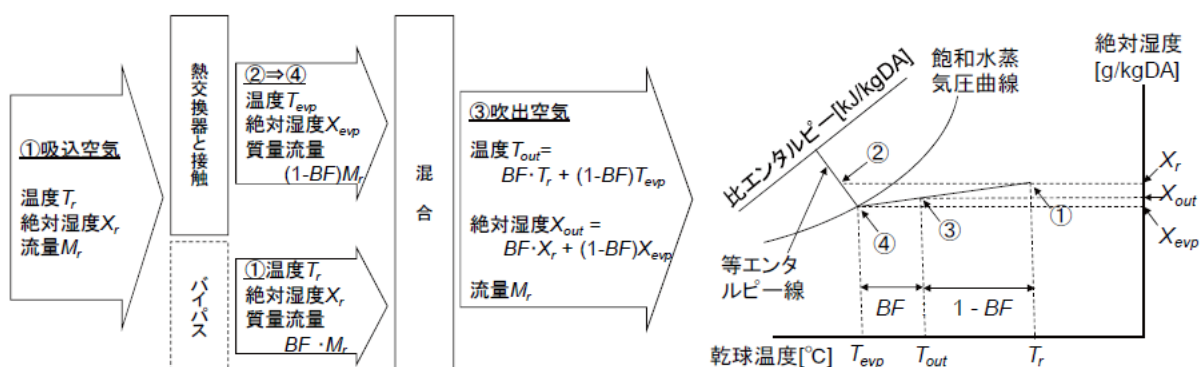


図 3.6 室内空気の状態推移フローと空気線図(結露あり)[16]

3.4.3 冷媒凝縮温度

冷房時には、冷媒は室外機熱交換器内にて熱を吐き出すため、蒸気から液体へと相変化する。よって外気から室外機に吸い込まれた空気は熱を受け取り、温度が上昇するため室内機の場合と異なり、結露が生じることはない。そのため、冷媒蒸発温度の結露が生じない場合と同様の考え方をを用いる事によって冷媒凝縮温度を求める事が可能である。熱交換器と接する空気 M_{cnd} [kgDA/s]および、素通りする空気の量 $M_{through}$ [kgDA/s]は以下の式で表される。

$$M_{cnd} = (1 - BF) \cdot M_o \quad (3.12)$$

$$M_{through} = BF \cdot M_o \quad (3.13)$$

M_o : 室外機の吸込口に入る空気の量(吹出口から出る空気の量)

冷媒蒸発温度の場合と同様に、冷媒凝縮温度と熱交換器の表面温度が等しいと仮定する。室外機側では、冷房能力 Q とエアコン自体の消費電力 P の分の潜熱を冷媒に加えるため、冷媒凝縮温度 T_{cnd} は、

$$(3.14)$$

となる。消費電力の値は式(3.2)から求める事が出来るが冷媒凝縮温度 T_{cnd} が変化すると、COPの値が変化し、それに伴って消費電力の値も変化してしまう。そこで、収束計算を行って熱交換器

と接触して熱平衡状態になる空気の状態を求めなければならない。図 3.7 に室外空気の状態推移フローと空気線図を示す。図に示すように外気から吸い込まれた空気①はその一部②が熱交換器と接触し空気温度が上昇する。その後、熱交換機と接触しなかった室内空気と混合し、結果として混合空気③が外気に吹き出される。

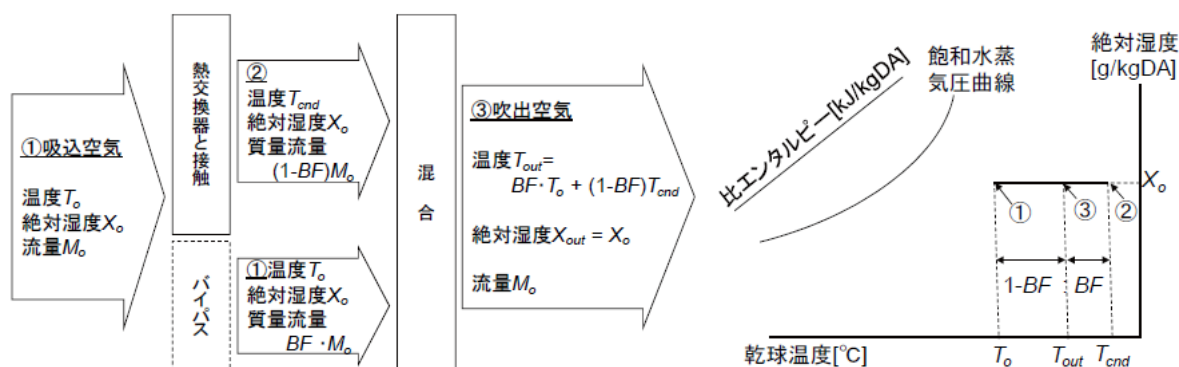


図 3.7 室外空気の状態推移フローと空気線図[16]

3.4.4 機器固有パラメータの決定

機器固有パラメータ($R \cdot P_c$)の決定手順は以下の通りである。

- 1) メーカーから公表されている機器の最小条件と定格条件の 2 つの条件を用いて、最小条件と定格条件における R と P_c を決定する。
- 2) 1) で求めた P_c を、最大条件でも等しいと仮定して最大条件における R を求める。
- 3) 最小条件・定格条件・最大条件における冷房能力 [kW] と R の関係を二次式で近似し、 R を冷房能力(部分負荷率)の関数として求める。 P_c は冷房能力によらず一定とする。

以上のような手順によって求めた P_c と R の値は図 3.8 のようになる。 P_c の値は冷房能力によらず一定であり、 R の値は定格条件と最小条件の間において最大となる。このような手順を踏む事によって、現行機種公表数値を用いて機器固有パラメータを決定する事が可能となる。また、表 3.5 に示すとおり、様々な運転条件における冷媒蒸発温度・冷媒凝縮温度・理論効率などを算出し、COP や消費電力を推定する事が可能となる。

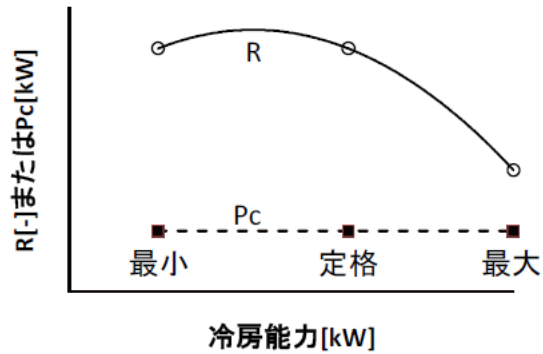


図 3.8 冷房能力と機器固有パラメータの関係[16]

表 3.5 CADIEE モデルの入出力項目[16]

入力項目		モデル内部	出力項目
空気温熱 環境条件	室温	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷凍機の理論効率に対する冷凍機の実際の効率の比 R 	COP
	室内空気相対/絶対湿度		消費電力
	外気温		潜熱処理量
	室外空気相対/絶対湿度		冷媒蒸発温度
機器の条件	室内機風量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補機の消費電力 P_c 	冷媒凝縮温度
	室外機風量		室内機吹出空気温度
	室内機熱交換器 バイパスファクタ		室内機吹出空気 相対/絶対湿度
	室外機熱交換器 バイパスファクタ		室外機吹出空気温度
熱負荷条件	全熱負荷		室外機吹出空気 相対/絶対湿度

3.5 温熱指標[22]

一般的に温熱環境評価を行う場合の諸量の関連を図 3.9 に示す。温熱的快適性や温冷感などの人間の温熱感覚を左右するのは熱収支量と、それによって決まる平均皮膚温および皮膚ぬれ面積率である。定常状態では、熱収支量は 0 となり熱的平衡状態を保っている。この熱交換プロセスには、環境側の要素である気温・平均放射温度・風速・相対湿度と、人間側の要素である代謝量・着衣量が影響する。これらの要素を組み合わせることで変数を一般的に温熱指標と呼ぶ。我々は日常的には、気温を一つの指標として温熱環境に関する判断を行うが、実際には先の 6 つの要素が複合して人間の温熱感覚に作用するものであるから、考慮する温熱要素が多くなるほど精度が向上することが期待される。

温熱指標には幾つかの指標が存在するが、いずれの温熱指標も環境条件や人間条件などが特定の範囲内において導き出されたものである。したがって、それらと同様の条件下で使用する場合は最も適合性が良いと考えられる。一般室内環境に対する指標としては、予測平均温冷感申告・標準有効温度・作用温度などがあり、屋外環境に対する指標として不快指数 DI・風冷温度指数 WCT などがある。これらの指標を評価対象に対して適切に選択し評価を行う事が重要である。

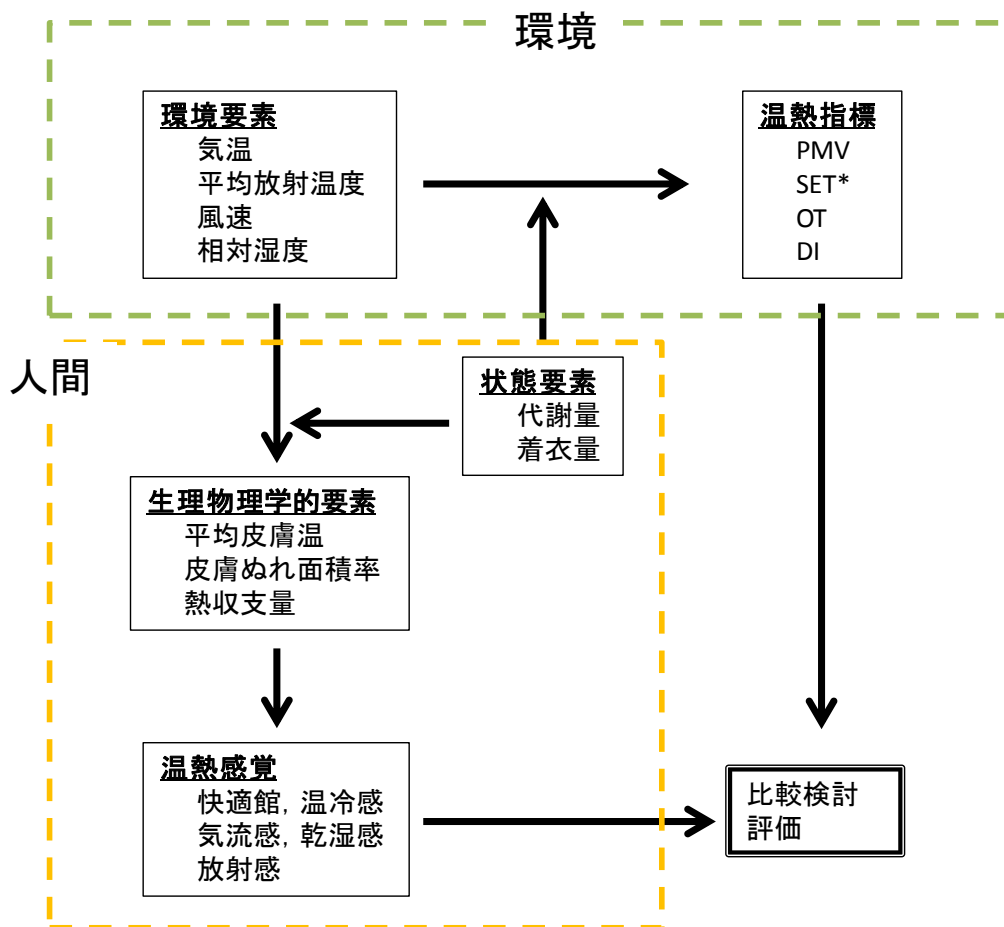


図 3.9 温熱環境評価概略図

3.5.1 予測平均温冷感申告(PMV)

本研究では、温熱環境の指標として PMV(Predicted Mean Vote) [22][23]を用いたため、その詳細を述べる。PMV は居住生活の場として使用されるオフィス、住宅などのように、気温が極端に高くも低くもなく、比較的均一で温和な環境を対象とする指標である。1967年にデンマーク工科大学のファンガー教授は快適方程式の導出を発表し、これをもとに人体の熱負荷と人間の温冷感もとした温熱環境評価指数 PMV および PPD(予測不満足率: Predicted Percentage of Dissatisfied)が提案された。PMV は以下の式で導出される。

$$PMV = f(M) \times L$$
$$f(M) = \{0.303 \exp(-0.036M) + 0.028\} \quad (3.15)$$
$$L = M - (C + R + E) - (C_{res} + E_{res})$$

f(M): 関係係数 M: 代謝量 [W/m²] L: 人体の熱負荷 [W/m²]

C・R・E: 皮膚表面を通しての放熱量(C:対流, R:放射, E:蒸汗)

C_{res}・E_{res}: 呼吸による放熱量(C_{res}:顕熱, E_{res}:潜熱)

L は人体の熱負荷であり、快適時における平均皮膚温および発汗蒸発放熱量をいじしているものとして求められる皮膚表面を通しての放熱量および呼吸による放熱量を代謝熱生産量から引いた差として与えられる。PMV は表 3.6 に示すように-3 から 3 の値を取るものであり、-3 に近くなるほど寒くて不快、3 に近くなるほど暑くて不快であることを示す。PMV は、多数の在室者の平均的な温冷感を表すものであるため、PMV=0 となる環境条件においても全ての人が温熱的に満足する訳ではないことに注意が必要である。ファンガーは被験者実験において温冷感-1, 0, +1 以外を申告した人の不満足率として、PPD という指標を導いた。PPD と PMV の関係式は以下の式で表される。

$$PPD = 100 - 95 \exp \left\{ - \left(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2 \right) \right\} \quad (3.16)$$

生活において最も頻度の高い身体活動である「いす座作業におけるエネルギー消費量」を基本単位として以下のように定義された。

$$1 \text{ met} = 50 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 58.2 \text{ W}/\text{m}^2$$

各身体活動と代謝量の関係を表 3.8 に示す。代謝率は標準的な体表面積として 1.7 m^2 のヒトを想定して計算されている。表 3.8 を参考に、イスに座って簡易作業をしている状態(1.2 met)を家庭におけるヒトの代謝量として採用した。

表 3.7 PMV 算出に用いた各数値

平均風速	0.15 m/s
着衣量	冷房時:0.35 clo 暖房時 : 0.85 clo
代謝量	1.2 met

表 3.8 身体活動と代謝量の関係

	代謝率 [W]	[met]
安静時・睡眠時	70	0.7
休息 いす座	75	0.8
休息 立位	120	1.2
事務所 いす座読書	95	1.0
いす座ファイル整理	135	1.2
歩行 時速 3.2 km/h	195	2.0
料理	160~195	1.6~2.0

4 実験住宅 COMMA ハウス実験

4.1 実験概要

家庭用エアコンを用いて、室内の温熱環境を変化させる場合、住宅構造やエアコンの能力等の影響を受けて、室内に温熱環境のムラが生じる。冷房時には、エアコン室内機から供給される冷熱は室内の空気よりも軽いため、上方向へと移動させるには人為的に空気の流れを作る必要がある。特に、COMMAハウスのリビングは吹き抜け構造となっており、ある一定以上の高さにおいて、エアコン室内機による冷熱供給が及ばない空間が存在する事が予想される。また、暖房時においては、エアコンから供給される空気は室内空気よりも暖かいため軽く、上方向へと移動する事が予想される。また、エアコン室内機の位置からの距離によっても温度のムラが生じる。一方で、通常熱負荷計算において室内環境は質点として模擬し、熱平衡の方程式を解くため、現実に生じる温度分布を考慮する事が難しくなっている。よって、エアコンの運転を変化させた場合のエアコン消費電力の変化とエアコン使用者の快適性の変化を評価するという本研究の目的を考えた場合、エアコンによる熱供給が及ぶ室内の範囲や、人が感じる高さにおける室温等を把握する必要があると言える。そこで、COMMAハウスにおいて実際にエアコンを運転させ、実現された室内温熱環境と消費電力の関係を明らかにし、適宜シミュレーションにフィードバックを行う事で、目的に合致したシミュレーション精度の向上を目指す。

4.1.1 熱電対

本研究では、室温の測定に熱電対を用いた。熱電対は異なる二種の金属を接合し、それぞれの熱電能の違いから2つの接合点に温度に応じた電圧が発生し一定の方向に流れる電流を測定することを利用した温度センサである。素線径 0.32 mm の T 型(銅-コンスタンタン)熱電対を使用している。図 4.1 に熱電対の配置図を示す。リビングの南東の角を原点位置に設定した。星印の位置にエアコンが設置されている。各熱電対の座標に関するデータを表 4.1 に示す。各熱電対設置位置に対して、高さ方向に複数の測定点があり、LDK 南端～LDK 南から 4 までの位置が吹き抜け部にあたり、LDK 北から 4～LDK 北端はキッチンの測定点となる。そのため、吹き抜け部位の高さ方向の測定点はキッチン部位の測定よりも多くなっている。また○○○○○○から○○○○○○○にかけては、南側の大きな掃き出し窓からの直射日光の影響を避けるためにアルミホイルを用いて直射日光をさえぎっている。このように、リビング内の多数の測定点における室温を計測することによって、詳細な室内温熱分布を把握することが可能となる。測定時間間隔は 1 分であり、電力データ(1 分値)と併せて詳細なデータを得る事が可能である。

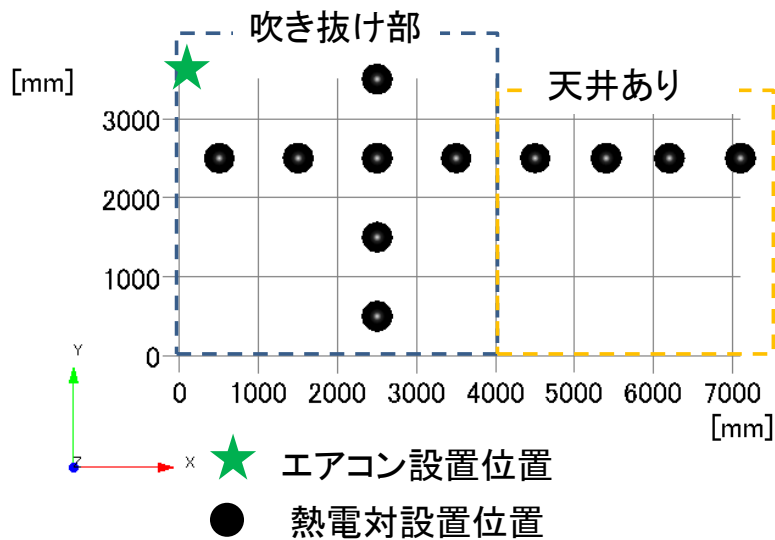


図 4.1 熱伝対設置図

表 4.1 熱伝対座標データ

名前	X 座標 [mm]	Y 座標 [mm]	Z 座標 [mm]	測定点数
LDK 南端	500	2500	0-5470	12
LDK 南から 2	1500	2500	0-5720	12
LDK 中央東	2500	500	0-5970	13
LDK 中央東から 2	2500	1500	0-5970	13
LDK 中央	2500	2500	0-5970	13
LDK 中央西	2500	3500	0-5970	13
LDK 南から 4	3500	2500	0-6220	13
LDK 北から 4	4500	2500	0-2300	6
LDK 北から 3	5400	2500	0-2300	6
LDK 北から 2	6200	2500	0-2300	6
LDK 北端	7100	2500	0-2300	6

4.2 冷房時室温分布

4.2.1 空間室温分布

まず初めに、表 4.1 に示した全ての測定点を用いて室内の温熱分布に関する評価を行う。これによって主に高さ方向においてエアコンの冷熱供給の影響が及ばない範囲を明らかにする事を目的とする。代表する 2 日間の運転時間・エアコン設定温度を表 4.2 に、同 2 日間の外気温と室温を図 4.2 に示す。室温の代表値として、LDK 中央の高さ 1100 mm において測定された値を用いた。7 月 28 日の室温の推移を見てみると、エアコンを 11 時に運転開始しているが、設定温度が 22 °C とひくいため室温が安定する時間は外気温が下がる夕方以降となっている。一方、8 月

12日にはエアコンの運転を夜中の0時に開始し、設定温度は26℃と高い値であるため、日中に少し上昇している様子は見取れるものの、1日を通して室温が安定している。このように室温が安定している状態および室温が下がりきらず安定していない状態における室温の分布を把握するため、2日間の14時における室温の分布を図4.3に示す。2日間ともに、吹き抜け部の熱電対設置位置(LDK南端・LDK南から2・LDK中央東・LDK中央東から2・LDK中央・LDK中央西・LDK南から4)においてある一定の高さより高い空間で急激に室温が上昇している様子が見取れる。それぞれの吹き抜け部の温度は、エアコン設定温度22℃の場合30℃前後、エアコン設定温度26℃の場合28℃前後となった。これは、エアコンによる冷熱供給の影響を受けているのではなく、外気温・日射等の影響を受けているものと判断できる。吹き抜け部における室温の変化はいずれも共通して、2900mmの高さを境として生じた。これはリビングにおけるエアコン設置高さが〇〇〇〇〇である事からも妥当であると判断できる。この結果から吹き抜け部における2900mmを超える高さの空間における熱負荷をエアコンでは処理する事が不可能であると判断できる。これにより以下のような事をシミュレーション条件に反映させる事によって熱負荷計算シミュレーションにおける消費電力の精度向上を実現する。

・COMMAハウスリビングにおける熱負荷シミュレーションにおいて、エアコンが冷熱供給を行う質点に吹き抜け部位(2900mmを超える高さ)は含めないこととする。

表 4.2 運転時間とエアコン設定温度

実験日	運転時間	設定温度
2012年7月28日	11h-23h	22℃
2012年8月12日	0h-24h	26℃

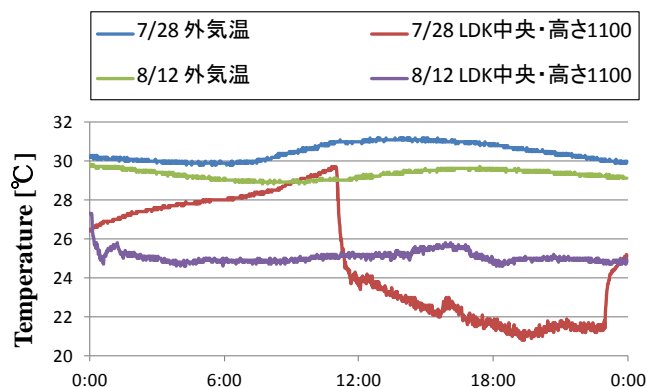


図 4.2 7月28日・8月12日14時における外気温と室温

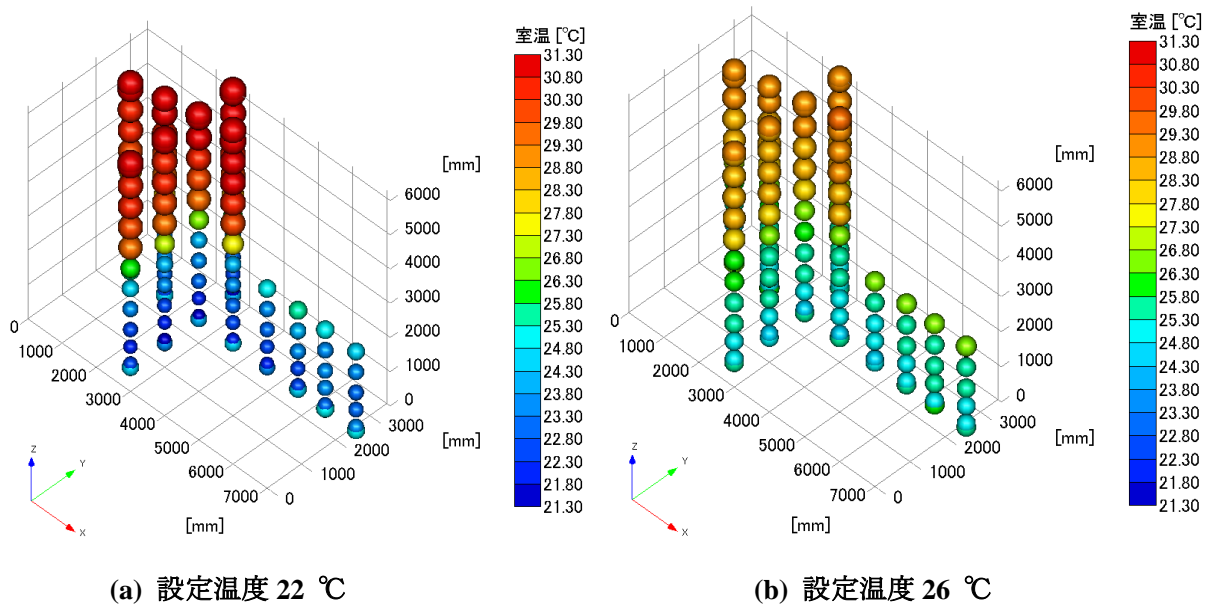


図 4.3 7月28日・8月12日14時における室温分布図

4.2.2 平面室温分布

次に、高さ一定な平面における室温の分布に関して評価を行う。図 4.2 図 4.3 に示したものと同時刻である、7月28日・8月12日の14時における高さ1100 mmの平面における室温の分布を図 4.4 に示す。これはヒトが日常生活において最も影響を受ける高さにおける室温の分布をみることを目的としている。どちらの時刻においてもエアコンの位置から離れるほど室温が高くなっている様子が見て取れる。エアコン設定温度が22 °Cと低い場合には、エアコン設定温度が26 °Cの場合と比較して室温の差が大きくなっている。それでも、室内における室温の最大値と最小値の差は1 °C未満に抑えられている。高草木は、室内におけるPMVのばらつきが大きくなるほど居住者が感じる不満足度が大きくなる傾向があるが、その変化は非常に小さなものであり、室内の温熱環境のばらつきを抑える事よりも、平均値の値を快適なものに保つことの重要性に関して報告している[25]。

本研究では熱負荷計算シミュレーションにおいて、室内を1つの質点として扱うため、室内の温熱環境の分布を模擬する事が不可能であるが、COMMAハウスにおける実測結果から人の居住休館である高さにおける室温のばらつきが小さいことや、上記報告により温熱環境のばらつきが不満足度に与える影響は小さいことから、熱負荷計算によって計算される居住者の快適性は実態と大きな乖離がないものとして扱う事ができる物と言える。

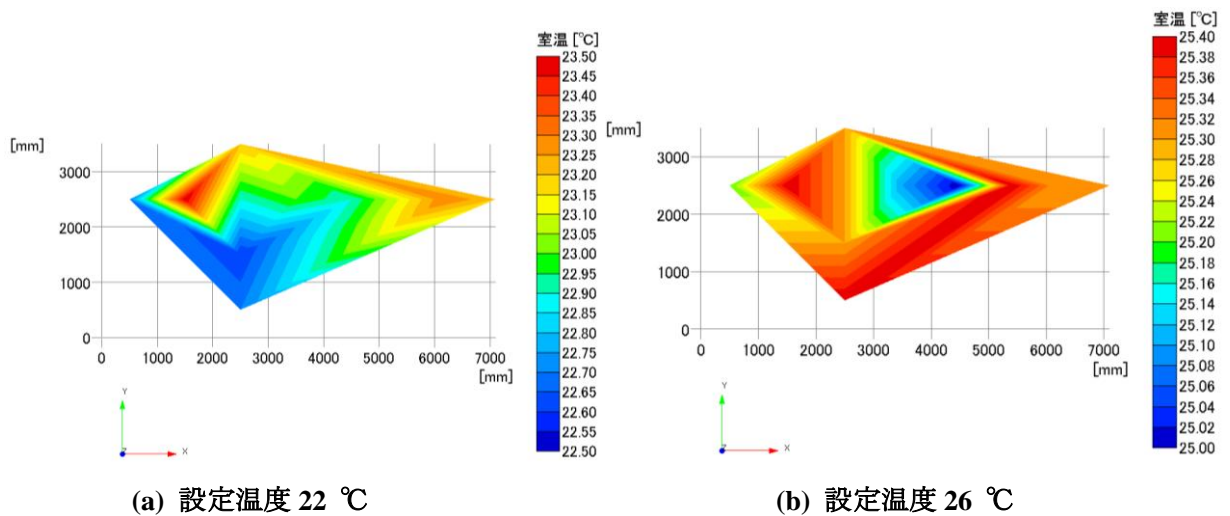


図 4.4 高さ 1100 mm での室内温度分布

4.2.3 空間平均室温と人体感知高さにおける平均室温

ヒトが感じる空気温度は高さ 1100 mm 付近のものであり、それ以上の高さの空気温度は感じる事が出来ない。そこで、エアコンの冷熱供給がおよぶ高さ(2900 mm)までの平均室温と 1100 mm における平均室温との比較を行う。この二つの平均室温について以下のように定める。

- ・リビング平均室温: 熱電対設置位置[LDK 南から 2・LDK 中央・LDK 南から 4・LDK 北から 4・LDK 北から 3・LDK 北から 2]における高さ 2900 mm までの平均室温
- ・リビング 1100 平均室温: 熱電対設置位置[LDK 南から 2・LDK 中央・LDK 南から 4・LDK 北から 4・LDK 北から 3・LDK 北から 2]における高さ 1100 mm の平均室温

COMMA ハウスリビング内を南北に 8 つの測定点があるが、端の 2 点(LDK 南端・LDK 北端)は窓からの放射熱等の影響により非定常状態となる可能性がある事を考慮し、平均室温を求め際には用いないこととした。リビング平均室温とリビング 1100 平均室温の関係を図 4.5 に示す。それぞれの室温の値はエアコン運転開始後または、設定温度変更後 1 時間が経過したのちの室温が安定した時間帯における値を用いている。図に示すように、リビング平均室温と比べるとリビング 1100 平均室温はわずかに低い値を取る事が分かる。本来であればこの結果から得られた 1 次関数を用いて、シミュレーションによって得られた室温を補正して、ヒトが感じる室温の値として用いるべきである。しかし、以下の理由から本研究ではシミュレーションによって得られた室温の値を居住者の快適性を評価する際にそのまま用いることとする。

・家庭における平均的なエアコン設定温度(26 °C 前後)における、リビング平均室温とリビング 1100 平均室温の差は 0.5 °C 以下と小さいこと。

・室内全体の平均室温は、人の居住範囲の高さにおける平均室温よりも高いため、全体の平均室温を用いて快適であると判断できれば、人の居住範囲の高さにおける平均室温を用いた場合で

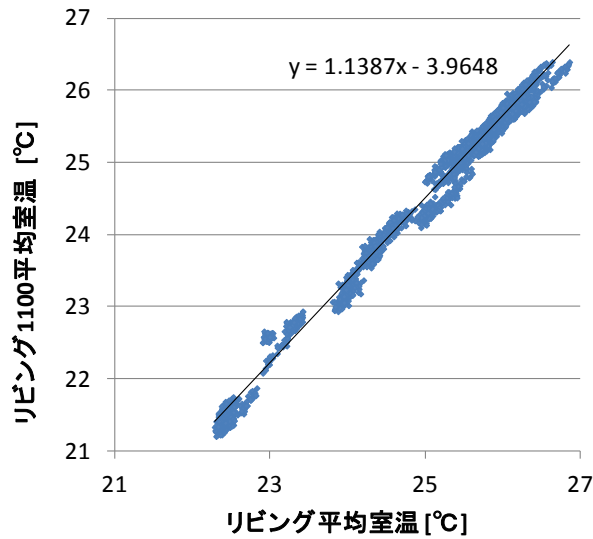


図 4.5 室温の比較

も快適な範囲に収まっていると考えられるから。

・エアコンの運転を変化させた場合の快適性の評価は、基準ケースを想定しそれとの比較による相対的評価を行うため。

4.2.4 冷房時における実測値とシミュレーション結果の比較

CADIEE を用いた熱負荷シミュレーションによって、居住者の快適性とエアコンの消費電力の関係を精度よく評価できるようにするため、通常の住宅構造・エアコン能力の設定に加え、COMMA ハウスにおける実測から得られた以下のような結果をシミュレーション条件に反映させた上で、その結果の比較を行う。

・吹き抜け部において 2900 mm 以上の高さには、エアコンの冷熱供給による影響が及ばないため、シミュレーションにおいてエアコンが熱供給を行う質点の体積を調整する。また、同時にキッチン等の躯体構造を考慮して体積の調整を行う。

以上のように条件を設定した上で、実測されたリビング平均室温・エアコン消費電力とシミュレーションから得られたリビング室温・エアコン消費電力の比較を行う。実験は 2012 年 7 月 25 日に行い、実験におけるエアコンの設定温度は表 4.3 に示すとおりである。シミュレーションでは熱電対を用いて計測された室温の平均値をエアコン設定温度として用いている。得られた室温とエアコン消費電力に関する、実測値とシミュレーション結果を図 4.6 に示す。

表 4.3 実験におけるエアコン設定温度

時間	8:00-13:00	13:00-16:00	16:00-23:00
エアコン設定温度 [°C]	22	28	26

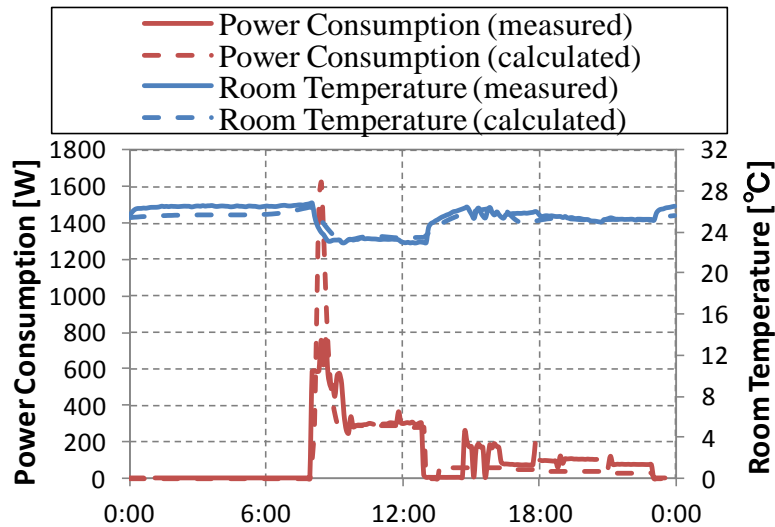


図 4.6 消費電力と室温の比較

結果をみるとエアコン運転開始後・エアコンの設定温度変更後の室温の推移および、消費電力の値とともに精度よく計算されている様子が分かる。しかし、以下に示す2点に関して実測値とシミュレーション結果が異なっている。

1. 8時の運転開始直後におけるエアコン消費電力

2. 13時のエアコン設定温度変更後における室温とエアコン消費電力

1に関しては、シミュレーションの方が実測値と比較して大きな消費電力 [W]の値となっているように思える。CADIEE では、エアコンの熱源特性と PID 制御を用いて簡易的に模擬しているため、ある一定の負荷以上の処理を行う場合は最大出力にて運転するような傾向がある。これに対して、実際のエアコンではエアコンの出力を段階的に変化させるようなロジックが用いられていると推察される。しかし、エアコン運転開始後室温が安定するまでの消費電力量 [kWh]を比較すると、実測値：0.81 kWh, シミュレーション値：0.97 kWh と同程度の値となっている。また、2に関しては、実測においては断続運転(エアコンが on/off を短周期で繰り返す)が確認された。他の実験日における結果から、設定温度を低い値から高い値に変化させた場合に断続運転が行われるという傾向が見て取れた。シミュレーションにおいて断続運転の様子を模擬する事が不可能であるが、断続運転中の平均室温・平均消費電力を評価していると考えた事により、消費電力と快適性の関係に関する評価を行うという本研究の目的においては、大きな影響がないものとして扱う事が出来る。

4.3 暖房時室温分布

4.3.1 空間室温分布

冷房時と同様に室内全体の温熱分布に関して評価を行う。代表する2日間の運転時間・エアコン設定温度を表4.4に、同2日間の外気温と室温を図4.7に示す。室温の代表値として、LDK中央の高さ1100mmにおいて測定された値を用いた。12月18日の室温の推移を見てみると、エアコンを6時に運転開始しているが、室温は1日を通して安定している。これに対して12月24日は18日よりも外気温度が低い設定温度が22℃の時間は18日と同様の室温となっている。設定温度が26℃の時間帯では高さ1100mmにおける室温は26℃まであがりきらず、約25℃となっている。以上のような異なる設定温度における室温の分布に関して評価を行うため、18日14時・24日12時50分における室温の分布を図4.8に示す。冷房の場合と異なり、エアコンから温熱が供給されるため供給された熱は上方向に移動する。そのため、高さ方向の温度差は冷

表 4.4 運転時間と設定温度

実験日	運転時間	設定温度 [°C]
2012年12月18日	6h-24h	22
2012年12月24日	6h-9h	22
	12h-13h	26
	18h-24h	22

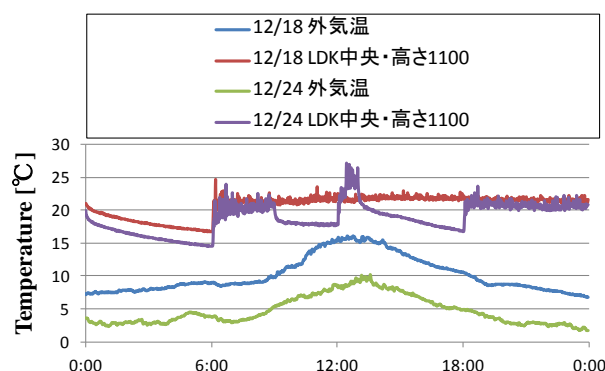


図 4.7 外気温と室温

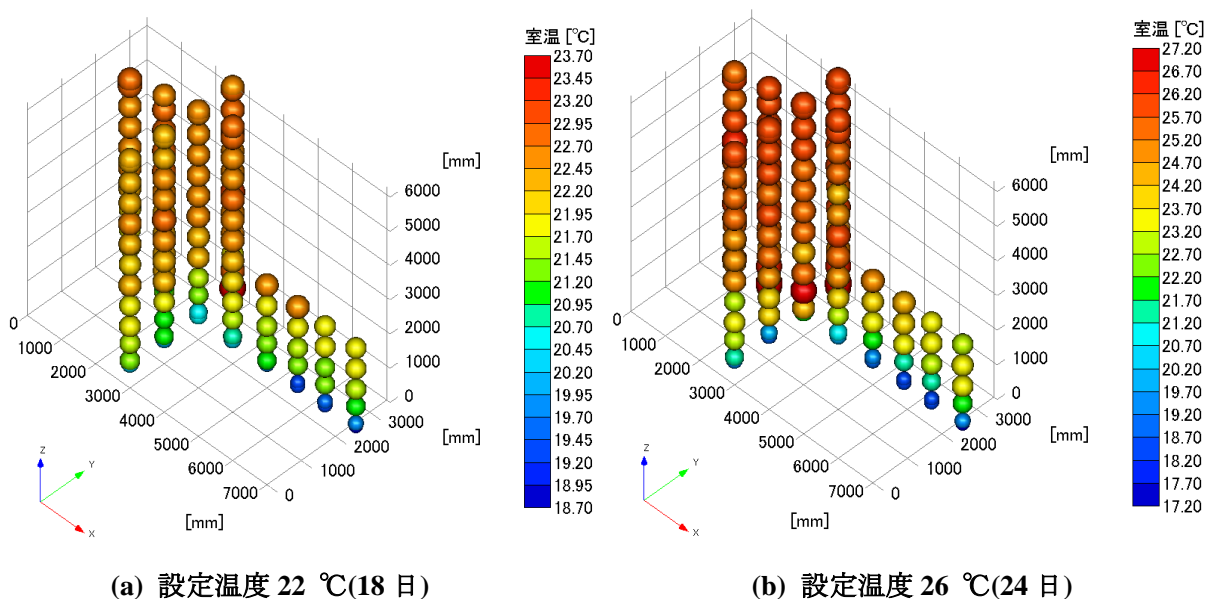


図 4.8 12月18日(14h)・12月24日(12h50min)の室温分布図

房の場合と比較して大きくなり、設定温度 22 °C において約 3 °C、設定温度 26 °C において約 4 °C となった。このような室温分布となるため、冷房の場合とは異なりエアコンが供給した熱量は特に吹き抜け部に移動している。そのため、暖房時には以下の点をシミュレーション条件に反映させる事によって熱負荷計算シミュレーションにおける消費電力の精度向上を実現する。

- ・COMMA ハウスリビングにおける熱負荷シミュレーションにおいて、エアコンが温熱供給を行う質点に吹き抜け部位(2900 mm を超える高さ)を含めることとする。

4.3.2 平面室温分布

次に、高さ一定な平面における室温の分布に関して評価を行う。図 4.7 図 4.8 に示したものと同時刻の、高さ 1100 mm の平面における室温の分布を図 4.9 に示す。これはヒトが日常生活において最も影響を受ける高さにおける室温の分布をみることを目的としている。どちらの時刻においてもエアコンの位置から離れるほど室温が低くなっている様子が見て取れる。高さ方向の温度分布と比較すると室温の差は小さくなっている。特に、設定温度 22 °C の場合温度差は 1 °C 以下であるが、設定温度 26 °C においては、最大で約 2 °C の違いが生じている。設定温度 26 °C の場合は、1 時間以下の運転のためエアコンから離れた室内の室温を上昇させるに至らないことが大きな温度差の原因となっている。暖房においては、エアコンの使用により室内全体を均一に暖めることが難しいことが室温の分布から明らかとなった。

暖房の場合は、冷房の場合とは異なり室内の温度分布が大きいいため、室内を 1 点の質点として模擬したシミュレーションでは、現実の温熱分布との乖離が大きいといえる。居住者の快適性に関して詳細な評価を行うためには、室内の温熱分布を考慮したモデルを用いる必要があるが、本研究では、基準ケースと比較してエアコンの運転を変化させた場合の需給バランスへの貢献に関して相対的な評価を行うため、室内の温度分布は考慮しないこととする。

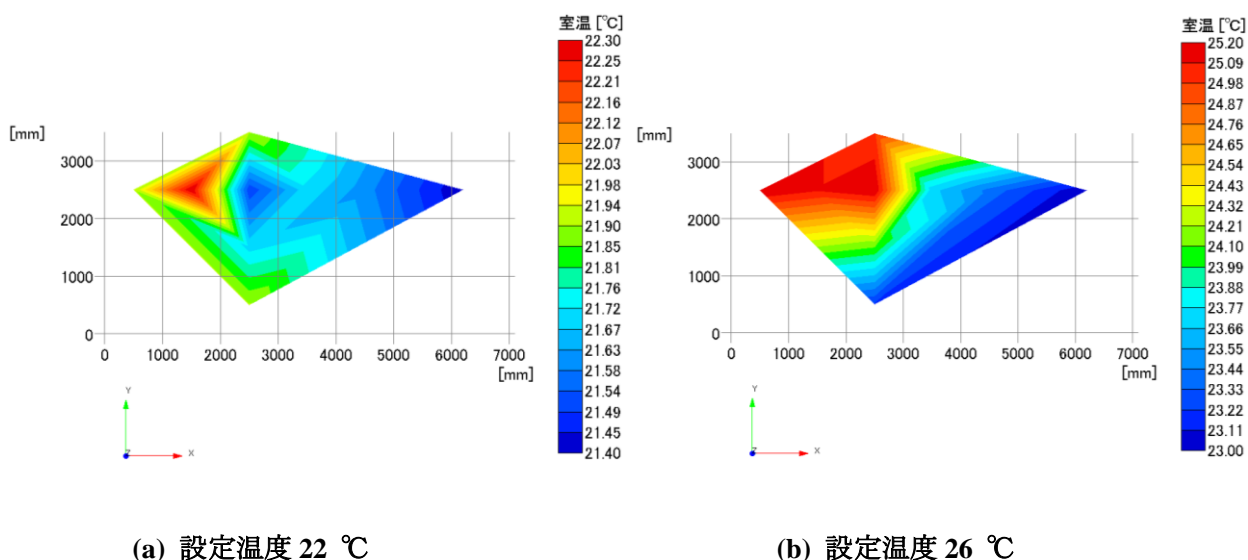


図 4.9 高さ 1100 mm での室内温度分布

4.3.3 空間平均室温と人体感知高さにおける平均室温

ヒトが感じる空気温度は高さ 1100 mm 付近のものであり、それ以上の高さの空気温度は感じる事が出来ない。そこで、エアコンの冷熱供給がおよぶ高さまでの平均室温(冷房時と異なり、リビング全体)と 1100 mm における平均室温との比較を行う。この二つの平均室温について以下のように定める。

- ・リビング平均室温: 熱電対設置位置[LDK 南から 2・LDK 中央・LDK 南から 4・LDK 北から 4・LDK 北から 3・LDK 北から 2]における全高さの平均室温
- ・リビング 1100 平均室温: 熱電対設置位置[LDK 南から 2・LDK 中央・LDK 南から 4・LDK 北から 4・LDK 北から 3・LDK 北から 2]における高さ 1100 mm の平均室温

12 月 18 日・24 日における上記 2 つの平均室温を図 4.10 に示す。図に示すように、エアコン停止時には 2 つの平均室温は等しい値となるが、エアコン運転時にはリビング平均室温の方が僅かに高い値となった。暖房時には冷房時と比較し、高さ方向に大きな温度差が生じるが、全体の平均室温と高さ 1100 mm における平均室温はほとんど変わらないことがわかった。これは、建築構造によって異なる傾向になると予想されるが、本研究では建築構造として COMMA ハウスを用い、COMMA ハウスが多数ある場合の評価を行うため、暖房時において以下のような仮定を用いることは現実に合致したものであると言える。

・現実に人が感じる室温(リビング 1100 平均室温)と室内全体の平均室温(リビング平均室温)は等しいとする

・シミュレーションにおいて計算される室温(室点 1 点の温度)は、その室内に居る居住者が感知する室温と等しいものとして扱う

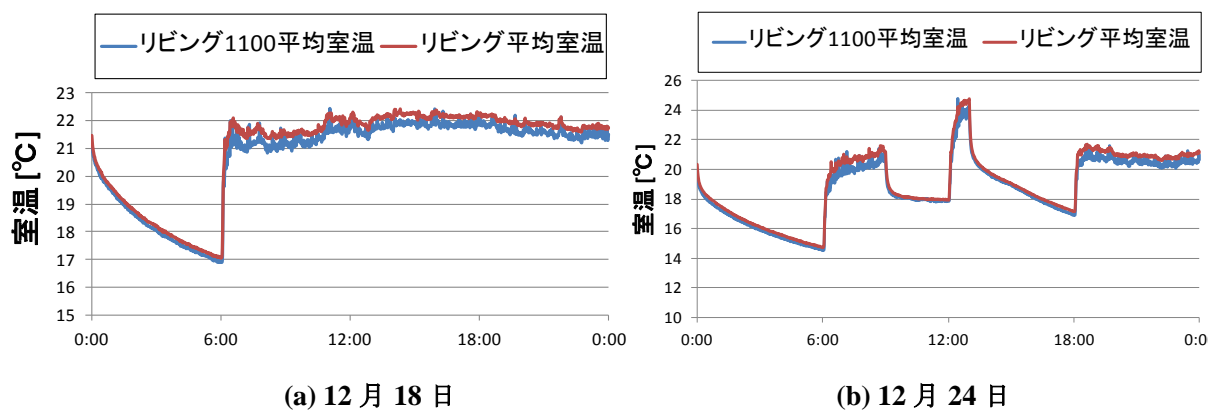


図 4.10 室温の比較

5 ピーク需要削減を目的としたエアコン運転方法

5.1 エアコン制御方針概要

初めにエアコンの制御方針について述べる。本研究では、東京電力管内において家庭のエアコンを制御したときに得られるメリットに関して定量的に評価を行う事を最終目的としている。そのため、東京電力管内の夏期・冬期需要を考慮しそれに合致した制御方法を考えた上で評価を行うことが必要となる。図 5.1 に 2010 年度の夏期・冬期における需要ピーク日(夏期：2010 年 7 月 23 日，冬期：2011 年 2 月 14 日)の電力需要を示す。図からわかるように、夏期においては外気温が最も高くなり、冷房需要が最大となる 14 時前後が需要最大となる。また、冬期においては日の入りによる照明需要や暖房需要の増加が要因となって夕方過ぎに需要が最大となる。図 5.2 に夏期におけるエアコン制御方針を示す。電力需要がピークとなる 14 時前後のエアコン消費電力を削減する事を第一の目的とする。それ以外の、電力需要がピークとならない時間帯は基本的に通常運転、つまり居住者が快適であると思うような運転を行うこととする。冬期においては電力需要が最大となる時間帯が夕方過ぎになるため夏期と比較するとエアコンの消費電力を削減したい時間帯は異なる。電力消費削減方法に関しては、以下にしめす 2 通りが考えられる。

- ・省エネ：電力消費削減時間帯にエアコンの設定温度を緩和(冷房時：高く，暖房時：低く)する。

- ・プレクーリング・プレヒーティング：電力消費削減時間帯の直前に通常より強く(冷房時：低く，暖房時：高く)運転させることにより、室内の温熱環境が通常に戻るまでの時間に消費電力削減を実現する。

省エネは単純に消費電力の削減を行うことになり、プレクーリングやプレヒーティングは電力消費が発生する時間帯をずらすこと、需要シフトを行うことになる。これら 2 つの要素を用いて、東京電力管内の需給バランスの維持に貢献するような制御を行った場合のメリットを、定量的に評価するとともに、そのような運転制御を行った場合に、需要家の快適性がどのように変化するかについて PMV を指標とした評価を行う。

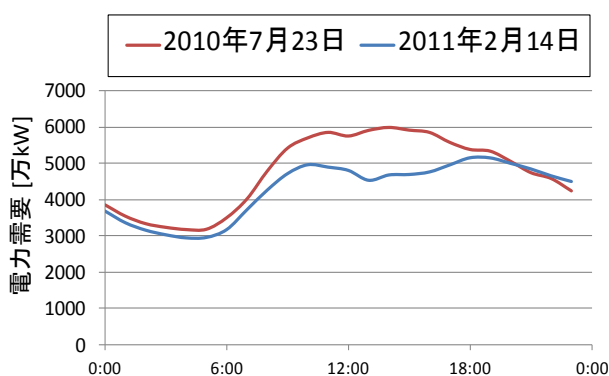


図 5.1 東京電力管内 2010 年度需要ピーク日

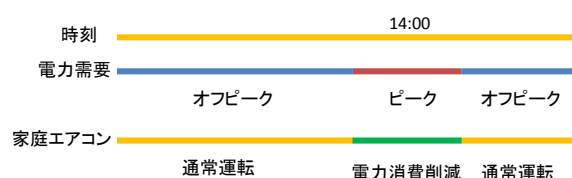


図 5.2 夏期エアコン制御方針

5.2 室温基準運転モデル

実際にエアコンの運転を変化させる場合、それが HEMS の機能によるものであっても、居住者がリモコンを用いて設定するものであっても、最も簡単な制御はエアコンの設定温度を変化させることである。また、シミュレーションにおいてもエアコンの設定温度を入力として与える事によって、その時刻における室温との偏差からエアコンの出力が決定され、結果的に室温や湿度などの室内の温熱環境が求められる。従って、最も基礎的な制御パターンとして室温によってエアコンの運転を制御するモデルを考える。前節で述べたような方針に従って、表 5.1 に示すような設定温度における評価を行う。基準ケースとして 8 時から 23 時まで設定温度 26 °C 一定で運転する場合を考える。これに対して、14 時前後の消費電力を削減するために 13 時から 16 時までの設定温度を 27 °C に変化させた場合を制御ケースとして用いる。また、13 時直前に室温を 23 °C まで冷やすプレクーリングの有無による評価を併せて行う。住宅構造として断熱性能が 2.34 W/m²・K である COMMA ハウスを用いた。消費電力量は、プレクーリングを行わない場合は基準ケースよりも減少したが、プレクーリングを行う場合は増加した。以上の設定温度で運転した場合の快適性に関する数値(室温・湿度・PMV)とエアコンの消費電力を図 5.3 に示す。この結果から得られた知見について以下に示す。

(1) 快適性 プレクーリングを行った場合、行わない場合と比較して設定温度を 1 °C 下げている時間帯の室温に差は見られないが、PMV の値が向上し、±0.5 の範囲内に収まっていることが分かる。これは、プレクーリングにより室温を低い値まで下げたことによって、エアコンによる除湿量が増加したためである。更に、16 時以降の、基準と同じ設定で運転する場合においても同様の理由から、PMV の値は向上している。

(2) 消費電力 設定温度を下げた直後においてプレクーリングを行った場合に、運転停止時間はプレクーリングなし: 6 min, プレクーリングあり: 42 min となった。これは、室内を冷やす

表 5.1 エアコンの設定と各ケースにおける消費電力量

	時間	エアコン設定温度 [°C]	消費電力量 [kWh]
基準ケース	8:00-23:00	26	3.63
制御 1 (プレクーリングなし)	8:00-13:00	26	3.46
	13:00-16:00	27	
	16:00-23:00	26	
制御 2 (プレクーリングあり)	8:00-23:00	26	4.31
	13 時直前	23	
	13:00-16:00	27	
	16:00-23:00	26	

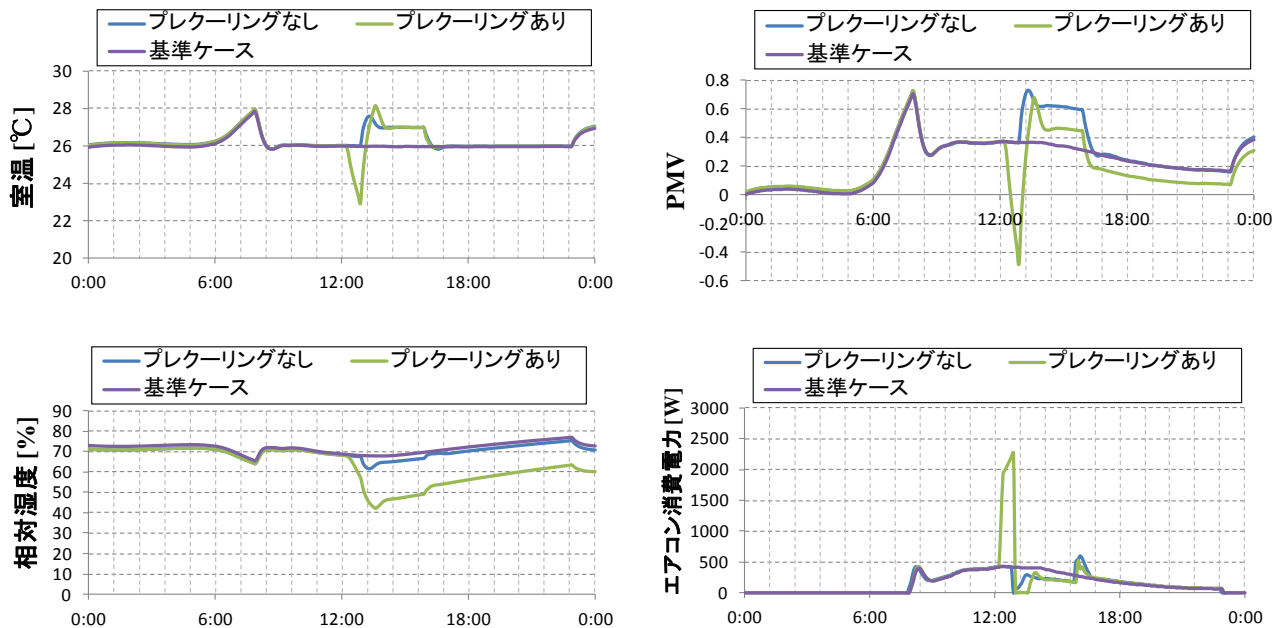


図 5.3 快適性に関する数値とエアコン消費電力

ことによって、室温が上昇するまでの時間が長くなり、エアコンの運転を停止できる時間が長くなった事によるものである。これにより停止時間帯は、基準ケースの消費電力約 400 W が削減可能となる。また、プレクーリングを行った場合、16 時以降の快適性が向上しているにもかかわらず、消費電力は変化していない事から、同様の快適性を実現する運転に、必要な消費電力は削減できる可能性があると言える。ただし、プレクーリングを行う事により、エアコンが処理する熱負荷が増大しているため消費電力量は増加してしまう。

つまり、13 時から 16 時の設定温度を 1 °C 緩和させることによってエアコンの消費電力を削減することが可能であるが、居住者の快適性は損なわれてしまう。これを、プレクーリングを行う事によって緩和させ、更にエアコンの運転を停止する時間が長くなるため、消費電力削減効果も増加するが、プレクーリングによる消費電力増加の影響が削減効果よりも大きくなってしまう。

5.3 PMV 基準運転モデル

前節で示したように、プレクーリングを行う事によって室内の湿度が変化するため、室温が等しい状態においても居住者の温熱環境に対する感覚は異なることがわかった。また、プレクーリングの有無によらず、エアコンの運転を変化させた場合、室温以外の湿度・平均放射温度等が居住者の温熱環境に与える影響は無視することができないほど大きいものと推察される。従って、前節の室温を基準としたシミュレーションモデルではなく、快適性指標である PMV を用いてエアコンの運転を変化させた場合の評価を行うことが、エアコンの消費電力と快適性の変化の関係を評価する際には重要であると考えられる。しかし、CADIEE では PMV 基準でエアコンの運転を変化させることはできないため、以下の図 5.4 に示すような手順を踏むことによって、PMV 基

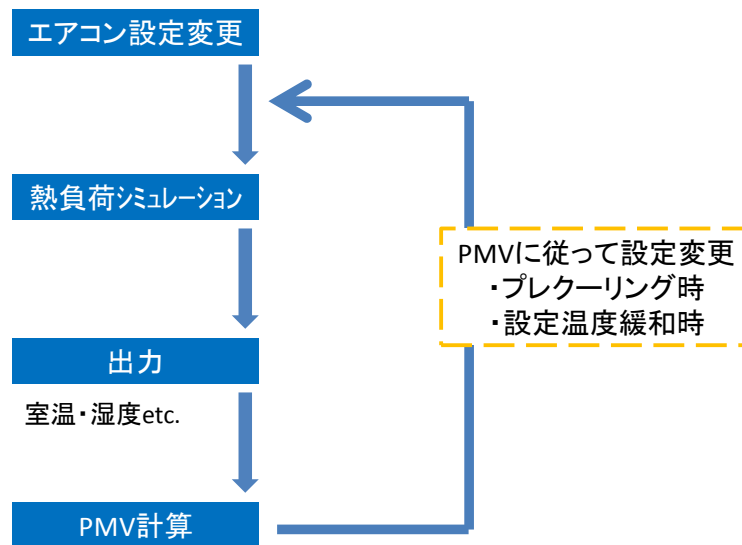


図 5.4 PMV 基準モデルの計算順序

準でエアコンを運転させた場合のシミュレーションを行う。ある設定に従って熱負荷シミュレーションを行い、得られた結果から PMV を計算する。その PMV の値と満たすべき条件を比較し、条件を満たさない場合は、条件を満たすようにエアコンの設定温度を変更させ再び熱負荷シミュレーションを行う。以下これを繰り返すことによって PMV を基準にエアコンを運転させた場合のエアコン消費電力等を求める。PMV 基準モデルによって計算した結果を図 5.5 に示す。前節の場合と同様に、8 時-23 時において設定温度 26 °C で運転する場合を基準ケースとし、13 時から 16 時のエアコン消費電力を削減することを目的とする。プレクーリングなしの場合は前節同様に、設定温度 27 °C に設定し、プレクーリングありの場合はプレクーリングなしの場合と同様の PMV の値となるような設定温度を用いた。その結果、プレクーリング後の室温はプレクーリングをしない場合と比較して高くなっているが、PMV の値は同様の値に保たれている。これによって、居住者にとって同様の温熱環境を保つためのエアコン消費電力を求めることが可能となる。また、図 5.6 に示すように 1 日の消費電力の値は室温基準モデルの場合と同様に、制御 1・基準ケース・制御 2 と大きくなっていくが、制御 2 の場合の値はプレクーリング後に低い設定温度で運転されるため、4.31 kWh から 4.06 kWh へと減少した。更に、13 時から 16 時における消費電力量に注目すると、制御 1・制御 2 の場合ともに基準ケースよりも減少している。特に、制御 2 の場合は制御 1 の場合と比較して約 4 割削減されている。これは、プレクーリングを行う事が、ある特定の時間帯において快適性を同等に保ちながら、電力消費量の削減に貢献することを示している。

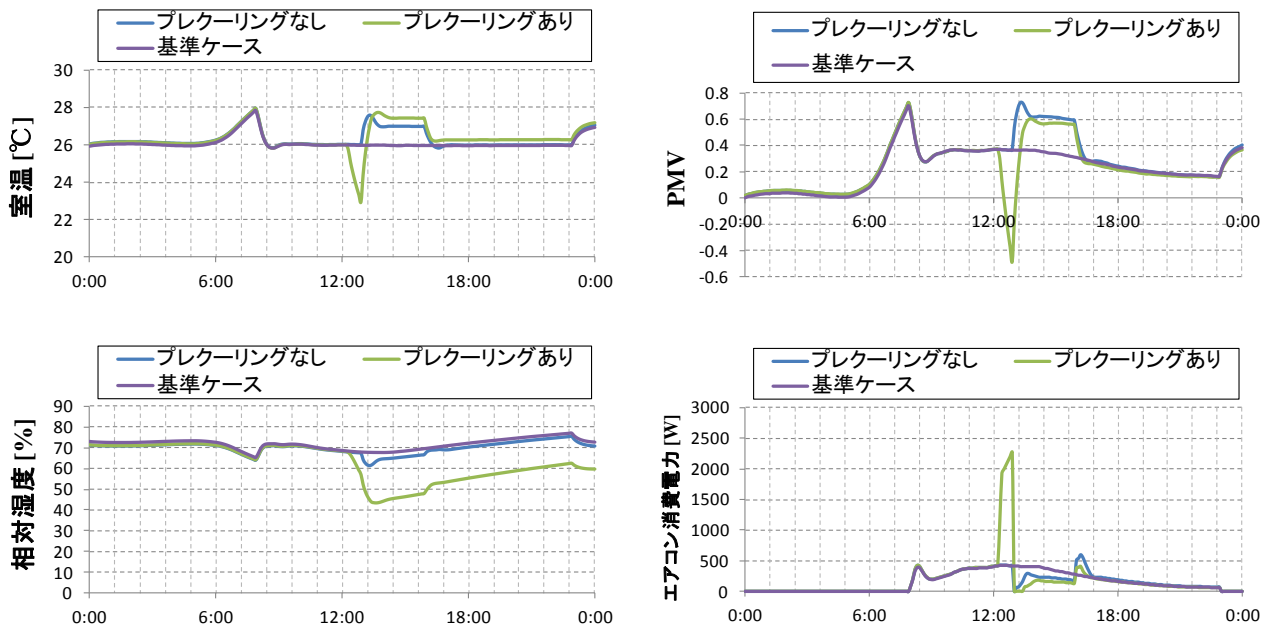


図 5.5 快適性に関する数値とエアコン消費電力(PMV 基準モデル)

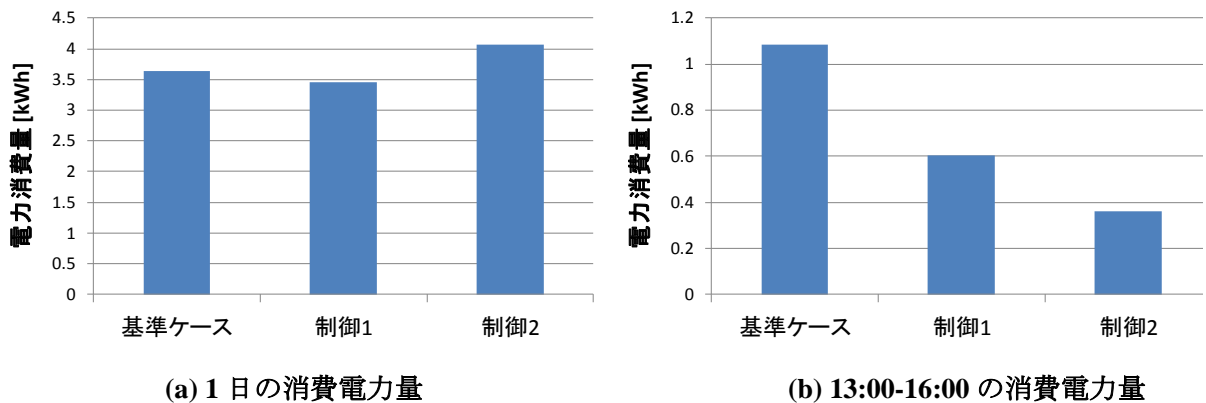


図 5.6 各運転ケースにおける消費電力量

5.4 暖房時の評価

5.4.1 運転開始時間

東京電力管内では、冬期の電力需要が最大となる時間が夕方であるため、暖房においては夕方の時間帯において家庭のエアコンを制御することに関する評価を行う。冬期の夕方には、日の入りによる気温低下や、帰宅などを理由にして夕方以降の暖房需要が増加する。そこで、18時にエアコン運転を開始する場合を基準として想定する。想定した運転ケースを表 5.2 に示す。18時に運転開始する場合を基準として、それよりも早い時間に運転開始するケースを 3 通り想定した。各運転ケースにおける室温と消費電力の変化を図 5.7 に、1 日のエアコンの消費電力量・処理熱

量・平均 COP(1 日の処理熱量/1 日の消費電力量)を表 5.3 に示す。

表 5.2 運転開始時間と設定温度

運転開始時間	設定温度 [°C]
17.5 時	22
17.7 時	
17.9 時	
18 時	

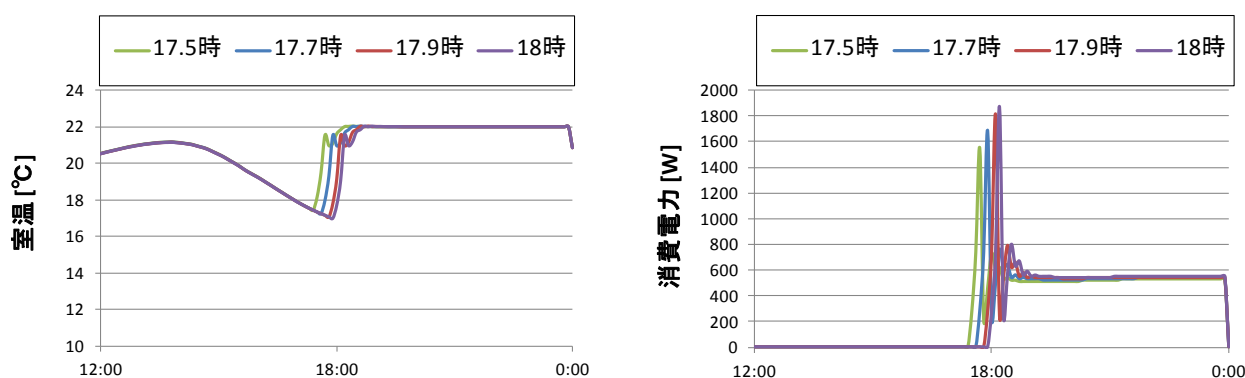


図 5.7 室温と消費電力

表 5.3 各運転ケースにおけるエアコンに関する数値

運転ケース	消費電力量 [kWh]	エアコン処理熱量 [kWh]	平均 COP
17.5 時	3.50	15.4	4.40
17.7 時	3.48	15.1	4.36
17.9 時	3.43	14.9	4.35
18 時	3.43	14.8	4.31

エアコン運転時間が長くなる(運転開始時間が早くなる)に従って、消費電力量は増加している。これは、運転時間が長くなることにより、エアコンが処理する熱量が増加するためである。運転開始時間が 17.9 時と 18 時を比較すると、エアコン処理熱量は 17.9 時に運転開始した場合の方が大きいにも関わらず、消費電力量は等しくなった。これは、表 5.3 に示すように平均 COP の値が向上しているからである。夕方以降の時間帯において室温は単調に低下しており、運転開始時間が遅くなるほど室温が低くなる。これによって、運転開始時のエアコン処理熱量が増大するため、その時間帯における COP が低下してしまうからである(外気温の変化もエアコンの COP に影響を与えている)。また、等しい理由から運転開始時間の消費電力 [W] の値は 18 時 : 1.8 kW, 17.5 時 : 1.55 kW と運転開始時間が早まるに従って低下する。このような、運転方法の変更を行った場合、室内が暖まる時

間が早まるだけであり、居住者の快適性に関して損失は生じていない。つまり、居住者の快適性を損なわないような運転方法の変化を用いることによって、消費電力量 [kWh]を大きく増加させることなく、ピークの値を削減するとともに、その時間帯をシフトさせることが可能であると言える。

5.4.2 需要ピーク時削減運転

東京電力管内の冬期需要ピークは 19 時前後に生じる。そこで、18 時から 21 時(以後消費削減時間)の消費電力を削減する事を目的としてエアコン運転方法を変化させた場合の評価を行う。各運転ケースにおける運転時間と設定温度を表 5.4 に示す。Case1 は基準ケースと比較し、消費削減時間における設定温度を 1 °C緩和させた。Case2 は、Case1 に加えて、18 時以前に室温を 24 °C になるように運転を開始させている。Case3 は 18 時直前の室温を 25 °C に設定したものである。このような運転ケースにおける快適性に関する数値(室温・PMV・相対湿度)と消費電力の結果を図 5.8 に示す。冷房時とは異なり、暖房時には室内機において空気中の水蒸気量が除去されることはない。そのため、エアコンの運転を変化させた場合でも同一の室温における相対湿度の値には変化が生じない。冷房時には室温を基準とした評価を行うのではなく、PMV を基準とした評価が重要であった。一方暖房時には、室温を基準とした評価により居住者の温熱環境に対する感覚を正確に評価できるものと考えられる。しかし、暖房時には冷房時と比較し室内の温度差が大きいため、室内全体の平均室温と居住者の感じる室温との誤差を考慮する必要があると考えられる。

各運転ケースにおける 1 日の消費電力量と 18 時から 21 時の消費電力量を図 5.9 に示す。基準ケースと比較すると全ての制御ケースにおいて消費電力量は削減出来ている。18 時前に運転開始させる Case2 と Case3 では、Case1 よりも消費電力量が増加している。しかし、運転時間を早めたことによって、18 時から 21 時における消費電力量は削減出来ている。この Case1 と比較した削減値は、Case2: 0.2 kWh, Case3: 0.25 kWh と 18 時直前の設定温度を高く設定する方が大きな削減が実現できている。

表 5.4 運転方法

	時間	エアコン設定温度[°C]
基準ケース	18h-24h	24
Case1	18h-21h	23
	21h-24h	24
Case2	18 時直前	24
	18h-21h	23
	21h-24h	24
Case3	18 時直前	25
	18h-21h	23
	21h-24h	24

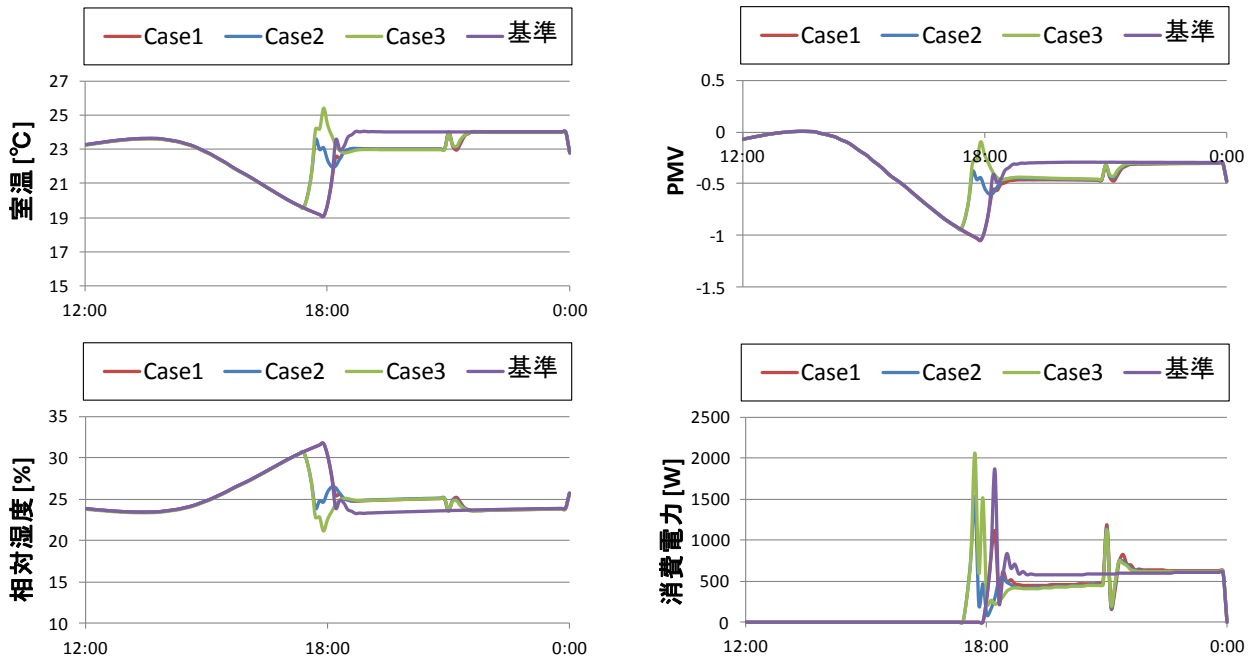
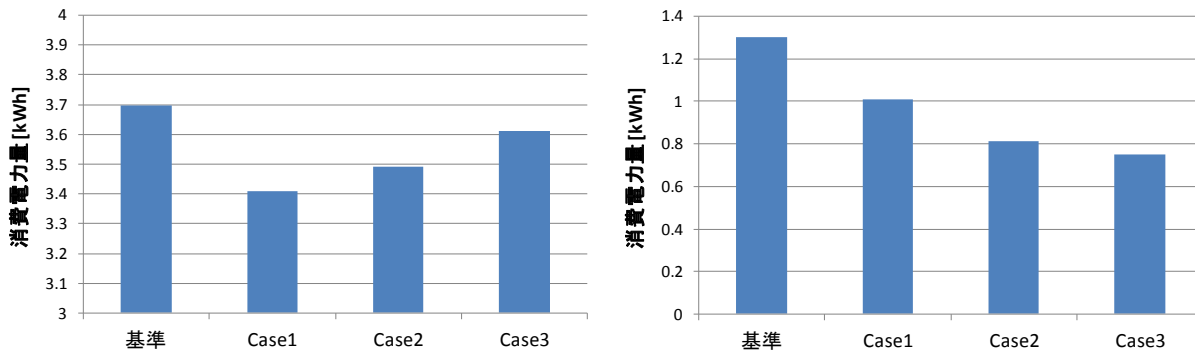


図 5.8 快適性に関する数値とエアコン消費電力



(a) 1日の消費電力量

(b) 18:00-21:00の消費電力量

図 5.9 各運転ケースにおける消費電力量

6 ピーク需要削減と経済性評価モデル

6.1 評価モデル概要

これまでエアコン1台を評価対象とし、エアコン利用者の快適性を考慮した範囲内においてエアコンの運転方法を変化させた場合の消費電力の変化に関してシミュレーションを行った。エアコンの運転を変化させると、室温以外の湿度や平均放射温度等に変化が生じ、それらが居住者の温熱環境に対する感覚に影響を与えるため、室温を基準として運転を行うのではなく、居住者が温熱環境に対して抱く感覚を反映された PMV を指標としてエアコンの消費電力等をシミュレーションするモデルを作成した。そのような制御を行う目的は、電力システムの需給バランスに貢献することであるが、エアコン1台の評価のみでは実際に電力システムに貢献することができることを定量的に示すことは不可能である。そこで、東京電力管内を評価対象とし多数の家庭における多数のエアコンの制御を行った場合に、電力システムに与える利益に関して評価を行う。

6.1.1 目的関数

目的関数を以下のように設定した。

$$\text{MAX}\{Load_t - \text{number} \times (P_{ref,t} - P_{con,t})\} \rightarrow \text{最小化} \quad (6.1)$$

$Load_t$: 東京電力管内基本需要 [万 kW] (夏期: 2010年7月23日, 冬期: 2011年2月14日)

number : 被制御エアコン台数 [万台]

$P_{ref,t}$: エアコン基準消費電力 [kW]

$P_{con,t}$: エアコン制御時消費電力 [kW]

基本需要として、東京電力管内の2010年度における夏期・冬期それぞれの需要最大日となった、2010年7月23日と2011年2月14日の実績値(図6.1)を用いた。 $P_{ref,t}$ はエアコンの運転制御を行わず、エアコン使用者が自由にエアコンを使用した場合の消費電力とする。それに対して、 $P_{con,t}$ の値は1日のピーク削減を目的としてエアコンの運転方法を基準ケースから変化させた場合の消費電力を表している。これら二つの値は、PMVを基準としたエアコン消費電力計算モデルを用いて求めた値を用いる。例えばある時刻 t における $P_{ref,t}$ の値が2kW、 $P_{con,t}$ の値が1kWであるとすれば、1台のエアコンあたり1kWの消費電力を削減することができる。これに被制御エアコン台数(number)をかけることによって複数台のエアコンを制御した場合に削減できる消費電力の値を求める。この値を基本需要($Load_t$)の値から引くことによって、エアコンを複数台制御した場合の時刻 t における東京電力管内の需要とする。これを1日の各時刻において求め、その最大値を最小にするように被制御エアコン台数(number)の値を決定することによって、ある制御パターンを複数のエアコンに適用した場合の、ピーク需要削減ポテンシャルを求めることになる。

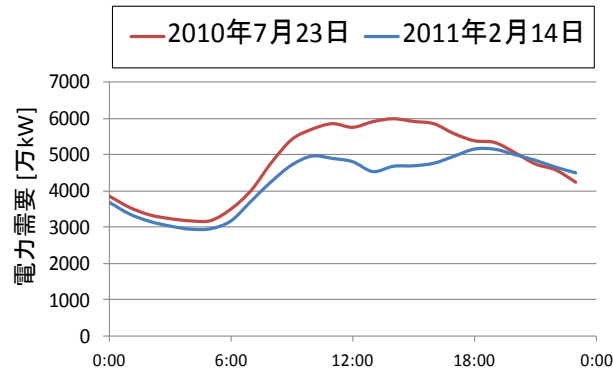


図 6.1 2010 年度の東京電力管内需要最大日の実績値

6.1.2 燃料費

本研究における燃料費の算出方法について述べる。燃料費は各時刻において算出し、その全時刻における和を計算することによって 1 日の燃料費とする。燃料費の計算には、東京電力管内のシステム負荷別の限界燃料費[26][27]を用いる。電力系統には、原子力・火力・水力・揚水などの各種発電設備があるが、ある時刻に生じた負荷に対して、電力会社は発電単価の安価な発電所から順に用いることによってその時刻の需給バランスを維持する。この時刻における需要に対して最も高い発電機の燃料費を、その需要に対する限界燃料費としている。限界燃料費は式(6.2)のように定式化され、図 6.2 のように表すことができる。揚水発電所の燃料費は、ベースおよびミドルベースの電源から揚水動力を供給することを想定し、揚水発電と個別に関係づけて揚水動力における燃料費を定義し、さらに揚水効率を適用して算出した。限界燃料費の定数の部分は原子力によるものを表している。このように、ある時刻における需要が大きくなるほどその時刻の限界燃料費は高くなることを示している。電力供給はこのような発電設備選択方法によって行われるため、ピークカットを行い、負荷平準化を実現することが燃料費の削減につながり、経済的メリットが生じることになる。この限界燃料費の値を用いると、ある時刻における需要に対する燃料費は式(6.3)で表される。結果として、1 日の燃料費は式(6.4)のようになる。

$$M(\text{load}) = \begin{cases} 0.731 \times \text{load} - 14.597 & (\text{load} \geq 22.544) \\ 1.883 & (\text{load} \leq 22.544) \end{cases} \quad (6.2)$$

$$FC_t = \int_0^{\text{load}} M(x) dx \times 10^6 \quad (6.3)$$

$$FC = \int_0^{24} FC_t dt \quad (6.4)$$

M: 限界燃料費[円/kWh], load:電力需要 [GW], FC: 燃料費 [円]

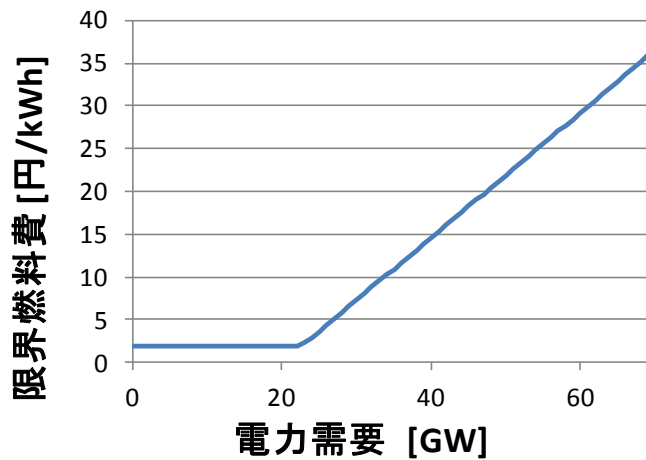


図 6.2 限界燃料費曲線

6.2 冷房時結果

6.2.1 想定した運転方法

前節で示した目的関数・条件にしたがって多数のエアコンを制御した場合の東京電力管内におけるピーク削減効果について評価を行う。想定したエアコンの運転パターンと各ケースにおける消費電力量の値を表 6.1 に示す。運転方法を考える際には、以下の点に注意した。

- ・エアコン利用者は設定温度等の選択の際に、制約を受けずに自由に行える場合、最も快適だと思う設定を選択するであろうという想定のもと、エアコンの制御を行わない時間帯に関して PMV が 0 になるような運転を行うものとする。

まず、基準ケースとして 8 時から 23 時まで PMV を 0 に保つような運転を考える。これを基準とし、以下の 4 つの制御パターンを用いた。

Case1: 14 時前後の消費電力削減を目的として、13 時から 16 時の PMV の値を 0.5 に保つような運転を行う (PMV の値が ± 0.5 に収まる範囲が国際標準では快適範囲と定められている)。そのほかの時間帯は通常と同様に PMV=0 に保つ。

Case2: Case1 と同様に 14 時前後の消費電力削減を目的とする。その際、快適な範囲から少し外れるような設定をエアコン利用者が受け入れてくれることを想定し PMV の値が 1 に保つように運転を行う。

Case1_Pre Cool: Case1 の場合に加えて、13 時直前にプレクーリングを行う。プレクーリングは快適な範囲として定められている PMV が -0.5 の値になるように室内を冷やすことにした。これにより、プレクーリングによる需要シフト効果の有無に関して評価を行う。

Case2_Pre Cool: Case2 の場合に加えて、13 時直前にプレクーリングを行う。プレクーリングは快適な範囲として定められている PMV が -0.5 の値になるように室内を冷やすことにした。これにより、プレクーリングによる需要シフト効果の有無に関して評価を行う。

表 6.1 エアコンの運転パターン

運転ケース	運転時間	PMV	プレクーリング	消費電力量 [kWh]
基準	8-23	0	×	5.48
Case1	8-13,16-23 13-16	0 0.5	×	5.04
Case2	8-13,16-23 13-16	0 1	×	5.04
Case1_Pre Cool	8-13,16-23 13-16	0 0.5	○	5.38
Case2_Pre Cool	8-13,16-23 13-16	0 1	○	5.41

各運転ケースにおける室温・PMV・消費電力の値を図 6.3 に示す。PMV を基準にして設定温度を決定した結果、表 6.1 を満たすようなエアコン運転方法が実現されている。また、室温の値は PMV の変化と同様の変化を示している。これはエアコンの運転によって最も変化する値が室温であることに因る。しかし、細かく PMV の値と室温を比較してみると Case1 と Case1_Pre Cool の場合を比較すると、Case1 の室温のほうが低いにも関わらず、PMV の値は高くなっている。これは、湿度や平均放射温度の変化が影響したものであり、前章で示したように PMV 基準でエアコンの運転を決定するモデルを用いることが重要であることが改めて示された。

また、消費電力の値は各制御ケースにおいて基準ケースよりも 14 時前後における消費電力が削減されている。一方、プレクーリングを行う場合には 13 時直前に通常よりも大きな熱量をエアコンが処理することになるため、消費電力の値は非常に大きくなっている。また、14 時前後において室内を通常と比較して暑い環境に保っていたため、16 時から通常と同様の温熱環境に戻す際に通常よりも大きな消費電力が生じる。このように、ある時間帯の消費電力を削減した場合、その前後に通常よりも大きな消費電力が生じる。このような運転方法の変更を行った場合の消費電力量は、表 6.1 のように基準ケースよりも低い値となっている。削減した時間帯の前後に通常よりも大きな消費電力が生じるが、その時間は極めて短い物であり、14 時前後に消費電力量を削減した効果の影響が大きくなっている。

プレクーリングの有無による比較を Case1 と Case1_Pre Cool を用いて行う。プレクーリングによって、1 日の消費電力量は 5.04 kWh から 5.38 kWh へと増加している。16 時直後の消費電力は、プレクーリングを行った場合の方が低くなっているが、これはプレクーリングを行った際に空気中の水蒸気除去量が増加したため、潜熱負荷が削減されたからである。また、13 時以降 PMV の値が 0.5 に達するまでの時間帯はエアコンの運転を停止することになるが、この時間は Case1:12 分、Case1_Pre Cool:30 分とプレクーリングを行った場合の方が長くなっている。

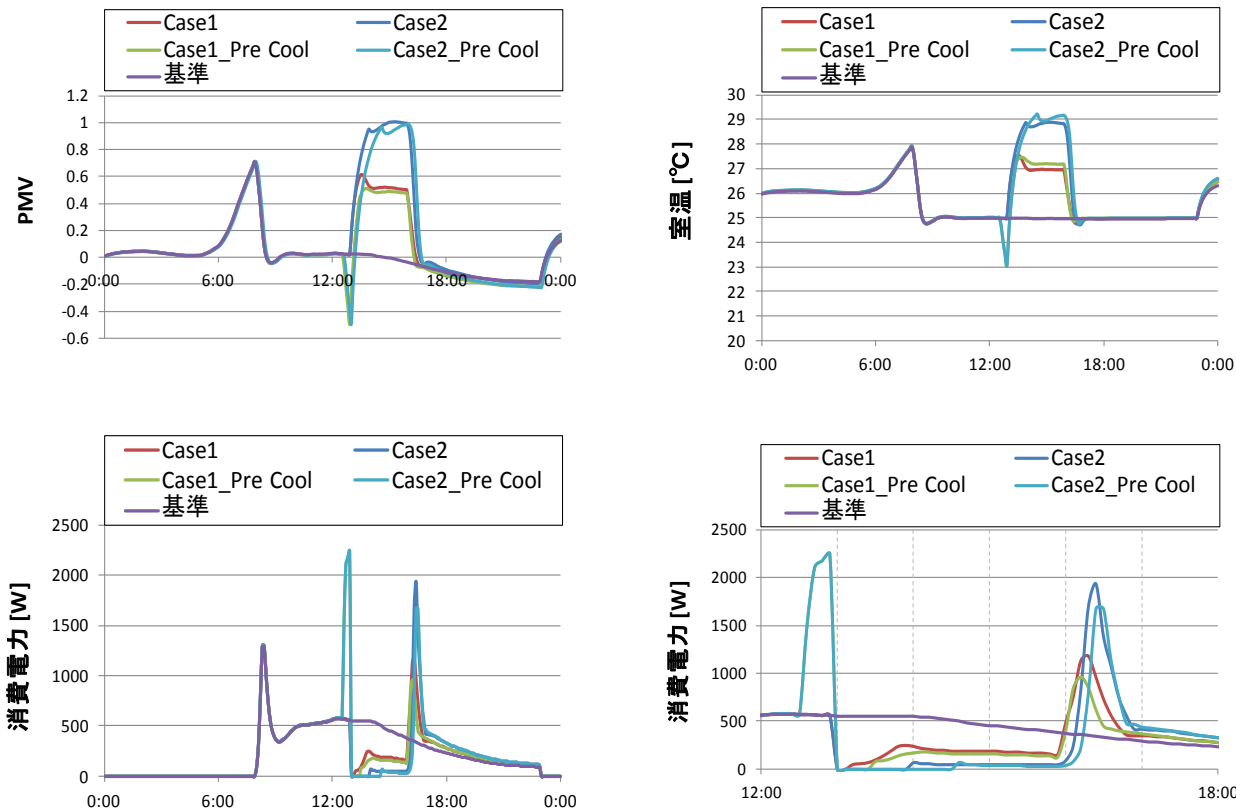


図 6.3 各運転ケースにおける快適性に関する値と消費電力

6.2.2 結果

前節で示した消費電力の値を用いて式(6.1)を解いた結果を図 6.4・図 6.5 に示す。東京電力管内の需要は、プレクーリングの有無によって傾向がことなるものとなった。プレクーリングを行わない場合(Case1/Case2)は、14 時前後の需要が削減されるが、16 時以降に消費電力が増加するためその時刻における需要が新たなピーク需要となっている。プレクーリングを行った場合(Case1_Pre Cool/Case2_Pre Cool)、13 時直前のプレクーリング時における消費電力増加の影響が大きいためその時間帯の需要が新たなピーク需要となった。

また、それぞれのピーク需要削減値はプレクーリングを行わない場合は約 110 万 kW の削減、プレクーリングを行った場合は、60 万 kW から 80 万 kW 程度の削減となった。つまりプレクーリングを行うとその時刻の消費電力が大きくなるため、東京電力管内では需要ピーク時前後の時間帯における需要がピーク需要と同程度に大きいため、1 日のピーク需要削減という目的に対してプレクーリングを行うことは貢献できないことがわかる。しかし、14 時前後の需要のみに注目すると、プレクーリングを行った場合のほうが大きく需要削減できていることがわかる。つまり、プレクーリングを行うことは、特定の時間帯の需要削減効果を大きくすることに関してメリットを有するが、東京電力管内のような元の需要構造によって 1 日のピーク削減効果を減少させてしまうことがわかる。

また、Case1 と Case2 の比較を行う。Case1 と Case2 の運転方法の違いは、14 時前後の PMV の値が 0.5 であるか 1 であるかであった。つまり、1 つのエアコンに対して小さな温熱環境の変化に因る小さな消費電力削減効果を得る場合と、大きな温熱環境の変化による大きな消費電力削減効果を得る場合である。このように、1 台のエアコンから得られる消費電力削減効果が異なるにもかかわらず、ピーク減少値がともに 110 万 kW 程度と同等の値となった。これは、消費電力を削減していない他の時間帯が新たな需要ピークとなってしまうことを原因としている。しかし、制御しなければならないエアコンの台数は、300 万台から 200 万台程度まで減少している。

また、燃料費はプレクーリングを行わない場合のほうが行う場合に比べて大きく削減する可能である。

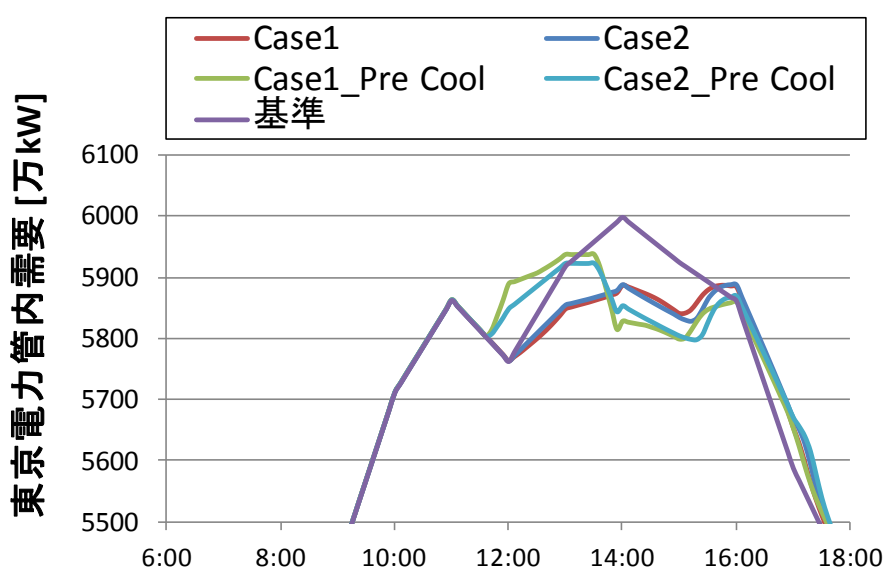


図 6.4 エアコン制御による東京電力管内需要変化

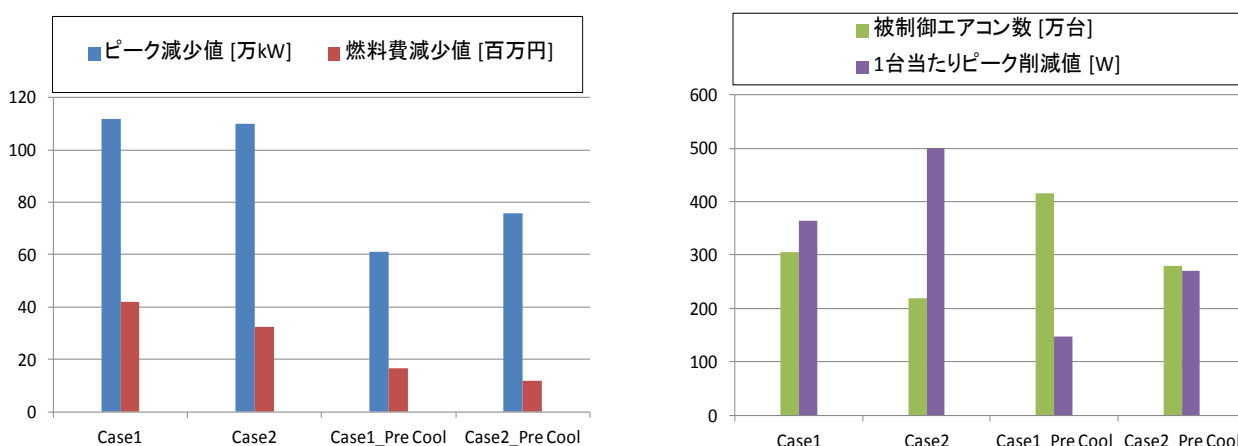


図 6.5 各運転ケースにおける制御結果

6.2.3 考察

前節の結果から東京電力管内における家庭のエアコン制御によって得られるピーク削減効果に関して以下の知見を得た。

1. エアコン 1 台の消費電力削減値を大きくすることはピーク需要削減に対して貢献しない
2. プレクーリングを行うとピーク削減効果は減少する
3. プレクーリングは特定の時間帯の需要削減効果を大きくする

燃料費の削減効果に関しても併せて評価したが、例えば Case1 の場合 300 万台のエアコンを制御した結果として削減できる燃料費は 4000 万円であるため、エアコン 1 台あたりに直すと約 13 円となる。仮に、このようなエアコンの制御を行ったことによって得られた燃料費削減のメリットを各家庭に分配することで協力を求めるようなシステムを考える場合、この数値では家庭にとってメリットがほとんどないことになってしまう。恒常的に電力会社・各家庭にとってメリットが生じるようなシステムを考えなければピーク削減価値として信頼する事ができず不安定なシステムであると言える。そこで、ピーク削減によって発電設備の更新を回避できることで得られる経済的価値を考慮し、電力会社が得た利益を協力した家庭に分配するようなシステムを想定した上で最終的に電力会社が得られるメリットに関して次節にて評価を行う。

6.3 アンケート結果組み込みモデル

6.3.1 目的関数

ピーク削減によって発電設備建設量を削減できることから得られるメリットに関して評価を行うため以下のように目的関数を設定した。目的関数の第 1 項はピーク削減が実現された結果、削減可能となる発電所の資本費を表している。第 2 項は、エアコン制御時と非制御時の燃料費の差を表す。第 3 項はエアコンの消費電力量によって電力会社が得られる電気料金の収入のエアコン制御時・非制御時の差を表す。第 4 項は、エアコンの制御を行いピーク削減に貢献した家庭に対する謝礼を現す。day は 1 年間でエアコン制御が発動する日数を示している。前節の結果から東京電力管内において家庭のエアコンを制御することによって得られるピーク削減ポテンシャルは 100 万 kW 程度であると計算された。2010 年度において年間のピーク需要は 6000 万 kW であるが、5900 万 kW を超える需要発生日は 3 日間であることから、エアコン制御日は 3 日間(=day)とした。野中らによると太陽光発電の導入により削減可能な LNG 火力発電所の固定費を 6200 円/kW・年としている[28]。また、米国におけるダイヤモンドレスポンス市場における実績値では、ネガワットの価値として 50 \$/kW・年[29]が見積もられる。これらの値を参考にして 5000 円/kW・年を KW_v (kW 価値)として用いることにした。

$$TM = PeakC \times KWv + day \times \left\{ (FC_{ref} - FC_{con}) + EC \times (TPC_{con} - TPC_{ref}) \right\} - DIS_{house} \quad (6.5)$$

→ max

$$TPC_{con} = P_{con} \times number, \quad TPC_{ref} = P_{ref} \times number \quad (6.6)$$

$$DIS_{house} = REW \times number \quad (6.7)$$

TM: エアコン制御によって得られるメリット [円/年], PeakC:ピーク削減値 [kW]

KWv: kw 価値(削減可能となる発電所の資本費) [円/kW・年]

day: エアコン制御発生日数, FC_{ref}/FC_{con} : 非制御時燃料費/制御時燃料費 [円/day]

EC: 電気料金 [円/kWh]

TPC_{ref}/TPC_{con} :非制御時/制御時の総エアコン消費電力量 [kWh], DIS_{house} : 家庭への総分配金 [円]

number: 被制御エアコン台数[台]

P_{con}/P_{ref} : 非制御時/制御時 1 台のエアコン当たり消費電力量 [kWh], REW: 1 家庭への分配金 [円]

6.3.2 制約条件

アンケートから得られた数値を制御できるエアコン台数に関する制約条件として用いる。夏季の暑い日において、各時間帯におけるエアコン使用割合を図 6.6 に示す。夏季需要ピークとなる 14 時前後においてエアコンを使用する可能性のある人の割合は 50 % となっているが、東京電力管内の 1900 万世帯のうち、この時間帯における在宅率は 33 % と推計されている[8]。これは、エアコン使用する可能性がある人もランダムに外出している要因が先のアンケート結果に含まれているからである。以上の事から在宅世帯約 630 万世帯のうち、アンケートの結果からエアコン未所持・未使用の人の割合(14.3 %)を除いた、540 万世帯においてエアコンが使用されていると推計した。これは、本研究が夏の最も暑い 1 日を評価対象としているため、在宅世帯のうちエアコンを使用する可能性のある世帯ではエアコンが使われているものという仮定を用いている。従って、14 時前後において運転されているエアコン台数は約 540 万台であり、これを制御可能エアコン台数の最大値として設定した。このエアコン台数に対し、各条件においてエアコンを制御されることを許した人の台数を、式(6.8)を用いて算出し、各条件における制御可能エアコン台数として用いる。

$$accept = aircon \times p_{accept} \quad (6.8)$$

accept: 各条件における制御可能エアコン台数 [台]

aircon: 東京電力管内の 14 時前後に稼働しているエアコン台数 [台] (:400 万台)

P_{accept} : 各条件において制御を許容した人の割合

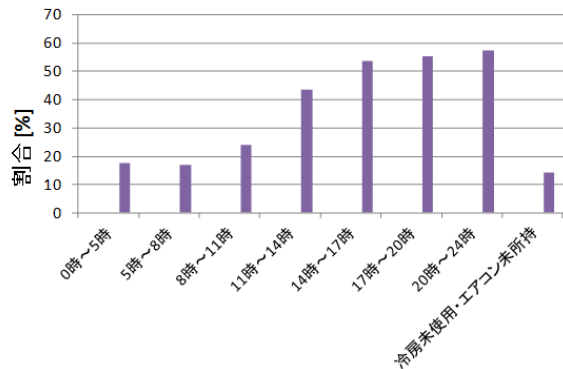


図 6.6 各時間帯におけるエアコン使用割合

表 6.2 各条件におけるエアコン被制御許容率(P_{accept})

	13時～16時の 設定温度変更	設定温度を変更 されることに対 する謝礼 [円]	被制御許容率 P_{accept} [%]	アンケート パターン
プレクーリングなし	1 °C	100	56.6	①
		200	56.6	②
		400	60.3	③
	2 °C	200	49.7	①
		400	52.4	②
		800	56.6	③
	3 °C	300	40.4	①
		600	46.3	②
		1200	47.2	③
プレクーリングあり	1 °C	100	44.7	①
		200	42.8	②
		400	46.4	③
	2 °C	200	38.4	①
		400	39.5	②
		800	41.4	③
	3 °C	300	31.1	①
		600	32.8	②
		1200	33.2	③

各条件におけるエアコンを制御されることを許容する人の割合(被制御許容率)を表 6.2 に示す。ここで、プレクーリングなしにおける割合は、プレクーリングを許容する人も含まれているものとする。表 6.2 における各条件に合致するエアコン運転方法における、消費電力と室内の快適

性に関する数値に関するシミュレーションを、PMV 基準モデルを用いて行う。アンケートにおいて、PMV という指標は一般の人に馴染みのない指標である事を考慮して、エアコンの設定温度を基準として用いた。シミュレーションでは、これを PMV 基準に変換し、各条件における条件として用いる。PMV の算出に当たり、平均放射温度は室温と比較し 0.5 °C 高い値であると仮定し、室温と平均放射温度以外の数値を定数として PMV 計算を行うと、室温 1 °C の変化に対し、PMV の値は 0.35 変化した。これにより、設定温度を 1 °C 変更することを許容する人は、PMV の値が 0.35 変化することを許容すると仮定した。2°C・3°Cにおける場合も同様に考え、各場合におけるエアコンの運転をシミュレーションした結果を図 6.7 図 6.8 にしめす。また、各ケースにおける 1 日の消費電力量を

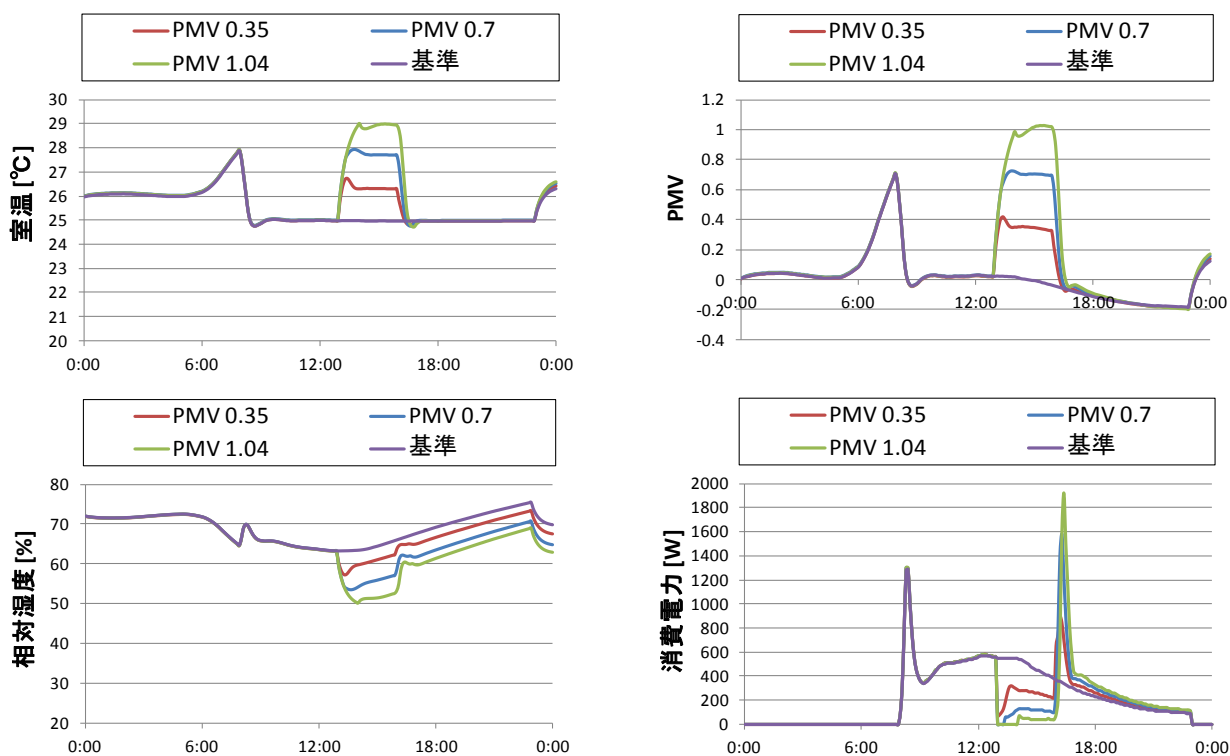
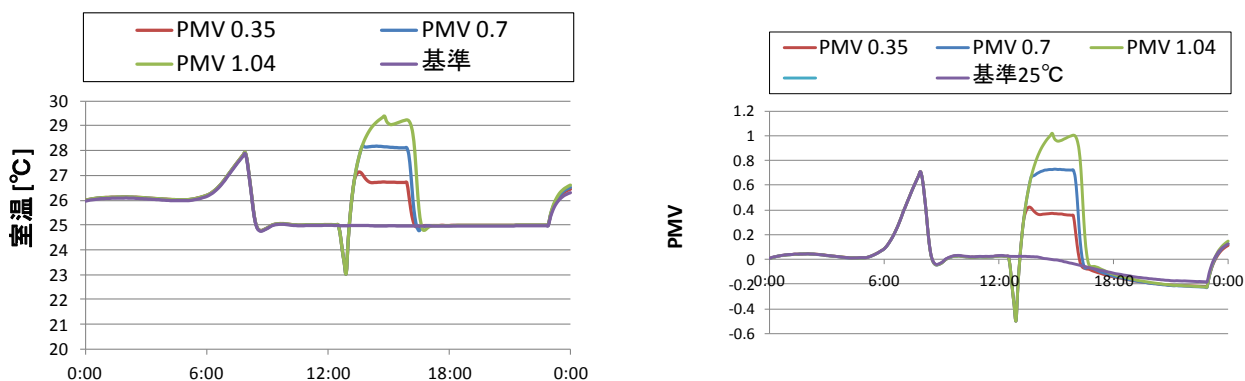


図 6.7 消費電力と快適性の数値(プレクーリングなし)



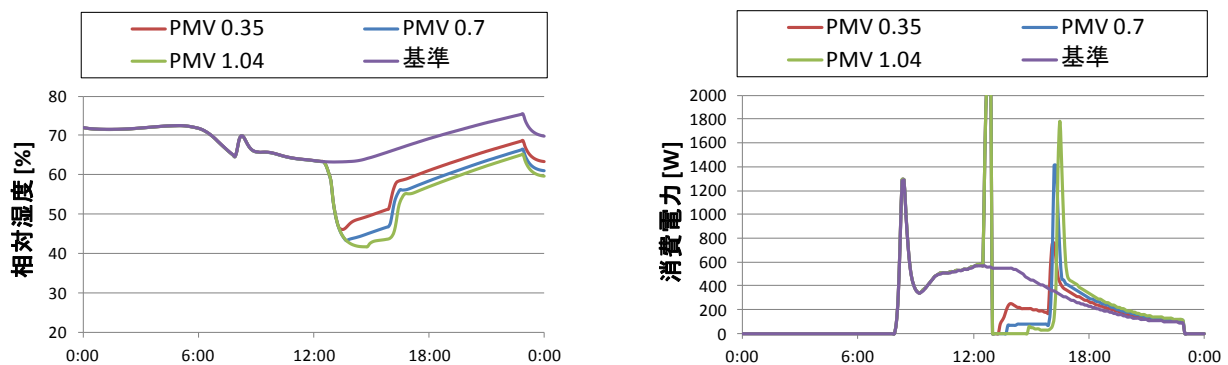


図 6.8 消費電力と快適性の数値(プレクーリングあり)

表 6.3 各運転ケースにおける 1 日の消費電力量 [kWh]

基準	プレクーリングなし			プレクーリングあり		
	PMV 0.35	PMV 0.7	PMV 1.04	PMV 0.35	PMV 0.7	PMV 1.04
5.48	5.10	5.03	5.04	5.42	5.39	5.41

各制御ケースとも、1 日の電力消費量は基準ケースと比較し減少している。しかし、14 時前後の設定を緩和できる運転ケースほど削減値は大きくなるわけではなく、PMV1.04 と PMV0.7 において削減値は逆転している。これは、14 時前後に室内を高い温度に保っていた結果、16 時過ぎに通常の温熱環境に戻す際には大きな熱負荷をエアコンが処理する事を原因とする。この時刻において、負荷が大きいことにより COP の低下が見られ、14 時前後の消費電力は大きく削減できる半面、1 日の消費電力は大きくなる。しかし、このような傾向は住宅の構造や、エアコンの定格能力等、様々な数値に影響を受ける物であり、常に成り立つものではないことに注意が必要である。以上に示した数値を用いて、式(6.5)を目的関数とする、線形計画法を用いた最適化計算を行う。

6.4 結果

6.4.1 プレクーリングを行わない場合

目的関数のうち、電力会社にとってのメリットとデメリットを以下のように分けて示す。

- ・メリット：ピーク削減によって削減可能となる発電所の資本費(目的関数第 1 項)
燃料費削減(目的関数第 2 項)
- ・デメリット：エアコン消費電力削減による電気料金収入減(目的関数第 3 項)
エアコンを制御した家庭に対して支払う謝礼(目的関数第 4 項)

メリットは正の値で示し、デメリットは負の値で示す。上記 2 つの和が目的関数 **TM** に相当する。アンケートパターン①におけるプレクーリングなしの場合の結果を図 6.9 に示す。エアコンを制

御した場合に得られるメリット TM は PMV が 0.7 の時に最大となった。これは、PMV 0.35 の場合、制御できるエアコン台数が accept(制御可能エアコン台数)によって制限されているからである。それに対し、PMV0.7, PMV1.04 と 1 台のエアコンが削減できる消費電力の値が大きくなることによって、ピーク削減値が最大となるために必要な制御されるエアコン台数が少なくなるため、accept によって制限されることなく、大きなピーク削減値が実現されるからである。PMV0.7 と PMV1.04 を比較すると、得られるメリットは変わっていない。これは、PMV0.7 において既に最大ポテンシャルのピーク削減されているからである。これによって、PMV1.04 の場合は家庭に分配する報酬が増加するため TM の値が減少している。

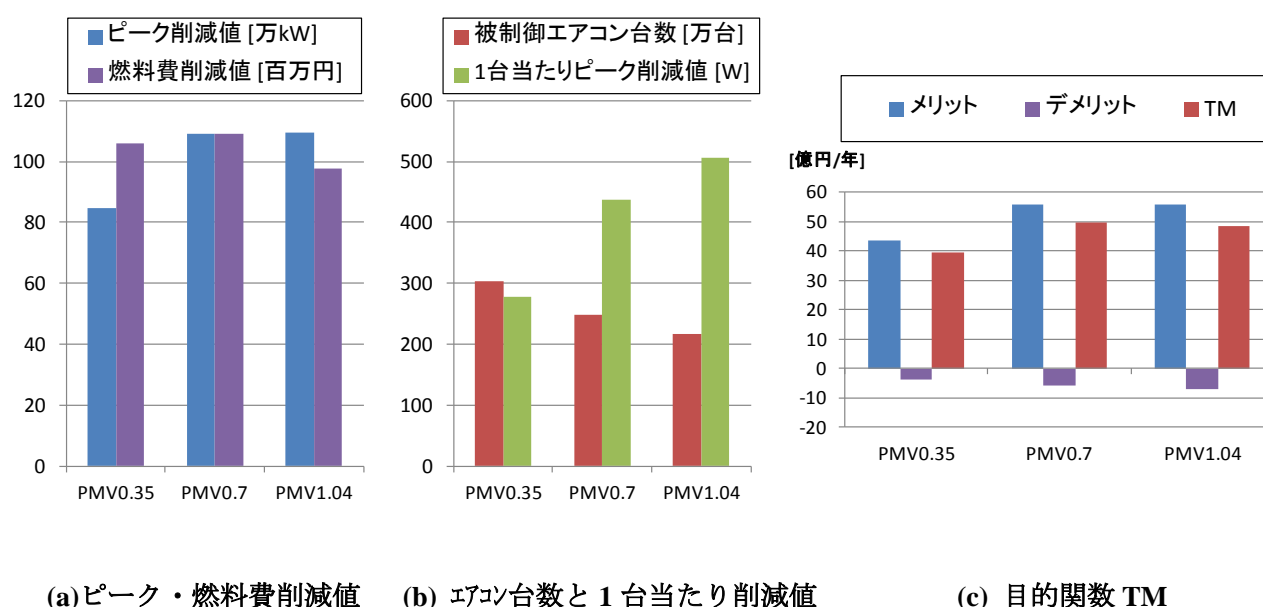


図 6.9 PMV の違いによる結果の比較(アンケート①)

次に、14 時前後における設定温度を 1 °C 高くする場合(PMV0.35)において、謝礼を 100 円・200 円・400 円(パターン 1・パターン 2・パターン 3)と変化させた場合の結果を図 6.10 示す。消費電力のパターンは各ケース共に同一であるため、1 台当たりのピーク削減値は一定である。パターン 1(謝礼：100 円)，パターン 2(謝礼：200 円)においては、アンケートにおいて制御を許容する人の割合が変わらなかったため、ピーク削減値・得られるメリットの値共に変わらない結果となった。一方で、家庭に分配しなければならない報酬額は単純に約 2 倍になるため、TM の値はパターン 2 の方が低い値となる。また、パターン 3(謝礼：400 円)では、価格に反応しエアコン制御を許容する需要家が増加するため、パターン 1・2 の場合と比較しピーク削減によるメリットが約 3 億円増加している。しかし、家庭に分配する報酬が大きく増加するため、最終的に得られるメリットである TM の値はパターン 1・2 の場合よりも小さくなってしまう。

それに対し、設定温度を 3 °C 高く設定する場合(PMV1.04)には異なる傾向が見られた。結果を図 6.11 に示す。消費電力に関しては PMV0.35 の場合と同様の傾向が見てとれる。ピーク削減値

に関しては、報酬を増加させた場合でも、(パターン1: 300円, パターン2: 600円, パターン3: 1200円)その値は変化しないことがわかった。これは設定温度を3℃変更する場合、1台当たりの消費電力削減値が大きくなるため、報酬が少ない場合でも十分なエアコン制御台数が確保されているからである。設定温度が1℃の場合では、エアコン利用者の価格に対する応答が低かったが、設定温度が3℃になると価格に対する弾性力が大きくなったといえる。これは、設定温度変更が1℃においてはそれによる温熱環境の悪化(エアコン使用者の利便性の低下)が小さいため、報酬の有無にかかわらず、電力の安定供給に協力するといった社会貢献がエアコンを制御されることへのモチベーションになっていることが示唆される。また、設定温度変更が3℃になると明らかな利便性の低下が予想されるため、経済的な報酬を与えられないとエアコン使用者は行動に移さないであろうという予測がたてられる。しかし、このような報酬の増加に従って制御可能となるエアコン台数が増加することは、ピーク削減する価値に対して影響を与えないことがわかった。この結果、家庭に分配する報酬が増加するに従って、得られるメリットは減少してしまうと言える。

以上のことから、エアコン利用者が犠牲にする快適性の大小はエアコン制御に協力することに対して需要家が求める報酬に影響を及ぼすため、適切な価格設定を行うことが最大のメリットを得るためには必要なことであると言える。しかし、このような快適性の変化に対する需要家の感覚は、大規模な実証実験等を行うことによって判断する必要がある、今回用いたアンケート結果から得られた知見は限定的なものであることに注意する必要がある。

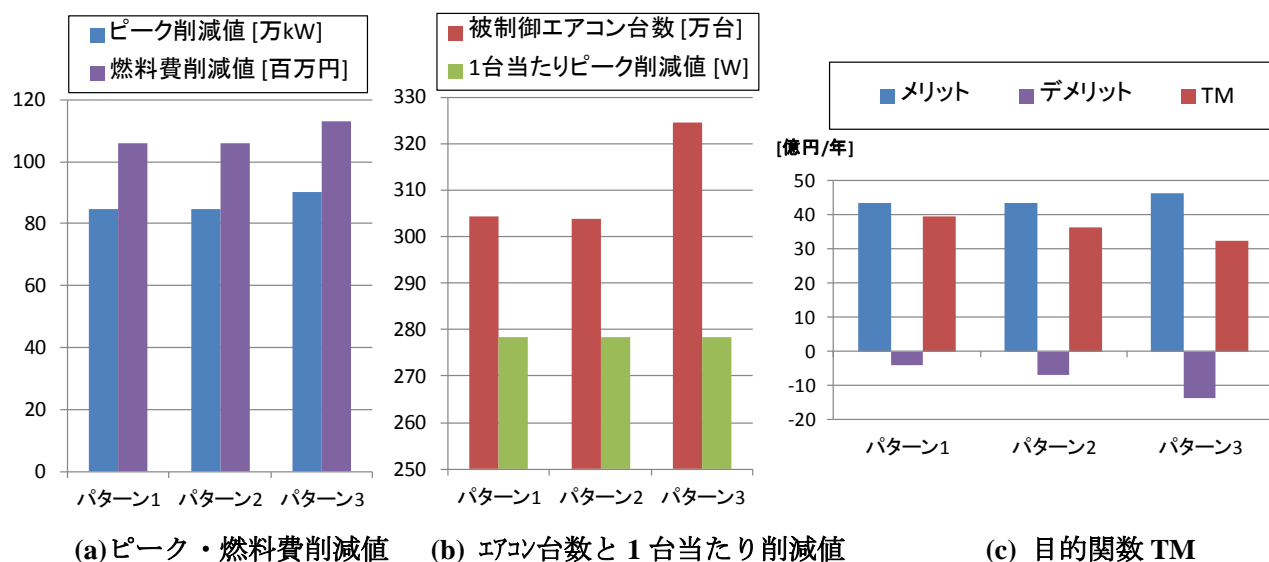
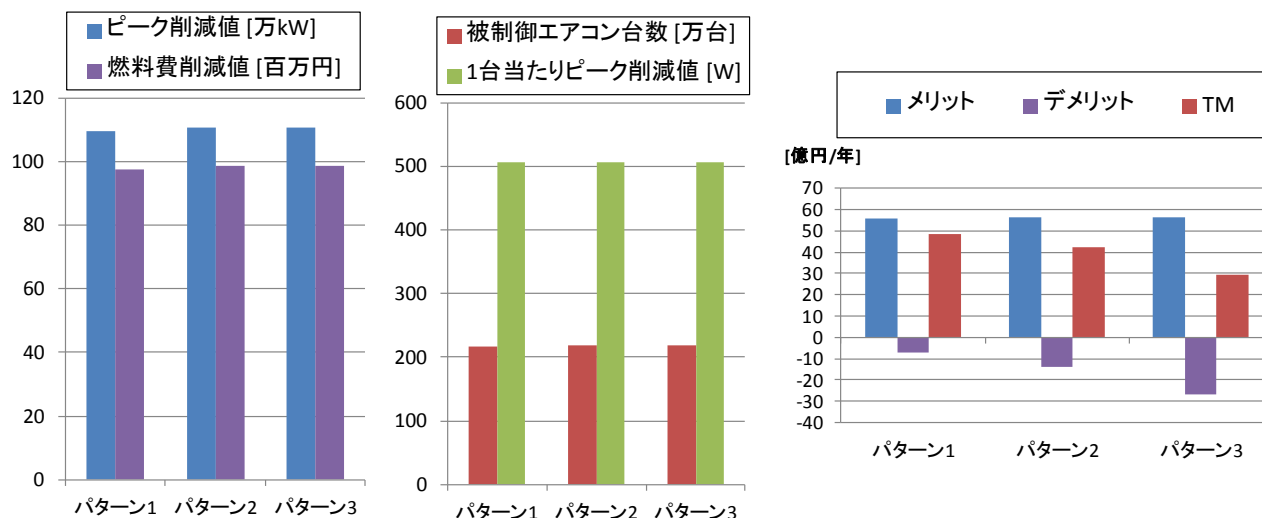


図 6.10 等しい PMV 変更値(0.35)における報酬の違いによる結果



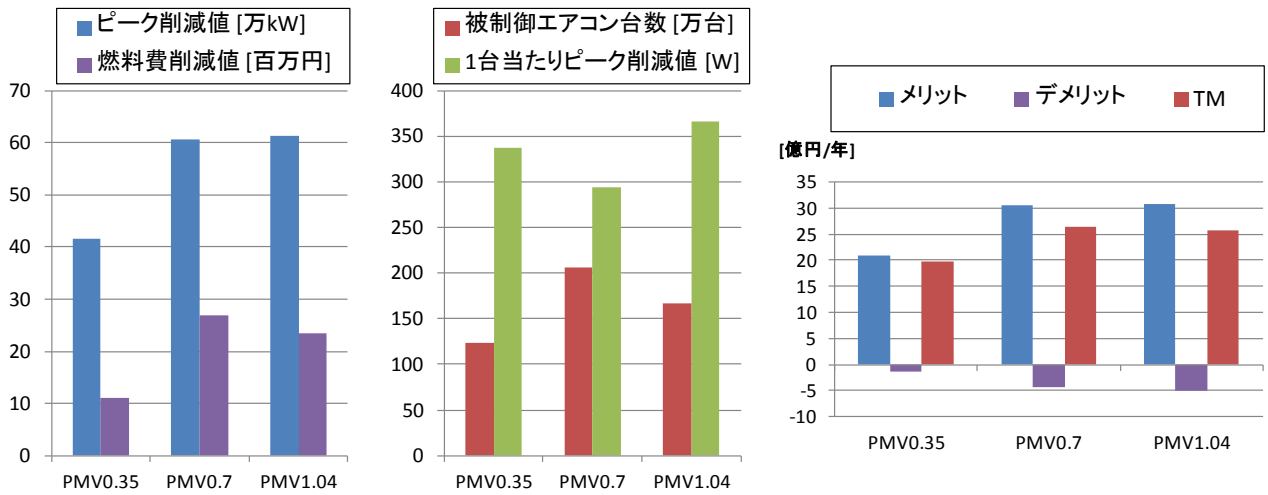
(a) ピーク・燃料費削減値 (b) エアコン台数と1台当たり削減値 (c) 目的関数 TM

図 6.11 等しい PMV 変更値(1.04)における報酬の違いによる結果

6.4.2 プレクーリングを行う場合

プレクーリングを行う場合のアンケートパターン1における結果を図6.12に示す。プレクーリングを行わない場合の図6.9との比較を行う。ピーク削減値は、40万kW以上減少しており、最終的に得られるメリット(TMの値)はプレクーリングを行わない場合と比較し約20億円低い値となった。これは、プレクーリングする時間帯において消費電力が増加する事によってピーク削減値が減少してしまうことを原因としている。エアコン1台当たりのピーク削減値は、PMV0.35の場合において、プレクーリングなし:W,プレクーリングあり:Wと増加している。特定の時間帯のみ大きな電力需要が生じるような場合など、元の需要の形状によって、プレクーリングを行うことによる消費電力削減値の増加がメリットをもたらす場合も考えられる。しかし、本研究で評価対象として用いた東京電力管内においては、プレクーリングによる消費電力削減値の増加は需要ピーク削減という目的に対して明らかな損失を与えることが示された。

これまで、家庭部門に限らず空調需要に関する評価は、建物1軒あたりなど局所的な需要のみを考慮した評価が多くみられた。ミクロ的に個々の需要を削減させることは省エネ・電力の有効利用等を考慮する際、重要なことであるが、それを行う最終的な目的に対して有用であるかを常に示す必要があると言える。



(a) ピーク・燃料費削減値 (b) エアコン台数と1台当たり削減値 (c) 目的関数 TM
 図 6.12 PMV の違いによる結果の比較(アンケート①・プレクーリング)

7 結論

7.1 まとめ

本研究では、HEMS の機能の 1 つとして家庭のエアコンを制御するシステムを想定した上で、エアコン制御によって得られる電力需要ピーク削減効果に関して評価した。熱源特性を詳細に模擬することが困難な家庭のエアコンに関するシミュレーションを、COMMA ハウスにおける実験結果を反映させることで実態に合致した計算を行えるようにした点や、エアコン 1 台あたり、家 1 軒あたりの評価に留まらず、東京電力管内において多数のエアコンを制御することを評価した点が他の研究では行われていない新規性のある特徴であると言える。

また、アンケート結果を用いてエアコン使用者の、制御されることに対する許容率の数値を用いてピーク削減効果の評価を行い、実態に即した削減効果ポテンシャルの評価を行った。

本研究のまとめを以下に示す。

- アンケート結果においてエアコンの設定を変更されることに対する許容率は、設定した価格帯では価格弾力性が小さく、設定温度によって決定される。設定温度 1 °C の変更は約 6 割の人が許容する。
- 冷房時においてプレクーリング等、設定温度を積極的に変化させる場合、湿度・平均放射温度等の変化が居住者の快適性に及ぼす影響が無視できないほど大きいため、PMV を基準として評価を行うことが重要である。
- エアコン使用者が設定を変更することを無条件に許容する場合、東京電力管内の需要ピーク削減効果は約 110 万 kW となる。
- ピーク需要削減による削減可能な設備費を考慮すると、家庭のエアコン制御により最大 50 億円/年の経済的メリットを得ることができる。
- 今回のアンケート結果においては、報酬と許容率の関係から設定温度を 2 °C 変更する場合に最も大きなメリットが得られることが示された。実際に制御を行う場合、適切な報酬や料金精度等、システム設定を行うことが重要であるといえる。
- プレクーリングを行うことは、特定の時間帯におけるエアコン 1 台あたりの消費電力削減に有効であるが、東京電力管内におけるピーク需要削減効果を低減する。

7.2 今後の課題

今後の課題としては以下のことがあげられる。

- 住宅の断熱性能分布・住宅構造の差異を考慮したエアコン消費電力の評価
- 居住者の生活パターンを考慮して、エアコン運転時間等の需要家ごとの違いを考慮した東京電力管内全体の評価
- 室内の温熱環境の変化に対するエアコン使用者の感覚の評価
- 冬期暖房需要における冷房時と同様の評価
- 実証実験などによる実際のエアコン使用者の行動に関する評価
- 本研究で評価したピーク需要削減を実現するための、変動型電気料金などのシステム提案

謝辞

本研究を進めるにあたり、たくさんの方々のご協力をいただきました。この場をお借りして深く感謝致します。

指導教員である岩船由美子准教授には丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。当初、本研究分野に関して全く知識のない状態でしたが、的確に導いて下さり深く感謝いたします。

八木田特任研究員には日々の研究生活からアンケートの実施まで、多岐にわたりお世話になりました。心よりお礼申し上げます。

電力中央研究所の宮永俊之様・北原博幸様・上野剛様には、熱負荷シミュレーションに関して多くの有益なコメントを頂きました。熱くお礼申し上げます。

株式会社 LIXIL の野中俊宏様には COMMA ハウスの実験においてデータの収集等、様々な点でお世話になりました。心より感謝申し上げます。

博士2年の渡邊裕美子さん、修士2年のチョンイェウンさん、修士1年のアシクムスタファ君には、常に支えられ、学生生活においての励みになりました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス, 日本の温室効果ガス排出量データ(2012)
- [2] 経済産業省 各部門におけるエネルギー期限 CO₂ 排出について (2004)
- [3] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables Global Status Report (2012)
- [4] 経済産業省:長期エネルギー需給見通し(2008)
- [5] 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 新エネルギーの大量導入に伴う影響とその対応策について
- [6] 次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会: 次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に向けて(2010)
- [7] 内閣府経済社会総合研究所 景気統計部: 消費動向調査(全国、月次)(2011年3月実施)
- [8] 資源エネルギー庁: 夏期最大電力使用日の需要構造推計(東京電力管内)(2011)
- [9] 鈴木:WTA/WTP 比の相違と評価手段に関する実験的研究, 北海学園大学経営論集, Vol.2(4), pp.111-121(2005)
- [10] John K.Horowitz and Kenneth E.McConnell: A Review of WTA/WTP Studies, Journal of Environmental Economics and Management, Vol.44, pp.426-447(2002)
- [11] 国土交通省: 仮想的市場評価法 (CVM) 適用の指針(2009)
- [12] 宮永・占部:住宅用室内温熱環境設定ツールの実用化 その2:運転特性を考慮した暖房機器の性能評価手法の開発, 電力中央研究所研究報告書 R07034 (2008)
- [13] 社団法人 空気調和・衛生工学会: 徹底マスター 熱負荷のしくみ(2009)
- [14] 井上: 空気調和ハンドブック(2008)
- [15] 宮永・占部: 住宅用室内温熱環境設計ツールの実用化 その1: 多数室空調負荷・温熱快適性指標の同時計算手法, 電力中央研究所研究報告書 R06016 (2007)
- [16] 上野・宮永・占部・北原:家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発 その1: 冷房時モデル, 電力中央研究所研究報告書 R09017(2010)
- [17] 芝原・村上・石野・群: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その47) BEST と他のシミュレーションツールとの熱負荷比較, 平成19年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2007-9, 1969-1972(2007)
- [18] 浅間・赤林・坂口・石山・宝里: 家庭用エアコンの実使用時における成績係数に関する調査研究 その5 各種エアコンの COP の比較, 日本建築学会北陸支部研究報告書, Vol.49, pp.209-212 (2006)
- [19] 細川・林・野村・渡邊: 家庭用エアコンの特性調査と数値計算モデル: その5 冷房性能特性の推定と消費電力の計算方法, 日本建築学会研究報告九州支部.2, 環境系, Vol.46, pp.181-184 (2007)
- [20] COMMA ハウス
- [21] 北原・小西・数江: 湿式デカント回路を搭載したエアコンの除加湿性能の評価(第1報)理論的検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.205-208(2008)
- [22] 社団法人 空気調和・衛生工学会; 新版 快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間を目指して, pp.71, 社団法人 空気調和・衛生工学会(1997)
- [23] Fanger P.O.: Thermal Comfort, McGraw Hill Book Company(1972)

- [24] Gage,A.P., A.C.Burton and H.C.Bazett: A Practical System of Units for the Description of the Heat Exchange of Man with His Environment, Science, Vol.94, pp.428(1941)
- [25] 高草木:室内温熱環境のばらつきを考慮した居住者の不満発生確率の推定方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol514, pp.13-19(1998)
- [26] 荻本・大関・植田: 太陽光発電大量導入の電力系統の運用コストに与える影響試算, 第 26 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 17-4, pp.1-4(2010)
- [27] 池上・岩船・荻本: 電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発, 電気学会論文誌 B 部門, vol.130, No10, pp.877-887(2010)
- [28] 野中・浅野: 太陽光発電の系統電源に対する競争力評価, SERC Discussion Paper 11028(2011)
- [29] EnerNOC,Inc.: Annual Report on Form 10-K, (2011)

発表実績

1. 山田・岩船:住宅における空調負荷の可制御性に関する基礎的検討, エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2012年1月)
2. 山田・岩船:住宅の空調制御による需要シフトに関する検討, 平成24年電気学会全国大会(2012年3月)
3. 山田・岩船:住宅における快適性を考慮した空調負荷制御に関する検討, 電気学会電力・エネルギー部門大会(2012年9月)
4. 山田・岩船:経済性・快適性の観点からみた家庭部門の空調負荷制御に関する検討, エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2013年1月)
5. 山田・岩船:住宅における暖房需要制御による冬期ピーク需要削減に関する検討, 平成25年電気学会全国大会(2013年3月発表予定)