

博士論文

自家消費を向上させるゼロ・エネルギーハウスの  
効率的設備運用に関する研究

Efficient Facility Operation Measures for  
Zero Energy House to Improve Self-consumption

2020年 2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科  
建築学専攻 建築環境研究

金 ジョンミン  
Jung min KIM



自家消費を向上させるゼロ・エネルギーハウスの効率的設備運用に関する研究  
Efficient Facility Operation Measures for Zero Energy House  
to Improve Self-consumption

第1章 序論

pp.01-20

- 1.1 研究背景
  - 1.1.1 日本のエネルギー消費動向
  - 1.1.2 エネルギーに関する動向
  - 1.1.3 日本の ZEH に関する動向
- 1.2 既往研究
  - 1.2.1 ZEH に関する既往研究
  - 1.2.2 調整力に関する既往研究
  - 1.2.3 居住者の行動変容に関する既往研究
  - 1.2.4 生理量を用いた評価に関する既往研究
  - 1.2.5 燃料電池に関する既往研究
- 1.3 研究目的
  - 本論文の構成
  - 参考文献

第2章 対象住宅概要

pp.23-36

- 2.1 はじめに
- 2.2 全体計画
- 2.3 Nobi-obi HOUSE コンセプト
  - 2.3.1 設備コア
  - 2.3.2 居住ゾーン
  - 2.3.3 Nobi-Nobi ゾーン
- 2.4 導入技術
  - 2.4.1 外皮
  - 2.4.2 換気設備
  - 2.4.3 冷暖房設備
  - 2.4.4 照明設備
  - 2.4.5 太陽光発電システム (PV)
  - 2.4.6 蓄電池システム (BT)
  - 2.4.7 固体酸化物形燃料電池システム (SOFC)
  - 2.4.8 ヒートポンプ給湯器 (エコキュート)
  - 2.4.9 W-HEMS
- 2.5 熱容量計算
- 2.6 まとめ

- 3.1 はじめに
- 3.2 研究目的
- 3.3 実験概要
  - 3.3.1 実験条件
  - 3.3.2 測定項目
  - 3.3.3 サーマルマネキン概要
- 3.4 実験結果
  - 3.4.1 夏季における予冷運転に関する考察
  - 3.4.2 冬季における予熱運転に関する考察
- 3.5 予冷・予熱によるエネルギーシフト効果
- 3.6 ヒートポンプ給湯器の昼間運転によるシミュレーション結果
  - 3.6.1 シミュレーション検証
  - 3.6.2 夏季における結果
  - 3.6.3 冬季における結果
- 3.7 まとめ
- 参考文献

- 4.1 はじめに
- 4.2 研究目的
- 4.3 実験による予冷運用の温熱環境・エネルギー評価
  - 4.3.1 実験概要
  - 4.3.2 実験結果
- 4.4 BEST-H を用いたシミュレーションによる検証
- 4.5 被験者実験による予冷運用の快適性・健康性評価
  - 4.5.1 実験概要
  - 4.5.2 実験結果
- 4.6 まとめ
- 注
- 参考文献

- 5.1 はじめに
- 5.2 研究目的
- 5.3 シミュレーション概要
  - 5.3.1 室温変動計算モデル
  - 5.3.2 エアコンモデル
  - 5.3.3 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) モデル
  - 5.3.4 太陽光発電 (PV) モデル
  - 5.3.5 蓄電池 (BT) モデル

- 5.3.6 エコキュート (EC) モデル
  - 5.3.7 シミュレーションモデル妥当性検証
  - 5.4 シミュレーション条件
    - 5.4.1 シミュレーション住宅構成
    - 5.4.2 生活パターン
  - 5.5 シミュレーション結果
    - 5.5.1 2人世帯のライフスタイルによる評価
    - 5.5.2 4人世帯のライフスタイルによる評価
    - 5.5.3 一次エネルギー削減率と ZEH 達成率による評価
  - 5.6 経済性評価
  - 5.7 まとめ
- 参考文献

---

## 第6章 総論

pp.137-139

---

## APPENDIX

pp.143-186

APPENDIX A. English abstract

APPENDIX B. 第4章 被験者実験によるアンケート調査項目

APPENDIX C. 第5章 MATLAB 数値計算モデル

APPENDIX D. 第5章 ライフスタイル別エネルギー需要

APPENDIX E. 研究業績リスト

---

## 謝辞

pp.189-190



# 第 1 章

序論





## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 日本のエネルギー消費動向<sup>1)2)3)</sup>

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）のエネルギー需要推計において、技術的に実現可能であり、現実的な省エネルギー対策による省エネ量を積算すると経済成長1.7%を前提に、最終エネルギー消費量ベースで5030万kL程度の省エネにより、2030年までにエネルギー効率を35%程度改善できると見込まれている。またその省エネ化の促進が、省エネ投資の拡大と生産性の向上を引き起こし、経済活性とCO<sub>2</sub>排出削減の両方の達成が見込まれている。

図1-1に最終エネルギー消費と実質GDP（Gross Domestic Product）の推移を示す。日本のエネルギー消費を部門別にみると、1973年度から2014年度まで全体が1.2倍の増加であるのに対して家庭部門が2倍に増加、業務他部門が2.4倍に増加と民生部門におけるエネルギー消費量が大きく増加している。産業部門は石油ショック以降、製造業を中心に経済成長をする中でも省エネルギー化を推し進めたため、消費量は微増にとどめられている。ところが業務他部門は産業部門のような抜本的なエネルギー消費原単位の改善が進んでいない。また家庭部門、運輸部門は家電機器や自動車の普及などを要因として大幅に増加している。

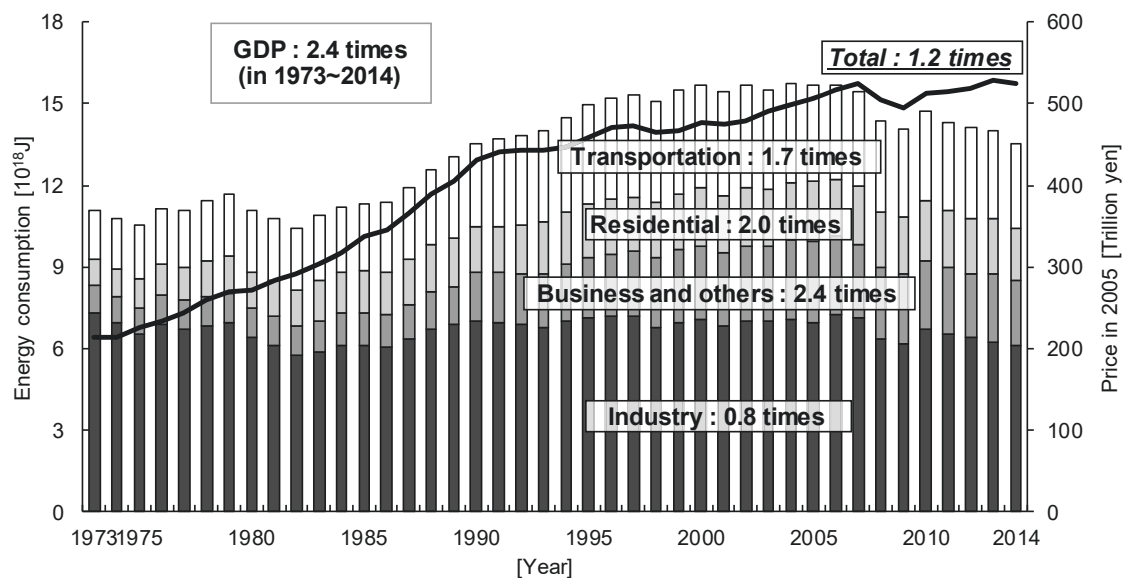


Fig. 1-1 Energy consumption and GDP<sup>1)</sup>

日本の電力消費量は1973～2007年度の間には2.6倍に拡大した。2000年における世界的金融危機の影響で電力消費が減少に転じたが、2008年景気の回復後、3.8%の増加が見られた。しかしながら、東京電力福島第一原子力発電所事故を発端に、関東、東北圏内を発端として全国的に節電が呼びかけられる事態になった。2011年度、2012年度は前年度より5.1%、1.0%減少したが、2013年度で初めて増加に転じ0.1%微増した。電力消費の増加は、家庭部門と業務部門によって構成された民生部門の消費によってより強くけん引された。

図1-2に世帯当たりのエネルギー消費原単位と用途別エネルギー消費の推移を示す。家庭部門のエネルギー消費量は、「世帯当たり消費量×世帯数」で表す。生活の利便性・快適性を追求する国民のライフスタイルの変化、世帯数増加などの社会構造変化の影響を受け、生活水準の向上など個人消費の伸びとともに増加し、経済の不景気などの影響による減少する。家庭のエネルギー消費量は1973年が100とすると、2000年度には216.9まで拡大した。その後省エネルギー技術の普及と国民の環境保護意識の高揚に従って、2013年度には203.7まで低下した。また、家庭内のエネルギー消費は、冷房、暖房、給湯、厨房、動力・照明他の5用途に分類され、1973年と比較して、家電の普及、大型化に伴い、動力・照明の割合が増加した。家庭において電力を多く消費しているのはエアコンなどの空調で、エアコンの普及などにより冷房エネルギー消費量が増加した。この結果、1965年と比較し、2013年度における、冷房のエネルギー消費量は2.1%増加した。

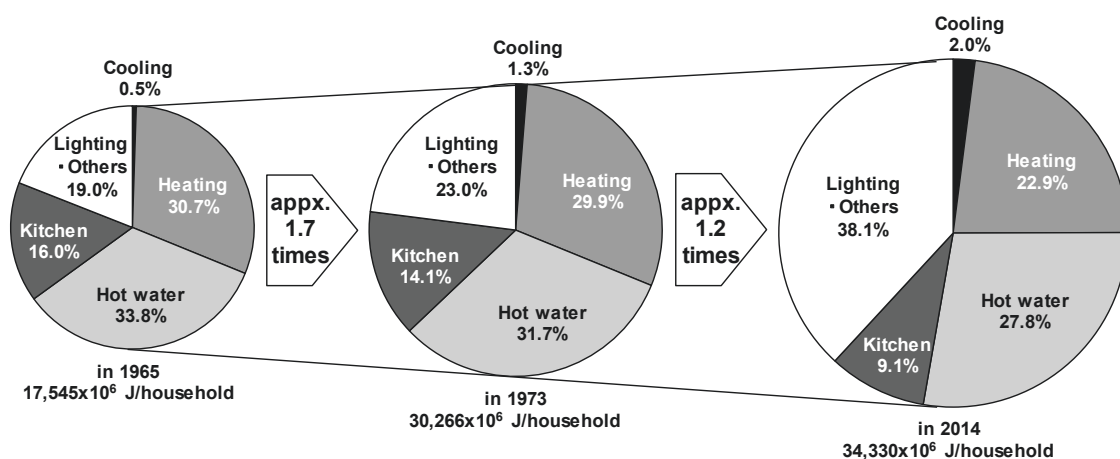


Fig. 1-2 Trend of energy consumption per household and energy consumption by application<sup>2)</sup>

### 1.1.2 エネルギーに関する動向<sup>4)</sup>

再生可能エネルギーとは、化石燃料以外のエネルギー源のうち永続的に利用することができるものを利用したエネルギーであり、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスなどがあげられる。日本では1970年代の二度の石油ショックを契機に、石油代替エネルギーへ移行が進められてきた。世界に先駆け様々な技術開発が行われたこともあり、日本世界有数の技術力を持ち、現在も多数の研究が行われている。

再生可能エネルギーは、現状6%しかない日本のエネルギー自給率の向上によるエネルギー安全保障の強化や、新たな発電方法や高効率化技術の開発を通じた新市場の創出や、石油燃料への依存度低減、低炭素社会実現などさまざまな利点がある。しかし現状は、他の発電方法と比較して発電コストが高く、天候等に発電量が左右され供給が不安定であるなどの課題があり再生可能エネルギーの普及率は依然低い状態にある。

#### 1) 固定価額買取制度 (Feed-in Tariff, FIT)<sup>5)</sup>

図1-3に固定価格買取制度 (Feed-in Tariff: 以下FIT) の概要図を示す。FITは日本をはじめ多くの国が導入している再生可能エネルギー普及促進政策である。2012年7月より、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が施行され、FITが定められた。FITは再生可能エネルギー（太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス等）によって発電された電気を、国が定めた単価・期間で小売電気事業者が買取りする制度である。再生可能エネルギーの発電事業者に対して固定価格での長期買取を保証し、参入リスクを低減することで新たな再生可能エネルギー市場を生み出し、その市場拡大によるコスト低減が再生可能エネルギーの中期的な自立の達成につながる。FITの買い取り費用は、電力を利用する国民全体から賦課金として回収され、日本においては買取金額と賦課金は設備ごとの発電コストや全体の導入量に応じて、中立的な立場にある調達価格等算定委員会の意見を尊重し経済産業大臣が決定している。

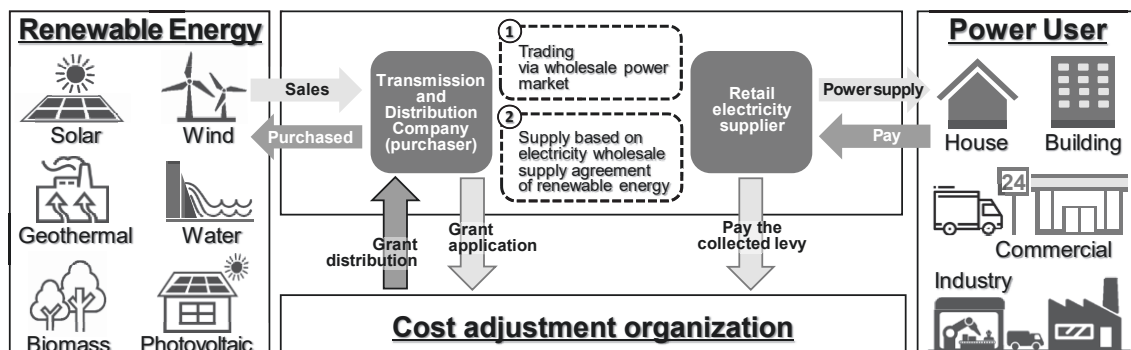


Fig. 1-3 Overview of the FIT<sup>5)</sup>

## 2) 省エネ政策

日本では、「産業部門」、「業務・家庭部門（民生部門）」、「運輸部門」のそれぞれに応じた省エネルギー政策が展開され、部門ごとに省エネ法による規制と、予算・税制等による支援の両面の対策を実施するとともに、分野の垣根なく技術開発や、国民の省エネ意識の変革に向けた政策を行っている。

省エネ法は 1979 年に省エネ政策の根幹として、石油危機を契機に「エネルギー使用の合理化に関する法律」として制定された。時代の変遷と共に、技術の進歩やライフスタイルの変化を受け省エネ法は改正を重ねてきた。現在の省エネ法は平成 25 年の通常国会において、電気需要の平準化の推進及びトップランナー制度の建築材料等への拡大等に関する措置を追加した省エネ改正案であり、合理化の後ろに平準化推進を意味する「等」の文字が追加され「エネルギー使用の合理化等に関する法律」として平成 25 年 5 月 31 日に公布された。

平成 25 年省エネ法改正案で示された、電力の需要の平準化の推進は、今までのエネルギー利用の合理化だけでなく電気需要の平準化の概念を追加したものである。これは需要家側における対策の必要性から策定されたものであり、従来の省エネ対策に加え、蓄電池や、自家発電設備の導入と活用によって夏季、冬季のピークカットとピークシフトをすることで電力需要量の季節または時間帯による変動を縮小させることを目指し、取り組みを行った事業者に対して適切な評価がされる体制（電気需要平準化評価原単位の策定）を構築するものである。

トップランナー制度の建築材料等への拡大は、今まで、エネルギーを消費する機械器具が対象として取り込まれてきたトップランナー制度を、自らエネルギーを消費しなくても、住宅・ビルや他の機器のエネルギー消費効率の向上に資する建築材料等を新たな対象として追加するものであり、エネルギー消費量増加の著しい民生部門特に住宅部門における断熱性能の底上げを図るものである。

ここでトップランナー制度とは、エネルギー消費機器の製造・輸入事業者に対し、3～10 年程度先に設定される目標年度において最も優れた機器の水準に技術進歩を加味した基準を満たすことを求め、目標年度に報告と国からの確認を課すものである。今までの対象とされていたエネルギー消費を伴う 28 製品に加え、外壁等に使用される断熱材及び窓に使用されるガラス及びサッシが建材トップランナー制度の対象となった。

「エネルギーの使用の合理化に関する建築主等及び特定建築物の所有者の判断の基準」通称省エネ基準が、平成 25 年度改正された。昭和 55 年の旧省エネ基準から、平成 4 年の新省エネ基準、平成 11 年の次世代省エネ基準を経て 4 回目の改正となる。平成 25 年基準では、「一次エネルギー消費量」を指標とすることで、建築全体の省エネルギー性能の評価を容易にすることが新たに加えられ、外皮（外壁や窓等）性能に関しては、適切な温熱環境の確保などの観点から平成 11 年基準相当を維持することが定められている。また 2020 年には省エネ基準が新築建築において義務化されることが決まっている。

---

### 3) エネルギー基本計画<sup>2)</sup>

2018年7月に第5次エネルギー基本計画が発表された。2014年4月に策定された第4次エネルギー基本計画の見直しに加え、パリ協定を受けた2050年を見据えた対応、目標が示されている。第5次エネルギー基本計画冒頭では、日本のエネルギー選択に際して常に踏まえるべき点として下記2点が示されている。

1. 東京電力福島第一原子力発電所事故の収束とその反省を忘れることなく安全なエネルギー構成を実現していく。再生可能エネルギーの拡大を図りながら、可能な限り原子力依存度を低減する。
2. 戦後一貫したエネルギー選択の思想として、膨大なエネルギーコストを抑制し、エネルギーの海外依存構造を変える「エネルギー自立」は必要不可欠な視点である。

以上の2点の前提の下、2030年にむけ、複数電源を組み合わせたエネルギーミックスの実現が目指されているが、現状太陽光発電や風力など再生可能エネルギーはディマンドコントロール、揚水、火力等を用いた調整が必要であり、再エネだけでは完全な脱炭素化は難しいことなどが問題点として提示されている。2050年にむけては、近隣諸国が台頭していく中で、化石資源に恵まれない日本は、エネルギー技術において主導権を獲得することが何より必要とされ、官民協調で脱炭素化に向けて取り組んでいくことが示されている。

### 4) ダックカーブ (Duck curve)<sup>6)7)</sup>

ダックカーブとは、カリフォルニア州における時間別「実質」電力需要のグラフで、2013年から2020年にかけての変化を指す。実質電力需要とは、電力消費量全体から再生可能エネルギーによる発電量を差し引いたものである。日本においては日中に最も電力需要が高くなるとされているが、米国で最も太陽光発電が導入されているカリフォルニア州では、午後5～6時が電力需要のピークとされている。太陽光発電システムの発電量ピークが正午から午後2時に対し、電力需要のピークが夕方になる。つまり、配電網に接続させる太陽光発電の導入が増加するにつれて、昼間の実需要が低下し、夜間との差が大きくなる。2020年の場合、約13GWの需要の差を約3時間という短時間で急速に埋める必要が生じ、電力を供給できない可能性も出てくる。ダックカーブ現象により、本来なら調整を必要としないベース電源による供給を減らす必要がある。加えて、より大きな需要の差を埋めるために、柔軟性のあるピーク電源が以前より多く必要となる。

### 1.1.3 日本のゼロ・エネルギーハウス（Zero Energy House：以下 ZEH）に関する動向<sup>8)9)</sup>

平成 24 年より経済産業省資源エネルギー庁では、高断熱外皮、高性能設備と制御機構等を組み合わせ、住宅の年間一次エネルギー消費量が正味でゼロとなる住宅（ZEH）に対し導入費用を補助する「住宅・ビルの革新的省エネルギー技術促進事業（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス支援事業）」を行っており、4 年間で ZEH 新築数が初年度の 14 倍になっている。一方で、一次エネルギー消費量を正味ゼロとする ZEH を目指すうえで、再生可能エネルギーの導入が不可欠であるが、高層建築物が多く、敷地面積も限られている都心部においては、日射量そのものを十分に得ることができない場合や、屋根面積を確保できないなど物理的に ZEH 達成が困難な場合もある。また、ZEH を建設するにあたって、現段階ではコストの増加は避けられず ZEH 普及の最大の障害となっている。そのため ZEH の省エネルギー性以外の快適性・健康性の向上や、防災・減災性能向上などのメリットを十分に示したうえで、認知度の向上を進め、持続的に ZEH が普及していくためのブランディングが必要となる。また、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法施行規則」が改正（2018 年 4 月 1 日施行）され、FIT／非 FIT 電源が一需要場所内に併存する場合でも、10kW 未満の太陽光発電設備については、それぞれの逆潮分を的確に計量できることを条件に、非 FIT 電源の電気が逆流することが認められた。それに伴い ZEH の定義が改正され、図 1-4 に ZEH 定義を示す。

平成 30 年 3 月 27 日に経済産業省 資源エネルギー庁より発表された ZEH+では ZEH における自家消費拡大措置として電気自動車（Electric Vehicle：以下 EV）導入が認定条件の一つに取り上げられた。従来までの ZEH に加え、さらなる省エネルギーの実現を目的とする。売電のみを前提とせず、自家消費の向上を意識した再生可能エネルギーの促進に係る措置を以下の 3 要素のうち 2 要素以上満たすことを提示している。

#### ① ZEH 強化外皮基準：

$U_A$  値 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] が次の値以下であること。

1・2 地域：0.40、3 地域：0.50、4～7 地域：0.60

#### ② 高度エネルギーマネジメント：

ホーム・エネルギー・マネジメント・システム（Home Energy Management System: 以下 HEMS）により、太陽光発電設備等の発電量等を把握したうえで、住宅内の暖冷房設備、給湯設備等を制御可能であること。

具体的には、HEMS、暖冷房設備、給湯設備及び太陽光発電設備用パワーコンディショナ、並びに蓄電システム及び燃料電池システム（これらの設備が設置される場合に限る）について、いずれも ECHONET Lite AIF 仕様に適合し、認証を取得しているものを設置すること

(アダプタが分離されている場合は当該アダプタを併せて設置することが必要)。

③ 電気自動車を活用した自家消費の拡大措置：

太陽光発電設備等により発電した電力を電気自動車（プラグインハイブリッド車を含む。）に充電することを可能とする設備、または電気自動車と住宅間で電力を充放電することを可能とする設備を設置し、車庫等において使用を可能としていること。

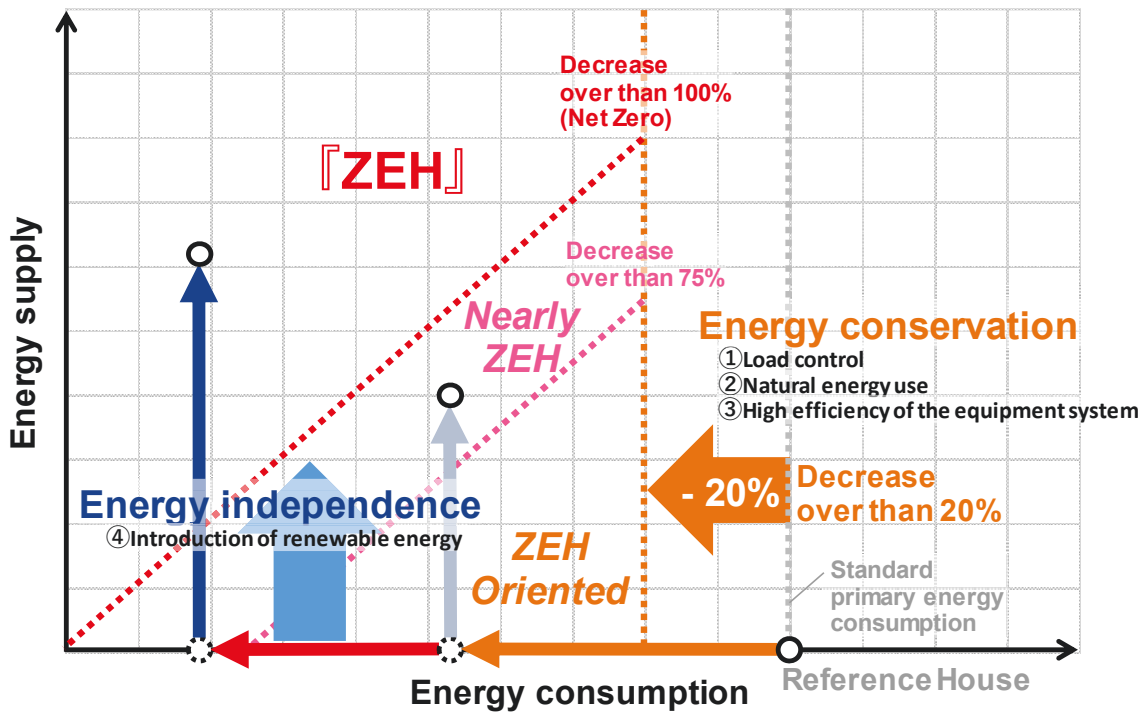


Fig. 1-4 ZEH definition<sup>10)</sup>

## 1.2 既往研究

### 1.2.1 ZEHに関する既往研究

樋口ら<sup>11)</sup>は、ピーク負荷の低減や停電時の温熱環境の改善を目的として、年間のエネルギー収支ゼロを目指すネット・ゼロ・エネルギーハウスをシミュレーションにて検討した結果、高断熱化することで、ピーク負荷が低減できることを示した。中川ら<sup>12)</sup>は、既存工業化住宅を用いて改修型のゼロ・エネルギーハウスを提案した。柳ら<sup>13)</sup>と仲保ら<sup>14)</sup>は、シミュレーションを用いてタウンハウスにおける省エネ手法に関する研究を行い、パッシブ手法を組み合わせることでエネルギー削減ができることを示し、ゼロ・エネルギータウンハウスを提案した。

このように現在までは、ZEHの設計方法や温熱環境、空調方法、HEMSなどによる省エネルギーに関する研究が数多く行われていたが、ZEH普及やFITの順次終了、系統への逆流問題の発生などに伴い、「自家消費」に関する研究が注目されている。

松永ら<sup>15)</sup>は、住宅における効率的な電力運用手法の提案を目的に、太陽光発電と蓄電池を導入した住宅においてシミュレーションを実施した。自家消費率や経済性の評価を行った結果、自家消費率は電力消費量が小さいほど高く、経済的に蓄電池容量を選択することが自家消費率の観点からも有用であることを示した。常岡ら<sup>16)</sup>と大木ら<sup>17)</sup>は、自立的なエネルギー運用を目指し自家消費率と日負荷率の向上を目的とした創蓄連携設備、日射量予測による制御システムを用いた実測を行った。発電量の予測値に基づいたHP給湯器の稼働開始時刻および稼働時間の調整、蓄電池の充電量の調整を実践し、発電量に応じた設備の運用が電力需給の調整に有用であることを示した。



### 1.2.2 調整力に関する既往研究

調整力とは、一般送配電事業者が、供給区域における周波数制御、需要バランス調整その他の系統安定化業務に必要となる発電機、蓄電池、デマンドレスポンスその他の電力需要を制御するシステムその他これに準ずるものの能力である<sup>18)</sup>。

平成30年度ZEH支援事業で定められたZEH+では高断熱化に加え、HEMSやEVによる自家消費拡大措置が認定項目に加えられた。住宅における調整力の検討として、HP給湯器の昼稼働、蓄電池・EVの導入など設備機器に関する研究や政策が進められ太陽光発電の自家消費拡大効果に期待が集まっている。一方で、電力需給に合わせて家電などの利用時間をシフトさせる様な、居住者の主体的な行動変容による調整力も検討されている。現在、デマンドレスポンス(Demand Response: 以下DR)に関しては、DRに参加した場合の経済的メリットや、停電価値(停電を回避できた場合に居住者が支払いうる金額)などによる行動促進が検討され、DRに伴う電力料金の変動に応じて家電利用の抑制やシフト、家から外出する可能性がアンケート調査で示されている<sup>19)</sup>。

#### 1) 設備機器を用いた調整力に関する研究

常岡ら<sup>20)</sup>は、太陽光発電パネルを搭載した住宅を対象に、余剰電力の自家消費運用の有用性と経済性の把握を目的に、エアコンによる予冷熱運用、蓄電池への蓄電、HP給湯器の昼稼働をシミュレーションで再現し、HP給湯器の昼稼働へのシフト、予冷熱運用によって自家消費と省エネルギー性が向上することを示した。秋元ら<sup>21)</sup>は、電気自動車を含む蓄エネルギー設備導入による自家消費効果を検討するためシミュレーションで再現し、車の利用頻度が高い(=日中に車が家になく、充電できない)ほど、自家消費効果が少なく、単に電気自動車を導入するだけでは自家消費拡大措置として機能しない可能性を示した。高橋ら<sup>22)</sup>は、再生可能エネルギーの導入が増加する中で、系統における調整力不足や、需給調整に問題が生じることを指摘し、DRや蓄電池による系統の需給調整が実用化されれば、蓄電池やHP給湯器の導入コストを含めても発電コストが低減する可能性を示した。

#### 2) 予冷・予熱運用やデマンドレスポンスによる調整力に関する研究

デマンドレスポンスとは、「卸市場価格の高騰時または系統信頼性の低下時において、電力料金価格の設定またはインセンティブの支払に応じて、需要家側が電力の使用を抑制するよう電力消費パターンを変化させること」を指す。

近年、IoT(Internet of Things)デバイスが多く登場する中で、エアコンをはじめとする空調機器を自動制御する製品が登場している。ネットワークに接続することで電力需要のピークやDRの情報を受信し、居住者の設定に応じて予冷・予熱運用を自動的に行うことがで

きる。また、室温変化や居住者の在不在状況を検知し、住宅の空調機器を自動調整コントロールする IoT 機器として、サーモスタッド型の IoT デバイスである「nest」と「Eco Factor Simple」がある。両製品は夏季や冬季の電力需要のピーク時に空調機器の電力消費を削減することを目的とする予冷・予熱を指示する機能があり、DR が発生する際に、予冷を自動的に行うなど空調機器による需要の調整力確保が可能である。

森田ら<sup>23)</sup>は、電力料金の変化と居住者の行動変化の関係をアンケートから明らかにすること、DR 導入時のエネルギー消費量のケーススタディを行うことを目的に、大規模なアンケート調査を行った結果、回答者の 76%がトレードオフ行動として予冷運用を実施すると回答した。一方で、予冷・予熱の効果は断熱性能の影響を大きく受けるため、無断熱住宅が多い日本では電力消費量の増加や DR 開始前にピークが発生することなどが懸念される。また、オーストラリアの DR 時の空調利用習慣に関する実態調査では、予冷などシフトを伴う居住者行動は持続的に行われにくいことが述べられている<sup>24)</sup>。金ら<sup>25)</sup>は、太陽光発電の余剰電力の自家消費手法として、予冷・予熱運用に着目し、実証住宅における実測を行った結果、夏季と冬季ともに夜間の空調にかかる電力消費を日中にシフトし、自家消費率の向上も可能であることを示した。

### 3) 居住者行動による調整力に関する研究

加藤ら<sup>26)</sup>は、電力価格の変動により需要の制御を目指すダイナミックプライシングについて、消費者の反応の特徴を明らかにすることを目的として、夏季・冬季それぞれ一定期間の実測を行い、夏季平日昼間に 6~9%、冬季の平日夕方に 2~3%の世帯で、最大限節電行動が行われたことを示した。森田ら<sup>13)</sup>は、電力料金の変化と居住者の行動変化の関係をアンケートから明らかにすること、DR 導入時のエネルギー消費量のケーススタディを行うことを目的に、大規模なアンケート調査と試算を行い、電力料金が高くなるほどピーク時間帯における外出が増加すること、短期的な省エネ行動の推進だけでなく、設備機器の買い替えや導入など長期的な行動変化が促進される可能性や DR による行動変容が行われる可能性があることを示した。

### 1.2.3 居住者の行動変容に関する既往研究

近年、一人ひとりの行動変容を直接促すための研究が活発となり、行動科学の観点から省エネ政策の立案や改善が行われ始めている。日本国内でも効果的な家庭の省エネ対策を検討する動きが出てくるなど、行動科学への関心が高まってきている<sup>27)</sup>。また、環境省<sup>28)</sup>では、日本版ナッジ・ユニットとしてBEST (Behavioral Sciences Team) を発足した。国民一人一人に配慮した無理のない行動変容を促進し、ライフスタイルの変革を創出することが目標の1つにされ、幅広い分野での課題解決にむけた検討を行うとしている。

森ら<sup>29)</sup>は、居住者の省エネルギー行動が家庭部門の省エネに及ぼす影響が大きいことから、家庭でのエネルギー抑制を目的として、69世帯について1年間の計測を行い、アンケートによる調査とエネルギー使用量を計測した結果、内発的な動機付けによって長期にわたる持続的な省エネ行動とエネルギー使用量は正の相関があることが示されている。また、スマートフォンによる家庭向け省エネサービスの実証では、2,000世帯にアプリを提供し、非提供世帯と比較を行った結果、真冬で使用料の多くなる2月に約3%の省エネ効果があることを確認した<sup>30)</sup>

## 1.2.4 生理量を用いた評価に関する既往研究

### 1) 心拍数

心電図 R-R 間隔検査の熱的快適性評価尺度としての有用性を検討することを目的に行われた、ネガティブな熱的快適性に関する研究では、心拍が少なくとも熱的中性より寒い環境において、熱的快適性評価尺度として有用であることが示されている<sup>31)</sup>。温熱環境（温度、湿度）の変化が人体へ与える影響を、心拍を用いて数量化し評価することを目的とした研究では、高温時、高湿度時に、精神的なストレスによる生体反応が見られることが示されている<sup>32)</sup>。花岡ら<sup>33)</sup>は、熱的快適性評価（PMV）に在室者自身の生理反応を加えた新しい熱的快適性評価指標の開発を目的に、異なる室内温熱環境および代謝量と心拍数の関係を明らかにする研究を行った結果、PMV が中立側に近づくと心拍数が安定することを示した。

### 2) LF/HF (Low Frequency/High Frequency)

ストレス評価は、交感神経や副交感神経系の緊張状態のバランスによって行われ、交感神経が緊張状態であればストレスが高い状態、副交感神経が緊張状態であればストレスが低い状態であることを意味する。LF 成分は常に現れるが、HF 成分は副交感神経が優位な場合に現れるため、LF/HF は交感神経と副交感神経のバランスを示し、ストレス状態を示す指標とされている<sup>34)35)36)37)38)</sup>。また、LF/HF が非常に安静な状態では 2.0 より小さく、ストレス注意時では 2.0～4.0、副交感神経活動が抑制または交感神経活動の興奮状態（ストレス要注意時）では 4.0 以上の値が目安となることが示されている<sup>39)40)</sup>。

### 3) SDNN (Standard Deviation of all NN interval)

心拍のゆらぎを示す指標であり、ストレス状態で低く、リラックス状態で高くなる<sup>41)42)43)</sup>。また、健康性の高い人ほど SDNN 数値が高くなる傾向があるとされている。

### 1.2.5 燃料電池に関する既往研究

燃料電池は、発電効率が 30～60 %と高く、さらにコージェネレーションシステム (Co-generation System : 以下 CGS) として利用する場合には総合効率が 90 %以上とエネルギー効率が非常に高いシステムである。加えて、発電過程で二酸化炭素や硫黄酸化物を排出せず、環境特性に優れたクリーンなエネルギーシステムである。

CGS とは熱と電気 (または動力) を同時に供給するシステムである。消費地に近いところに発電施設を設置できるため、送電ロスが少なく、また発電に伴う冷却水、排気ガス等の排熱を有効に回収利用できるため、エネルギーの有効利用が可能である。とりわけ排熱を有効に利用した場合には、エネルギーの総合効率が最大で 90 %以上に達するため、省エネルギーや二酸化炭素排出削減への貢献に期待されている。

坂口ら<sup>44)</sup>は、家庭用燃料電池コージェネレーションシステム (家庭用 FCCGS) の導入による電力ピークカット効果および省エネルギー効果の検証を目的に、東北電力管内の戸建住宅を想定したシミュレーション解析を行った結果、家庭用 FCCGS の一世帯における導入は冬季に有効であることを示した。赤林ら<sup>45)</sup>は、複数の住宅間で家庭用 FCCGS を導入する場合においても、冬季の方が一次エネルギー量および CO<sub>2</sub> 排出量の削減に有効であることを示した。新野ら<sup>46)</sup>は、ライフスタイルによる住宅のエネルギー需要の増減が固定酸化物系燃料電池コージェネレーションシステム (SOFC-CGS) 導入効果に与える影響の把握を目的にシミュレーションを行った結果、SOFC-CGS の余剰電力の逆潮流を可能とした場合、最大出力の 700 W で運転が可能のため、東京標準型の年間一次エネルギー削減率は 22.9 %から 27.6 %に増加することを示した。新野ら<sup>47)</sup>はまた、世帯ごとに異なるエネルギー需要を考慮した導入効果の検証を目的に、異なる世帯構成・ライフスタイル・機器性能等によりエネルギー需要のばらつきを設定したシミュレーションを行った結果、異なるライフスタイル別に導入効果があることを示した。

### 1.3 研究目的

日本の民生部門におけるエネルギー消費量は年々増加しており<sup>1)</sup>、ネット・ゼロ・エネルギー化や再生可能エネルギーおよび蓄電・蓄熱システムの導入が進められている。2014年4月には「第4次エネルギー基本計画」が閣議決定され、「住宅については2020年までに標準的な新築住宅で、2030年までに新築住宅の平均でネット・ゼロ・エネルギー・ハウスの実現を目指す」という政策目標が設定された。2015年のパリ協定により、世界共通の長期目標として平均気温の上昇を2°Cより十分下方に抑えることが設定された。また、2018年には「第5次エネルギー基本計画」により、再生可能エネルギーの主力電源化が目標とされた。住宅部門ではZEHを中心に太陽光パネルの導入が進んでいる。さらなる再生可能エネルギーの導入には、天候による出力変動に対する調整力の確保などの次世代送配電ネットワークへの環境整備が必要とされる<sup>2)</sup>。日本では、パリ協定やエネルギー基本計画をもとに長期エネルギー需給見通し(エネルギーミックス)を策定し、実現に向けて政策が進んでいる。特に、現在火力・揚水発電に頼っている調整力については、デマンドレスポンスによる電力需要の調整や、蓄電池などの蓄エネルギー設備による脱炭素化求められている<sup>2)</sup>。

これらの背景を受け、日本の住宅部門では再生可能エネルギーの導入が促進されている。ZEHなどの普及に伴い、分散型電源が大量に導入された際に発生する低負荷期における余剰電力の系統への逆流が、都市配電網の電圧上昇・周波数調整などに問題を生じさせることが懸念されている。また、2019年以降に固定価格買取制度が順次終了し売電価格が下落することが予想されており、住宅における余剰電力の積極的な自家消費を検討する必要性がある。一方、アメリカにおけるダッチカーブの問題のように都市全体のエネルギー消費構造にも影響を及ぼすと予想されるため、DRやバーチャルパワープラント(Virtual Power Plant: VPP)による制御により、グリッド全体での電力潮流量の調整やピークの平準化が求められている。

以上のような背景から、本論文では、ZEHの自家消費を向上させるために効率的な設備運用の提案を行うことを目的としている。実験住宅にて予冷・予熱運転やHP給湯器の昼間運転による太陽光発電電力の有効利用に関して評価を行った。さらに、電力需要のシフトや電力ピークの平準化を目指し、DRを想定した予冷運用による電力需要のシフト効果と予冷運用に合わせた居住者行動の効果を評価した。また、ライフスタイルによるPV発電とSOFCのダブル発電の有効性に関する評価を行い、ZEHにおける自家消費を向上させる効率的設備運用方法を提案した。

#### 1.4 本論文の構成

図 1-5 に本論文の構成を示す。本論文は7章で構成されている。

第1章では、本研究の目的と背景を示す。

第2章では、本研究で扱う対象住宅の概要を示す。

第3章では、予冷・予熱運転による太陽光発電の有効利用に関する実験について述べる。

第4章では、デマンドレスポンスへの適応を目指した予冷運転と居住者行動に関する実験について述べる。

第5章では、太陽光発電と燃料電池によるダブル発電の有効性に関するライフスタイル別評価について述べる。

第6章では、各章の研究結果を総括した。

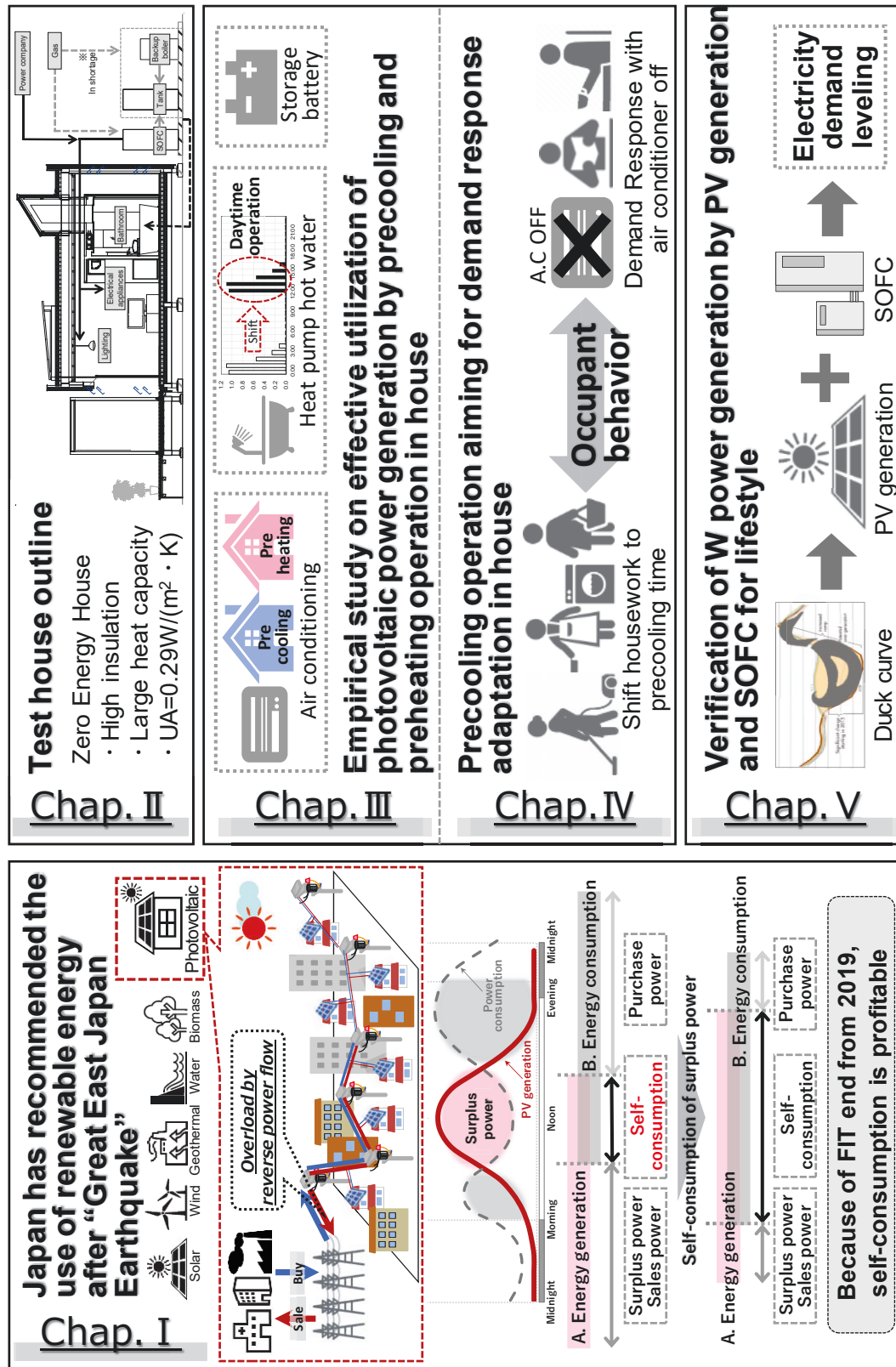


Fig. 1-5 Structure of this thesis



## 参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：平成30年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2019），2019
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁：第5次エネルギー基本計画, 2018
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁：ご家庭の皆様向け節電メニュー
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁：平成27年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2016），2016
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁：固定価格買取制度（FIT）
- 6) 経済産業省資源エネルギー庁：再生可能エネルギー各電源の導入の動向について，2015
- 7) 中田祐司：低炭素社会を実現するスマートグリッドとスマートシティ，電気学会全国大会, 2012. 3
- 8) ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス支援事業調査発表会, 2018
- 9) 経済産業省資源エネルギー庁：平成30年度戸建て住宅における ZEH 支援事業の主なポイント, 2018
- 10) 経済産業省資源エネルギー庁：ZEH の定義（改定版）＜戸建住宅＞, ZEH ロードマップ フォローアップ委員会, 2019. 2
- 11) 樋口ら：ゼロエネルギー住宅のシミュレーションによる設計と評価(選抜梗概,環境建築システムの性能評価，日本建築学会大会，環境工学Ⅱ オーガナイズドセッション，pp. 953-956, 2011. 7
- 12) 中川ら：既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案，日本建築学会技術報告書，第59巻，pp. 239-242, 2019. 2
- 13) 柳ら：タウンハウスのゼロエネルギー化に関する研究：その1 タウンハウスにおけるパッシブ省エネ手法・アクティブ省エネ手法の導入，日本建築学会大会，環境工学Ⅱ，pp. 1207-1208, 2012. 9
- 14) 仲保ら：タウンハウスのゼロエネルギー化に関する研究：その2 ゼロエネルギータウンハウスの提案，日本建築学会大会，環境工学Ⅱ，pp. 1209-12, 2012. 9
- 15) 松永ら：ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その6）太陽光発電・蓄電池導入住宅における自家消費率の評価，日本建築学会大会，環境工学Ⅱ，pp. 1159-1160, 2016. 8
- 16) 常岡ら：既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その3：自立的なエネルギー運用を目指した設備・制御計画，日本建築学会大会，環境工学Ⅱ，pp. 315-316, 2018. 7
- 17) 大木ら：既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その4：エネルギー運用に関する冬季実測結果，日本建築学会大会，環境工学Ⅱ，pp. 317-

- 318, 2018. 7
- 18) 電力広域的運営推進機関：第6回調整力等に関する委員会（資料6）調整力の定義及び調整力確保計画の対象について, 2015
  - 19) 常岡：Demand Response への適応を目指した居住者行動の快適性・健康性評価, 早稲田大学創造理工学部建築学科修士論文, 2018
  - 20) 常岡ら：快適性を考慮したゼロ・エネルギーハウスの自立的運用に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集, 第10巻 J-50, pp. 293-296, 2017
  - 21) 秋元瑞穂：電気自動車の利用を考慮したゼロ・エネルギー住宅の自家消費運用手法の提案, 早稲田大学創造理工学部建築学科卒業論文, 2018
  - 22) 高橋ら：再生可能電源出力の不確実性を考慮した需給運用計画モデルを用いた蓄電池と可制御ヒートポンプ給湯機による発電コスト低減効果分析, 電気学会論文誌. B 137(12), pp. 756-765, 2017
  - 23) 森田ら：デマンドレスポンス制度導入による居住者行動とエネルギー消費量変化の推計, 土木学会論文集 G (環境), 第71巻, 第5号, pp. I357-I368, 2015
  - 24) Yolande Strengers : Air-conditioning Australian households: The impact of dynamic peak pricing, Energy Policy, Vol. 38, No. 11, pp. 7312-7322, 2010
  - 25) 金ら：住宅における予冷・予熱運転による太陽光発電電力の有効利用に関する実証研究日本建築学会論文集, 第755号, pp. 73-82, 2019
  - 26) 加藤ら：ダイナミックプライシングと家庭における最大限節電行動の特徴, 自動制御連合講演会講演論文集 59(0), pp. 159-160, 2016
  - 27) 行動科学を活用した家庭部門における省エネルギー対策検討会：H29年度行動科学を活用した家庭部門における省エネルギー対策検討会報告書概要版（案）, 2018
  - 28) 環境省：行動科学の活用を通じた行動変容の促進にかかる環境省の取組, 2017
  - 29) 森ら：家庭での省エネルギー行動に対する内発的動機付けの長期的な効果:実際のエネルギー使用量と自己申告による省エネ行動を用いた検討, 社会心理学研究, 第31巻, 第3号, pp. 160-171, 2016
  - 30) デロイトトーマツコンサルティング合同会社：家電と自動車の利用者に対し省エネ行動を促すナッジ活用手法の確立に向けた大規模社会実証平成29年度成果（速報）, 2018
  - 31) 入來ら：心電図 R-R 間隔検査を用いた熱的快適性の評価, 日生氣誌第30巻, 第2号, pp. 57-63, 1993
  - 32) 西川ら：温熱環境が心拍変動に与える影響, 人間工学 第33巻, 第2号, 1997
  - 33) 花岡ら：温熱環境と代謝量が心拍数に及ぼす影響に関する基礎研究, 空気調和・衛生工学会学術公演論文集, 第6巻, pp. 269-272, 2016
  - 34) 内村ら：LF/HF を用いた時空間ストレス指標の提案, 情報処理学会研究報告, 第2012-
-

---

MPS91/BIO32 卷, 第2号, 2012

- 35) 品川ら：長時間心電図の心拍変動解析による筋萎縮性側索硬化症の心・血管系自律神経機能評価, 日職災医誌, 第58巻, pp. 109-115, 2010
- 36) 高橋ら：気分と心拍変動に対する身体活動タイプの影響, 体育学研究, 第63巻, pp. 739-752, 2018
- 37) 前田陽一郎：心拍情報に基づくリラクゼーションサウンド生成手法, 31stFuzzy System Symposium, 2015
- 38) 堀ら：客観的なストレス評価方法について, 日本職業・災害医学会会誌 JSOMT, 第66巻, 第5号, 2018
- 39) 高田ら：心拍変動周波数解析の LF 成分・HF 成分と心拍変動係数の意義-加速度脈拍測定システムによる自律神経機能評価-, HEP 第32巻, 第6号, pp. 504-512, 2005
- 40) 株式会社疲労化学研究所：測定結果表の見方 <http://www.fatigue.co.jp/qa.htm> (2018/11/11 閲覧)
- 41) 松下昌之助：心拍変動解析を用いた視覚障害と理学療法臨床実習のストレス評価, 筑波技術大学紀要, 筑波技術大学テクノレポート, 第21巻, 第2号, pp. 56-60, 2014
- 42) Keisuke TSUNODA et al.: Predicting Change in a Cognitive Performance using Heart Rate Variability, IPSJ SIG-DPS, DICOMO symposium, 2016
- 43) 角田ら：心拍変動を用いた認知能力変化の予測, IPSJ SIG-DPS, マルチメディア、晚餐、協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2016), 2016
- 44) 坂口淳ら：家庭用燃料電池による電力需要のピークカットに関する研究 その1 戸建住宅における電力需要のピークカット効果, 日本建築学会北陸支部研究報告書, 第55号, pp. 223-226, 2012
- 45) 赤林伸一ら：家庭用燃料電池による電力需要のピークカットに関する研究 その2 東北電力管内における電力需要のピークカット効果, 日本建築学会北陸支部研究報告書, 第55号, pp. 227-230, 2012
- 46) 新野将平ら：ライフスタイルに基づく家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの省エネルギー性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 699-700, 2013
- 47) 新野将平ら：エネルギー需要のばらつきがSOFC導入効果に与える影響, 空気調和・衛生工学大会学術講演論文集, pp. 61-64, 2014

図・表リスト

Fig. 1-1	Energy consumption and GDP .....	1
Fig. 1-2	Trend of energy consumption per household and energy consumption by application....	2
Fig. 1-3	Overview of the FIT .....	3
Fig. 1-4	ZEH definition.....	7
Fig. 1-5	Structure of this thesis .....	16

## 第 2 章

对象住宅概要



## 第2章 対象住宅概要

### 2.1 はじめに

第2章では実験を行った対象住宅概要を示す。対象住宅は2014年度に開催されたエネマネハウスにおいて提案したZEH住宅である。移築後、設備を随時更新しながら利用している。

### 2.2 全体計画

一般社団法人環境共創イニシアチブが先進的な技術を取り込んだZEHの実証および展示を目的に平成25年度「ネット・ゼロ・エネルギー・ハウスの標準化に係る調査・実証事業」を実施した。事業の一環として、大学が主体となり、先進的なZEHの技術やZEHを活用した新たな住まい方を取り込んだモデルハウスを建築・展示する「エネマネハウス2014」を経済産業省資源エネルギー庁主催で2014年1月末に開催した。早稲田大学は、本研究で扱うZEH「Nobi-Nobi HOUSE ～重ね着するすまい」を提案した。本研究は、2014年8月に静岡県富士市へ移築を行ったZEH「Nobi-Nobi HOUSE ～重ね着するすまい」において行った。

表2-1に対象住宅概要、図2-1に断面パース、図2-2に平面図、図2-3に3重構造模式図を示す。対象住宅は、鉄骨構造であり、住宅の中心にある設備コアを居住ゾーンが取り囲み、さらに半屋外空間のNobi-Nobiゾーンが住宅を取り囲む3重構造の平面計画となっている。

Table 2-1 Building outline

Location	Shizuoka, Japan	Main structure	Steel
Total floor area	53.6m <sup>2</sup>	Max height	5.3m
Number of floors	1	Ceiling height	2.7m
U <sub>A</sub> value	0.29W/(m <sup>2</sup> ・K)	ηA value	0.6



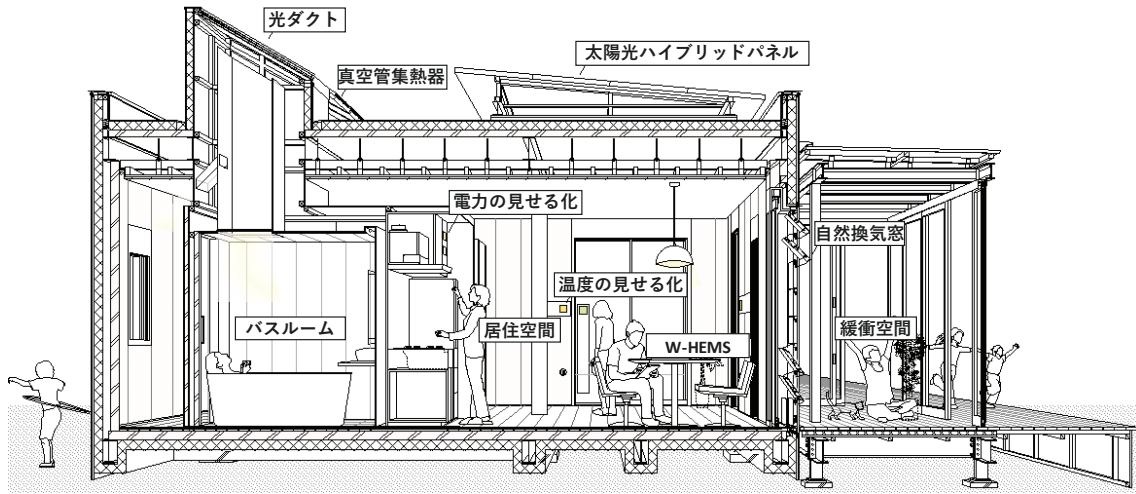


Fig. 2-1 Cross section perspective

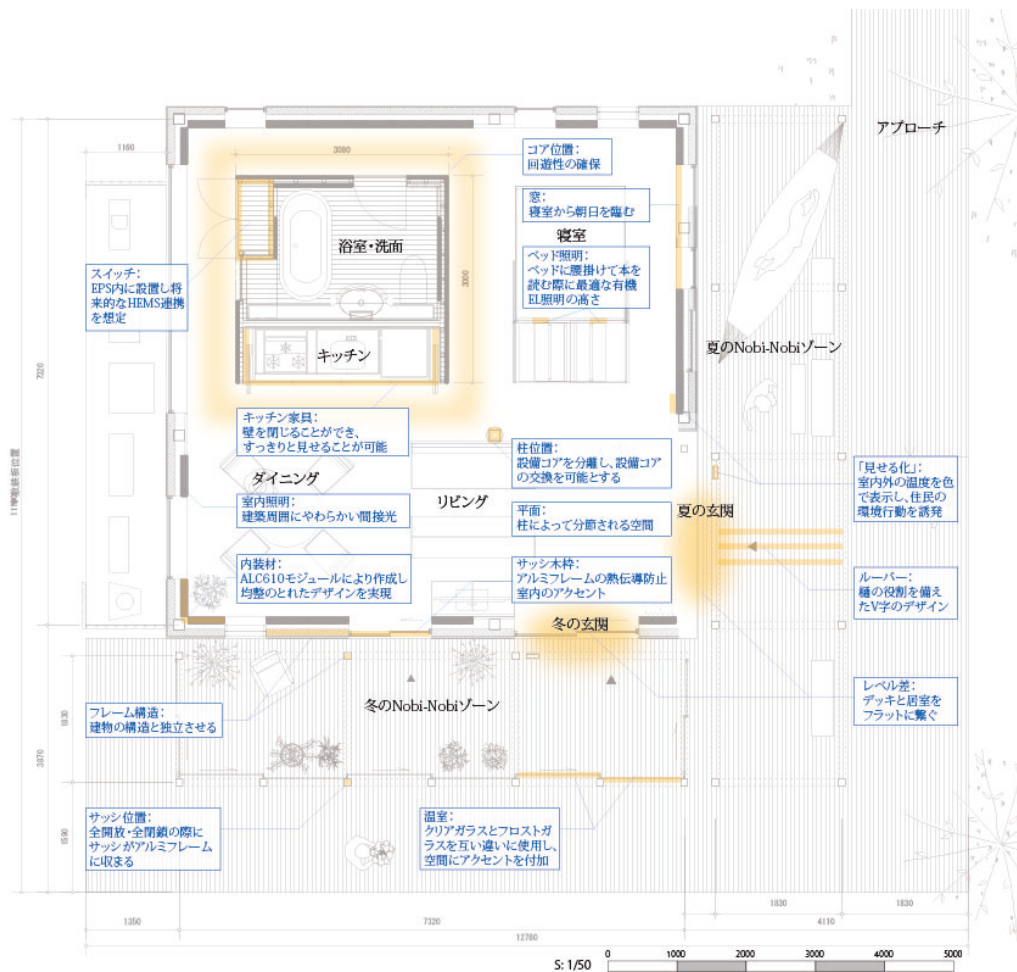


Fig. 2-2 Floor plan



## 2.3 Nobi-Nobi HOUSE コンセプト

### 2.3.1 設備コア

キッチンや浴室、空調設備といった日本の高性能設備および生活インフラをユニット化された空間である。太陽からの日射をお湯、電気および光エネルギーに変換し、居住ゾーンに供給する。

### 2.3.2 居住ゾーン

リビングルームやダイニングルーム、寝室を含んだ、生活の中心となる空間である。設備コアで創り出したお湯、電気および光エネルギーを用いて、床暖房、照明および家電を動かし、日々の快適な生活を確保する。

### 2.3.3 Nobi-Nobi ゾーン

Nobi-Nobi ゾーン季節や地域、住民の好みに合わせて日射や風等の自然エネルギーの取り入れを調整しながら、居住空間を伸び縮ませることができる空間である。

#### ①夏の Nobi-Nobi ゾーン

夏を想定した Nobi-Nobi ゾーンには、天井部に遮光ネットを設置する。遮光ネットおよびカーテンを用いて、天井部は 60%程度、側面部は 20%程度の日射を遮蔽しながらも、風を取り入れることが可能である。

#### ②冬の Nobi-Nobi ゾーン

冬を想定した Nobi-Nobi ゾーンには、風を遮り日光を通すポリカーボネート、ガラスおよび遮光ネットを使用し、居住ゾーンと外気との間に緩衝空間を生み出す。風除室として機能するほか、太陽熱を取り込むことで温室の効果が得られる。

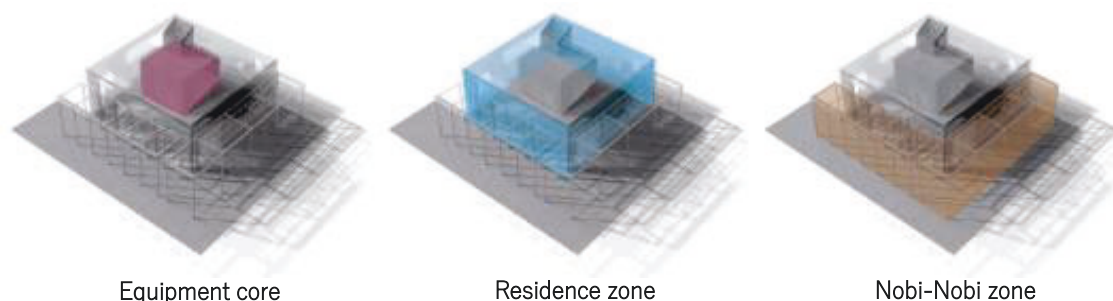
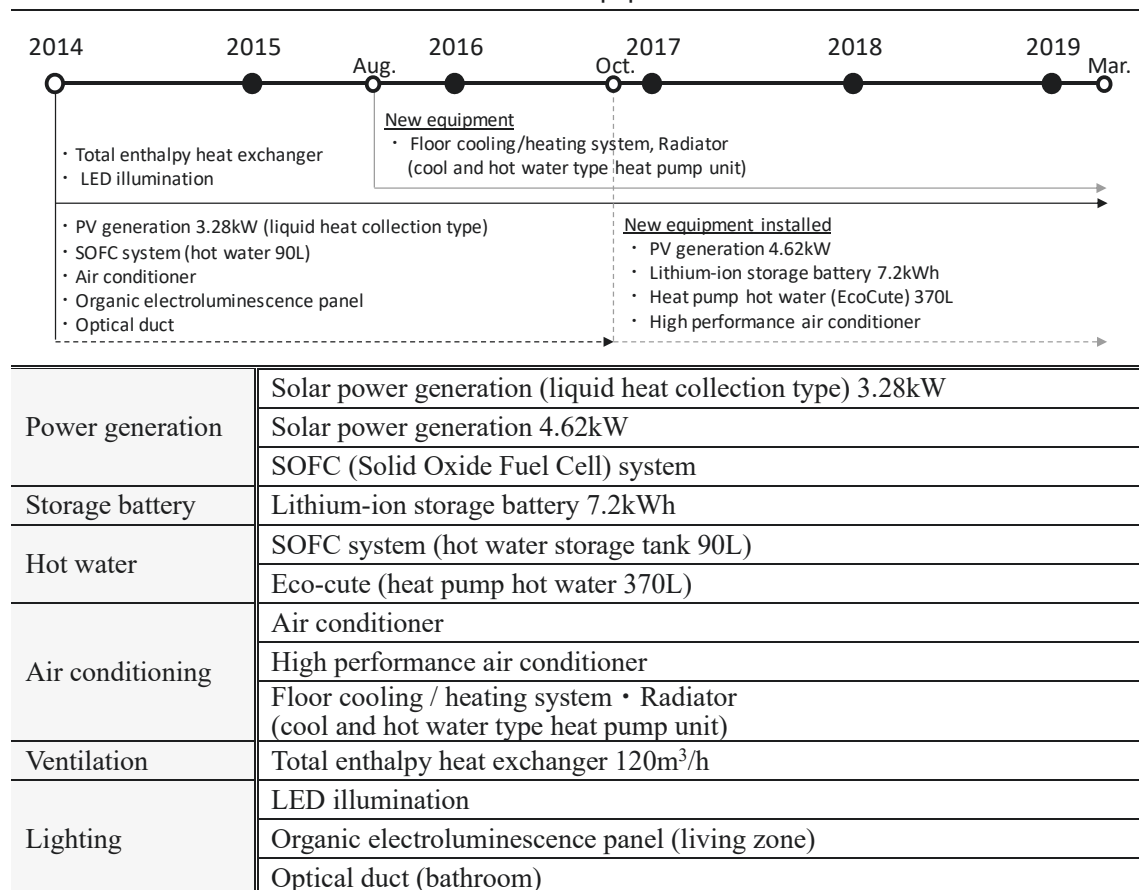


Fig. 2-3 Triple structure schematic diagram

## 2.4 投入技術

表 2-2 に導入技術一覧を示す。本建物では、外皮、パッシブ、冷暖房、換気、給湯、照明、発電に関して、様々な技術を導入することで、省エネルギー性能を高めている。以下に導入技術の詳細を記す。

Table 2-2 Equipment list



### 2.4.1 外皮

#### ①フェノールフォーム+ALCパネル

ALC パネルを蓄熱材として活用することを意図として内壁に「あらわし」の状態で使用し、外断熱とした。断熱材には居住ゾーンの外断熱性能を高めるために、高断熱性能のフェノール樹脂系断熱材（ネオマフォーム）を採用した。ALC パネルは厚み 100 m のものを、ネオマフォームは熱伝導率  $0.02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、厚み 100 m のものを使用した。

#### ②遮蔽断熱ガラス、高性能サッシ

UA 値  $0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  を満たす省エネ性能の高い遮熱断熱ガラスに加え、遮音性、防犯性、気密性の高いアルミサッシを導入した。開口面積を壁面全体の 3 割程度と大きく取った開放的な室内における快適で安全な居住空間の維持を実現する。

#### ③日射遮蔽・断熱ブラインド

日射取得および気密性の調整を目的に、各窓に断熱・遮熱ブラインドを導入した。HEMS を用いた連携制御により、外部環境に応じて 2 種類のブラインドを自動的に開閉し調整を行うことでエネルギーのロスを抑える。

### 2.4.2 換気設備

#### ①自然換気窓

自然の風力と室内外の温度差で効率の良い自然換気を行う。わずか  $1 \text{ m/s}$  前後の微風で開閉が可能であり、無風時には重力換気を行う。加えて HEMS を用いた連携制御により、適切な時間に外気導入が行える。自然換気窓を自動制御運転した場合、雨天時と強風時に閉鎖する仕様となっている。

#### ②全熱交換機システム

換気の際に屋外への排熱を、熱交換により排気から回収し、給気に再利用する。消費電力を従来比最大 45%削減した全熱交換器を導入し、省エネ・高効率な換気計画を行う。

### 2.4.3 冷暖房設備

#### ①ヒートポンプエアコン

表 2-3 にエアコン仕様を示す。エアコンは冷房能力 3.6kW、暖房能力 4.2kW の空冷式の高性能ヒートポンプエアコンを導入した。ECHONET Lite に対応し、W-HEMS によって ONOFF 制御、室温設定等が可能である。

Table 2-3 Specification of air conditioner

	Capacity [kW]	Power consumption [kW]	COP	Air volume [m <sup>3</sup> /min]		
				Hight	Middle***	Low
Cooling	3.6*	0.825	4.36	14.8	11.8	9.3
Heating	4.2**	0.825	5.09	16.4	11.9	9.2

\*: outdoor air temperature 35°C, indoor air temperature 27°C

\*\* : outdoor air temperature 7°C, indoor air temperature 20°C

\*\*\*: used in this measurements

#### ②ヒートポンプ放射冷暖房

ヒートポンプを熱源とした空気式床冷暖房システム・結露許容型ラジエータを導入している。表 2-4 に放射冷房の仕様、図 2-4 に空調設備の配置場所、図 2-5 に放射冷房システム系統図を示す。高性能空冷式のヒートポンプエアコンは夏季の床冷房の除湿機器、冬季は床暖房の補助熱源として利用する。ヒートポンプ式放射冷暖房は床裏に設置したパネルに冷温水を流し、夏に床冷房、冬は床暖房を行う。また夏と中間期において自然換気とラジエータの併用によって冷房を行う。操作パネルに遠隔操作可能な IoT 機器を設置し、ボタンを小型ロボットで操作した。

Table 2-4 Specification of radiant air conditioning

Type	Floor cooling/heating・Radiator (Cool and hot water type heat pump unit)	
Water supply system	Open type	
Operation mode	Cooling*	Heating**
Capacity	3.0 kWh	4.0 kWh
Power consumption	1.2 kWh	1.0 kWh
Driving current	7.0 A	6.2 A
COP.	2.5	4.0

\*: Outdoor temperature 35°C, Supply water temperature 19°C

\*\* : Outdoor temperature 7°C, Supply water temperature 40°C

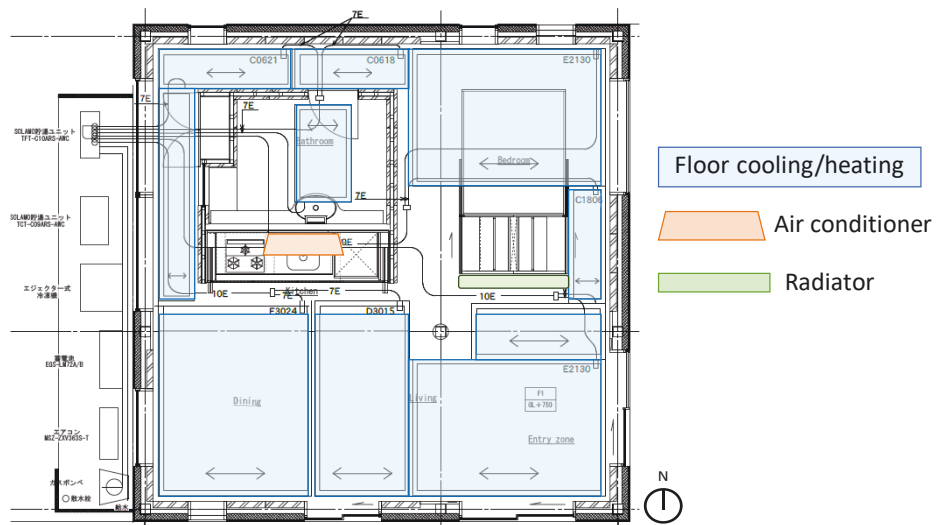


Fig. 2-4 Location of air conditioning system

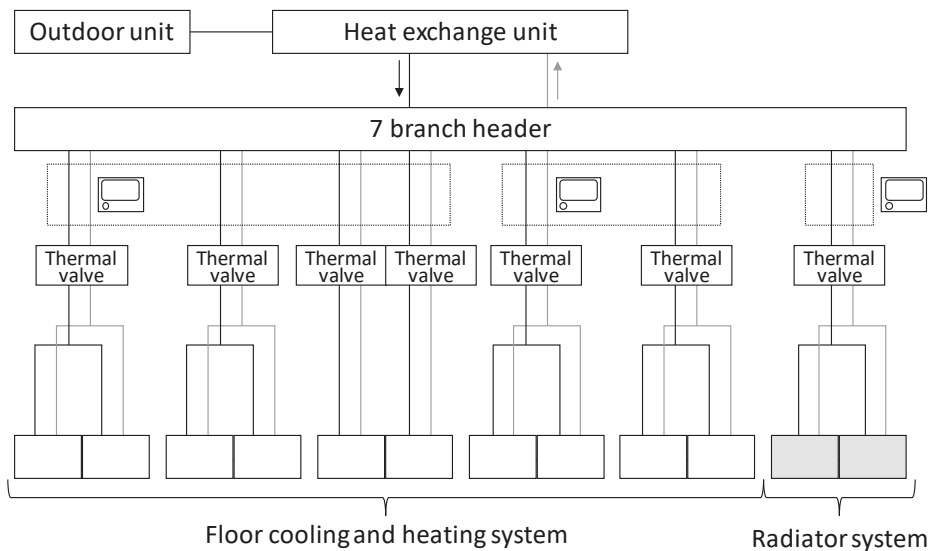


Fig. 2-5 Radiant air condition diagram (floor cooling and heating, radiator)

#### 2.4.4 照明設備

##### ①光ダクト

トップライトで取り入れた自然光を浴室内、廊下側へ導入する。木漏れ日のような光を演出するデザイン性の高い光ダクト「スカイシャワー」を導入し、太陽高度に関わらず日中ほぼ同じ照度を保つことが可能である。

##### ②有機 EL 照明

有機 EL 照明は、LED と共に省エネ性能の高い照明である。非常に薄型で熱を持たず、やわらかい面の光、優しい色合いの実現化等の特徴を持つ。室内外温度や電力消費量等の環境情報を有機 EL 照明パネルの色合いとして「見せる化」する。数値やグラフではなく色合いによる情報提供を行うことで、居住者が快適さにつながる環境調整行動を行うタイミングを直感的に感じ取れる仕組みである。

#### 2.4.5 太陽光発電システム (Photovoltaic, PV)

表 2-5 に PV パネルの機器仕様を示す。2014 年から 2016 年 10 月まで利用した既存 PV パネルは、単結晶セルの太陽電池とし、発電効率を 16.06%、パネル総面積を 20.426 m<sup>2</sup>、設置角度を水平面に対し 5°、設置方位は南面である。

2016 年 10 月に設備改修を行い、新たに京セラ製の PV パネルを導入した。単結晶セルの太陽電池とし、発電効率を 16.61%、パネル総面積を 27.81 m<sup>2</sup>、設置角度を水平面に対し 5°、設置方位は南面である。

Table 2-5 Specification of PV system

	Used 2014~2016.10	Used 2016.10~2019.03
External dimension	H808 x W1,580 x D40mm	H990 x W1,338 x D46mm
Maximum power output	3.28kW	4.62kW
Power generation efficiency	16.06%	16.61%
Total solar panel area	20.43m <sup>2</sup>	27.81m <sup>2</sup>
Direction・Angle	South, 5°	South, 10°

2.4.6 蓄電池システム (Storage Battery, BT)

表 2-6 に蓄電池の仕様を、図 2-6 に蓄電池のグリーンモードを示す。蓄電池はリチウムイオン蓄電池として、定格容量は 7.2kWh で実質容量は定格容量 7.2kWh×放電深度 80%×パワコンディショナ効率 94%である。蓄電池は昼間に PV 発電の余剰分を BT へ優先的に充電するグリーンモードに設定した。本モードは、昼間に宅内で電力を消費する際の電源は、PV 発電を最優先に使用し、2 番目に BT の放電、3 番目に系統からの買電となる。

Table 2-6 Specification of BT

Type	Lithium-ion storage battery
Rated capacity*	7.2 kWh
Rated voltage	DC180 V
Number of charge and discharge cycles	6,000 cycles, Deterioration degree is over 80%

\* : The actual available capacity is approximately 5.4kWh  
(rated capacity 7.2kWh x discharge depth 80% x power conditioner efficiency 94%)

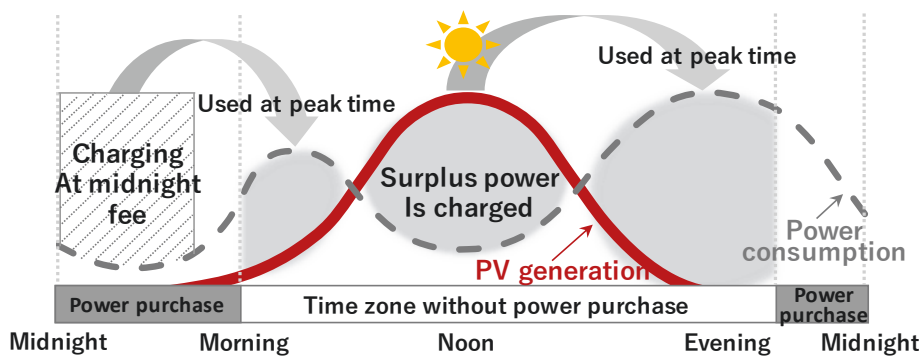


Fig. 2-6 BT system diagram (green mode)

### 2.4.7 固体酸化物形燃料電池システム (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

表 2-7 に SOFC システムの仕様、図 2-7 に SOFC システムの概念図を示す。SOFC とは、空気中の酸素と都市ガスから作った水素や一酸化炭素を利用した発電手法である。発電量は天候条件に左右されず、高いエネルギー回収効率を得ることができる。騒音・振動も少ない発電設備であり本体が小型なため、今後の家庭利用への発展・普及が期待されている。本実験では、定格発電出力 700 W、発電効率 42%、熱回収効率 39.2% (高位発熱量基準、0℃、1 気圧時) の SOFC を用いた。

Table 2-7 Specification of SOFC system

Fuel cell unit	Power output	Rated capacity 700W (output range: 50~700W)
	Heat capacity	Rated capacity 650W
	Fuel cell type	SOFC (solid oxide fuel cell)
	GAS type	City gas 13A
	Efficiency	Generation 42.0% Heat recovery 39.2%
Hot water unit	Hot water temperature	Approximately 70°C
	Hot water storage tank	90L

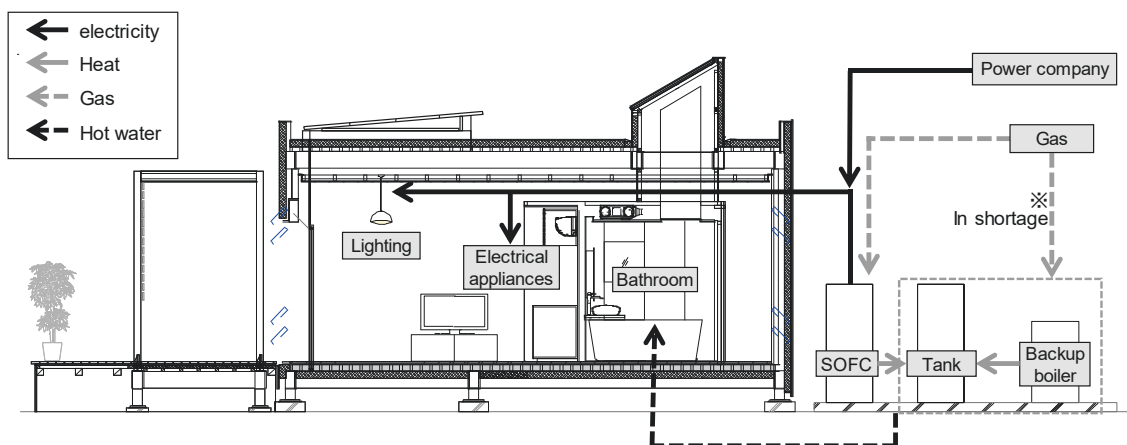


Fig. 2-7 SOFC system diagram



#### 2.4.8 ヒートポンプ給湯器 (EcoCute, EC)

表 2-8 にヒートポンプ給湯器 (EC) の仕様を示す。高性能 CO<sub>2</sub> ヒートポンプ給湯器で、貯湯タンクの容量は 370L、加熱能力は 4.5kW である。ECHONET Lite に対応し、W-HEMS を用いて沸き上げ開始、停止の指示が可能である。実測時は、沸き上げ開始のみ W-HEMS で制御し、沸き上げ完了の判定は EC 自身の制御システムに依存した。

Table 2-8 Specification of heat pump water heater (EC)

Type	Heat pump unit	
Heating capacity	4.5kW	
Boiling temperature range	Approximately 65~90°C	
Hot water temperature	32, 35, 38~47, 50, 55, 60°C	
Hot water storage tank	370L	
Hot water storage unit	Boiling pump	DC24V, rated capacity 35W
	Bath pump	DC282V, rated capacity 60W
	Reheat pump	DC24V, rated capacity 10W

#### 2.4.9 W-HEMS

設備コアから供給されるエネルギーを有効に使用するために、冷房使用時には開口部からの熱損失を抑制すること、さらには外部環境を把握し適切な時間帯に外気を室内に導入することが可能な場合、冷房の使用自体を抑制することも可能である。このように居住者への省エネルギーに関する情報提供や、窓やブラインド等の建築設備とエアコン等の電気設備を連携制御することで更なる消費エネルギーの削減が見込まれる。対象住宅では、ホーム・エネルギー・マネジメント・システム (以下、HEMS) を導入し、建築設備と電気設備の双方の制御を行うことで省エネかつ快適な居住空間の実現を目指した。

W-HEMS とは、早稲田大学の建築系・田辺研究室と電気系・林研究室が共同開発を行い、「DR 信号」に対する建築設備の制御の検討を行った HEMS である。日射遮蔽・断熱の 2 種のブラインドと自然換気窓を全天日射量・外気空気温度・室内空気温度等の環境条件により制御を行う。2018 年度は新たに ECHONET Lite に対応した HP 給湯器 (EC) を導入したため、W-HEMS による制御システムの構築を行った。

## 2.5 熱容量計算

表 2-9 に各部材構成および性能値、表 2-10 に ALC パネルの熱容量を示す。対象住宅は鉄骨構造の地上 1 階建ての低層住宅である。断熱材には熱伝導率  $0.02\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、厚み  $100\text{mm}$  の高断熱性能のフェノール樹脂系断熱材（以下、PF と呼ぶ）を採用した。ALC パネルは断熱材の内側に設置する外断熱方式をとっており、熱伝導率  $0.19\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、厚み  $100\text{mm}$  のものを使用した。ALC パネルの全体熱容量は  $7,140\text{kJ}/\text{K}$ 、床面積当たりの熱容量は  $133\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$  であり、石膏ボードや合板  $12\text{mm}$  のみを採用した場合と比較して約 4 倍の熱容量である。

Table 2-9 Material property value of building each part

	Constitution	Thickness [mm]	Thermal conductivity [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]	Thermal transmittance [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]	Solar heat acquisition rate [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]
Outer Wall	ALC	100	0.19	0.20	-
	Air layer	-	-		
	Phenolic foam	100	0.02		
	Air-tight sheet	-	-		
	Steel plate 16type	-	-		
Inner wall	ALC	50	0.19	1.04	-
	Ply wood	5	0.16		
	Air layer	-	-		
	Ply wood	5	0.16		
	ALC	50	0.19		
Ceiling roof	Plaster board	9	0.22	0.20	-
	Air layer	-	-		
	ALC	75	0.19		
	Phenolic foam	100	0.02		
	Insulation sheet waterproof	-	-		
Floor	Flooring	15	0.16	0.20	-
	Hot water mat	12	-		
	Ply wood	18	0.16		
	ALC	100	0.19		
	Phenolic foam	100	0.02		
Window	Aluminum sash	-	-	1.30	0.33
	Heat shield Low-E pair glass	-	1.15		
Blind	Solar shading blind	-	-	6.40	-
	Insulation blind	-	-	2.60	

Table 2-10 ALC panel heat capacity

		Area [ $\text{m}^2$ ]	Thickness [mm]	Effective Thickness [mm]	Volumetric specific heat [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ]	Heat capacity per $1\text{m}^2$ [ $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]	Heat capacity [ $\text{kJ}/\text{K}$ ]
Wall	Outer wall	53.40	100	70	565.11	39.56	2,113
	Equipment core (outside)	15.84	50	50	565.11	28.26	448
	Equipment core (inside)	12.05	50	50	565.11	28.26	341
	Floor	53.58	100	70	565.11	39.56	2,120
	Ceiling	53.58	75	70	565.11	39.56	2,120
	Total	188.46	-	-	-	-	7,140

## 2.6 まとめ

第2章では、本研究で扱う対象住宅の概要について述べた。対象住宅はエネマネハウス2014の際に早稲田大学が計画・建設したZEHである。外断熱式を採用し、内装にALCを利用しているため、熱容量が比較的大きな、高断熱住宅である。導入設備としては、太陽光発電システム(PV)、蓄電池システム(BT)、固体酸化物形燃料電池システム(SOFC)、自然換気窓、断熱ブラインド、日射遮蔽ブラインド、高性能エアコン、ヒートポンプ式放射冷暖房(床冷暖房・ラジエーター)、ヒートポンプ給湯器、全熱交換器、有機LED照明がある。また、窓やブラインド等の建築設備とエアコン等の電気設備を連携制御するため、対象住宅では、ホーム・エネルギー・マネジメント・システム(HEMS)を導入した。2018年度はECHONET Liteに対応したHP給湯器を新規に導入した。

図・表リスト

Table 2-1	Building outline .....	23
Fig. 2-1	Cross section perspective .....	24
Fig. 2-2	Floor plan .....	24
Fig. 2-3	Triple structure schematic diagram .....	25
Table 2-2	Equipment list.....	26
Table 2-3	Specification of air conditioner.....	28
Table 2-4	Specification of radiant air conditioning.....	28
Fig. 2-4	Location of air conditioning system.....	29
Fig. 2-5	Radiant air condition diagram (floor cooling and heating, radiator).....	29
Table 2-5	Specification of PV system.....	30
Table 2-6	Specification of BT.....	31
Fig. 2-6	BT system diagram (green mode) .....	31
Table 2-7	Specification of SOFC system.....	32
Fig. 2-7	SOFC system diagram.....	32
Table 2-8	Specification of heat pump water heater (EC).....	33
Table 2-9	Material property value of building each part.....	34
Table 2-10	ALC panel heat capacity.....	34

## 第3章

予冷・予熱運転による太陽光発電の有効利用に関する実験



### 第3章 予冷・予熱運転による太陽光発電の有効利用に関する研究

#### 3.1 はじめに

日本の住宅部門では、再生可能エネルギーの導入が促進されており、2030年には太陽光パネルの搭載が750万件、累計導入容量が40GWと予想されている<sup>1)</sup>。ZEHなどの普及に伴い、分散型電源が大量に導入された際に発生する低負荷期における余剰電力の系統への逆流が、都市配電網の電圧上昇・周波数調整などに問題を生じさせることが懸念されている。また、2019年以降に固定価格買取制度が順次終了し売電価格が下落することが予想されており、住宅における余剰電力の積極的な自家消費を検討する必要がある。

断熱・気密性能が高い住宅ほど、冷暖房室と非冷暖房室との温度差が小さくなり、エネルギー消費が削減されることが知られている<sup>2)</sup>。また、放射冷暖房に関しては、浦山らの研究<sup>3)</sup>で、放射冷房とエアコンの併用運転はエアコン単独運転より快適な室内温熱環境を維持できることが確認され、坂本らの研究<sup>4)</sup>では、放射冷暖房はエアコンに比べ、1日を通じて温熱環境を均一に制御しやすく、間欠運転によって電力消費量の削減も実現できることが示されている。

以上のように、放射冷暖房、住宅の断熱性能、エネルギー消費、温熱環境に関する研究は数多くある。その一方で、蓄エネルギーによる再生可能エネルギーの自家消費などの有効活用手法と熱的快適性に関して一体的に取り扱った研究は少ない。

## 3.2 研究目的

本章では、太陽光発電の余剰電力を自家消費する運用方法として不在時間帯に冷房・暖房を稼働させる予冷熱運転に着目した。快適性を向上しながらも、売買電力量を削減することで自家消費率の向上を目指す予冷熱運転手法の提案を目的とした。予冷熱運転手法ごとの熱的快適性及びPV発電の自家消費率に与える影響を把握するため、空調方式や予冷熱運転時間が異なる10条件において物理環境、電力量、サーマルマネキンを用いた熱損失量の実験を行った。

## 3.3 実験概要

### 3.3.1 実験条件

表 3-1 に設備設定条件、表 3-2 に夏季の実験条件、図 3-1 に夏季の予冷運転・BT稼働スケジュール、表 3-3 に冬季の実験条件、図 3-2 に冬季の予熱運転・BT稼働スケジュールを示す。実験条件は、空調方式と予冷熱運転時間が異なる夏季5条件、冬季6条件の合計11条件と設定し、空調方式による比較と予冷熱運転時間による比較を季節ごとに行った。居住者のライフスタイルはNHK国民生活時間調査に基づいた空気調和・衛生工学会のスケジュール作成ソフト「SCHEDULE」<sup>5)</sup>によって定めた。全条件で共働き2人世帯を想定し、起床時から外出時までの6:30~8:30を朝在宅時、帰宅時から就寝時までの18:00~23:00を夜在宅時とした。対流方式(エアコン)と放射方式(床冷暖房・ラジエーター)の2つの空調方式を用いて予冷熱実験を行った。BT運転モードはグリーンモードに設定し、系統からの充電設定時間を0時間とし買電による充電を行わなかった。不在時間帯(8:30~18:00)においては、BTから宅内への放電と、PV発電からBTへの充電が可能な設定である。また、宅内で電力を消費する際には、PV発電を最優先に使用し、2番目にBTの放電、3番目に系統からの買電とする。給湯は2人家族の給湯利用を想定<sup>6)</sup>し実際に給湯を行った。HP給湯器は夜間電力で沸き上げる夜間運転で稼働させた。昼間運転に関してはシミュレーションによって再現し、分析を行った。また、開口部に設置されたブラインドは、外気温及び日射の影響を最小化するためすべて閉じた。

朝・夜の在宅時間帯では、全条件において電力消費量削減及び快適性を維持するため、HEMSによってエアコンをPMV制御した。PMV制御は、PMVが快適範囲(±0.5以内)に収まるようにエアコンをON/OFFする制御である。夏季の予冷時間帯の設定温度は、エアコン条件は23°C<sup>注1)</sup>、放射冷房条件は24°C(送水温度19°C)とした。放射冷房時には床表面の結露防止のためエアコンを除湿運転した。冬季の予熱時間の設定温度は、エアコンと放射両条件とも24°C(送水温度40°C)とした。冬季実験では、一般的な運転を想定した在宅運転条件(条件①④)を設定し、朝と夜の在宅時(6:30~8:30、18:00~23:00)のみ一定温度で暖房を稼働した。



図 3-3 に夏季の PV 発電量、日射量及び外気温（代表日）、図 3-4 に冬季の PV 発電量、日射量及び外気温（代表日）を示す。本報における分析の代表日の選定は、季節ごとの発電状況と、実験期間中の外気温に応じて行った。夏季は天候により PV 発電量の変動が大きく、晴天日は 20kWh 以上の発電が確認されたが、曇天日は 12~15kWh 程度となり、晴天日に比べ最大 8kWh 程度減少した。一方で、冬季は PV 発電量の変動は小さく晴天日で約 12kWh、曇天日で 10kWh となった。夏季晴天日は BT 充電や長時間の予冷運転を行っても余剰電力が生じたことや、発電量の少ない冬季実験と同様の分析を行うことを考慮して、夏季実験の代表日は PV 発電量が少ない曇天日とした。冬季実験の代表日は PV 発電量が多い晴天日とした。代表日は外気温の平均値及び変動に近い日を選定した。

Table 3-1 Equipment setting condition

Air conditioning method		Storage battery (BT)			HP water heater operation	Blind control
Convection (A.C.)	Radiant (RAD.)	Operating mode	Charge by purchasing	Discharge		
Air conditioner	Floor cooling and heating system	Green mode	0 hour	16.5 hours (6:30-23:00)	Night mode	All closed
	Radiator					

Table 3-2 Experimental conditions for summer

	Measurement period	Average outdoor temp.	Air conditioning system	Absence		At home
				Precooling	Setting temp.	
Case1	2018.09.05~09.06	26.5°C	A.C.	Non	-	Normal operation*
Case2	2017.07.30, 08.01	26.7°C		6 hours	23°C	A.C. PMV control*
Case3	2017.08.03~08.04	26.0°C		3 hours	23°C	
Case4	2017.08.12~08.13	26.0°C	RAD.	6 hours	24°C	A.C. PMV control*
Case5	2017.08.26~08.27	28.6°C		3 hours	24°C	

\*: setting temperature 25°C

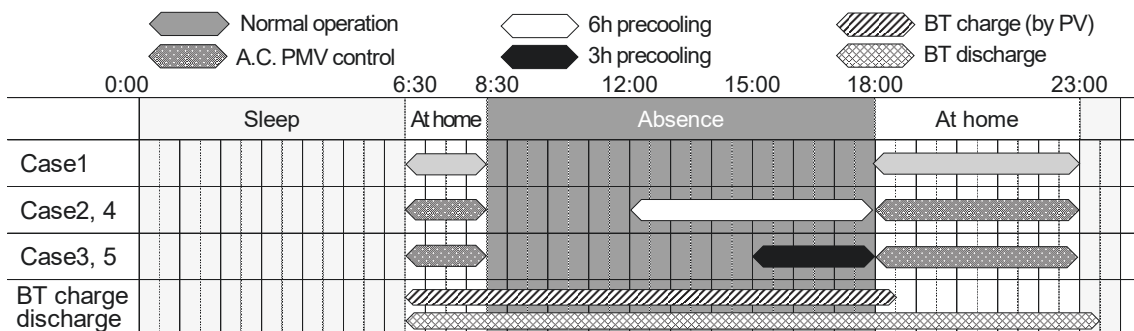


Fig. 3-1 Schedule of precooling・preheating operation and BT for summer

Table 3-3 Experimental conditions for winter

	Measurement period	Average outdoor temp.	Air conditioning system	Absence		At home
				Preheating	Setting temp.	
Case1	2017.12.09~12.10	7.7°C	A.C.	Non	-	Normal operation*
Case2	2017.12.12~12.13	6.0°C		6 hours	24°C	A.C.
Case3	2017.12.17~12.18	6.6°C		3 hours	24°C	PMV control*
Case4	2017.12.27~12.28	5.6°C	RAD.	Non	-	Normal operation*
Case5	2017.12.22~12.23	7.1°C		6 hours	24°C	A.C.
Case6	2017.12.20~12.21	6.9°C		3 hours	24°C	PMV control*

\*: setting temperature 24°C

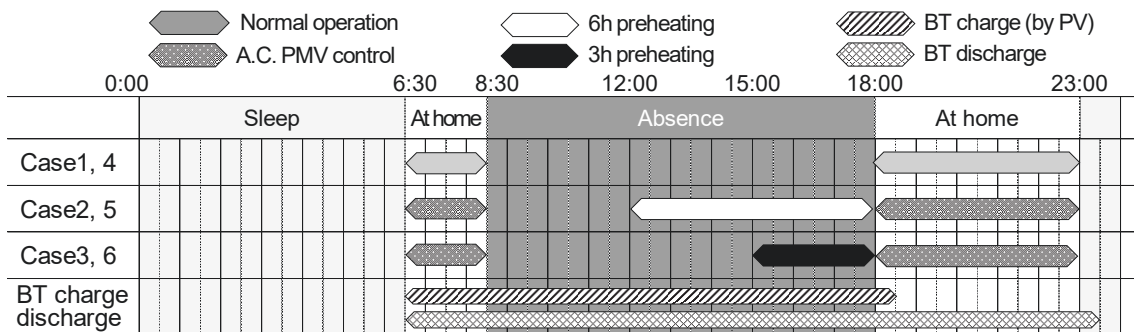


Fig. 3-2 Schedule of precooling · preheating operation and BT for winter

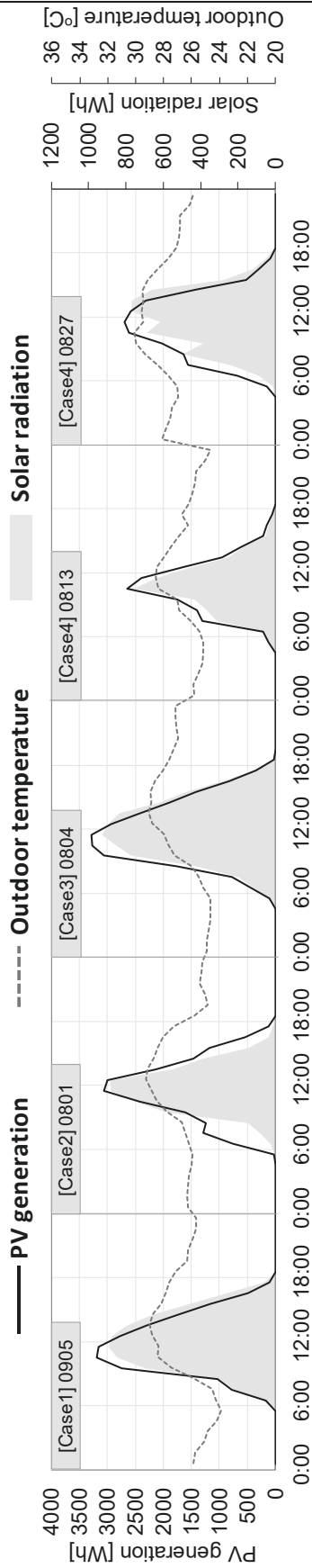


Fig. 3-3 PV generation, solar radiation and outdoor temperature for summer

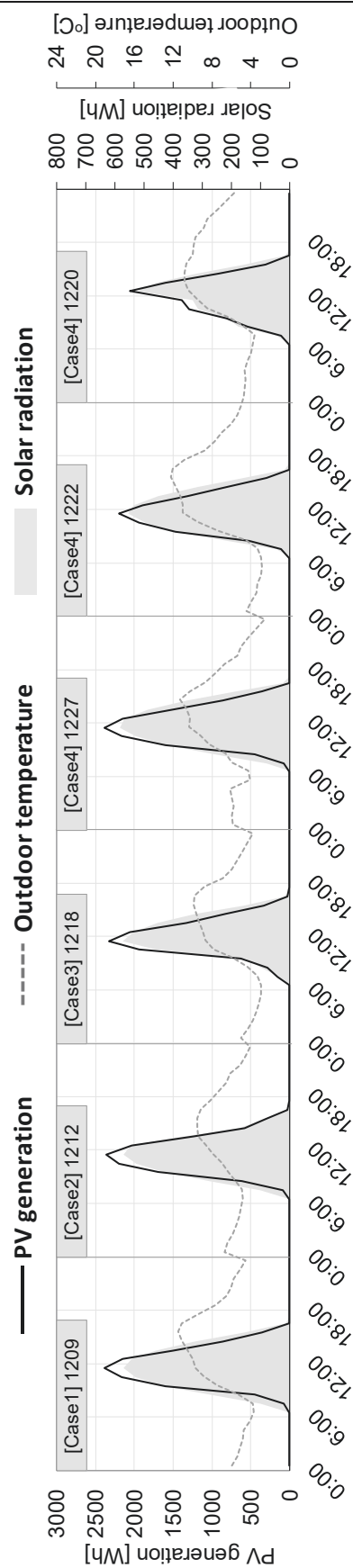


Fig. 3-4 PV generation, solar radiation and outdoor temperature for winter

### 3.3.2 測定項目

表 3-4 に測定項目、図 3-5 に測定位置を示す。室内環境測定は、リビング A・リビング B・寝室・浴室で行い、測定間隔は 1 分とした。電力量測定には HEMS を用い、宅内消費量・売買電力量・PV 発電量・BT 充放電量を測定した。パネルヒーターと加湿器で 2 人分の人体負荷（発熱 160 W、発湿 110 mL/h）を発生させ、電力負荷抵抗器（PCZ-1000A）で家電の電力消費を再現し居住者の生活を模擬した。

Table 3-4 Measurement items

	Measurement items	Legend	Height
Indoor environment	Air temperature	●	1.1m
	Vertical air temperature	◎	0.0m, 0.1m 0.8m, 1.1m 1.7m, 2.2m
	Globe temperature	○	1.1m
	Relative humidity	▲	
	PMV meter	■	
Electric power	Energy consumption / Purchased · sales power		
	PV generation / BT charge · discharge		

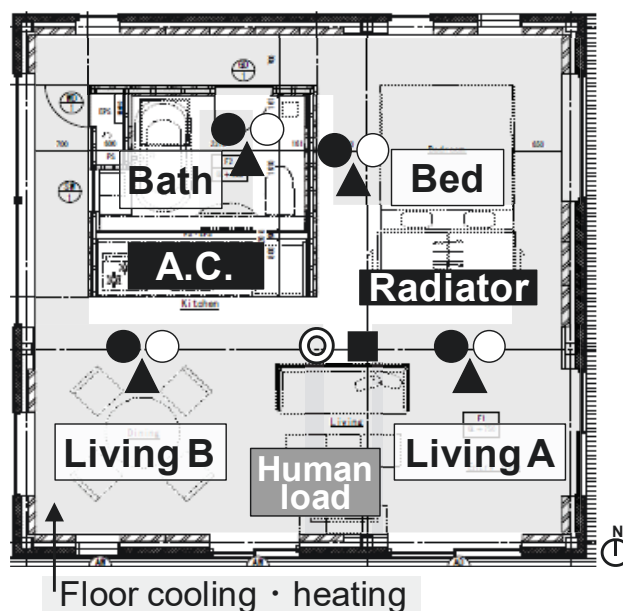


Fig. 3-5 Measurement points and position

### 3.3.3 サーマルマネキン概要

サーマルマネキンとは、人間の大きさと同様の形をもつセンサーで、全身及び部位ごとの皮膚表面温度、放熱量を測定する。独立した部位ごとに供給熱量が測定され、各部位の表面温度が一定または可変とするように、電力が供給される。人体形状に由来する対流と放射による伝熱過程の複雑さを、サーマルマネキンの表面温度により包括的な把握することが可能である。

表 3-5 にサーマルマネキンの仕様、図 3-6 にサーマルマネキンの設置場所、図 3-7 にサーマルマネキンの実験風景を示す。デンマークで開発された男性、身長 175cm、測定部位数 22 分割のサーマルマネキンを用いて、全身及び部位別の皮膚表面温度、熱損失量を 1 分間隔で測定する。サーマルマネキンは 24 時間同じ場所に設置し、部位別の皮膚表面温度、熱損失量を測定した。測定した部位別の皮膚表面温度、熱損失量から等価温度を算出<sup>7)</sup>し、等価温度を基に式 (3.1) を用いてサーマルマネキンによる温冷感 (以下、T.M PMV) を求めた<sup>8)</sup>。さらに、PMV 計 (以下、PMV meter) もサーマルマネキン近傍に別途設置し、測定方法の違いによる PMV の比較を行った。

$$T_{eq} = T_s - 0.155 (L_{cl} + L_a / F_{cl}) * Q_t \quad (3.1)$$

$T_{eq}$ : 等価温度 [°C]

$T_s$ : 皮膚表面温度 [°C]

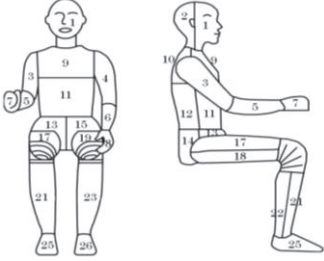
$L_{cl}$ : 基礎着衣熱抵抗 [clo]

$L_a$ : 裸体時皮膚表面熱抵抗 [clo]

$F_{cl}$ : 着衣面積比 [-]

$Q_t$ : 顕熱損失量 [W/m<sup>2</sup>]

Table 3-5 Thermal manikin specification

Nationality	Denmark	Organization of manikin
Gender	Male	
Height	175cm	
Parts	22 splits	
Clo (summer)	0.4 clo	
Clo (winter)	1.0 clo	

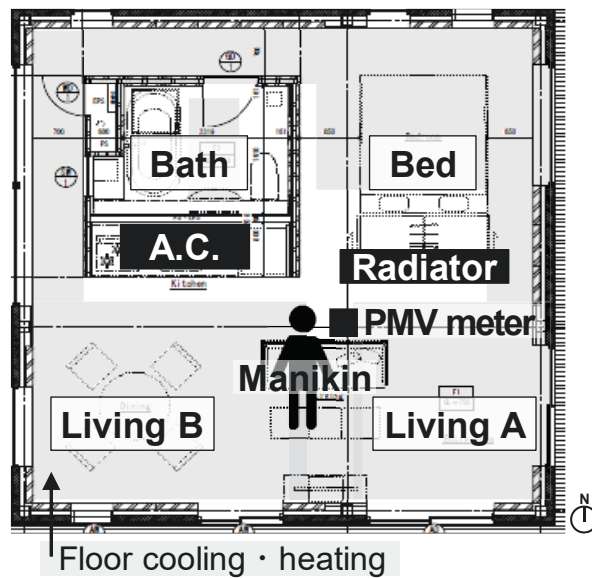


Fig. 3-6 Thermal manikin position



Summer



Winter

Fig. 3-7 Experiment landscape with thermal manikin

### 3.4 実験結果

実験結果では、各条件ごとの2日間の平均値を用いて考察を行った。経時変化のグラフは代表日1日のみを、積算電力消費の結果は2日間の平均値で示した。

#### 3.4.1 夏季における予冷運転に関する考察

##### (1) 空気温度

表 3-6 に時間帯別の平均空気温度（全実験日）、図 3-8 に空気温度経時変化（代表日）を示す。エアコンを設置しているリビング B は、全条件でエアコン運転時に空気温度が他の測定点より低くなった。また、予冷運転を行ってない条件①に比べ、予冷運転を行った条件①～⑤については、時間帯別に大きい温度差はみられなかったが、帰宅時（18:00）において予冷条件に比べ、条件①の方が最大 3.4°C、最小 1.7°C 高い結果となった。

6h 予冷条件の比較より、起床時（6:30）については、平均空気温度が条件②で 29.1°C、条件④で 28.0°C となり、エアコン条件に比べ、放射冷房条件の方が 1.1°C 低かった。帰宅時（18:00）については、平均空気温度が条件②で 27.0°C、条件④で 26.6°C となり、エアコン条件に比べ、放射冷房条件の方が 0.4°C 低くなった。また、条件①はエアコン運転開始直後から空気温度が急低下したが、条件③は放射冷房運転開始後に徐々に空気温度が低下し、3時間で安定した。3h 予冷条件の比較では、帰宅時の平均空気温度が条件③で 27.0°C、条件⑤で 28.3°C となり、放射冷房よりエアコンの方が 1.3°C 低い結果となった。条件⑤は条件③に比べ外気温が高かったため、予冷運転開始時点で条件⑤の室内空気温度の方が約 1.0°C 高く、外気温の影響が大きいことが考えられる。

睡眠時（23:00~6:30）については、平均空気温度が条件①で 27.9°C、条件②で 28.7°C、条件③で 27.9°C、条件④で 27.7°C、条件⑤で 29.3°C となり、条件③④は睡眠時の温冷感中立範囲（26~28°C 以内）<sup>13)</sup>で収まった。特に条件④は条件③に比べ、睡眠時間帯の外気温が高いにも関わらず、平均空気温度はおおよそ同じであった。以上より、エアコンより放射冷房の方が長時間予冷運転の蓄冷効果が高く、帰宅時や起床時の空気温度が快適温度域に近づくことが確認できた。

Table 3-6 Average value of air temperature by time

unit: °C

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Wake-up	06:30	28.2	29.2	28.1	28.0	29.8
Return home	18:00	30.0	27.0	27.0	26.6	28.3
Evening at home	18:00~23:00	26.6	26.7	26.9	26.5	27.0
Bedtime	23:00	26.6	26.9	26.7	26.5	27.1
Sleeping	23:00~06:30	27.9	28.7	27.9	27.7	29.3

## (2) 上下温度分布

表 3-7 に時間帯別の平均上下温度（代表日）、図 3-9 に上下温度分布（代表日）を示す。上下温度分布は代表日 1 日の比較結果である。全条件において、起床時（6:30）の上下温度差は大きくなかった。帰宅時（18:00）では、予冷運転を行ってない条件①の空気温度が最も高くなり上下温度差が小さくなった。また、帰宅後のエアコン稼働により急激な温度変化で温度ムラが発生したことで、夜在宅時間帯（18:00~23:00）の上下温度差が大きくなった。

6h 予冷条件の比較では、夜在宅時（18:00~23:00）の上下温度差（0.1m と 1.7m の測定点差）が条件②で 1.4°C、条件④で 0.9°C となり、放射冷房の方が上下温度差は小さくなった。一方、3h 予冷条件の比較では、条件⑤は実験時に外気温が高かったこともあり、条件③のエアコン条件よりも上下温度差が 1.0°C 大きくなった。エアコンは予冷時間が長いほど上下温度差が大きくなり、放射冷房は予冷時間が長いほど上下温度差が小さくなる傾向が確認された。長時間の予冷運転を行った場合、上下温度差はエアコンと放射冷房で逆の変動となることがわかった。

Table 3-7 Average value of vertical air temperature difference by time unit: °C

		Case1			Case2			Case3		
		0.1m	1.7m	DF	0.1m	1.7m	DF	0.1m	1.7m	DF
Wake-up	06:30	27.8	28.2	0.4	27.9	28.6	0.7	27.7	28.2	0.7
Return home	18:00	29.2	30.1	0.9	23.2	25.1	1.9	26.8	27.5	0.7
Evening at home	18:00~23:00	25.8	27.6	1.9	25.0	26.4	1.4	26.6	27.2	0.6
Bedtime	23:00	26.3	27.2	0.9	26.0	27.0	1.0	26.4	26.9	0.5
		Case4			Case5					
		0.1m	1.7m	DF	0.1m	1.7m	DF			
Wake-up	06:30	27.5	28.2	0.6	29.3	30.0	0.7			
Return home	18:00	25.3	27.0	1.7	27.1	28.9	1.9			
Evening at home	18:00~23:00	26.0	26.9	0.9	26.1	27.7	1.6			
Bedtime	23:00	26.1	26.8	0.8	26.3	27.6	1.4			

図 3-10 に空気温度のヒートマップ（代表日）を示す。全条件において、リビング B の空気温度が最も低くなった。6h 予冷条件において、エアコンを用いた条件②に比べ、放射冷房を用いた条件④の方が、睡眠時（23:00~6:30）の空気温度の上昇は緩やかになることが分かった。3h 予冷条件においては、条件⑤の外気温が高いことから、条件③に比べ、条件⑤の方が一日を通して空気温度が高くなった。



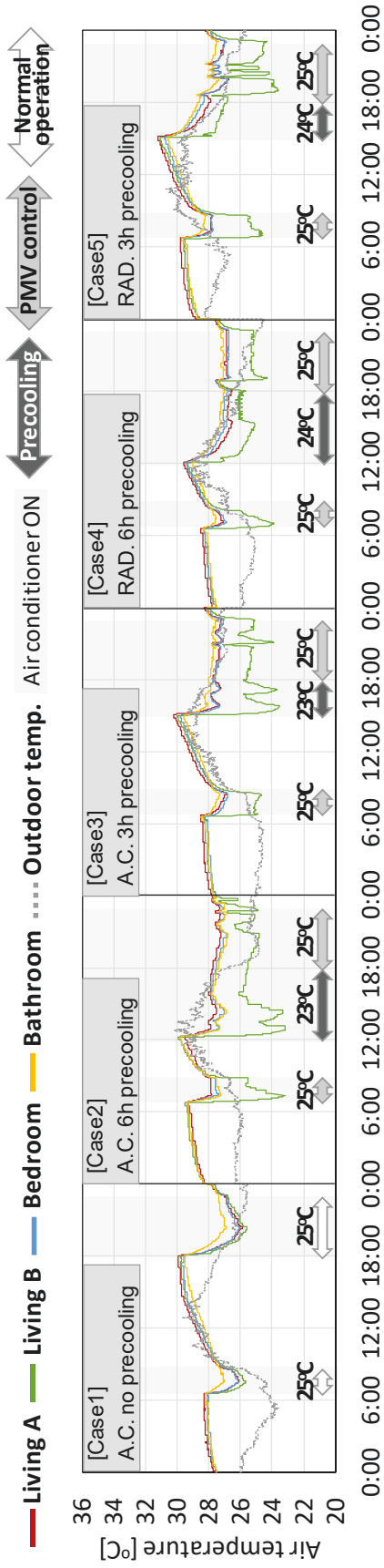


Fig. 3-8 Air temperature

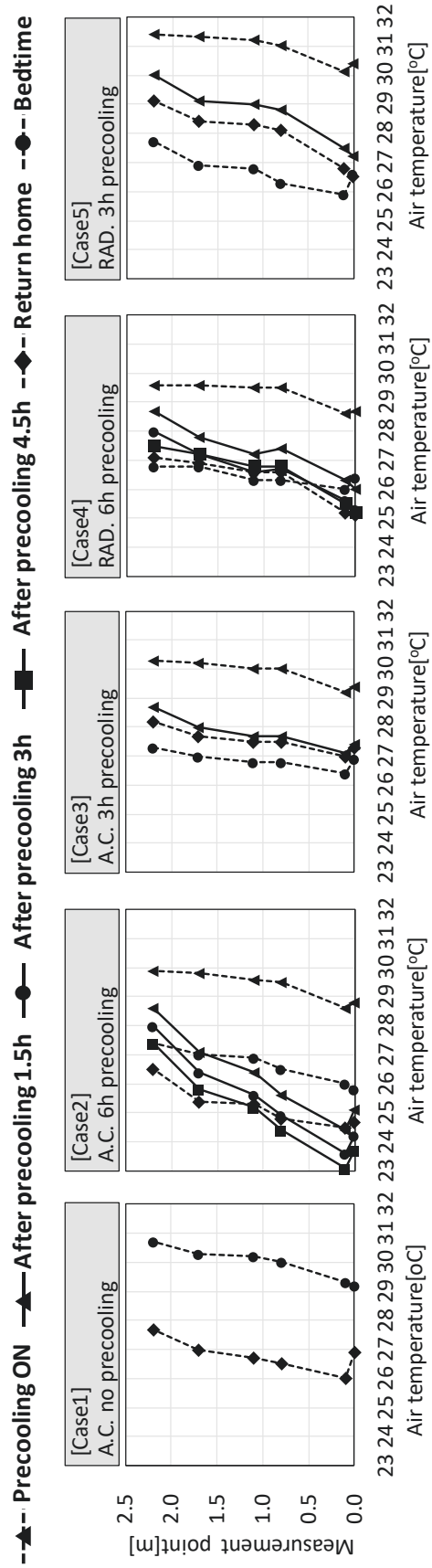


Fig. 3-9 Vertical air temperature distribution

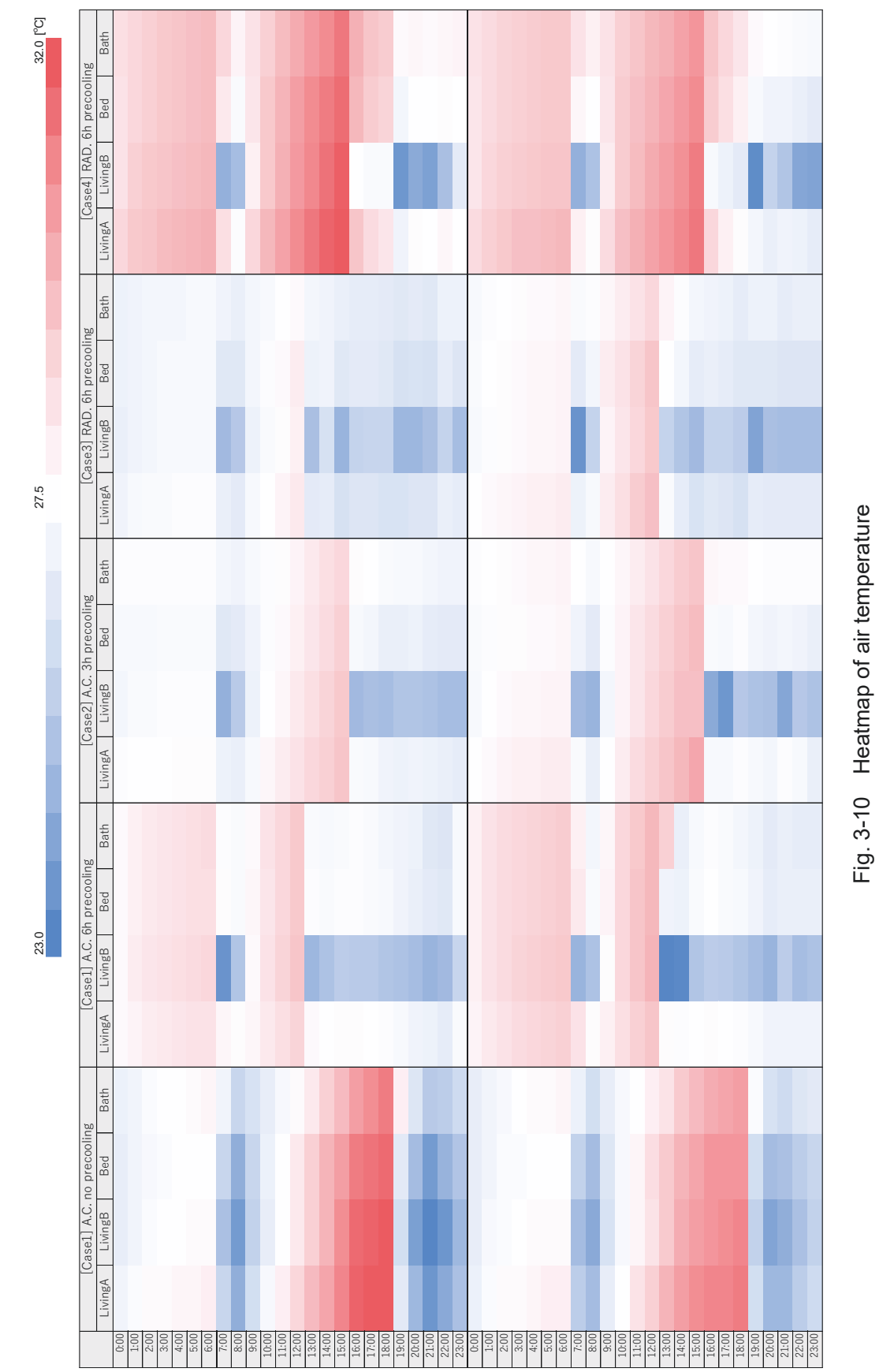


Fig. 3-10 Heatmap of air temperature

(3) PMV (Predicted Mean Vote)

表 3-8 に時間帯別の平均 PMV (全実験日)、図 3-11 に PMV 経時変化 (代表日) を示す。Env. PMV は物理環境から算出した予想温冷感、PMV meter は PMV 計からのデータ、T.M PMV はサーマルマネキンからの予想温冷感を表す。放射冷房条件では、PMV meter と T.M PMV との差はほぼなかったが、エアコン条件では T.M PMV の方が最大 0.2 高くなった。PMV 計は高さ 1.1m の測定点 1 点だけであるが、サーマルマネキンは 22 部位の平均予想温冷感であるため、T.M PMV にはエアコンによって生じた上下温度分布差が反映されたと考えられる。

T.M PMV 結果に関して、朝と夜の在宅時の T.M PMV は 0~+1.7 であった。6h 予冷運転条件では、帰宅時 (18:00) の T.M PMV が条件②で 0.8、条件④で 0.5 となり、夜在宅時 (18:00~23:00) の平均 T.M PMV は条件②で 0.7、条件④で 0.6 であった。起床時 (6:30) の T.M PMV は条件②が 1.5、条件④が 1.0 となり、条件②に対し、条件④はやや暖かい範囲 (PMV ≤ 1.0) で収まった。以上より、夜在宅時から起床時にかけての T.M PMV 変動は放射冷房よりエアコン予冷運転の方が約 2 倍大きくなった。放射冷房を用いた長時間の予冷運転で床や壁に蓄冷された効果が表れたと考えられる。3h 予冷運転条件では、帰宅時の T.M PMV が条件③で 1.0、条件⑤で 0.9 となり、夜在宅時の T.M PMV は条件③で 0.8、条件⑤で 0.7 であった。条件⑤は、全条件の中でも外気温が高く、一日を通して PMV が高くなった。特に深夜時間帯 (0:00~6:30) の外気温は条件③に比べ条件⑤の方が約 4°C も高く、起床時の T.M PMV が 1.7 となり、全条件の中で最も高くなった。

Table 3-8 Average value of PMV by time

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Wake-up 06:30	Env. PMV	1.0	1.5	1.0	1.0	1.6
	PMV meter	-	1.5	1.1	1.1	1.6
	T.M PMV	-	1.6	1.3	1.2	1.7
Return home 18:00	Env. PMV	1.6	0.6	0.6	0.5	1.1
	PMV meter	-	0.7	0.8	0.5	1.0
	T.M PMV	-	0.8	1.0	0.5	0.9
Evening at home 18:00~23:00	Env. PMV	0.3	0.5	0.6	0.5	0.6
	PMV meter	-	0.6	0.7	0.5	0.6
	T.M PMV	-	0.7	0.8	0.6	0.7
Bedtime 23:00	Env. PMV	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6
	PMV meter	-	0.6	0.5	0.5	0.5
	T.M PMV	-	0.8	0.7	0.6	0.5

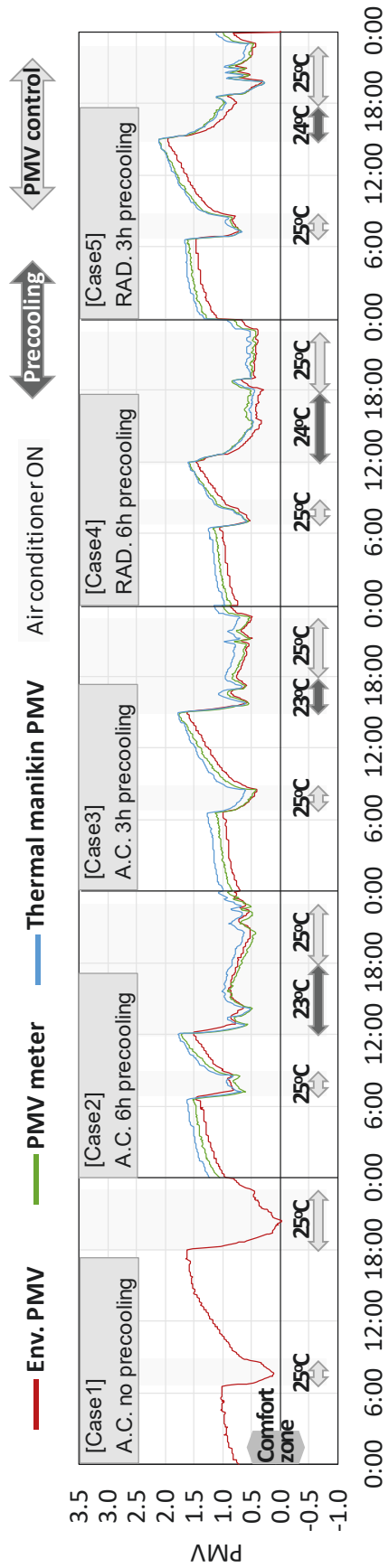


Fig. 3-11 PMV

(4) サーマルマネキンの熱損失量

図 3-12 にサーマルマネキンの熱損失量を示す。空調方式の違いによる熱損失量の変化を比較するため、予冷運転開始から帰宅時に停止するまでの熱損失量を比較した。全条件において、手、足などの露出している部分の熱損失量が大きくなった。エアコン予冷運転に比べ、放射の予冷運転は熱損失量が小さくなった。また、エアコン運転では時間の経過に従って熱損失量の増加割合が大きくなったが、放射の予冷運転では 3 時間経過後から熱損失量が安定した。

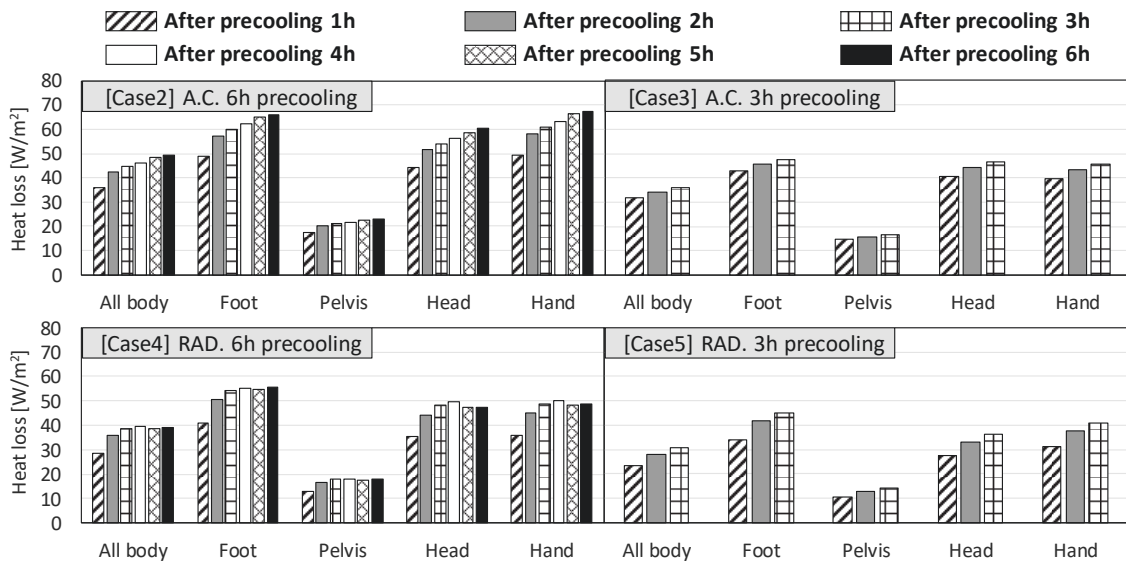


Fig. 3-12 Heat loss of thermal manikin

## (5) 電力消費量・売買電力量・自家消費率

図 3-13 に電力消費量経時変化（代表日）、図 3-14 に売買電力量経時変化（代表日）を示す。全条件において、15:00 頃から PV 発電量が徐々に低下し、17:00～18:00 の予冷時間帯には PV 発電が利用されてなかった。特に、日射量が少ない条件④⑤では 15:00 から PV 発電がほとんど利用されず BT で賄った。

図 3-15 に日積算電力量（各条件平均値）を示す。空調電力消費量においては、6h 予冷運転条件の比較より、予冷時（12:00～18:00）の冷房電力消費量が条件①で 2.2kWh、条件③で 2.1kWh となり、大きな差異はなかった。一方、条件①に比べ、条件③の方が夜在宅時（18:00～23:00）の冷房電力消費量は 0.3kWh、朝在宅時（6:30～8:30）の冷房電力消費量は 0.3kWh 減少した。以上より、予冷運転時の冷房電力消費は同等であったが、朝・夜在宅時間帯の冷房電力消費量は放射の予冷運転の方が減少したため、放射で予冷運転を行うことにより朝・夜在宅時の冷房電力消費が削減できることが示された。一方で、放射 3h 予冷運転の条件④では、冷房電力消費量が 3.9kWh で最も多くなった。条件④のみ外気温が高かったことが影響したと考えられる。また、放射の予冷運転条件については、天気の影響で 15:00～18:00 頃の PV 発電量が急激に低下し、予冷運転時に PV 発電が利用できていないことを確認した。

売買電力量において、売電量はエアコン予冷運転より放射の予冷運転の方が減少した。また、条件②より条件①の方が 49%、条件④より条件③の方が 50%減少したことから、予冷運転時間が長いほど売電量は減少した。買電量では、空調方式による差異はほぼなかった。しかし、PV 発電のある日中の買電量は、条件①②でほとんど発生しなかったが、条件③④では 15:00～18:00 頃の PV 発電量が少なかったため 15:00 頃から買電が発生した。したがって、同程度の PV 発電量があれば、条件③④の買電量は減少すると考えられる。

自家消費率（PV 発電量のうち、宅内消費と BT 充電に使用された電力量の割合）においては、条件①が 69%、条件②が 54%、条件③が 71%、条件④が 56%であった。3h 予冷運転に比べ 6h 予冷運転の方が 15～16%高くなった。また、エアコン予冷運転と放射の予冷運転との自家消費率の差は 2%と大きくなかった。しかし、放射の予冷運転を行った 15:00～18:00 に買電が発生した条件③④は、PV 発電が十分に多く、買電量を削減することができれば、より自家消費率が高くなると推察される。以上より、熱容量が大きい住宅で予冷運用を行うことで、売買電力量の削減と自家消費率の向上が実現可能であることが示唆された。また、PV 発電量を考慮し、放射冷房の長時間予冷運転時間を設定することで自家消費率がより高くなる可能性を確認した。

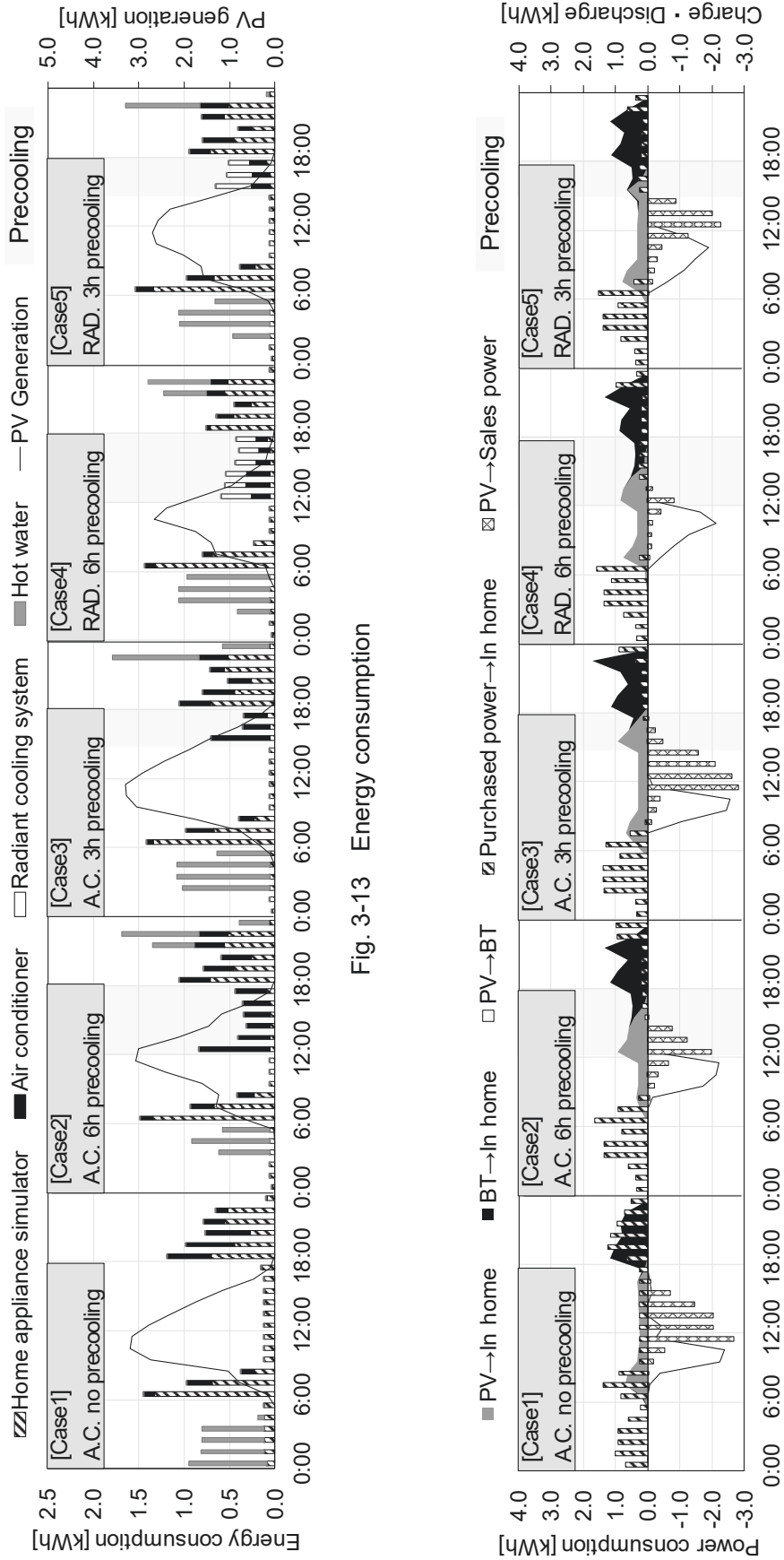


Fig. 3-13 Energy consumption

Fig. 3-14 Trading power

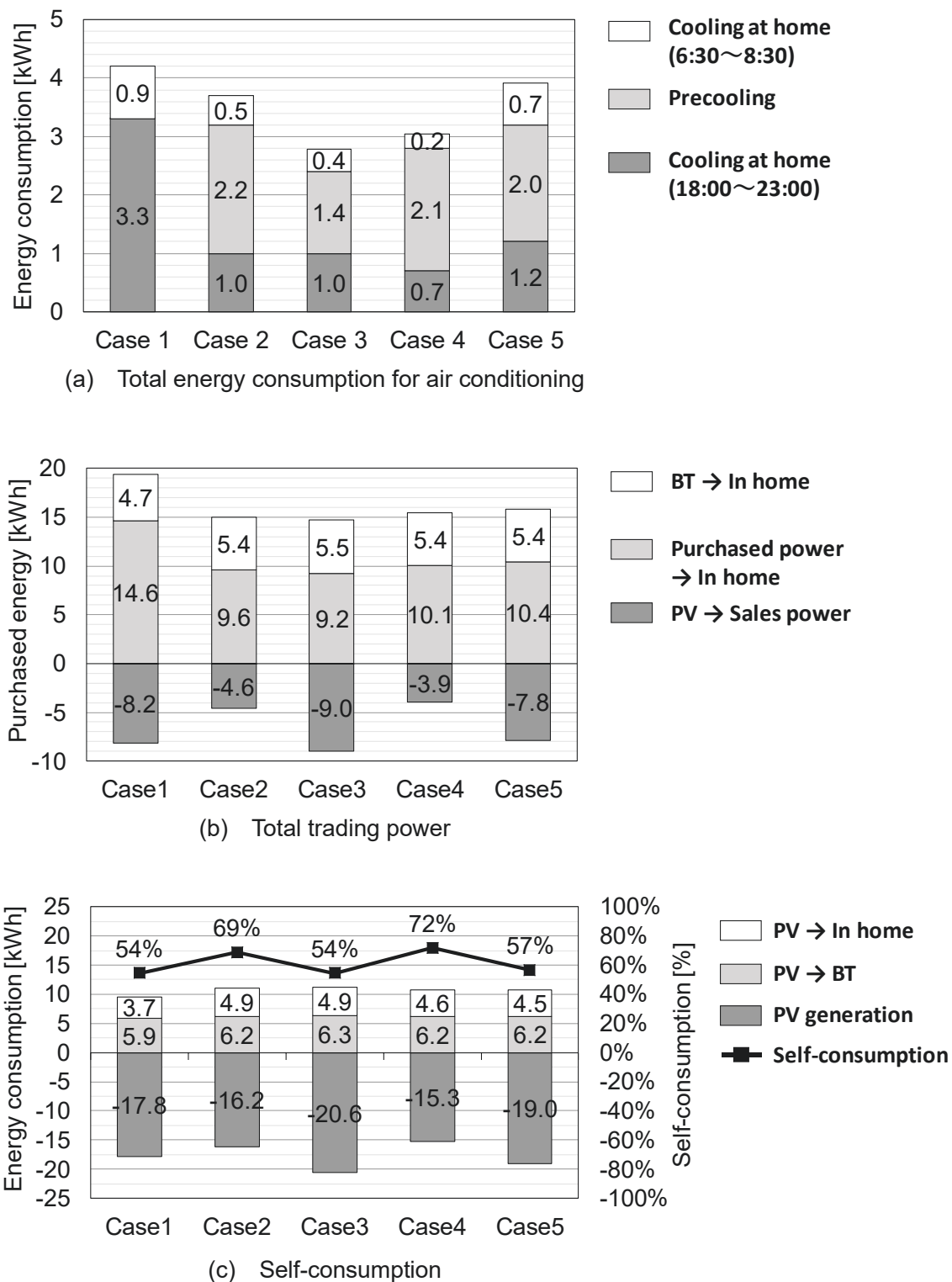


Fig. 3-15 Daily total energy consumption (average value for each case)



## 3.4.2 冬季における予熱運転に関する考察

## (1) 空気温度

表 3-9 に時間帯別の平均空気温度、図 3-16 に空気温度経時変化（代表日）を示す。エアコン運転時は空気温度が急上昇するが、放射暖房は空気温度の上昇が緩やかとなった。全条件において、エアコン稼働時はエアコンの設置されていたリビング B の空気温度が他の測定点より高くなり、測定点ごとの温度差が発生した。帰宅時（18:00）の平均空気温度は条件①が 19°C、条件②が 23°C、条件③が 23°C、条件④が 18°C、条件⑤が 25°C、条件⑥が 23°C となり、予熱運転条件では帰宅時には温暖な室温になっていた。特に、放射の長時間予熱運転条件の室温が高くなった。夜在宅時（18:00~23:00）のエアコン PMV 制御による稼働回数は条件②で 1 回、条件③で 2 回であったが、条件⑤⑥では PMV 制御によるエアコン稼働がなく、放射の予熱による蓄熱効果を確認した。また、起床時（6:30）の平均空気温度は条件①が 16.4°C、条件②が 17.6°C、条件③が 17.7°C、条件④が 18.4°C、条件⑤が 18.2°C、条件⑥が 17.6°C であり、在宅運転条件ではエアコンより放射暖房の方が約 2°C 高く、予熱運転条件では放射 6h 予熱条件のみ起床時まで空気温度が 18°C 以上に安定した。熱容量が大きい住宅における放射暖房による快適性の向上と床や壁への蓄熱効果が確認された。

Table 3-9 Average value of air temperature by time

unit: °C

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Wake-up	06:30	16.4	17.6	17.7	18.4	18.2	17.6
Return home	18:00	18.6	23.3	22.7	20.2	24.5	22.6
Evening at home	18:00~23:00	21.2	21.1	20.9	21.8	22.9	21.1
Bedtime	23:00	21.8	21.7	21.4	22.6	21.7	20.1
Sleeping	23:00~06:30	18.0	18.9	18.9	19.8	19.5	18.8

## (2) 上下温度分布

表 3-10 に時間帯別の平均上下温度差、図 3-17 に上下温度分布（代表日）を示す。上下温度分布は代表日 1 日のみの比較結果である。帰宅時（18:00）の上下温度差（0.1m と 1.7m の測定点差）は、条件①が 1.7°C、条件②が 0.0°C、条件③が 0.6°C、条件④が 1.2°C、条件⑤⑥が 0.0°C であった。6h 予熱を行った条件②⑤では、空調方式に関わらず上下温度差が 0.0°C となり快適性向上が示された。一方、3h 予熱を行った条件③⑥では、放射暖房条件⑥の方が上下温度差が小さくなった。在宅運転条件については、条件①④共に不在時間帯（8:30~18:00）の外気温が条件①で 9.4°C、条件④で 9.2°C と大きい差異はなかったが、帰宅時の上下温度差は、条件④の方が 0.5°C 小さくなった。放射暖房による蓄熱効果があったと考えられる。夜在宅時（18:00~23:00）の平均上下温度差は、条件①が 1.3°C、条件②が 1.5°C、条件③が 1.6°C、条件④が 0.2°C、条件⑤⑥が 0.6°C であった。エアコン運転時では上下温度差が 1°C 以上であったが、放射暖房の運転時では 0.6°C 以下であった。

Table 3-10 Average value of vertical air temperature difference by time unit: °C

		Case1			Case2			Case3		
		0.1m	1.7m	DF	0.1m	1.7m	DF	0.1m	1.7m	DF
Wake-up	06:30	15.5	16.9	1.4	16.7	18.2	1.5	16.5	17.7	1.2
Return home	18:00	17.3	19.0	1.7	23.7	23.6	0.1	22.4	23.0	0.6
Evening at home	18:00~23:00	19.7	21.0	1.3	21.0	22.5	1.5	20.1	21.8	1.6
Bedtime	23:00	21.0	21.9	0.9	19.9	22.8	2.9	19.3	22.1	2.8
		Case4			Case5			Case6		
		0.1m	1.7m	DF	0.1m	1.7m	DF	0.1m	1.7m	DF
Wake-up	06:30	17.7	18.9	1.2	17.7	18.9	1.2	16.8	17.9	1.1
Return home	18:00	19.6	20.8	1.2	25.0	24.9	0.1	22.7	22.7	0.0
Evening at home	18:00~23:00	21.9	22.1	0.2	22.8	23.4	0.6	20.7	21.3	0.6
Bedtime	23:00	23.4	23.1	0.3	21.0	22.0	1.0	19.1	20.1	1.0

図 3-18 に空気温度のヒートマップ（代表日）を示す。全条件において、エアコン運転時でリビング B にエアコンが設置されているため、リビング B の空気温度が最も高くなった。夜在宅時間帯（18:00~23:00）において、エアコンによる予熱条件②③ではエアコン PMV 制御によってエアコンが稼働したにも関わらず、エアコン停止後から空気温度が急低下することが確認された。一方、放射暖房による予熱条件④⑤では、PMV 制御によってエアコンは稼働せず、就寝時（23:00）まで空気温度が安定しており、放射暖房の蓄熱性が確認された。放射暖房の長時間予熱運転を行った条件⑤では、前日の影響を受け朝在宅時（6:30~8:30）の空気温度上昇が他条件より早い結果となった。

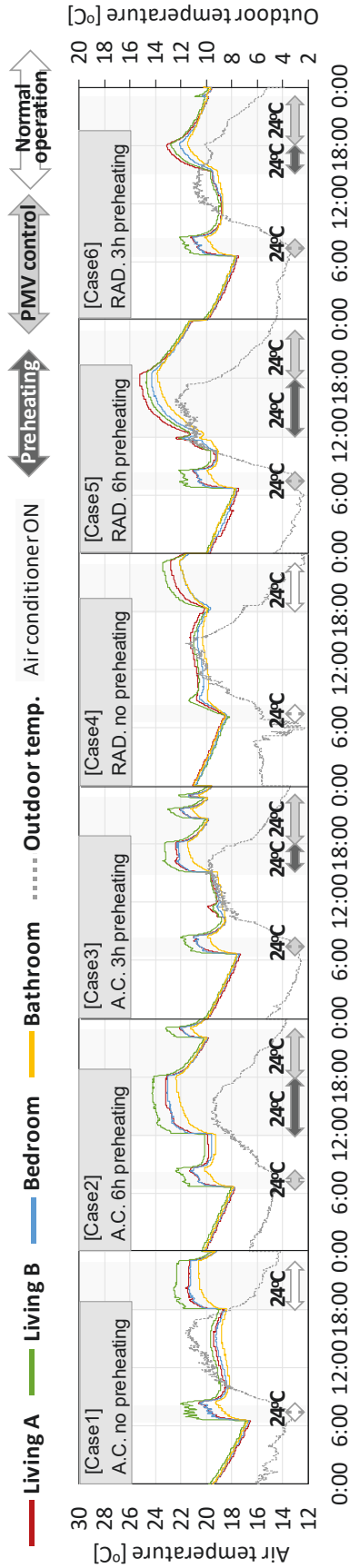


Fig. 3-16 Air temperature

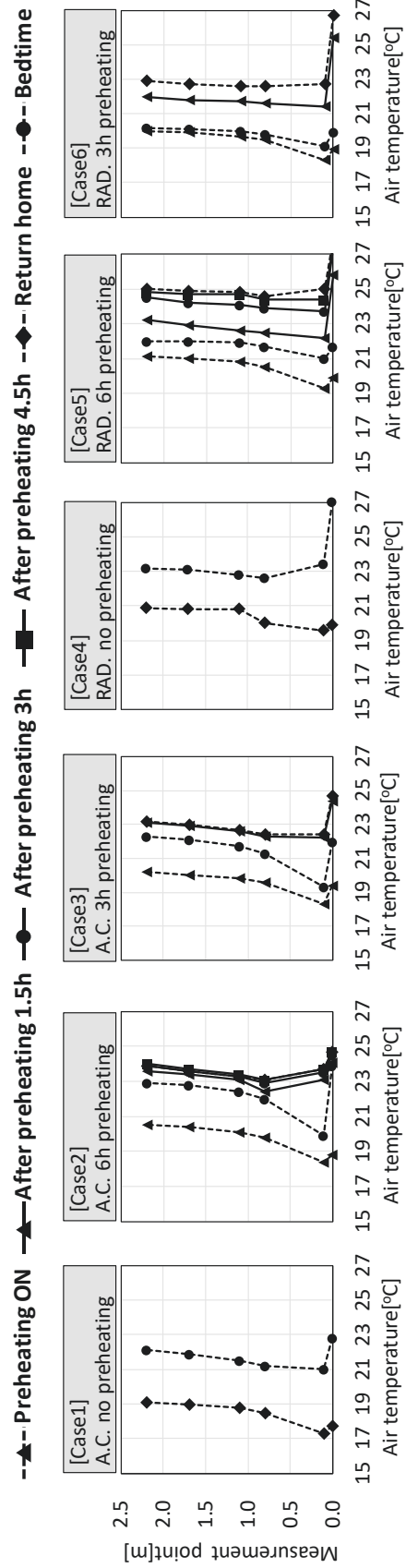


Fig. 3-17 Vertical air temperature distribution

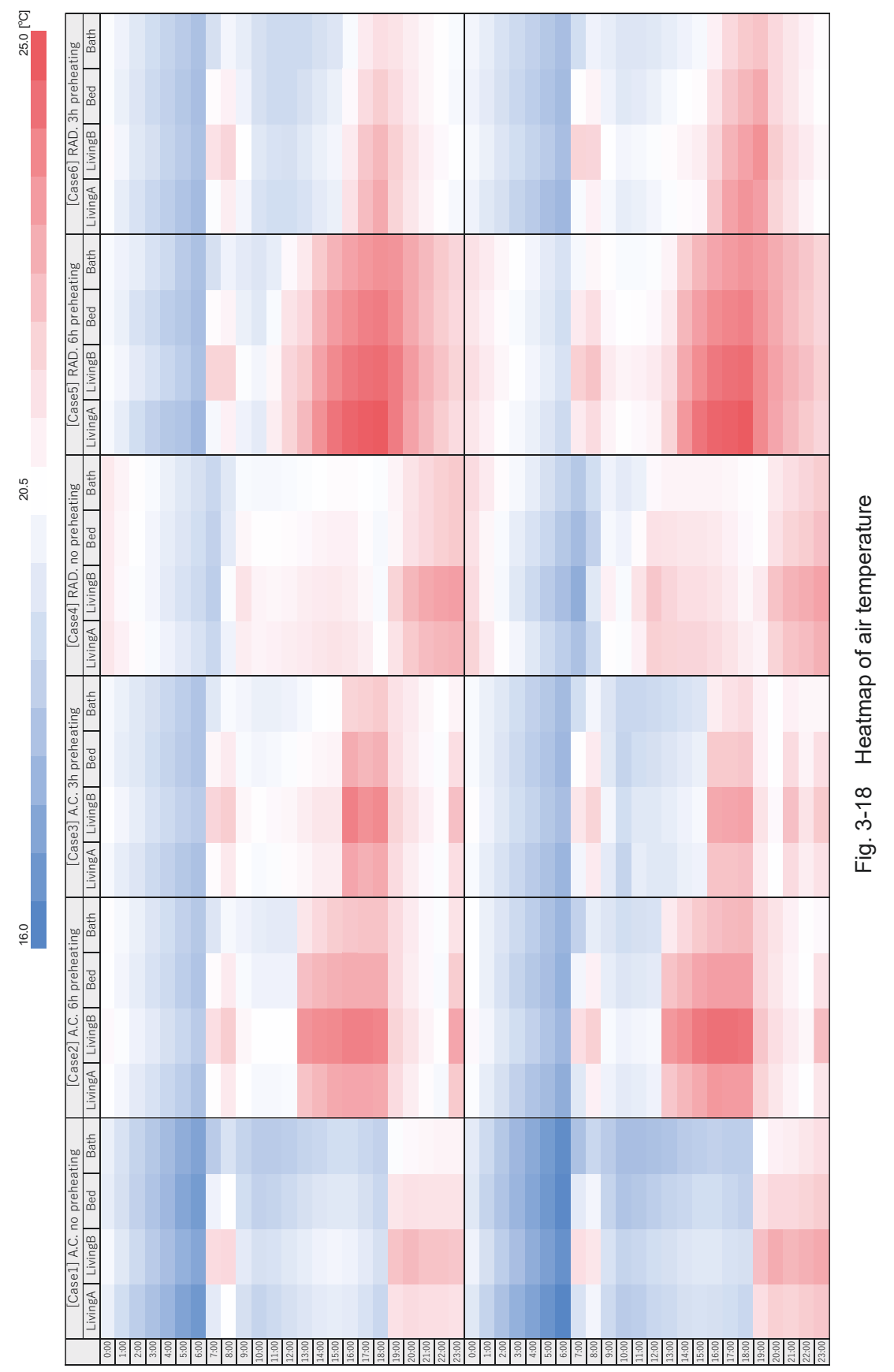


Fig. 3-18 Heatmap of air temperature

(3) PMV (Predicted Mean Vote)

表 3-11 に時間帯別の平均 PMV、図 3-19 に PVM 経時変化を示す。PMV meter は PMV 計からのデータ、T.M PMV はサーマルマネキンからの予想温冷感を表す。全条件において、PMV の測定方法によらず同等の変動がみられたが、エアコン運転時は T.M PMV の方が 0.4 程度低くなった。放射暖房の運転時では、PMV meter と T.M PMV との大きな差はみられなかったため、夏季条件と同様に、冬季条件でもエアコンによる暖房では温度ムラが発生し PMV 算出結果にずれが生じた。一方で、朝在宅時 (6:30~8:30) では、放射暖房は立ち上がりに時間が必要なため、起床前から運転することで快適性を向上できると考えられる。

T.M PMV 結果に関して、帰宅時 (18:00) の T.M PMV は、条件①が-0.3、条件②が 0.1、条件③が 0.0、条件④が-0.4 条件⑤が 0.6、条件⑥が 0.3 であった。夜在宅時 (18:00~23:00) の平均 T.M PMV は、条件①が-0.2、条件②が-0.4、条件③が-0.4、条件④が-0.1 条件⑤が 0.2、条件⑥が-0.2 であった。帰宅時から夜在宅時にかけて T.M PMV は全条件共に快適範囲 (PMV±0.5 以内) で安定した。在宅運転条件 (条件①④) は、帰宅後から夜在宅時間帯の間で、エアコン条件の平均 T.M PMV は 0.0 を下回って安定していたが、放射暖房条件では稼働開始約 1.5h 後から PMV meter、T.M PMV 共に 0.0 を上回っていた。放射暖房条件の方がより快適性向上に効果があることが示された。予熱運転条件 (条件②③⑤⑥) において、全条件で帰宅時にやや暖かい範囲 (0.0<PMV<0.5) であったが、夜在宅時では条件⑤以外の条件でやや涼しい範囲 (-0.5<PMV<0.0) を推移していた。条件⑤では帰宅時から夜在宅時にかけて T.M PMV が常に快適範囲内で安定していた。放射暖房の長時間予熱運転によって、帰宅時から夜在宅時まで快適性を維持できることが示された。

Table 3-11 Average value of PMV by time

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Wake-up 06:30	Env. PMV	-1.5	-1.2	-1.2	-1.1	-1.1	-1.2
	PMV meter	-1.1	-1.2	-1.2	-1.0	-0.6	-0.8
	T.M PMV	-1.2	-1.3	-1.2	-1.1	-0.6	-0.9
Return home 18:00	Env. PMV	-1.0	0.0	-0.1	-0.7	0.4	0.0
	PMV meter	-0.5	0.2	0.1	-0.4	0.6	0.3
	T.M PMV	-0.3	0.1	0.0	-0.4	0.6	0.3
Evening at home 18:00~23:00	Env. PMV	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	0.0	-0.4
	PMV meter	0.0	-0.2	-0.3	-0.1	0.2	-0.2
	T.M PMV	-0.2	-0.4	-0.4	-0.1	0.2	-0.2
Bedtime 23:00	Env. PMV	-0.3	-0.3	-0.4	-0.1	-0.3	-0.6
	PMV meter	0.0	-0.3	-0.3	0.1	-0.2	-0.5
	T.M PMV	-0.4	-0.5	-0.4	0.3	-0.2	-0.5

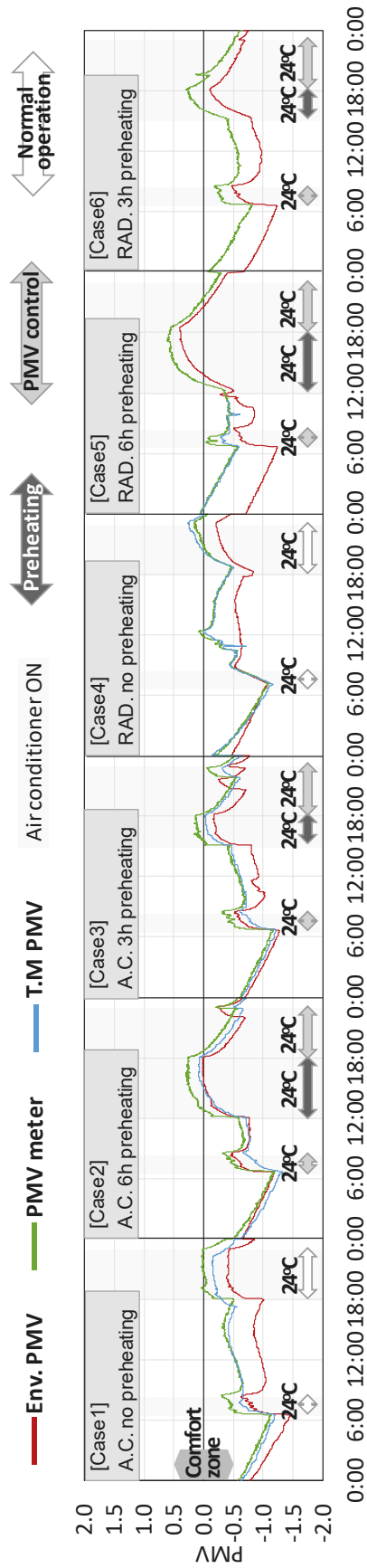


Fig. 3-19 PMV

(4) サーマルマネキンの熱損失量

図 3-20 にサーマルマネキンの熱損失量を示す。空調方式ごとの熱損失量の変化を比較するため、予熱運転開始後から帰宅時までの熱損失量を比較した。手、足などの露出している分の熱損失量が大きかったが、時間の経過に従って熱損失量の減少割合が小さくなり、安定していくことを確認した。予熱運転を行った4条件共に、予熱開始1時間の熱損失量から、予熱開始後1時間～2時間までの熱損失量への減少割合が最も大きかった。6h 予熱運転では、両空調条件共に3時間経過後から熱損失量が安定することを確認した。

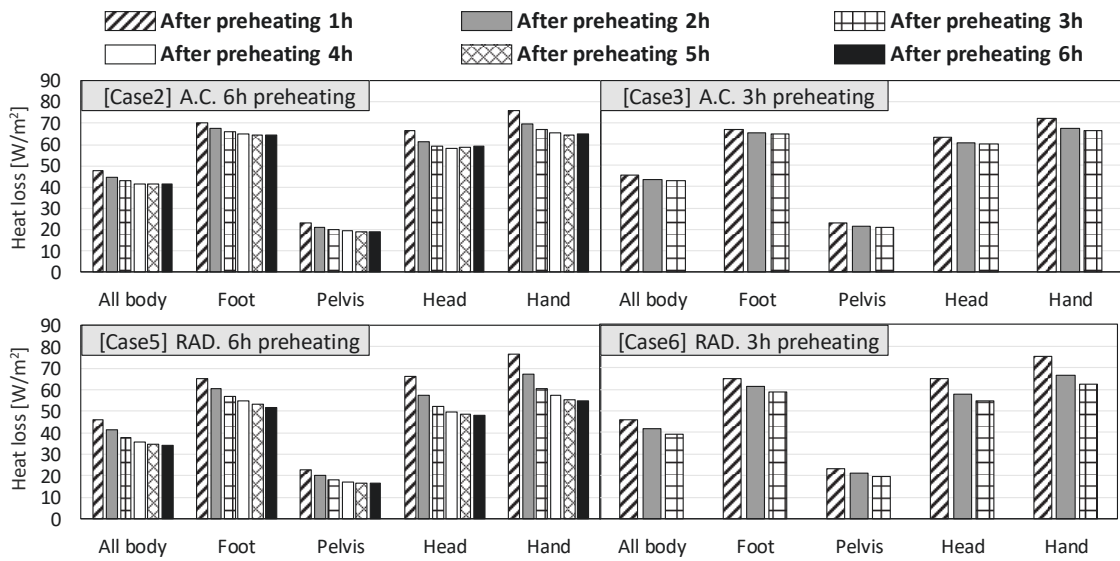


Fig. 3-20 Heat loss of thermal manikin

### (5) 電力消費量・売買電力量・自家消費量

図 3-21 に電力消費量経時変化（代表日）、図 3-22 に売買電力量経時変化（代表日）を示す。全条件において 7:00 に宅内電力消費量のピークが生じた。また、冬季の PV 発電量は 15:00 から急激に低下し、予熱運転時間帯（15:00~18:00）に PV 発電が利用されてなかった。特に、3h 予熱運転では、ほとんど PV 電力が利用されず BT で賄った。

図 3-23 に日積算電力量（各条件平均値）を示す。空調電力消費量において、在宅運転条件①④では、日積算暖房電力消費量がエアコンに比べ、放射暖房の方が約 2 倍多くなった。しかし、エアコン予熱条件②③では、夜在宅時（18:00~23:00）にエアコン PMV 制御による 0.5kWh、0.7kWh の暖房電力消費があったが、放射の予熱条件⑤⑥では、エアコンが稼働せず電力消費は発生しなかった。以上の結果より、放射の予熱運転によって、帰宅時から就寝時まで快適性を維持しながら、在宅時の暖房電力消費を削減できる可能性が示された。

売買電力量において、在宅運転の条件①④は買電量と売電量が予熱条件よりも多くなった。予熱運転条件では、PV 発電がほぼない時間帯（15:00~18:00）に予熱運転を行ったため、BT の放電量が最も多くなった。特に、条件⑤⑥では、電力消費量が多い放射暖房を用いて予熱運転を行ったため、21 時ごろには BT 残量がなくなり、買電量が増加した。しかし、在宅運転の条件④に対して 6h 予熱運転を行った条件⑤は買電量が 23%減少した。さらに、放射による予熱運転の条件⑤⑥は買電量の差がほぼないため、3h 予熱運転よりも快適性の高い 6h 予熱運転が優位であると言える。売電量は、エアコン運転では条件②が条件①より 50%、条件③より 24%減少した。放射運転では、条件⑤が条件④より 90%、条件⑥より 39%減少した。

自家消費率において、エアコン 6h 予熱運転条件の条件②が 84%となり、条件①より 13%、条件③より 8%増加した。放射 6h 予熱運転条件では条件⑤が 97%となり、条件④より 21%、条件⑥より 14%増加した。以上より、熱容量の大きな住宅で予熱運転を行うことで、売買電力量の削減と自家消費率の増加が可能であることが示された。さらに、放射暖房の長時間予熱運転がエアコンより効果があることが確認された。



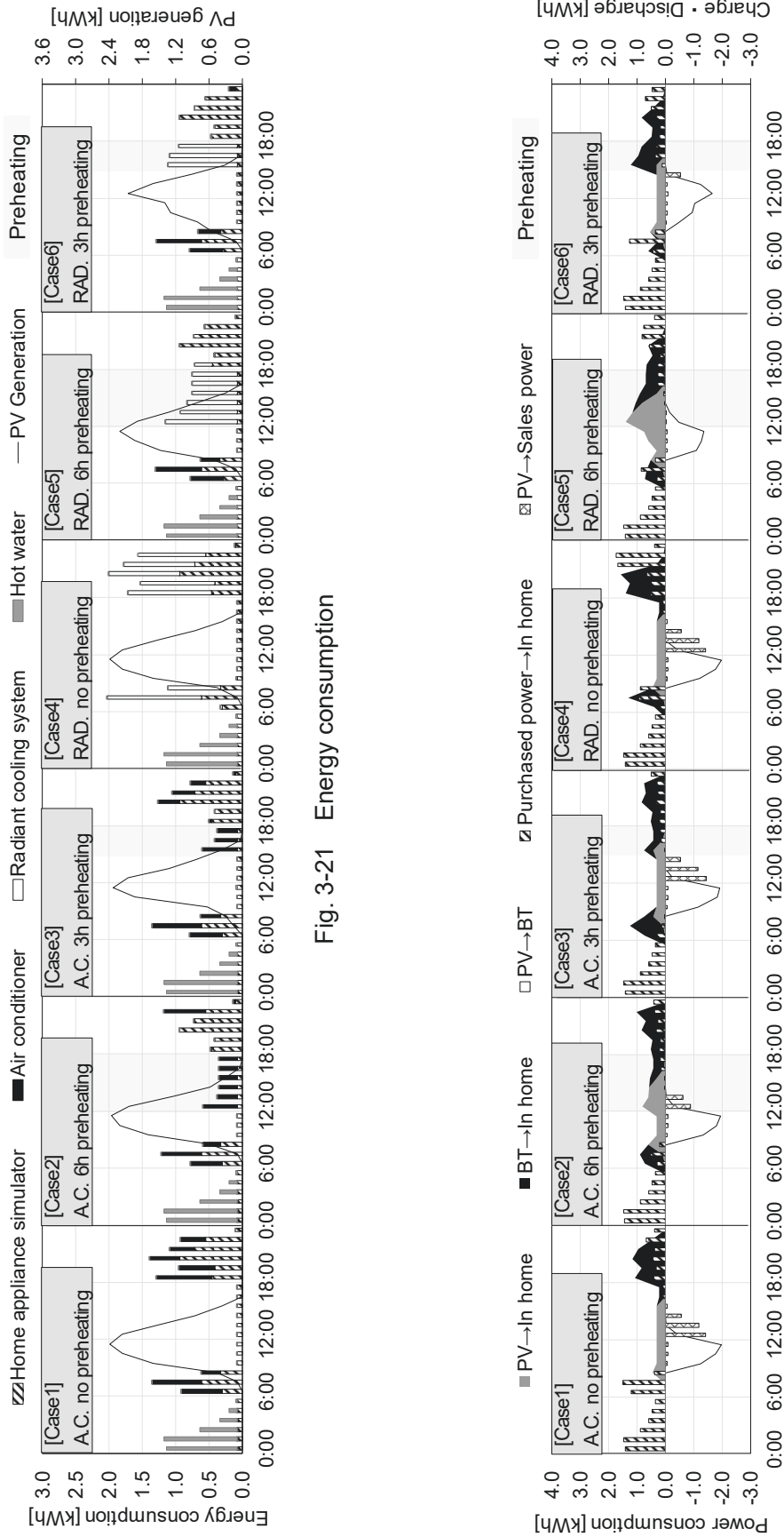


Fig. 3-21 Energy consumption

Fig. 3-22 Trading power

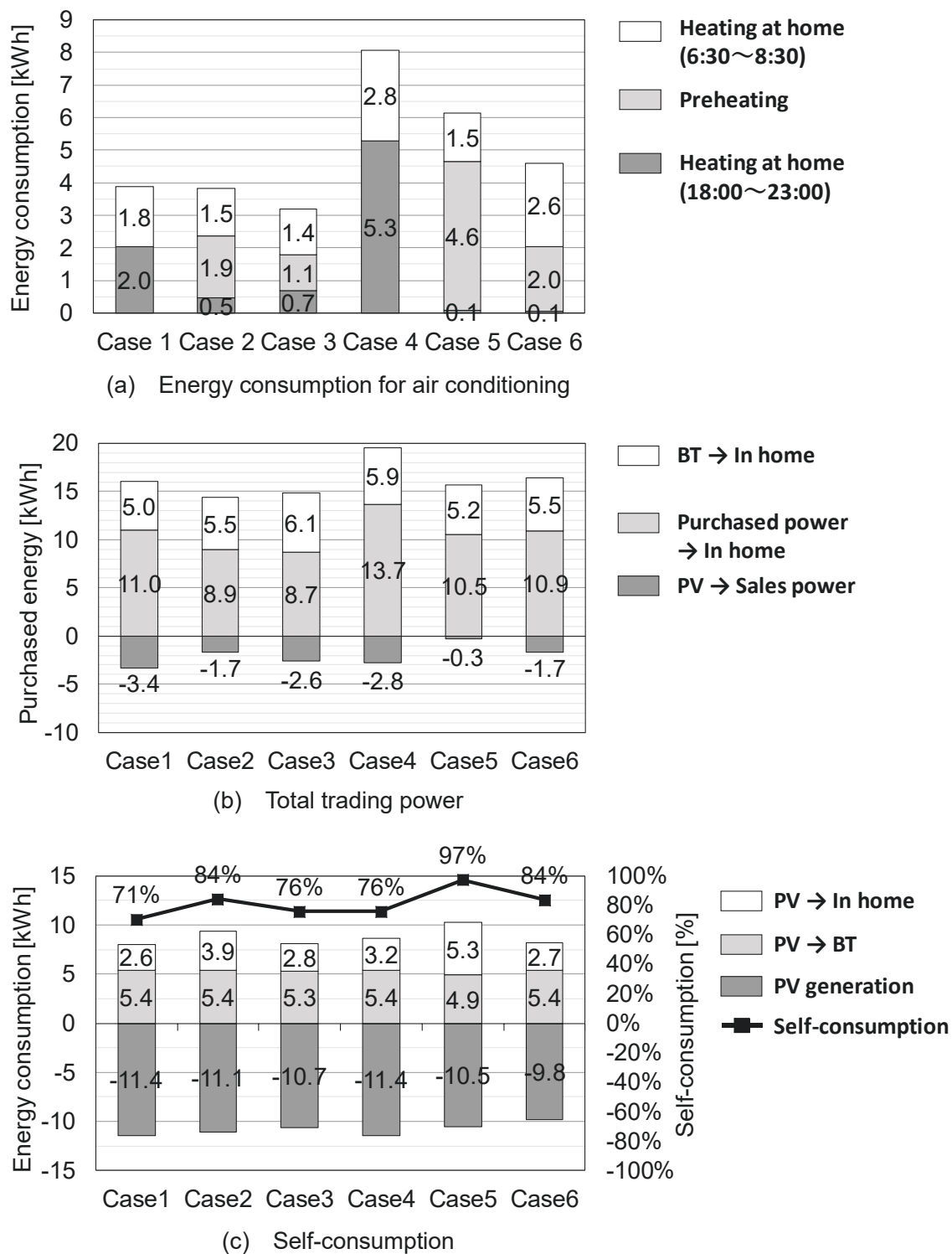


Fig. 3-23 Daily total energy consumption (average value for each case)

### 3.5 予冷・予熱運転によるエネルギーシフト効果

図 3-24 に予冷・予熱運転によるエネルギーシフト効果を示す。夏季に関して、日中に平均 1.9kWh を消費することで、帰宅後の在宅時間帯に平均 2.3kWh の電力消費を削減した。冬季においては、エアコン予熱の場合、日中に平均 1.5kWh を消費することで、帰宅後の在宅時間帯に平均 1.4kWh の電力消費を削減した。放射暖房で予熱する場合は、日中に平均 3.3kWh を消費することで、帰宅後の在宅時間帯に平均 1.9kWh の電力消費を削減した。以上の結果より、予冷・予熱運転をすることで、エネルギーのシフト効果が示され、余剰電力の売電価格が低下した場合にコストメリットが発生する可能性がある。

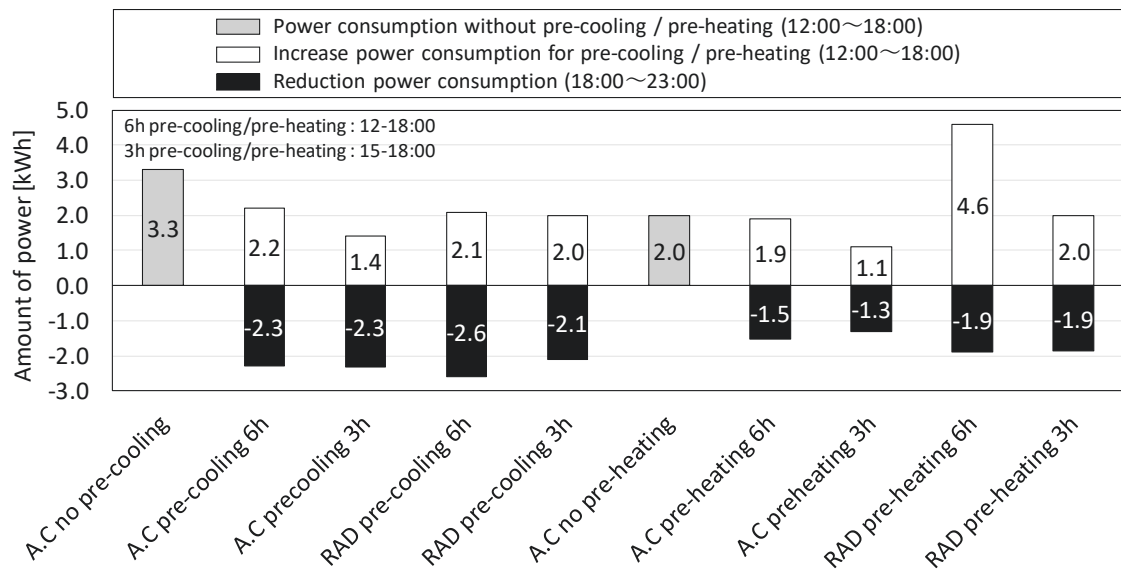


Fig. 3-24 Energy shift effect by pre-cooling/preheating operation

### 3.6 ヒートポンプ給湯器の昼間運転によるシミュレーション結果

#### 3.6.1 シミュレーション検証

現在一般的な住宅に導入されている HP 給湯器は夜間電力を利用して作動しているものが多い。一方でヒートポンプの特性上、日中の外気温の高い環境下で稼働させた方が高効率である。さらに、日中の余剰電力を有効利用が期待できる。そこで本研究では、夜間に稼働させた実験データから、昼間運転を再現した。

表 3-12 にシミュレーション検証のための実験データ条件、図 3-25 にシミュレーション結果と実験結果の相関関係、図 3-26 に HP 給湯器運転モードを示す。シミュレーションは電力消費データから売買電力量を算出するものである。12 月 8 日の 1 時間ごとの電力消費データを用いて、実験結果と計算結果の相関係数からシミュレーションの妥当性を検証した。買電から宅内への電力消費は 0.90、PV 発電から BT への充電量は 0.97、PV 発電から宅内への電力消費は 0.97、PV 発電から系統側への売電量は 0.77 となり、実験値と計算値との相関係数は全ての項目で強い正の相関範囲 ( $0.7 \leq R^2 \leq 1.0$ )、正の相関範囲 ( $0.4 \leq R^2 \leq 0.7$ ) であることを確認した。HP 給湯器の夜間運転は実験値を用い、昼間運転は PV 発電量が 1.5kWh 以上となる 10:00 から稼働開始とし、夜間と同じ電力消費を用いた。本検証では昼間運転による効率の変化は考慮していない。

Table 3-12 Measurement data condition for simulation verification

Date	2017.12.08		
Heating method	Air conditioner		
Air conditioning operation	Normal operation (A.C on at home)		
Setting temperature	25°C		
Storage battery (BT)	Green mode		
	Charge 0 hour by purchase		
	Discharge 16.5 hours		
HP water heater	Night mode		
Blind control	All closed		
Calculate items	①Purchased energy→In home	②BT→In home,	
	③PV→In home	④PV→BT	⑤PV→Sales energy

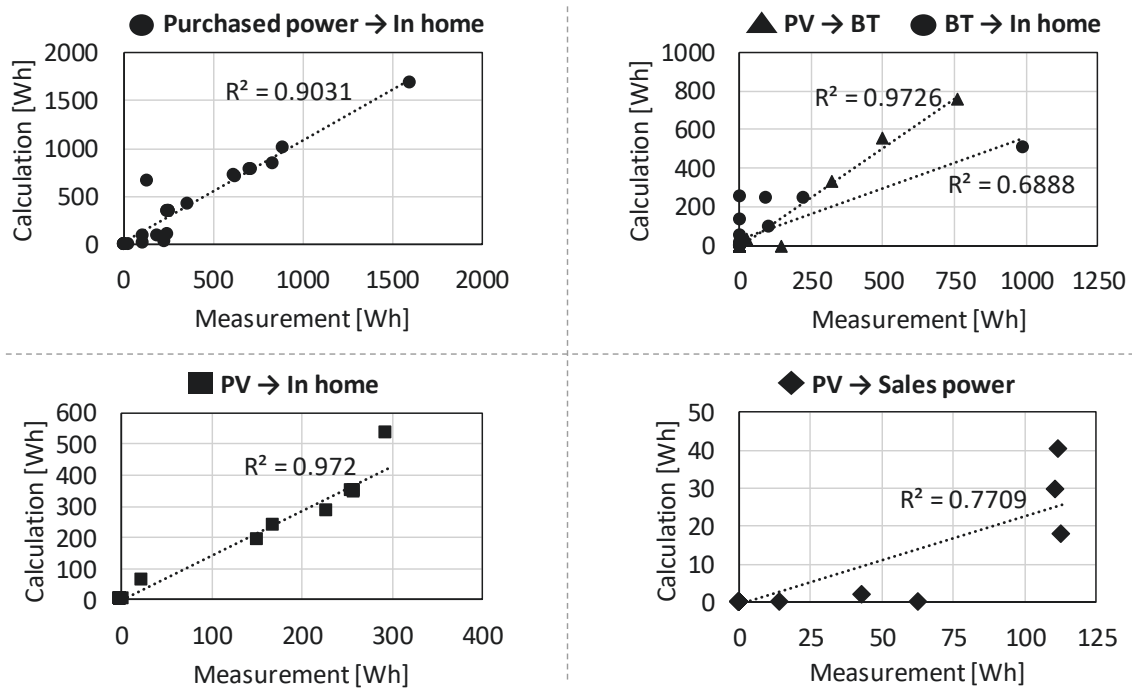


Fig. 3-25 Correlation between simulation result and measurement result

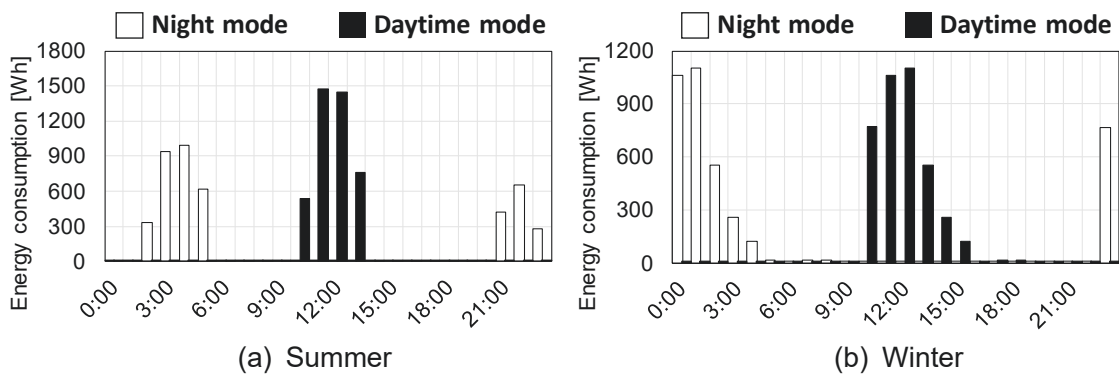


Fig. 3-26 HP water heater operation mode

### 3.6.2 夏季におけるシミュレーション結果

図 3-27 に積算売買電力量、図 3-28 に自家消費率を示す。売電量は、昼間運転の方がエアコン一般運転した条件①で約 4.6kWh、エアコン予冷運転条件（条件②③）で平均 3.1kWh、放射の予冷運転条件（条件④⑤）で平均 3.1kWh 減少した。買電量では、昼間運転の方がエアコン一般運転した条件①で約 6.5kWh、エアコン予冷運転条件（条件②③）で平均 4.5kWh、放射の予冷運転条件（条件④⑤）で平均 5.5kWh 減少した。また、PV 発電から宅内への消費量は、夜間運転に比べ、昼間運転の方がエアコン一般運転した条件①で約 5.1kWh、エアコン予冷運転条件（条件②③）で平均 4.4kWh、放射の予冷運転条件（条件④⑤）で平均 4.6kWh 増加した。自家消費率については、夜間運転に比べ、昼間運転の方がエアコン一般運転した条件①で約 26%、エアコン予冷運転条件（条件②③）で平均 20%、放射の予冷運転条件（条件④⑤）で平均 21%増加した。以上より、空調方式による昼稼働の効果に差はみられなかったが、予冷運転と HP 給湯器昼間運転の併用で、売電量は平均 53%、買電量は平均 49%削減し、自家消費率を平均 21%増加することが確認された。

■ Purchased power→In home □ BT→In home ■ PV→Sales power \* Daytime mode

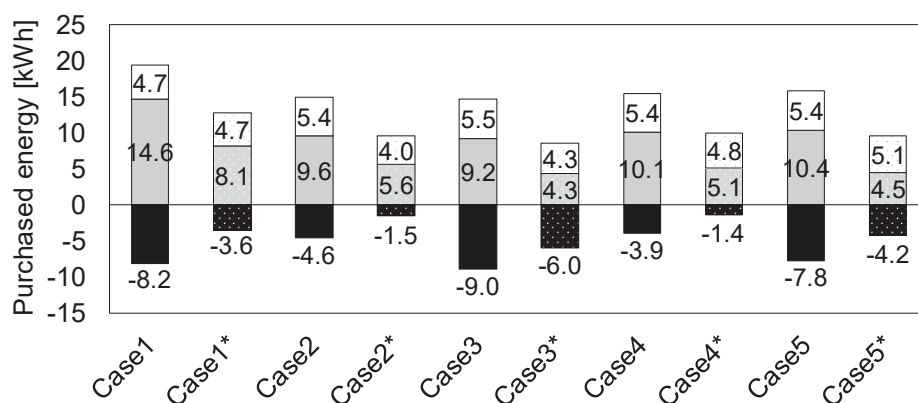


Fig. 3-27 Total trading power in summer

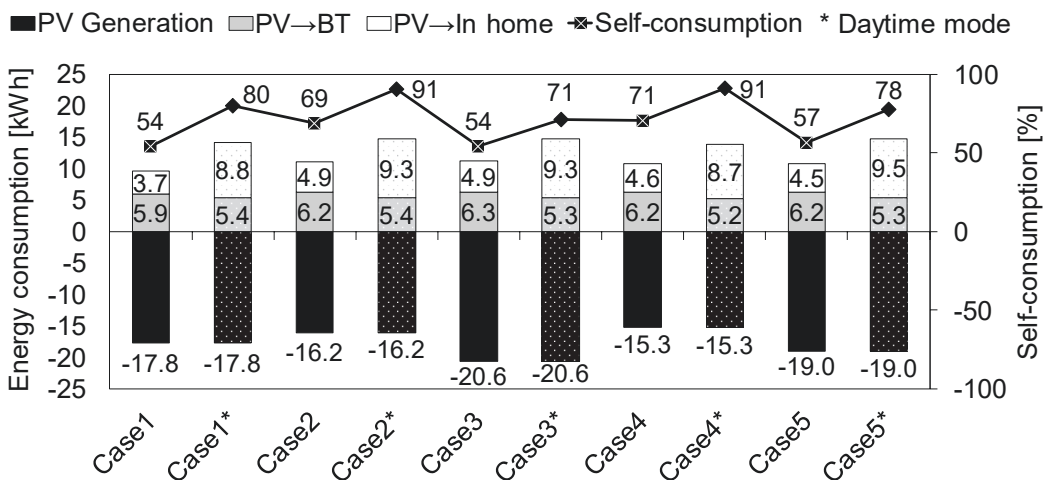


Fig. 3-28 Self-consumption in summer

### 3.6.3 冬季におけるシミュレーション結果

図 3-29 に積算売買電力量、図 3-30 に自家消費率を示す。HP 給湯器を昼間運転することで、売電量がほぼ発生しなかった。買電量は昼間運転の方がエアコン予熱運転条件（条件①～③）で平均 1.6kWh、放射の予熱運転条件（条件④～⑥）で平均 0.6kWh 減少した。PV 発電の宅内での消費量は、昼間運転の方がエアコンと放射暖房の全条件共に 3.5kWh 程度増加した。自家消費率については、昼間運転の方がエアコン予熱運転条件（条件①～③）で平均 21%、放射の予熱運転条件（条件④～⑥）で平均 13%増加した。在宅運転条件ではエアコンと放射暖房共に自家消費率が 20%以上増加した。また、放射 6h 予熱運転の条件⑤は、夜間運転で自家消費率が 97%と元々自家消費率が高かったため、昼間運転では 99%となり、宅内で発電した電力をすべて使い切ることができた。以上より、予熱運転と HP 給湯器昼間運転の併用で、エアコン条件では売電量が平均 91%、買電量が平均 16%削減し、自家消費率が平均 28%増加した。放射暖房条件では売電量が平均 83%、買電量が平均 4%削減し、自家消費率が平均 16%増加することが確認された。さらに、エアコンは放射暖房より余剰電力が多いため、昼間運転への切り替えによる効果が大きかった。

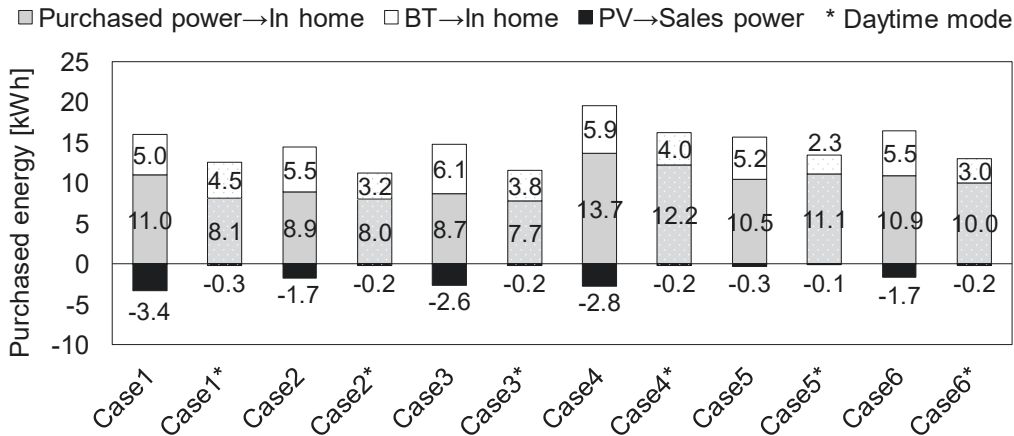


Fig. 3-29 Total trading power in summer

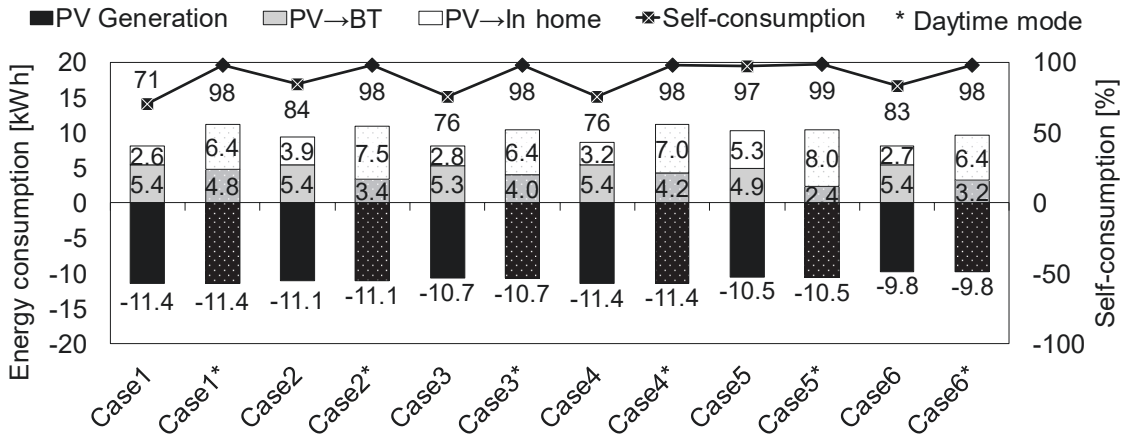


Fig. 3-30 Self-consumption in summer

### 3.7 まとめ

夏季と冬季の予冷熱運転が PV 発電の自家消費率及び熱的快適性に与える影響の把握を目的として、熱容量が大きく高断熱な対象住宅において空調運用条件が異なる 11 条件で物理環境・電力量・サーマルマネキンを用いた温冷感予測の実験を行った。また、発電量などの実験データを用いて HP 給湯器の昼間運転をシミュレーションし、比較・分析を行った。以下に本報で得た知見を示す。

#### (1) 温熱環境の評価

予冷・予熱運転によって、帰宅時と夜在宅時の PMV が快適範囲で安定した。空調方式の比較より、放射冷暖房の方が予冷・予熱運転共に PMV が快適範囲で安定した。さらに、3h 稼働条件よりも 6h 稼働条件の方が、蓄熱効果が長く持続し、非空調時間帯の快適性を向上できることがわかった。また、PMV meter と T.M PMV との比較より、放射による冷暖房は温度ムラが発生しにくいことを確認した。

#### (2) エネルギー評価

放射冷暖房を用いた予冷・予熱運転を行うことで夜在宅時及び、朝在宅時のエアコン PMV 制御による冷房・暖房の電力消費が削減した。さらに、放射冷房より放射暖房の方が蓄熱効果が高く、在宅時間帯の電力消費がないことが確認できた。放射冷暖房による予冷熱運転によって、快適性を向上しながらエネルギーシフトを実現し、売買電力量の削減と自家消費率の向上を実現した。

#### (3) HP 給湯器の昼間運転によるエネルギー評価

HP 給湯器を夜間運転から昼間運転へ切り替えることで PV 発電の自家消費率向上を確認した。予冷熱運転と併用することで冬季の放射 6h 予熱運転条件では宅内で発電した電力を全て使うことができた。本報のシミュレーションでは、昼間運転によるヒートポンプの高効率化を考慮していないため、実際には HP 給湯器がより省エネルギーに稼働すると考えられる。

以上より、熱容量が大きい高断熱住宅における予冷・予熱運転が、快適性を向上しながら、売買電力量の削減と自家消費率の向上を実現できることを示した。特に、対象住宅のような熱容量の大きな住宅では放射冷暖房による長時間の予冷・予熱運用が有効であることが示された。季節によって異なる PV 発電を予測し、予冷・予熱運転や、HP 給湯器、蓄電池などを併用しながら調整することで、快適性の向上と、さらなる売買電力量の削減、自家消費率向上を実現できると考える。



注

注 1) エアコン予冷運転時では、できるだけ室内空間を冷えるために 2016 年度 8 月の外気温・相対湿度を参考して、結露が発生しない露点温度 23°C を室内温度とした。

参考文献

- 1) Japan Photovoltaic Energy Association, JPEA PV OUTLOOK 2030
- 2) 浦山ら：住宅の断熱性能による冬季居間の温熱環境と暖房の仕方の差異 その 1) 関西地域における住宅の温熱環境と居住者の住まい方に関する事例研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 565 号, pp. 75-81, 2003. 3
- 3) 浦山ら：対流と床放射を併用した冷房に関する実験的研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, 第 48 号, pp. 297-300, 2010. 2
- 4) 坂本ら：地下水を熱源とする天井放射空調システムの PMV 制御に関する研究：放射・対流空調及び連続・間欠運転間の比較検討, 日本建築学会北陸支部研究報告集, No. 57, pp. 270-273, 2014
- 5) 空気調和・衛生工学会：生活スケジュール自動生成プログラム SCHEDULE ver.2.0., 2000
- 6) 高田ら：住宅用貯湯式給湯システムの稼働実態とその評価に関する研究（その 10）給湯負荷モードによるエネルギー消費量・機器効率の検討, 日本建築学会中国支部研究報告集, No. 37, pp. 365-368, 2014
- 7) 日本建築学会：日本建築学会環境基準 AIJES-H0005-2015 サーマルマネキンを用いた室内温熱環境評価法規集・同解説, 2015
- 8) 田辺ら：皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 448 号, pp. 1-8, 1993. 6
- 9) 秋山ら：睡眠段階を考慮した夏季の適切な寝室内温熱環境に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 233-236, 2016

図・表リスト

Table 3-1	Equipment setting condition .....	41
Table 3-2	Experimental conditions for summer.....	41
Fig. 3-1	Schedule of precooling・preheating operation and BT for summer.....	41
Table 3-3	Experimental conditions for winter .....	42
Fig. 3-2	Schedule of precooling・preheating operation and BT for winter.....	42
Fig. 3-4	PV generation, solar radiation and outdoor temperature for winter .....	43
Fig. 3-3	PV generation, solar radiation and outdoor temperature for summer.....	43
Table 3-4	Measurement items.....	44
Fig. 3-5	Measurement points and position.....	44
Table 3-5	Thermal manikin specification .....	46
Fig. 3-6	Thermal manikin position .....	46
Fig. 3-7	Experiment landscape with thermal manikin .....	46
Table 3-6	Average value of air temperature by time.....	47
Table 3-7	Average value of vertical air temperature difference by time.....	48
Fig. 3-8	Air temperature .....	49
Fig. 3-9	Vertical air temperature distribution.....	49
Fig. 3-10	Heatmap of air temperature.....	50
Table 3-8	Average value of PMV by time.....	51
Fig. 3-11	PMV .....	52
Fig. 3-12	Heat loss of thermal manikin.....	53
Fig. 3-14	Trading power .....	55
Fig. 3-13	Energy consumption.....	55
Fig. 3-15	Daily total energy consumption (average value for each case).....	56
Table 3-9	Average value of air temperature by time.....	57
Table 3-10	Average value of vertical air temperature difference by time.....	58
Fig. 3-17	Vertical air temperature distribution.....	59
Fig. 3-16	Air temperature .....	59
Fig. 3-18	Heatmap of air temperature.....	60
Table 3-11	Average value of PMV by time.....	61
Fig. 3-19	PMV .....	62
Fig. 3-20	Heat loss of thermal manikin.....	63
Fig. 3-21	Energy consumption.....	65
Fig. 3-22	Trading power .....	65
Fig. 3-23	Daily total energy consumption (average value for each case).....	66

Fig. 3-24	Energy shift effect by pre-cooling/preheating operation .....	67
Table 3-12	Measurement data condition for simulation verification .....	69
Fig. 3-25	Correlation between simulation result and measurement result .....	69
Fig. 3-26	HP water heater operation mode .....	69
Fig. 3-27	Total trading power in summer.....	70
Fig. 3-28	Self-consumption in summer.....	70
Fig. 3-29	Total trading power in summer.....	71
Fig. 3-30	Self-consumption in summer.....	71



## 第4章

デマンドレスポンスへの適応を目指した予冷運転と  
居住者行動に関する実験



## 第4章 デマンドレスポンスへの適応を目指した予冷運転と居住者行動に関する実験

### 4.1 はじめに

第5次エネルギー基本計画において、再生可能エネルギーの主力電源化が目標とされた。住宅部門ではZEHを中心に太陽光パネルの導入が進んでいる。さらなる再生可能エネルギーの導入には、天候による出力変動に対する調整力の確保などの次世代送配電ネットワークへの環境整備が必要とされる<sup>1)</sup>。特に、現在火力・揚水発電に頼っている調整力については、デマンドレスポンス（以下、DR）による電力需要の調整や、蓄電池などの蓄エネルギー設備による脱炭素化が求められている<sup>1)</sup>。平成30年度ZEH支援事業で定められたZEH+<sup>2)</sup>では高断熱化に加え、HEMSや電気自動車による自家消費拡大措置が認定項目に加えられた。住宅における調整力として、ヒートポンプ給湯器の昼稼働、蓄電池・電気自動車の導入など、ハードウェアに関する研究や政策が進められ太陽光発電の自家消費効果に期待が集まっている<sup>3)</sup>。

一方で、電力需給に合わせて家電などの利用時間をシフトさせるといった、居住者の主体的な行動変容による調整力も検討されている。DRに関しては、電力価格の変動により需要の制御を目指すダイナミックプライシングなどの経済的インセンティブによる行動促進が検討され、電力取引市場の整備などが進められている<sup>1)</sup>。また、アンケート調査から電力料金の変動により家電利用の抑制やシフト、家から外出するなどの可能性が示されている<sup>4)</sup>。行動変容を促すための方法論としては、ナッジ（Nudge）に注目が集まっている。国内では省エネルギーを目的とした研究が多いが、アメリカではDRへの活用が検証され、適切なタイミングでナッジを行い行動変容を促すことで平均3%の需要削減効果が示された<sup>5)</sup>。

近年、電力の調整力として、電力需要が多い時間帯に電力消費量を抑制する「下げDR」に加え、太陽光パネルの導入により余剰電力が多い時間帯に電力消費量を増やす「上げDR」も注目されている。太陽光パネルによる発電量は天候に大きく左右されるため、DRのかかる時間帯は電力消費量や天候によって変動する。本実験ではエアコンによる調整力に注目し、上げDRとしてのエアコンの予冷運用と、下げDRとしてのエアコンの停止に関する実験・シミュレーションを行った。本実験で想定したのはDRがかかる状況の一例であり、上げDRは11～13時に、下げDRは13～15時にかかる場合を想定した<sup>注1)</sup>。予冷運用は、DR時の電力消費量削減を目的に、DR前に室内を予冷し、DR時のエアコン稼働を抑制する運用である。アンケート調査より回答者の76%がDR時に予冷予熱運用を実施する可能性が示されている<sup>4)</sup>。一方で、予冷予熱の効果は住宅性能の影響を大きく受けるため、低性能の住宅が多い日本では、予冷予熱による電力消費量の増加やDR開始前にピークが発生することなどが懸念される。オーストラリアのDR時の空調利用習慣に関する実態調査<sup>6)</sup>では、予

冷などシフトを伴う居住者行動は持続的に行われにくいことが示された。効果的な予冷予熱運用の実現には、住宅性能に応じた導入・制御手法の検討が必要である。また、持続的に居住者の行動変容を促すためには、室内での過ごし方などを含め快適性・健康性を損なわない導入手法の提示が求められる。

## 4.2 研究目的

本章では、DR を想定した予冷運用による電力需要のシフト効果と、予冷運用に合わせた居住者行動が空調停止時の快適性や健康性に及ぼす影響を評価した。予冷運用は夏季日中の DR を想定したものとし、調整力としての効果を確認した。その後、予冷運用時に推奨する居住者行動として、家事を行う時間を工夫した場合の快適性・健康性の変化を確認し、予冷運用への適応を目指した居住者行動の効果を示す。

## 4.3 実験による予冷運用の温熱環境・エネルギー評価

### 4.3.1 実験概要

表 4-1 に居住者スケジュールとエアコン設定温度を示す。予冷なし条件①は 25°C 一定でエアコンを稼働させた。予冷あり条件では、DR 前の 2 時間 23°C で予冷を行い、DR 時間帯に設定温度を 27°C に上げる予冷条件② (DR\_27°C) と、DR 時間帯にエアコンを停止する予冷条件③ (DR\_OFF) の 2 条件とした。全条件において睡眠時間帯にはエアコンを停止した。なお、設定温度は過去の実験データと事前実験から定めた。居住者スケジュールは日中在室の世帯を想定し、スケジュール作成ソフト「SCHEDULE」<sup>7)</sup>を参考に定めた。DR が発生する時間帯に関しては、日射量や気温、電力需要によって変動することが想定されるが、文献<sup>9)</sup>を参考に 13:00~15:00 の 2 時間とした。パネルヒーターと加湿器で 2 人分の人体負荷 (発熱 160W、発湿 110mL/h) を発生させ、電力負荷抵抗器 (PCZ-1000A) で家電の電力消費を再現し居住者の生活を模擬した。

表 4-2 に測定項目、図 4-1 に測定位置を示す。室内環境は居場所と想定しリビングで空気温度、グローブ温度、相対湿度、上下温度を測定した。エアコンの電力消費量は HEMS で記録した。PMV の算出は代謝量 1.1met、着衣量 0.4clo、気流速度 0.1m/s とし、その他は実測値を用いた。式 (4.1) に屋内 WBGT 算出式を示す。自然湿球温度 (Natural Wet Bulb Temperature, *NWB*) は文献<sup>8)</sup>を参考に空気温度と相対湿度から算出し、グローブ温度 (Glove temperature, *GT*) は実測値を用いた。日常生活において WBGT が 25°C 以上になると熱中症「警戒」と評価される。

$$WBGT = 0.7NWB + 0.3GT \quad (4.1)$$



Table 4-1 Schedule and AC setting temperature

AC operation condition		Setting temperature				Date	Average outdoor temperature
		At home	Pre-cooling	DR	Sleep		
Without Pre-cooling	①	25°C			OFF	2018/8/25-26	28.4°C (±0.1)
	②	25°C	23°C	27°C	OFF	2018/8/14-15	27.3°C (±0.2)
Pre-cooling	③	25°C	23°C	OFF	OFF	2018/8/16-17	27.6°C (±0.1)
	Occupant schedule	6:30-11:00 15~23:00	11~13:00	13~15:00	23~6:30		

Heat load 160W + Humidification 110mL/h (24hours)

Table 4-2 Measurement items and position

	Measurement items	Legend	Height
Indoor environment	Air temperature	●	1.1m
	Globe temperature	○	1.1m
	Relative humidity	▲	1.1m
Electric power	Energy consumption / Purchased • sales power		
	PV generation / BT charge • discharge		

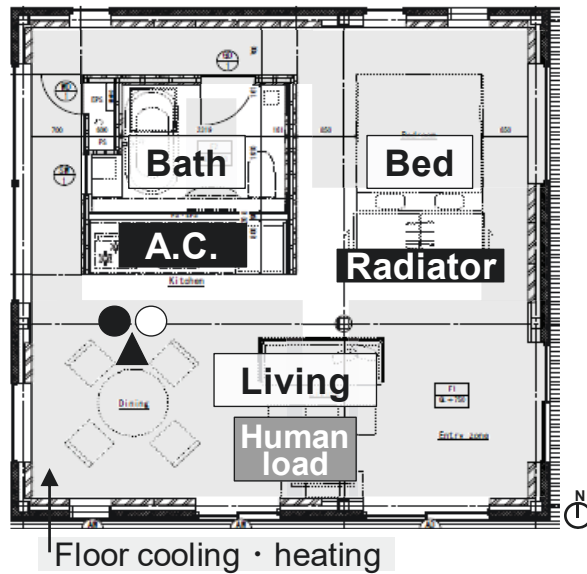


Fig. 4-1 Measurement points and position

### 4.3.2 実験結果

温熱環境とエネルギーに関する分析では、雨天日と外気温が相対的に低い実測日のデータを除いて行った。代表日は各条件間で外気温の変動や平均値、日射量が近い日とした。

#### (1) 温熱環境に関する評価

図 4-2 に室温と日射量の経時変化を示す。全条件において空気温度と放射温度に大きな差はなく、同様の変動を示した。予冷なし条件①はエアコン稼働中に設定温度 25°C を概ね維持できた。予冷条件②③は、予冷時間 (11:00~13:00) に PMV-1.0 程度である 23~24°C まで室温が低下し、DR 時間帯 (13:00~15:00) になるとエアコンが停止し室温が急激に上昇した。予冷条件② (DR\_27°C) は、DR 時も 27°C 設定で運転していたため DR 終了前に室温が設定温度を上回り再び稼働し始め、26°C 程度で安定した。予冷条件③ (DR\_OFF) は DR 時間帯は室温が 27.5°C まで上昇し、DR 時間終了後のエアコン再稼働で設定温度の 25°C を下回り 23°C 程度まで低下した。

図 4-3 に上下温度分布、図 4-4 に PMV と WBGT の経時変化を示す。全条件において測定点が高くなるほど室温も上昇する傾向がみられた。DR 開始時 (13:00) の上下温度は、予冷あり条件②③は予冷なし条件①と比較して、測定高さ 0.1m で約 3.5°C、測定高さ 2.2m で約 1.8°C 低くなった。DR 終了時 (15:00) の上下温度差<sup>注9)</sup> (0.1m と 1.1m の測定点差) に関しては、予冷なし条件①と予冷条件③ (DR\_OFF) は同様に 1.1°C となったが、予冷条件② (DR\_27°C) では上下温度差が 0.2°C となり、DR 時間帯に 27°C で空調を運転することで、上下温度差が小さくなることが確認された。また、いずれの条件においても、PMV は概ね ±0.5 範囲内で推移し、WBGT は熱中症に警戒が必要な 25°C を上回ることはなかった。

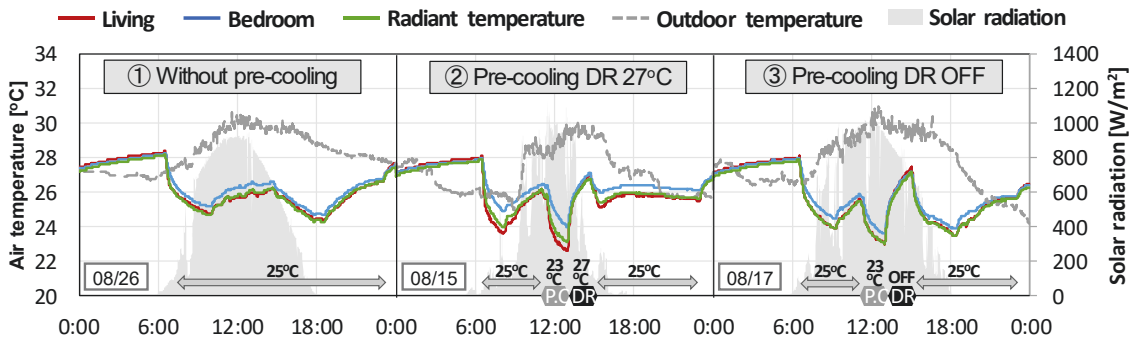


Fig. 4-2 Temporal change in indoor environment

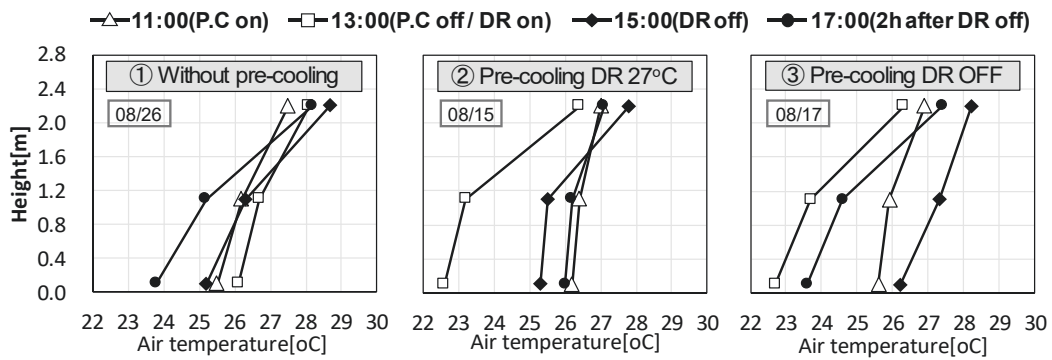


Fig. 4-3 Temporal change in indoor environment

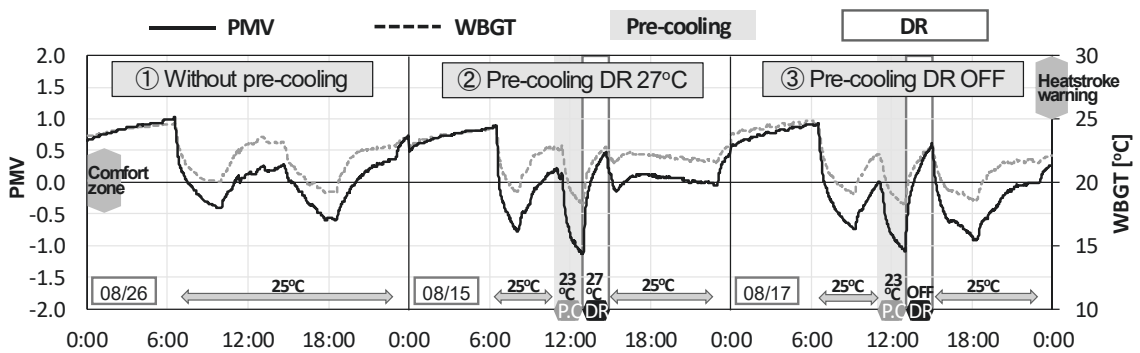


Fig. 4-4 Temporal change in PMV and WBGT

## (2) エネルギーに関する評価

図 4-5 にエアコン電力消費量の経時変化を、図 4-6 に時間帯別エアコン電力消費量の比較を示す。予冷条件②③のいずれも、予冷で設定温度を 23°C に下げたため DR 前 (11:00~13:00) の電力消費量は予冷なし条件①に比べ約 1 kWh 増加した。DR 後 (13:00~15:00) においては、予冷なし条件①のエアコン電力消費量と比較して、予冷条件③ (DR\_OFF) は大きな差がなかったが、予冷条件② (DR\_27°C) は 0.7 kWh 減少した。予冷開始から DR 終了 2 時間後まで (11:00~17:00) のエアコン電力消費量は、予冷なし条件①と予冷条件②で同程度であり、予冷条件② (DR\_27°C) の予冷運転により電力消費量を増加せずに DR 時間帯以外に電力需要をシフトできたといえる。予冷条件③ (DR\_OFF) においては、DR 直後のエアコン再起動により立ち上がり負荷がかかってしまい、DR 後 2 時間の電力消費量が予冷なし条件①対比 0.1 kWh、条件②対比 0.8 kWh 増加した。エアコンを運転停止してから再起動したために大きい立ち上がり負荷が発生することになり、過剰な冷却につながったと考えられる<sup>注6)</sup>。以上より、DR 時間帯も高めの設定温度でエアコン運転をし続けた方が、DR 直後にエアコンを再稼働するよりも、必要以上のエアコン電力消費を抑制できることが確認された。

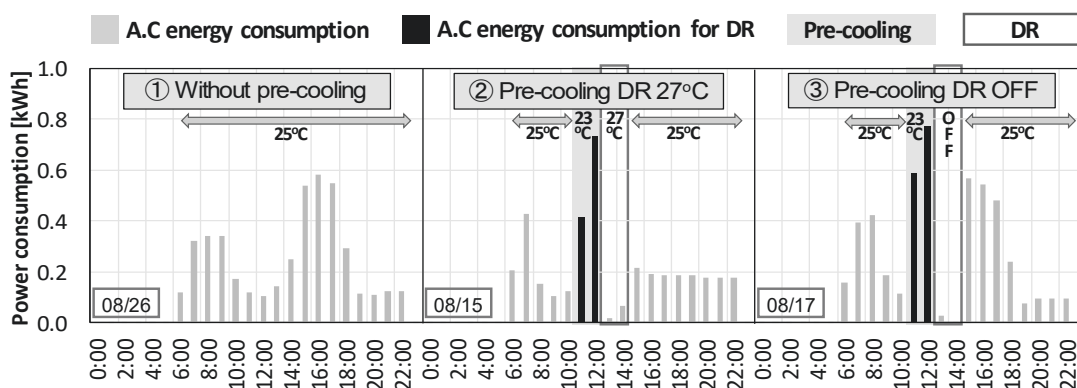


Fig. 4-5 Temporal change in electricity consumption of A.C

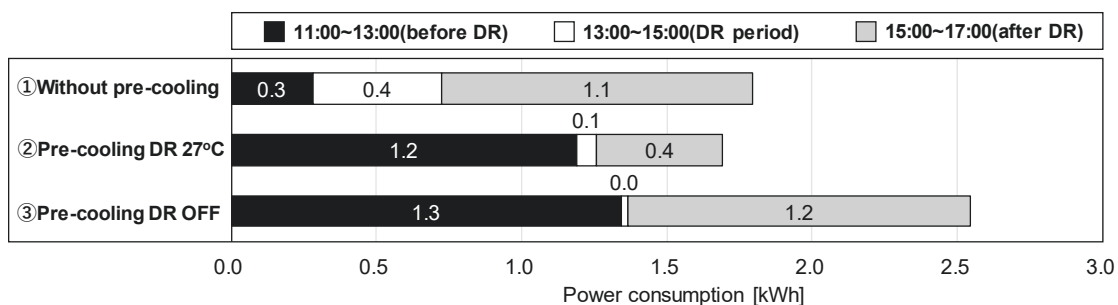


Fig. 4-6 Compare of A.C electric load by time zone

#### 4.4 BEST-H を用いたシミュレーションによる検証

実験においてはエアコンの制御などを実際に行っており、シミュレーションのように理想的に動作するわけではない。本実験結果は外気温などの実験条件の違いによる影響を受け、室内環境変動やエアコンの立ち上げり特性が異なると考えられたため、実験住宅における予冷の効果を BEST-H（住宅版）を用いたシミュレーションでも確認した。シミュレーションは標準年拡張アメダス気象データを用いて 1 年間 5 分間隔で行った。代表日は実験期間の外気温の平均値と近く、日中最高外気温が 32°C 程度でより厳しい日とした。また、近年夏季の猛暑日が増加していることから、日中最高外気温が 35°C 程度となる日も代表日として選出し、猛暑日における DR 適応を目指した予冷運転が室内環境やエネルギーへ及ぼす影響を検証した。なお、日中最高外気温が 35°C の条件は DR 時間帯にエアコンを停止する条件のみ検討した。

図 4-7 に室内環境の経時変化、図 4-8 に時間帯別エアコン電力消費量の比較を示す。室温に関しては、予冷なし条件①では起床時 (6:30) から就寝時 (23:00) まで 25°C で安定した。予冷条件② (DR\_27°C) ではエアコンを停止した 13:00 から約 25 分後に室温が 27.0°C まで上昇し、DR 終了時の 15:00 まで 27.5°C 程度で安定した。予冷条件③ (DR\_OFF) では、エアコン停止後から室温が徐々に上昇し、DR 終了時には 29.3°C となった。PMV は DR 時間帯において予冷なし条件①は±0.5 範囲内で安定したが、予冷条件②③は±1.0 のやや暑い範囲内で推移し、実験結果より高い結果となった。これは日中最高外気温が実験期間より高いことが原因であると考えられる。WBGT はいずれの条件も熱中症に警戒が必要な 25°C を上回ることはなかった。エアコン電力消費量に関しては、実験結果と時間帯別の電力消費傾向は概ね同様であったが、日中最高外気温が実験期間より高いため、一日の積算値は実験結果と比較して 0.3~0.5kWh 程度多い結果となった。

図 4-9 に最高外気温 35°C 時の室内環境の経時変化を示す。室温に関しては、DR 開始時では 23.0°C であったが、エアコン停止から約 30 分で室温が 28.0°C まで上昇し、DR 終了時には約 30.0°C 近くなった。PMV については、予冷時間帯に-0.5 を下回り、DR が終了する 25 分前から+1.0 を超える結果となったが、WBGT が 25°C を超えることはなかった。以上より、夏季の猛暑日にも予冷運転を行うことで DR 時間帯にエアコンを停止することでやや暑い環境となるが、熱中症にならず過ごせることが確認された。

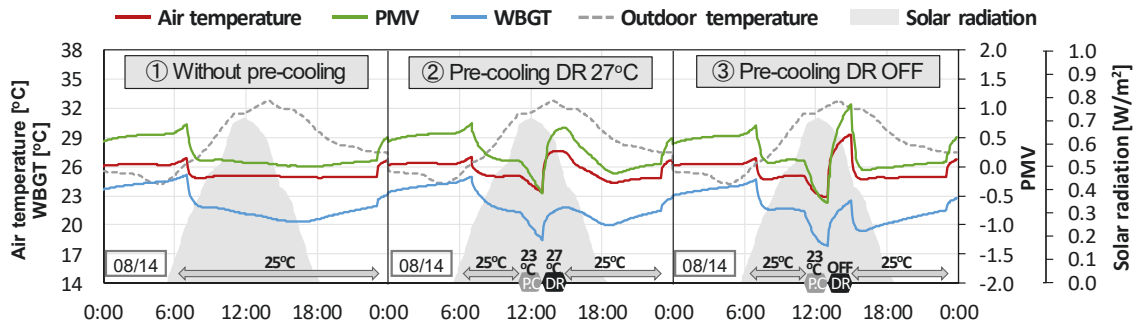


Fig. 4-7 Simulation results of indoor environment

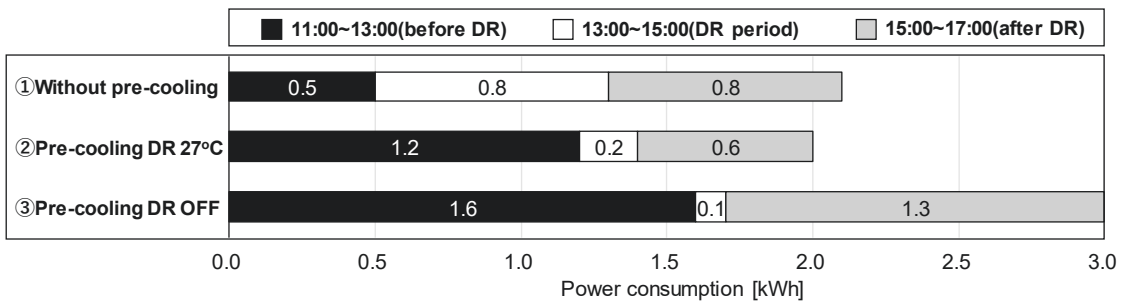


Fig. 4-8 Simulation results of A.C. Power load comparison by time zone

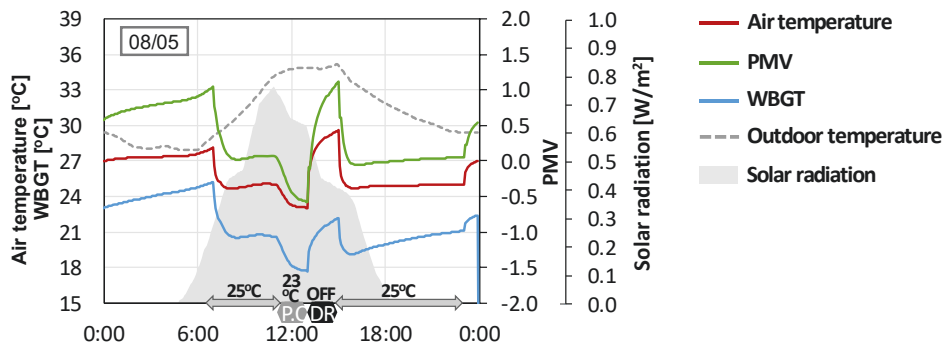


Fig. 4-9 Simulation results when maximum outdoor temperature 35°C

#### 4.5 被験者実験による予冷運用の快適性・健康性評価

実験、シミュレーションを行った3条件に関して被験者実験を行うことが理想的であるが、実験日数などの限りにより被験者を用いた本実験ではDRに対応した予冷運用に家事を行う時間を連動させる居住者行動が、予冷時やエアコン停止時における快適性や健康性に及ぼす影響の把握を目的とした。

##### 4.5.1 実験概要

表4-3に被験者実験のスケジュールとエアコン設定温度を示す。既往研究<sup>2)</sup>よりDRの時間帯を13:00~15:00と設定した。DR時間帯はエアコンを停止し、DRが始まる前2時間(11:00~13:00)はエアコンの設定温度を23°Cとして予冷運転を行った。被験者実験は2018年8月20日~31日(25日、26日は除く)の計10日間行った。なお、11:30~15:00の時間帯に被験者2名と実験主導者1名の計3名が在室した。

Table 4-3 Schedule and A.C setting temperature for subject experiment

Date	2018.08.20~24, 08.27~31				
Occupant schedule	6:30-11:00	11:00-13:00	13:00-15:00	15:00-23:00	23:00-6:30
	At home	Pre-cooling	DR	At home	Sleep
Setting temperature	25°C	23°C	OFF	25°C	OFF
Human load	Total 3 persons: 2 subjects + 1 experiment leader (only 11:30-15:00)				

図 4-10 に居住者行動の条件を示す。日中在宅者を想定し、家事行動と座席で安静に過ごす状態の 2 つを行った。DR への適応を目指した居住者行動の検証として、予冷時 (12:00～13:00) に家事を行いエアコン停止時は室内での活動量を減らす条件 A と、家事を DR 時間帯前半 (13:00～14:00) に行う条件 B の 2 条件を定めた。被験者は 11 時 30 分から実験住宅内で 30 分間の順応を行い、12 時から実験を開始した。在室中の実験主導者が被験者 2 名に踏み台昇降、主観申告の開始を指示した。安静時間は読書やスマートフォンの操作など被験者の自由とし椅座位安静を維持した。家事は踏み台昇降で模擬し、8 分間の踏み台昇降と 22 分間の安静の 1 セットを 2 回繰り返した合計 1 時間を、家事を行った時間帯とした。心拍は運動の影響を受けることが想定されたため、踏み台昇降時と安静時を区別して評価できる条件設定とした。

表 4-4 に被験者条件を示す。20～41 歳の健康な女性を被験対象とし、2 つの居住者行動条件を 1 回ずつ計 2 回行った。着衣は共通のハーフパンツと半袖 T シャツ (着衣量 0.4 clo 程度) とした。家事を想定した踏み台昇降は、踏み台の高さは 100 mm、60 step/min とし 8 分間行なった。想定される代謝量は 3.1 met である。本実験は、早稲田大学倫理委員会の承認 (承認番号 2018-127) を得て行った。

図 4-11 に実験住宅内の配置、表 4-5 に被験者実験測定項目を示す。エアコンの風が等しく届くように設置したパーテーションに安静時に 2 名の被験者が向かい合う配置とした。物理環境測定項目に関しては、被験者近傍 2 点の床から 1.1m の高さにおいて、空気温度、相対湿度、グローブ温度を 1 分間隔で測定した。被験者の心理量・生理量の測定項目に関しては、アンケートによる主観申告 (全身温冷感や乾湿感、温熱環境、湿度、気流に対する快不快感やストレス感等)、心拍計による心拍 (数、周期、波形) ・体表面温度 (胸部) を測定した。体表面積、基礎代謝は実験開始前に記録した。

表 4-6 に測定状況と分析対象者を示す。8 月 20 日、27 日、31 日は室温変動のばらつきが大きく分析対象日から除いた。被験者の平均基礎代謝は 0.63 (0.59～0.69) met であった。原則として被験者は条件 A と条件 B のそれぞれを 1 度ずつ順不同に参加するものとしたが、被験者 8 は 2 度目の参加ができず、代理の被験者 8' が参加した。また、主観申告は代表日 7 日全てのデータを利用したが、生理量は欠測が多かった被験者は除外し、N 数確保の観点から片方の条件のみデータを利用可能な被験者は分析に利用した。以降の解析では、表 6 に基づいてデータを選択し分析を行っている。



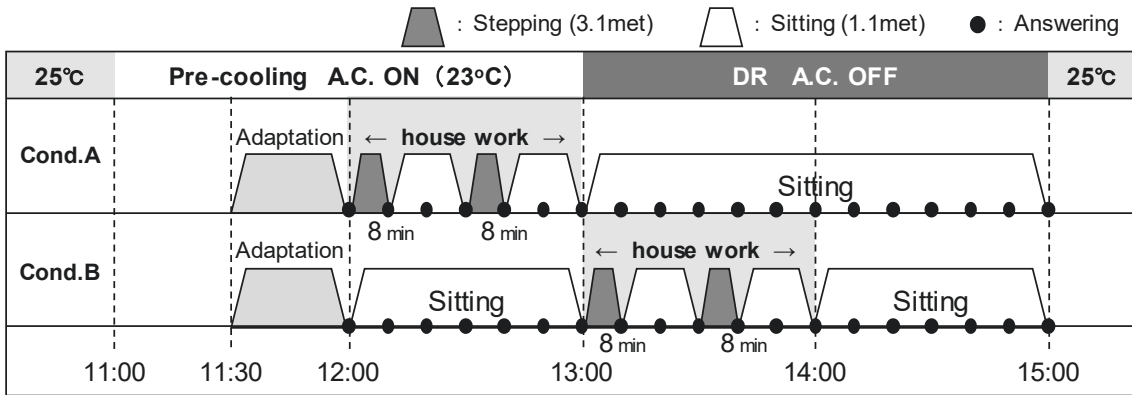


Fig. 4-10 Condition of occupant behavior

Table 4-4 Subjects outline

Subjects		11 women (average age: 32)
Number of days participated		2 days per person (2 subjects: 1 day)
Clo value		Approximately 0.4 clo (T shirt / Shorts)
Metabolic rate	House work	Stepping: 3.1met* <sup>1</sup>
	Rest	Sitting: 1.1 met

\*<sup>1</sup> : Step height 100mm, 60 steps/min

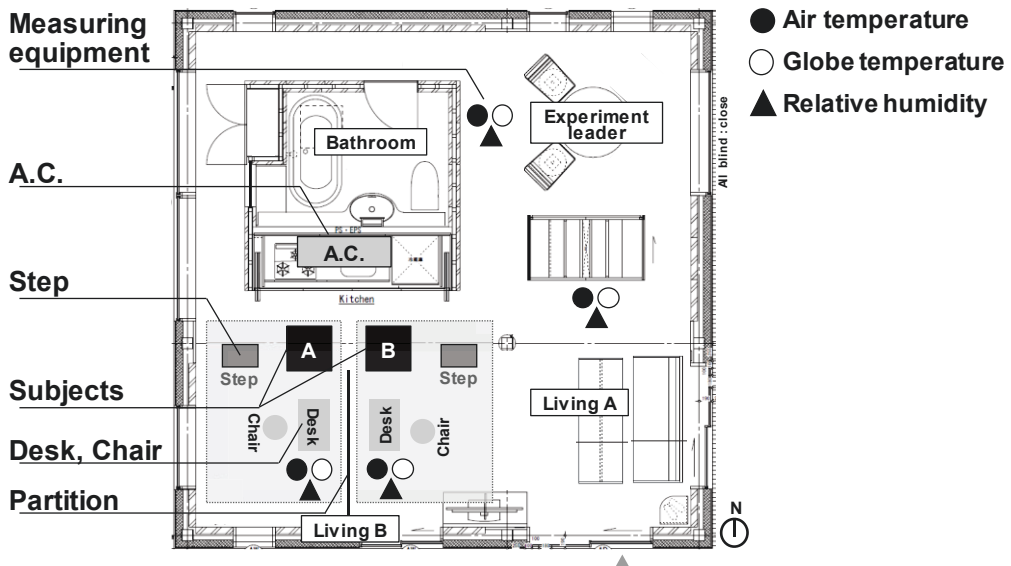


Fig. 4-11 Layout of test house

Table 4-5 Measurement items (physiological amount)

Physiological parameters		Measurement times & interval	Method & Equipment
Physiological measurement	Body surface area (Dubois)	1 time	Dubois
	Basal metabolism (kcal/day)	2 times (1 time/day)	Inner scan DUAL RD-800
	Heart rate (HR), Cardiac cycle	every heartbeat	My beat WHS-1
	Body surface temperature (chest)	1 sec	
Subjective evaluation of the thermal sensation	Thermal sensation, Humidity sensation	10 min	Questionnaire
	Thermal satisfaction, Humidity satisfaction, Airflow satisfaction		
	Sweat level, Airflow sensation, Stress levels (to indoor environment)		

Table 4-6 Data collection status and analysis target

Number of subjects	Age	Basal metabolism [met]	Day	Subjective evaluation	Physiological value	Room temp.	Group	
Cond. A	1	23	0.63	8/20			×	
	2	41	0.66	8/27			×	
	3	27	0.61	8/21	○	○		discomfort
	4	30	0.59	8/28	○	○		discomfort
	5	41	0.60	8/22	○	○		comfort
	6	20	0.62	8/23	○	○		discomfort
	7	38	0.62	8/24	○	○		comfort
	8	25	0.62	-	-	-	-	
	8'	22	0.69	8/30	○	○		comfort
	9	41	0.65	8/29	○	○		discomfort
10	41	0.60	8/31			×		
Cond. B	1	23	0.63	8/24	○	○		
	2	41	0.66	8/20			×	
	3	27	0.61	8/28	○	○		
	4	30	0.59	8/21	○	×		
	5	41	0.60	8/20	○	○		
	6	20	0.62	8/22	○	×		
	7	38	0.62	8/23	○	○		
	8	25	0.62	8/27			×	
	8'	22	0.69	-	-	-	-	
	9	41	0.65	8/31			×	
10	41	0.60	8/29	○	○			

■ : Excluded from analysis

#### 4.5.2 実験結果

##### (1) WBGT を用いた評価

図 4-12 に分析対象日の室温と WBGT 変動の分布を示す。エアコンを停止した 13 時以降の室内空気温度は同程度であり、特に 13 時 20 分以降は  $0.5^{\circ}\text{C}$  以下とばらつきは小さかった。外気条件は分析代表日の間でもばらつきが大きかったが、同等の室内環境が形成され対象住宅の外皮性能の高さが確認された。また、被験者実験時においても、WBGT $25^{\circ}\text{C}$  を上回らないことが確認された。

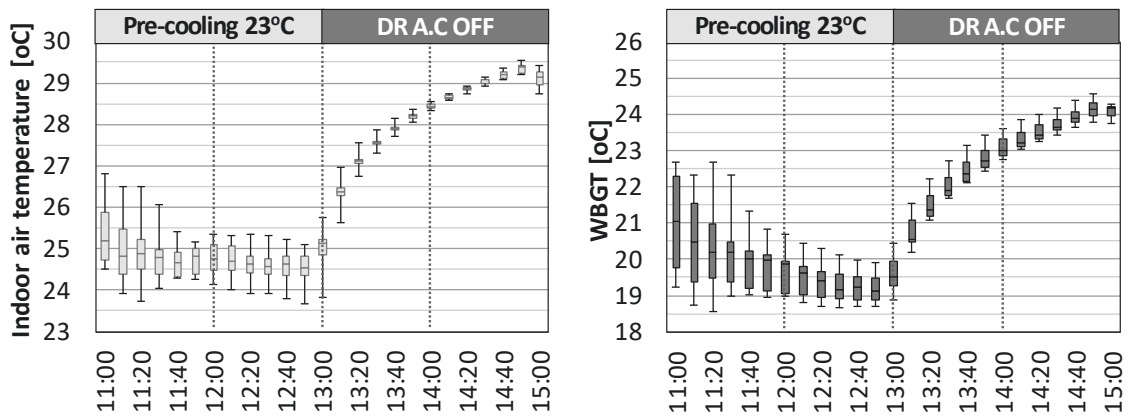


Fig. 4-12 Distribution change of room temperature and WBGT

## (2) 主観申告を用いた評価

### (2-1) 主観申告の経時変化に関する評価

主観申告の経時的な傾向を把握することを目的に、10分間隔の主観申告を1時間ごとに集計した。家事を模擬した踏み台昇降直後の申告と、安静時の申告は分離している。時間帯・行動別の申告の分布をt検定により有意差検定を行った。

図4-13に温熱環境に対する温冷感申告の時間帯・行動別分布を示す。予冷の時間帯(12:00～13:00)において、安静時にはエアコン前に被験者が着座していたため両条件ともに寒い側の申告が多くなったが、踏み台昇降を行った条件Aは条件Bに比べ有意に寒い側の申告が少なく、中立の申告があった。DR時間帯前半(13:00～14:00)では両条件ともに中立の申告が増加し、DR時間帯後半(14:00～15:00)になると暑い側の申告へ移動する傾向がみられた。

図4-14に温熱環境に対する快不快感申告の時間帯・行動別分布を示す。予冷の時間帯(12:00～13:00)において、条件Aと条件Bの申告の間に有意な差は見られず、両条件ともに不快側と快適側の申告数が同程度であった。DR時間帯前半(13:00～14:00)では両条件ともに中立から快適側の申告が増加した。DR時間帯後半(14:00～15:00)においては、両条件ともに不快側の申告が増加したが、条件Bのほとんどの被験者が不快側の申告に推移したのに対し、条件Aでは快適側の申告が計15回あり、条件Bに比べ条件Aの申告の平均値が有意に快適側であった。以上の結果より、家事を行う時間を予冷運用に連動させる居住者行動(条件A)により、DRによるエアコン停止時に、より快適に過ごせる可能性が示された。

図4-15に温熱環境に対する快不快感申告の平均値の経時変化を示す。室温上昇に伴い、快不快感申告の平均値が不快側に移動する傾向がみられた。予冷時間帯(12:00～13:00)において、条件Aの快不快感申告の平均値が予冷の寒さにより不快側になることがあった。いずれも踏み台昇降から約10分後であり、踏み台昇降時の体内発熱により条件Bよりも体からの放熱が多くなり、より寒く感じたためと推察される。また、条件Aは14:10頃、条件Bは13:35頃に中立となり、快不快感申告の平均値が中立を下回る時間が条件Bよりも条件Aの方が約35分遅くなった。DR時に快適に過ごせるエアコン停止時間が35分から70分まで延長した場合、調整力としての効果や、経済的メリットを向上できる可能性がある。

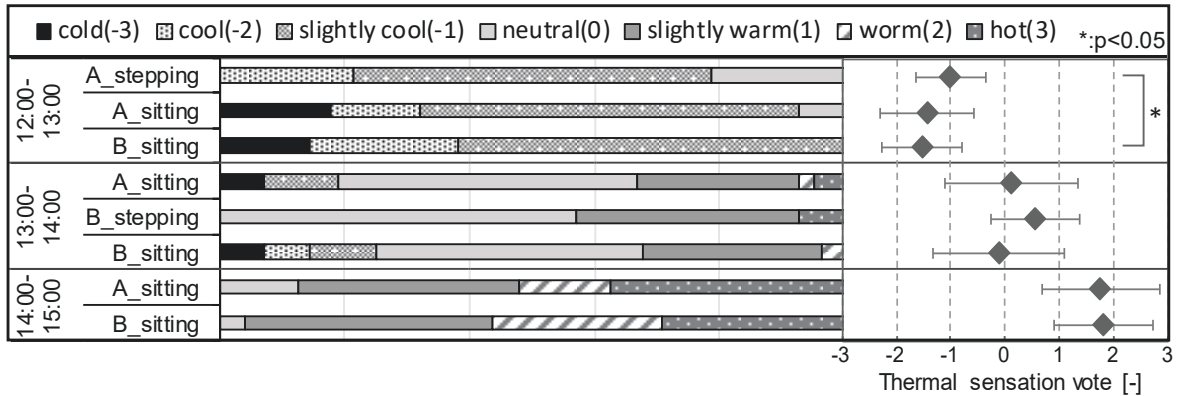


Fig. 4-13 Thermal sensation vote by time zone and behavior

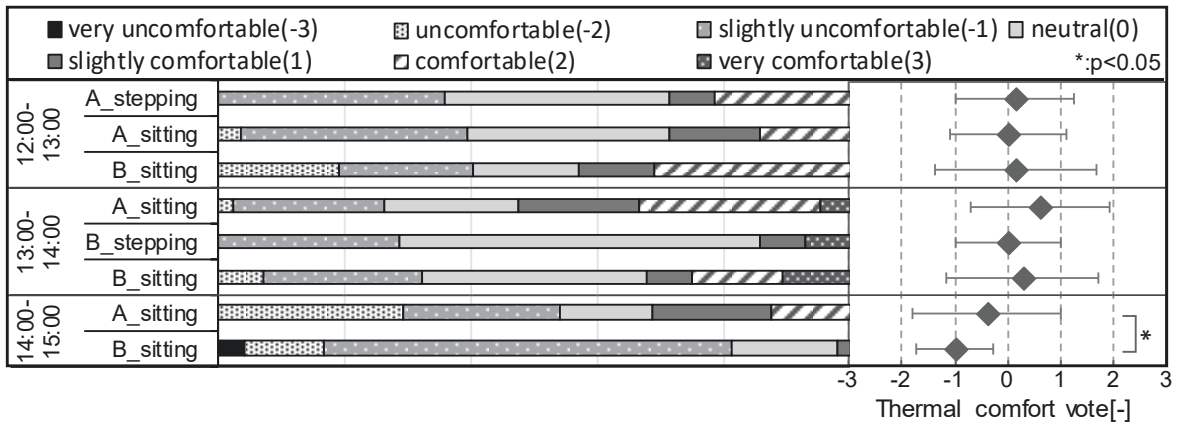


Fig. 4-14 Thermal comfort vote by time zone and behavior

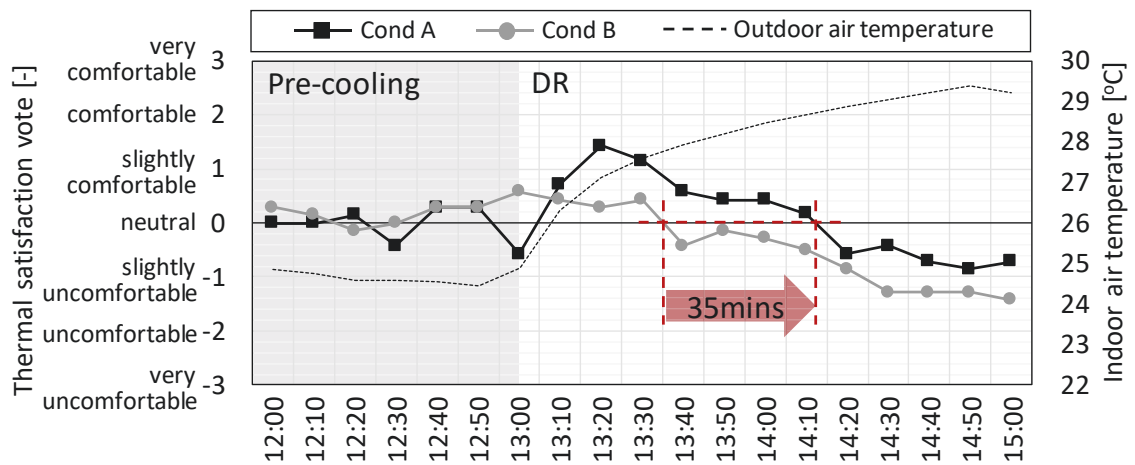


Fig. 4-15 Change of thermal comfort vote by indoor air temperature

## (2-2) 室内環境と主観申告に関する評価

室内環境が主観申告に及ぼす影響の把握を目的に、室内空気温度を横軸に主観申告の平均値をプロットした。予冷時間帯（12:00～13:00）と DR 時間帯（13:00～15:00）に分けて示した。

図 4-16 に温熱環境に対する全身温冷感と室内空気温度の関係を示す。予冷の時間帯（12:00～13:00）の全身温冷感は、両条件ともに「涼しい」「やや涼しい」の申告が多かった。DR 時間帯（13:00～15:00）では、家事行動や時間帯によらず空気温度に応じて暖かい側の申告となり、条件 A と条件 B は同様の傾向を示した。

図 4-17 に温熱環境に対する快不快感と室内空気温度の関係を示す。予冷の時間帯（12:00～13:00）の快不快感申告について、両条件ともに「中立」「やや快適」の申告が多かった。DR 時間帯（13:00～15:00）は、条件 A は 29°C 程度まで中立～快適、条件 B は 27.5°C 程度まで中立～やや快適に分布していた。申告平均が中立を下回る温度が条件 B は 27.5°C であるのに対し、条件 A は 1.5°C 上昇し 29°C となったことから、DR への適応を目指した居住者行動によって中立から快適側で過ごせる室温幅が拡大される可能性がある。

図 4-18 に全身温冷感、快不快感と室内空気温度の統計分析（室内温度>27°C）を示す。条件 A については、室内空気温度が 27°C 以上の状況下においても、快不快感申告で「中立」以上の申告をした被験者を快適群、「やや不快」以下の申告をした被験者を不快群と定義し、評価した。全身温冷感に関して、条件 A の快適群は条件 B に比べ有意に中立側であった。一方で、条件 A の不快群は条件 B に比べ有意に暑い側であったため、条件 A 全体と条件 B は統計的な有意差はなかった。快不快感に関して、条件 A 全体は条件 B より有意に快適側であった。条件 A の快適群に関しては、平均値が 1.1 で条件 A と条件 A の不快群、条件 B に比べ有意に快適側の申告となった。予冷運用に適応する居住者行動（条件 A）によって、DR 時間帯のエアコン停止により室内空気温度が 27°C を超えた場合においても、快適性を損なわずに過ごせた可能性が示された。

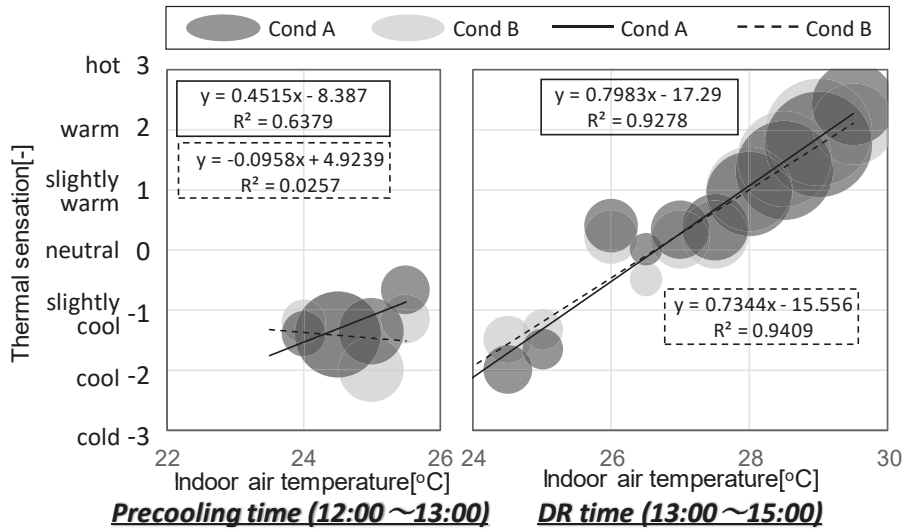


Fig. 4-16 Correlation of thermal sensation and indoor air temperature

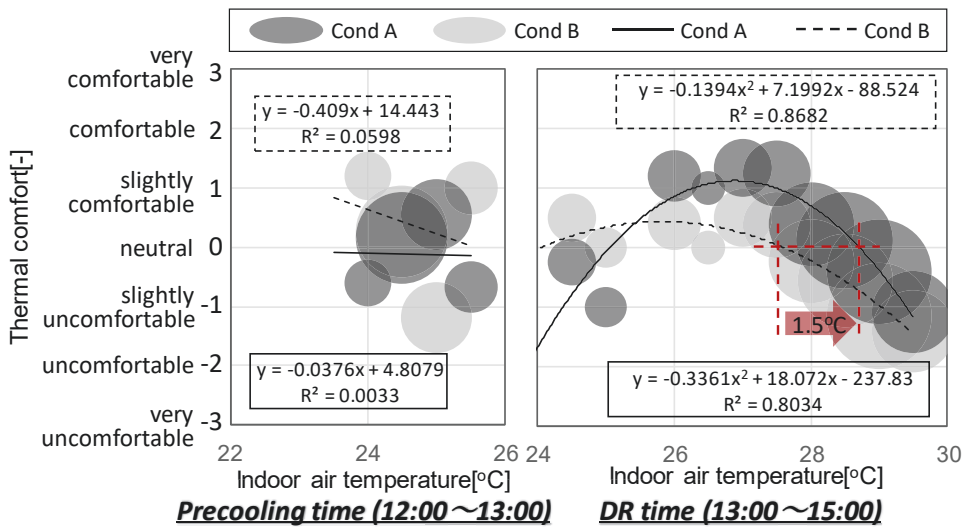


Fig. 4-17 Correlation of thermal satisfaction and indoor air temperature

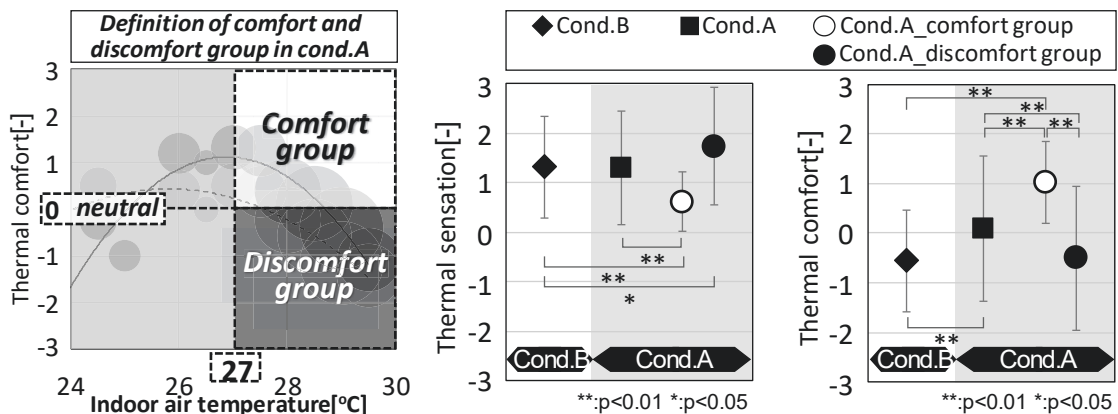


Fig. 4-18 Statistical analysis between indoor air temperature and thermal sensation, thermal satisfaction (Air temp. > 27°C)

### (3) 生理量を用いた評価

#### (3-1) 生理量の経時変化に関する評価

図 4-19 に心拍数、LF/HF (Low Frequency/High Frequency)、SDNN (Standard Deviation of all NN interval) の経時変化と統計分析を示す。心拍数、LF/HF、SDNN の経時変化と踏み台昇降の影響の把握を目的に、10 分間の平均値を被験者ごとに集計し、1 時間ごと、行動別に平均値を示した。LF/HF は交感神経活性度を示し、ストレス状態を示す指標とされている<sup>9)10)11)12)</sup>。SDNN は心拍のゆらぎを示す指標であり、ストレス状態で低く、リラックス状態で高くなる<sup>13)14)15)</sup>。また、健康性の高い人ほど SDNN 数値が高くなる傾向があるとされている。

心拍数はどちらの条件でも踏み台昇降時に有意に上昇することが確認されたが、安静時においては 70～80bpm で経時的にも変化が少なかった。一方で、LF/HF は安静時と踏み台昇降時で有意差は認められず、経時的に数値が大きくなる傾向を示した。LF/HF は被験者、実測状況などに大きく影響を受け一概に評価できない<sup>16)</sup>とされるが、2 以上で「ストレス」注意と評価される場合もあり、室温の上昇に伴って精神的ストレスが生じた可能性がある。心拍数に関しては、DR 時間帯 (13:00～15:00) においては条件 B が条件 A に比べて安静時の心拍数が有意に高いことが示されたが、どちらも適正值は 60～100bpm の範囲内であった。LF/HF に関しては、全ての時間帯において条件 B は安静時の LF/HF が有意に高いことが確認された。条件 B は条件 A に比べ予冷による涼しさに対する不快申告と、DR 時の暑さに対する不快申告が多いことが影響した可能性がある。DR 適応を目指した居住者行動 (条件 A) により、DR 時の予冷運用によるストレスを軽減できる可能性が示された。SDNN に関しては、全ての時間帯において条件 A の方が安静時の SDNN 数値が有意に高いことが示された。予冷時間帯に合わせて家事を行った条件 A は、DR 時間帯のエアコン停止時においてもストレスの少ない健康的な状態で過ごせる可能性が示唆された。



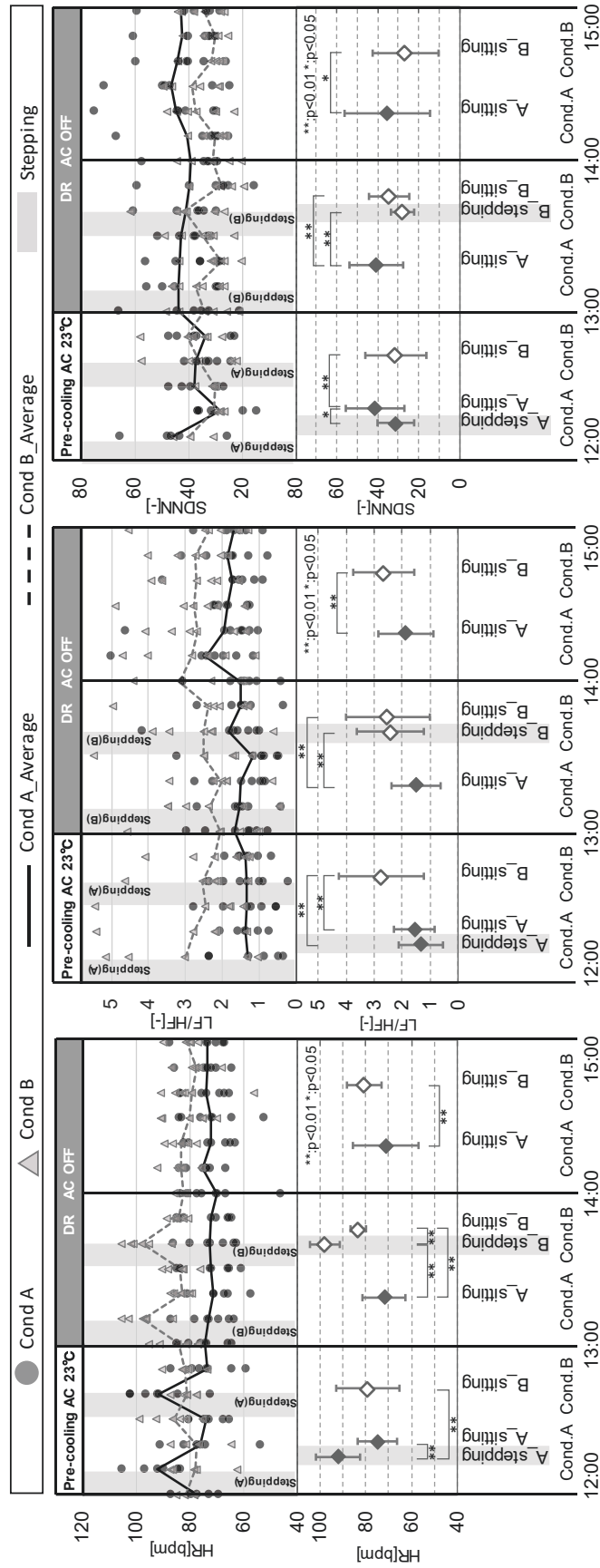
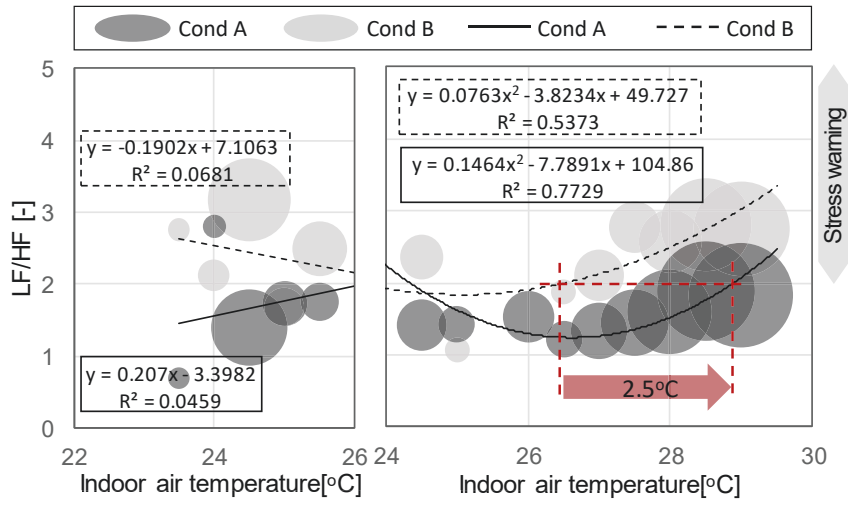


Fig. 4-19 Temporal change and statistical analysis of HR, LF/HF and SDNN by time zone and behavior

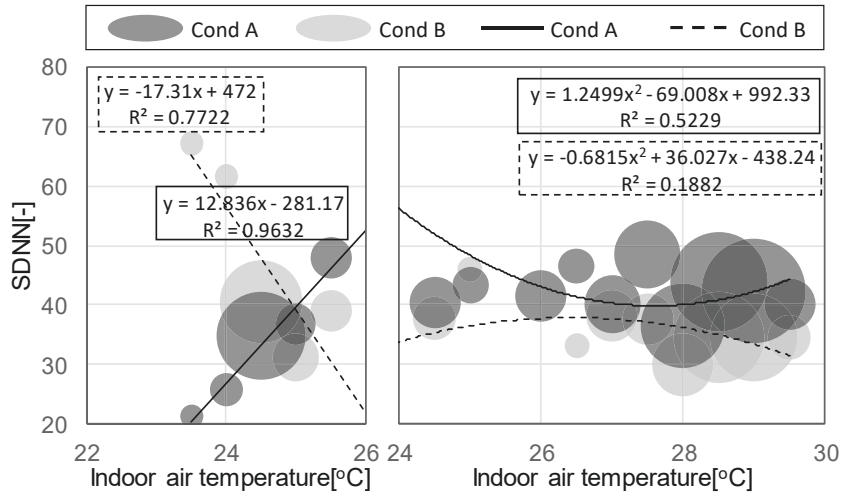
### (3-2) 室内環境と生理量に関する評価

図 4-20 に LF/HF と室内空気温度の関係、図 4-21 に SDNN と室内空気温度の関係を示す。LF/HF に関して、条件 A は室内温度が 26～27°C で、条件 B は 24～25°C で LF/HF の平均値は最も小さく、最もリラックス側になる傾向を示した。条件 A は室内温度が 29°C 程度まで LF/HF が 2 以下にとどまっていたが、条件 B では室内温度にかかわらず「ストレス注意」とされる 2 を上回ることが多かった。SDNN に関しては、DR 時間帯において条件 B に比べ条件 A の方がやや高い傾向を示した。特に、条件 A は室内温度が 27°C 以上の暑い環境であっても SDNN 数値が高くなった。

図 4-22 に LF/HF、SDNN と室内空気温度の統計分析（室内温度>27°C）を示す。条件 A は条件 B と比べて有意に LF/HF 値が低く、SDNN 値が高くなり、快適群・不快群どちらも条件 B より有意にリラックス側であった。なお、条件 A において快適群と不快群との間に有意差はみられなかった。DR への適応を目指した居住者行動によって、エアコン停止後の室温上昇によるストレスが軽減される可能性が示された。居住者行動の変容が快不快感だけでなく、健康性にも影響を与えることが示唆された。



**Precooling time (12:00~13:00)** **DR time (13:00~15:00)**  
 Fig. 4-20 Correlation of LF/HF and indoor air temperature



**Precooling time (12:00~13:00)** **DR time (13:00~15:00)**  
 Fig. 4-21 Correlation of SDNN and indoor air temperature

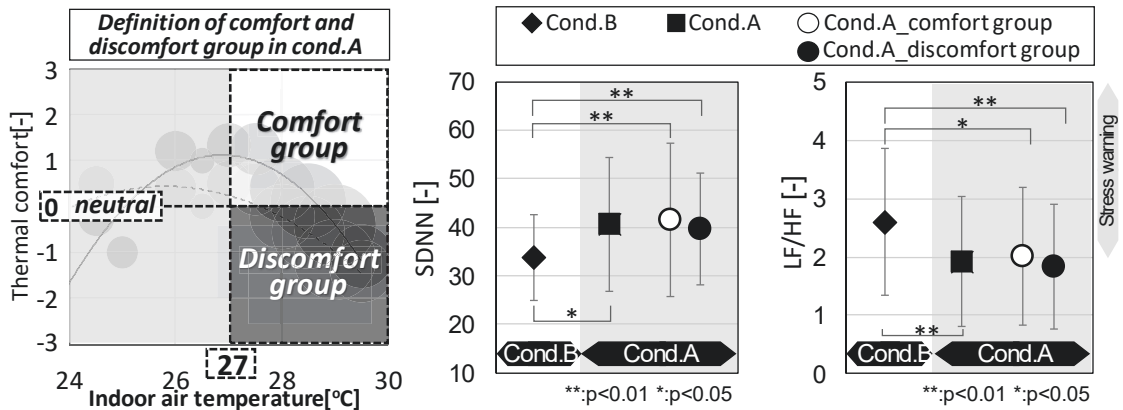


Fig. 4-22 Statistical analysis between indoor air temperature and LF/HF, SDNN (Air temp.>27°C)

#### 4.6 まとめ

本章では、住宅における調整力として予冷運用に着目した。夏季日中の DR を想定した予冷運用の電力需要のシフト効果と、予冷運用に合わせた居住者行動が予冷時や空調停止時における快適性や健康性に及ぼす影響の把握を目的に実験住宅で実験を行った。以下に本報で得た知見を示す。

##### (1) 温熱環境の評価

温熱環境に関しては、実験結果とシミュレーション結果を用いて解析を行った。その結果、DR 終了時に PMV が 0.5 程度、WBGT も熱中症に警戒が必要な 25°C (WBGT) より低く、今回の条件では DR 時にエアコンを停止しても予冷運用によって快適性・健康性が維持できる可能性が示された。また、日中最高外気温が 35°C を超える場合は PMV が 1.0 を超えやや暑い環境であったが、予冷を行うことで WBGT が 25°C を上回することはなかった。

##### (2) エネルギー評価

エアコンの電力消費量に関しては、25°C 一定で稼働した予冷なし条件①に比べ、予冷条件③ (DR\_OFF) は DR 時間帯にエアコンを停止したため約 0.4 kWh 削減したが、予冷時と DR 後の再稼働時に約 1.2 kWh 増加した。DR 時間帯に設定温度を 27°C に上げた予冷条件② (DR\_27°C) では、予冷条件③に比べ DR 時間帯の電力需要は微増したが、再稼働後の電力消費量を抑制できる可能性が示された。今後、予冷時と再稼働時の設定温度を段階的に変更するなど、予冷運用に即した最適制御を導入することができれば、予冷運用による電力消費量の増加を抑制できる可能性がある。

##### (3) 主観申告評価

予冷運用時の居住者行動に関する主観申告を用いた評価より、全身温冷感の申告は両条件間で有意差はなかったが、DR 時の温熱環境に対する快不快感申告は DR 適応を目指した居住者行動を行った条件 A の方が有意に快適側になることが示された。家事を予冷時間帯に合わせて行うことで DR 時に快適に過ごせるエアコン停止時間が条件 B より 35 分延長した。

##### (4) 生理量評価

予冷運用時の居住者行動に関する生理量を用いた評価より、LF/HF と SDNN に関しては、条件 A は条件 B と比較してストレスが小さくリラックス側であることがわかった。室内温度が比較的高い 27°C であっても、条件 A は有意に数値が低く、条件 B はストレスに注意が必要とされる 2 を超えた。予冷に合わせた居住者行動で室温上昇によるストレスが抑制される可能性が示された。

本研究で用いた対象住宅は一般住宅と比較して高断熱な住宅であり、熱容量が大きく蓄熱性能が高いことや特定の設備機器を用いた実験であったことより、今後は一般住宅にて実験を行う必要がある。また、予冷運用の導入の際にはエアコン設定温度を上げる手法などを用いることで、DR時の需要量はやや増大するものの、熱中症リスクを回避するなど安全性への配慮も必要である。また、住宅性能と運用効果の評価や、制御手法の検討、面的な導入による効果などの考察、評価は今後の課題である。

## 注

注1) 被験者実験の時間的な制約及び急激に天候が悪化する場合なども想定した<sup>17)</sup>。

注室内の上下温度が温熱的快適性を妨げることもあり、ISO-7730 では、床上 0.1m と 1.1m の一での温度差が 3°C 以内となることを推奨する。

## 参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：第 5 次エネルギー基本計画, 2018
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁：平成 30 年度戸建て住宅における ZEH 支援事業の主なポイント, 2018
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁：再生可能エネルギーの自立に向けた取り組みの加速化（多様な自立モデルについて）, 2018
- 4) 森田ら：デマンドレスポンス制度導入による居住者行動とエネルギー消費量変化の推計, 土木学会論文集 G, 第 71 巻, 第 5 号, pp.357-368, 2015
- 5) Cook et al : Behavioral Demand Response Study - Load Impact Evaluation Report, 2016
- 6) Strengers et al.: Air-conditioning Australian households; The impact of dynamic peak pricing, Energy Policy, Vol. 38, pp. 7312-7322, 2010
- 7) The Society Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan (2000), Life Style Schedule Program, SCHEDULE ver. 2.0.
- 8) 中居ら：環境温度と運動時熱中症事故発生との関係, 体力科学, 第 41 巻, 第 5 号, pp. 540-547, 1992
- 9) 堀ら：客観的なストレス評価方法について, 日本職業・災害医学会会誌 JJOMT, 第 66 巻, 第 5 号, pp330-334, 2018
- 10) 内村ら：LF/HF を用いた時空間ストレス指標の提案, 情報処理学会研究報告, 第 2012-MPS91/BIO32 巻, 第 2 号, pp. 1-6, 2012. 12
- 11) 品川ら：長時間心電図の心拍変動解析による筋萎縮性側索硬化症の心・血管系自律神経機能評価, 日職災医誌, 第 58 巻, pp. 109-115, 2010
- 12) 高橋ら：気分と心拍変動に対する身体活動タイプの影響, 体育学研究, 第 63 巻, pp. 739-752, 2018
- 13) 前田陽一郎：心拍情報に基づくリラクゼーションサウンド生成手法, 31stFuzzy System Symposium, 2015
- 14) 松下昌之助：心拍変動解析を用いた視覚障害と理学療法臨床実習のストレス評価, 筑波技術大学紀要, 筑波技術大学テクノレポート, 第 21(2)巻, pp. 56-60, 2014
- 15) 角田ら：心拍変動を用いた認知能力変化の予測, IPSJ SIG-DPS, マルチメディア、晚餐、協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2016) , pp. 925-933, 2016. 7
- 16) 高田ら：心拍変動周波数解析の LF 成分・HF 成分と心拍変動係数の意義-加速度脈拍測定システムによる自律神経機能評価-, HEP, 第 32 巻, 第 6 号, pp. 504-512, 2005
- 17) Prefectures Grading Research, Annual precipitation ranking

図・表リスト

Table 4-1	Schedule and AC setting temperature .....	81
Table 4-2	Measurement items and position .....	81
Fig. 4-1	Measurement points and position.....	81
Fig. 4-2	Temporal change in indoor environment.....	83
Fig. 4-3	Temporal change in indoor environment.....	83
Fig. 4-4	Temporal change in PMV and WBGT .....	83
Fig. 4-5	Temporal change in electricity consumption of A.C .....	84
Fig. 4-6	Compare of A.C electric load by time zone .....	84
Fig. 4-7	Simulation results of indoor environment.....	86
Fig. 4-8	Simulation results of A.C Power load comparison by time zone .....	86
Fig. 4-9	Simulation results when maximum outdoor temperature 35°C.....	86
Table 4-3	Schedule and A.C setting temperature for subject experiment .....	87
Fig. 4-10	Condition of occupant behavior .....	89
Table 4-4	Subjects outline.....	89
Fig. 4-11	Layout of test house .....	89
Table 4-5	Measurement items (physiological amount).....	90
Table 4-6	Data collection status and analysis target .....	90
Fig. 4-12	Distribution change of room temperature and WBGT .....	91
Fig. 4-13	Thermal sensation vote by time zone and behavior .....	93
Fig. 4-14	Thermal comfort vote by time zone and behavior.....	93
Fig. 4-16	Correlation of thermal sensation and indoor air temperature .....	95
Fig. 4-17	Correlation of thermal satisfaction and indoor air temperature.....	95
Fig. 4-19	Temporal change and statistical analysis of HR, LF/HF and SDNN by time zone and behavior .....	97
Fig. 4-20	Correlation of LF/HF and indoor air temperature .....	99
Fig. 4-21	Correlation of SDNN and indoor air temperature .....	99
Fig. 4-22	Statistical analysis between indoor air temperature and LF/HF, SDNN .....	99





## **第5章**

太陽光発電と燃料電池の併用発電の有効性に関する  
ライフスタイル別評価



## 第5章 太陽光発電と燃料電池の併用発電の有効性に関するライフスタイル別評価

### 5.1 はじめに

東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入や住宅の省エネルギー化が求められているが、現在に至るまで電力需給は依然重要な問題である。住宅の省エネルギー法基準に伴い、ZEHの普及が促進され、住宅への小型分散型エネルギーシステムとして家庭用発電設備の導入に対する期待が大きい<sup>1)</sup>。一方、ZEHなどの普及に伴い、余剰電力や逆潮流による急激な電圧上昇が懸念され、アメリカにおけるダックカーブの問題のように都市全体のエネルギー消費構造にも影響を及ぼすと予想される<sup>2)3)</sup>。

近年、太陽光発電と創エネ機器を組み合わせた「併用発電」が注目されている。併用発電に該当する創エネ機器はコージェネレーションシステム (Co-generation system: 以下 CGS)、蓄電池、電気自動車などがある。併用発電によるメリットは以下のように3点が挙げられる。

- ・併用発電することにより、売電量が増加する「押し上げ効果」が生じる。
- ・太陽光発電の単独発電では天候による制約があるが、併用発電することにより、雨天日や曇天日でも発電することができる。
- ・コージェネレーションは単独運転ができるため、停電時でも太陽光発電と合わせて住宅内に電気を供給することができる。

国土技術政策総合研究所により、系統電力とガス給湯器を利用する従来の住宅と系統電力及び燃料電池、太陽光発電、蓄電池、ガス給湯器を利用するスマートハウスのCO<sub>2</sub>削減効果を検証した結果、従来の住宅よりスマートハウスの方が64%程度のCO<sub>2</sub>削減効果が期待できることが示された<sup>4)</sup>。大阪ガスは「併用発電」システムを導入した省エネルギー住宅を一般公開し、「併用発電」により一次エネルギー消費量が約55%、CO<sub>2</sub>排出量が約70%の削減効果を示した<sup>5)</sup>。また、太陽光発電に燃料電池を組み合わせた「併用発電」を商品の目玉にした戸建て住宅の販売も行われている<sup>6)</sup>。

以上のように、「併用発電」システム導入のため、実践的な検討が行われている。一方、ライフスタイルや世帯構成、生活パターン、設備機器容量などを考慮し、設備導入コストによる経済性評価に関する研究は少ない。

## 5.2 研究目的

本章では、ライフスタイルによる太陽光発電と燃料電池の併用発電の有効性検証を目的として、燃料電池、太陽光発電、蓄電池などの家庭用分散型エネルギーシステムのシミュレーションモデルを作成した。ライフスタイルの違いがエネルギー消費量へ及ぼす影響の把握や ZEH 達成の核となる設備機器容量や発電方法に着目し、複数の生活パターンにおける設備導入効果及び経済性評価を行った。経済性評価においては、図 5-1 に示した併用発電の場合の ZEH 評価に従って経済性評価を行った。

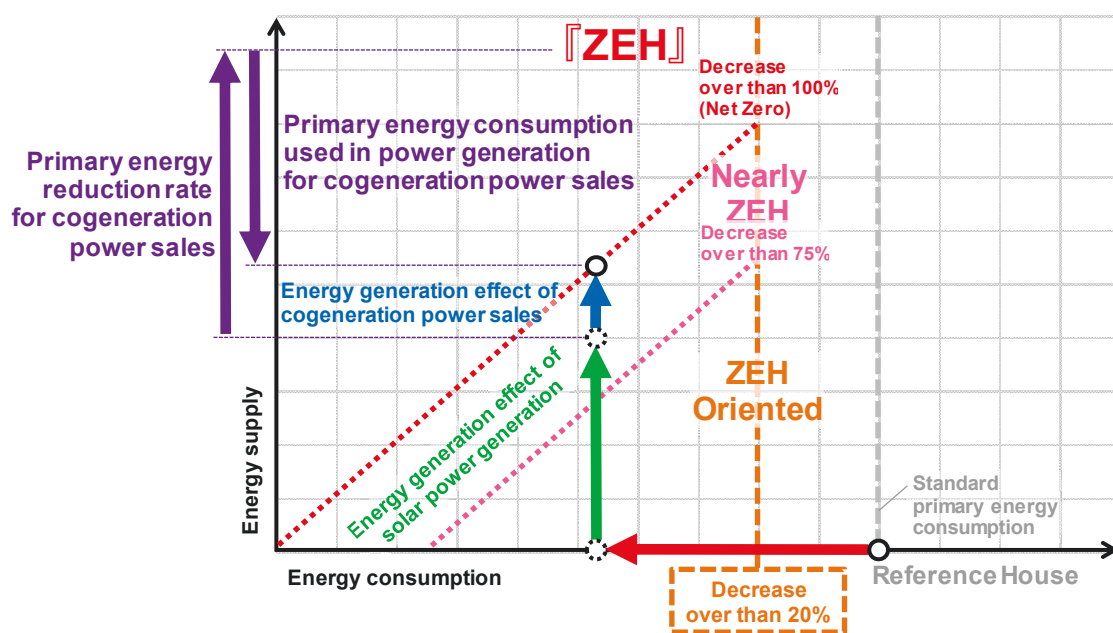


Fig. 5-1 ZEH evaluation for combined power generation<sup>7)</sup>

### 5.3 シミュレーション概要

生活パターンによる太陽光発電と燃料電池の併用発電の有効性を検証するにあたって、シミュレーションモデルを作成し、ZEH 内のエネルギーの生産・消費を模擬することで検討を行った。シミュレーションモデルの作成は、数値解析ソフト MATLAB を用いてプログラムの記述を行った。技術系分野で多用される MATLAB でモデル化することで、住宅1軒での制御に留まらず、複数住戸の制御が可能となる等、将来的にスマートシティを見据えたモデルの汎用性が期待できる。

図 5-2 にシミュレーション全体フローを示す。本シミュレーションは、室温変動計算モデル、SOFC 発電モデル、SOFC 給湯モデル、エアコン (AC) モデル、HP 給湯器 (エコキュート、EC) モデル、太陽光発電 (PV) モデル、蓄電池 (BT) モデルから構成される。地域条件 (気象条件)・建物条件・居住者条件を入力条件とし、住宅の電力消費量と発電量の算出と余剰電力の有無の判定をした。余剰電力がある場合は、運用条件ごとに余剰電力の自家消費を模擬し、室内空気温度・PMV・SOFC 発電量・PV 発電量・買電量・売電量・BT 充放電量・ガス消費量を計算した。

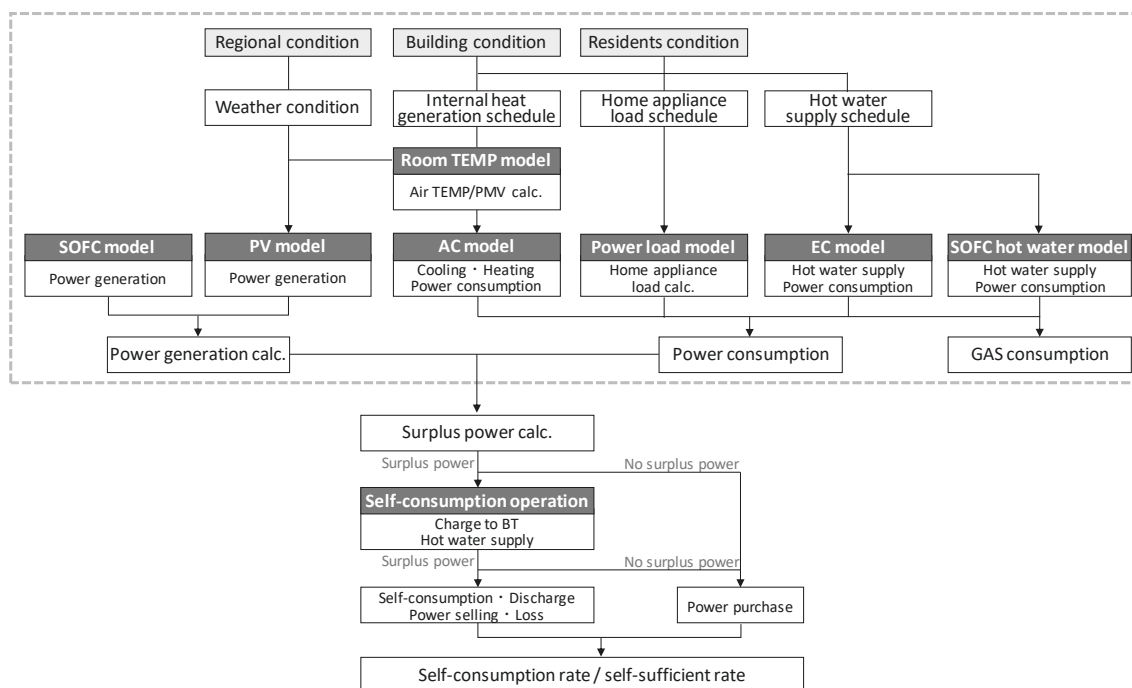


Fig. 5-2 Overall simulation flow

### 5.3.1 室温変動計算モデル

本モデルは熱容量質点系のモデルであり、対象建物について、経緯度、解析期間、解析期間中の外気温・太陽高度・太陽方位角・全天日射量および内部発熱量を入力することで、室温が算出される。

既往研究<sup>8)9)</sup>をもとに一室の熱容量質点系の室温計算モデルを作成した。6つの気象条件（外気温[°C]、直達日射量[W/m<sup>2</sup>]、天空日射量[W/m<sup>2</sup>]、太陽高度[rad]、太陽方位角[rad]）、居住者条件（内部発熱[W]）、住宅条件（住宅の幅・奥行き・高さ[m]、各面の構成部材、構成部材の物性値（熱伝導率・日射吸収率・熱容量）など）を入力条件として、各面の熱平衡式を前進差分法により差分することで、5分間隔の室温および各面の構成部材の温度を算出する。

算出した5分間隔の室温を用いて、平均放射温度を計算し、PMVの温熱6要素（相対湿度[%RH]、気流速度[m/s]、衣服の熱抵抗[clo]、代謝熱生産量[met]）の値を定めることで、PMVを計算している。表5-1に本研究におけるPMVの温熱6要素の各種設定値を示す。

Table 5-1 Setting value of thermal 6 elements of PMV

Relative humidity	60% RH	
Air velocity	0.1 m/s	
Amount of clothing	Summer	0.275 clo
	Spring and Autumn	0.5 clo
	Winter	0.725 clo
Metabolism	1.2 met	

### 5.3.2 エアコン（AC）モデル<sup>8)9)</sup>

本エアコンモデルは、電力中央研究所の報告書を参考に作成した。ある条件下でのCOPおよび電力消費量を算出するために、室内温度・室内相対湿度・外気温・外気相対湿度を入力条件とし、逆カルノーサイクルによって算出した理論効率と実効率の比率を推定し熱源特性や冷媒の物性のわからないエアコンにおいてもCOPおよび電力消費量を算出する。実効率と理論効率の比率を推定するにあたって、仕様書記載の成績係数と消費電力から処理熱量の2次式で推定している。

### 5.3.3 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) モデル<sup>10)</sup>

表 5-2 に SOFC 対象機器仕様、図 5-3 に SOFC モデル概要、図 5-4 に SOFC 発電効率と発電量の関係を示す。モデル化対象機器仕様は、給湯効率を 39.2%、給湯用貯湯タンク容量を 90L、補助ボイラー効率を 95%とする。発電効率については、対象建物における 2014 年度の SOFC 夏季実測結果 (9/25) より近似的に求めた。電力消費量・給湯流量を入力値とし、発電量・燃料電池のガス流量・補助ボイラーのガス流量を算出する。

Table 5-2 Specification of SOFC

Rated power	0.7kW
Rated heat	0.65kW
Generation efficiency	42%
Hot water efficiency	39.2%
Hot water storage tank	90L
Backup boiler efficiency	95%

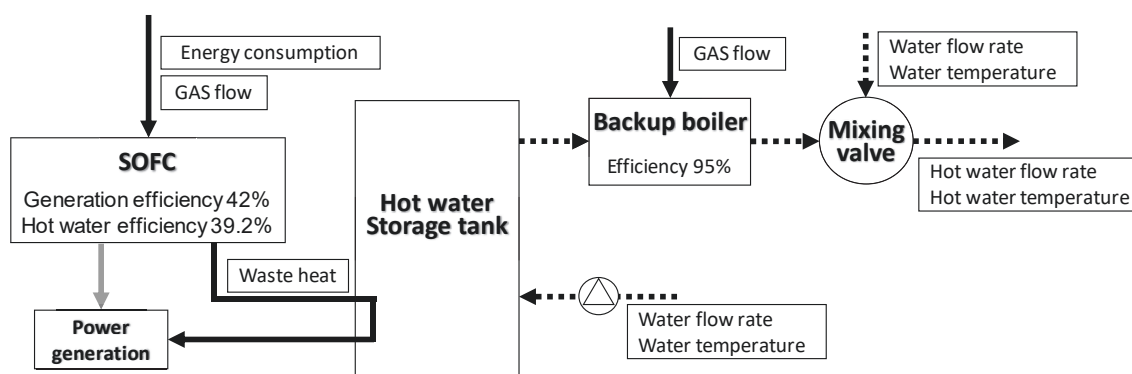


Fig. 5-3 Structure of SOFC model

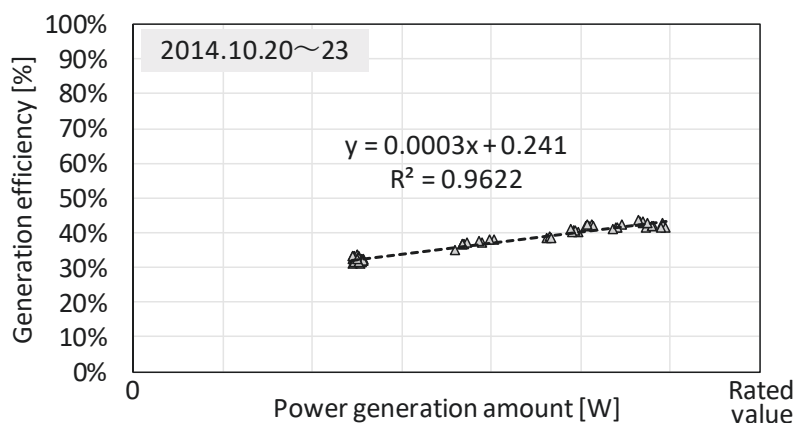


Fig. 5-4 Relationship between generation efficiency and generation amount of SOFC

### 5.3.4 太陽光発電 (PV) モデル<sup>11)</sup>

表 5-3 に太陽光発電対象機器仕様、図 5-5 に太陽光発電モデル概要を示す。モデル化対象機器仕様は、単結晶セルの太陽電池とし、発電効率を 16.06 %、パネル総面積を 20.426 m<sup>2</sup>、設置角度を水平面に対し 10°、設置方位は南面とする。外部条件である直達日射量・天空日射量・太陽高度・太陽方位角を入力値とし、発電量を算出する。

複数の地域で余剰電力の検証を行うにあたり、パネル表面温度による発電効率の変化を模擬することで、発電瞬時値の再現性を向上した。パネル表面温度は外気温と日射量から算出した。パワーコンディショナーとパネル表面の汚れによる損失を 12.5 %とし、パネル温度による損失分を加算することで、発電時の損失分を模擬した。PV の発電効率は JIS にて定められた 25°C 条件下の値を用いた。25°C の場合は温度による損失がなく、25°C より高温の場合は発電効率が悪化するとした。

Table 5-3 Specification of PV panel

Generation efficiency	16.61%
Direction・Angle	South, 10°
Temperature loss coefficient	0.43% (standard of 25°C)
Other loss	12.50%

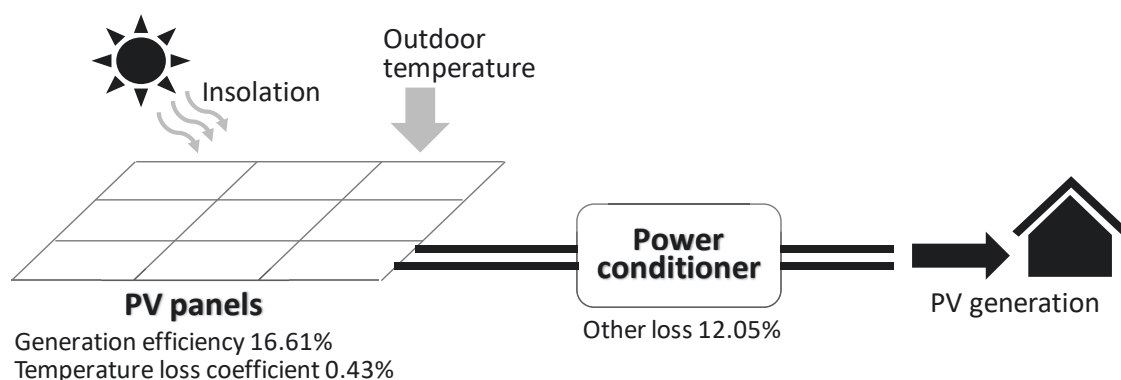


Fig. 5-5 Structure of PV model

### 5.3.5 蓄電池 (BT) モデル

表 5-4 に蓄電池対象機器仕様。モデル化対象機器仕様は、電力変換効率を充放電時に 88 %とする。また、モデル上では放電深度を 80 %とし、蓄電池容量の 20 %を蓄電不能領域として扱う。充電量・放電量を入力値とし、蓄電量を算出する。

Table 5-4 Specification of BT

Charge・Discharge efficiency	88%
Rated output	2.5kW



5.3.6 エコキュート (EC) モデル<sup>12)13)14)15)</sup>

表 5-5 にエコキュート機器仕様、図 5-6 にエコキュートモデル概要、式 5-1 に HPCOP の予測式を示す。既往研究の HPCOP 予測式と貯湯タンクの熱抵抗値を参考にし、温度成層モデルを用いて EC を再現した。季節によってヒートポンプから貯湯タンクへの HP 出湯温度を設定し、夏季は 65°C、中間期・冬季は 90°C とした。市水温度は実気象データの月平均外気温とした。EC モデルにおける HPCOP 予測式は、同既往研究にて実測結果の導出式を用い、電力消費は HP の標準加熱能力を COP で除することで求めた。

$$HPCOP = -0.03X_1 - 0.01X_2 + 0.06X_3 + 0X_4 + 4.01 \quad (5-1)$$

$X_1$  : HP 入水温度[°C]                       $X_3$  : 外気温[°C]  
 $X_2$  : HP 出湯温度[°C]                       $X_4$  : 相対湿度[%]

Table 5-5 Specification of EcoCute

Heating capacity	4.5kW	
Thermal transmittance	1.018W/(m <sup>2</sup> ·K)	
Rated COP	Summer 5.3 / Spring and autumn 4.6 / Winter 3.0	
Tank temperature	Summer	65°C
	Spring and Autumn	90°C
	Winer	90°C

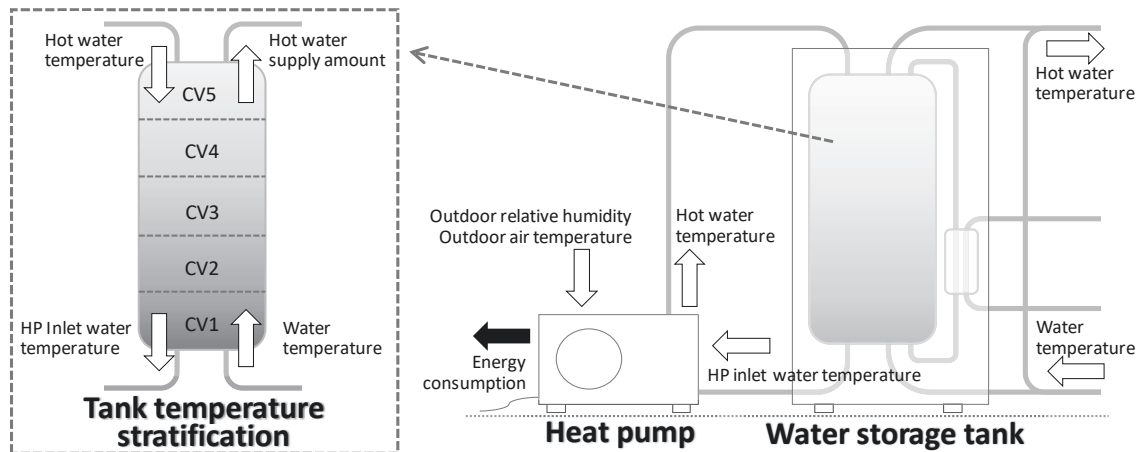


Fig. 5-6 Structure of PV model

### 5.3.7 シミュレーションモデル妥当性検証

モデルの妥当性検証のため、燃料電池（SOFC）モデル、太陽光発電（PV）モデルとエアコンモデルに関して対象建物での実測値とシミュレーション値を比較した。

#### 1) 燃料電池(SOFC)モデル

図 5-7 に実測値とシミュレーション値の SOFC 発電量比較結果を、図 5-8 に実測値とシミュレーション値の SOFC ガス消費量比較結果を示す。対象建物における 2014 年度の SOFC 夏季実測結果（9/25）と比較した。経時変化では、発電量に関しては、エアコン稼働の影響で宅内消費電力がハンチングする際に、実測発電量よりモデル発電量の方が多くなった。1 日積算値では、シミュレーション値は発電量、ガス消費量それぞれ実測値の 105%、98%となり、妥当性が確かめられた。

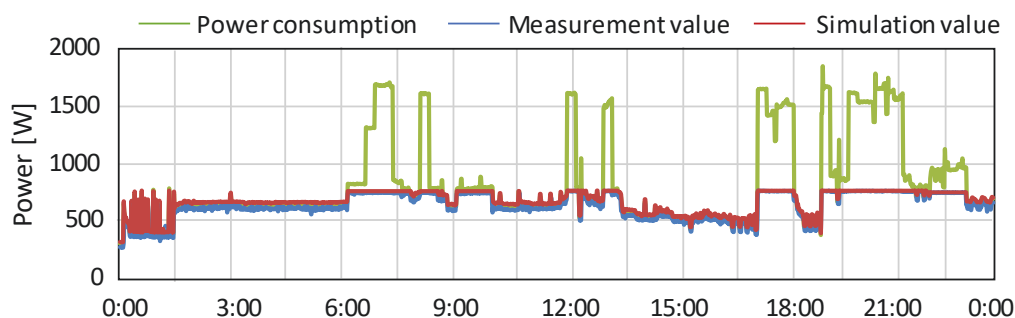


Fig. 5-7 Comparison of measurement value and simulation value of SOFC generation

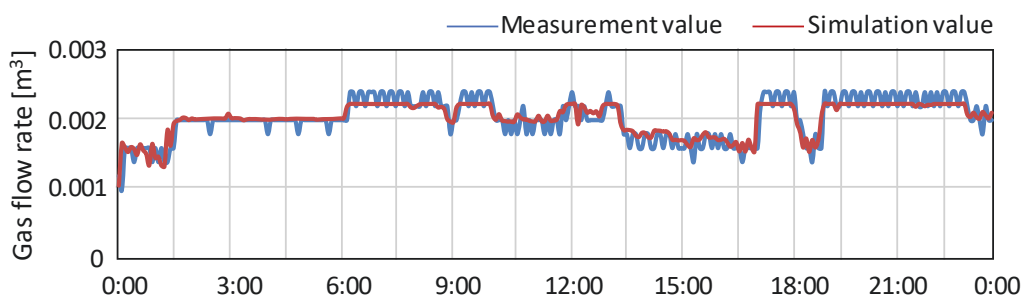


Fig. 5-8 Comparison of measurement value and simulation value of SOFC gas flow rate

## 2) 太陽光発電 (PV) モデル

図 5-9 に実測値とシミュレーション値の PV 発電量比較結果を示す。改良モデルはパネル温度による発電効率の変化を再現したモデルである。対象建物における 2014 年度の PV 秋季実測結果 (10/29) と比較した。経時変化では、午前にも実測発電量が、午後にもモデル発電量がそれぞれ若干量多くなる結果となり、パネル温度による発電効率の変化が見られる。1 日積算値では、どちらのシミュレーション値も実測値の 99% となった。ピーク発電量に関しては、改良モデルにおいて一致率がおおよそ 100% と、パネル温度を考慮していないモデルよりも再現性が向上し、妥当性を確認した。

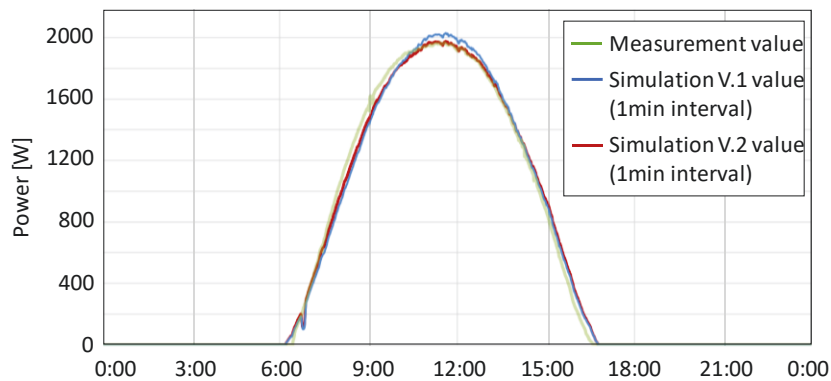


Fig. 5-9 Simulation verification of PV generation

## 3) エアコン (AC) モデル

図 5-10 にエアコンモデルの室温変動検証を示す。複数のエアコン稼働条件に対して、実測値と、シミュレーション値の比較を行った。空調を終日稼働させていた上図において、日中 15 時ごろにエアコンが稼働していながら室温が上昇している点など、一日の中での室温変動を再現できていることが見受けられた。

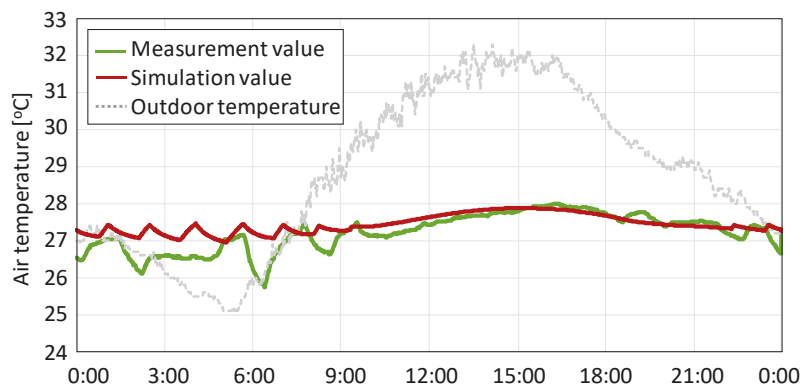


Fig. 5-10 Simulation verification of indoor temperature

## 5.4 シミュレーション条件

### 5.4.1 シミュレーション住宅構成

表 5-6 にシミュレーション住宅構成を示す。延床面積は世帯構成に応じて定め、地域と延床面積以外は「第 2 章 対象住宅」と同様に設定した。地域 1 条件・PV 容量 4 条件・給湯 2 条件・BT 容量 1 条件・世帯構成 6 条件を組み合わせた計 48 条件について計算し、解析を行った。BT については、PV 発電の余剰電力がある場合のみ充電し、買電による充電はしないものとした。

気象条件は、地上気象観測 1 分値資料を用いた。地上気象観測 1 分値資料は、全国各地の気象官署（气象台、測候所）および特別地域気象観測所で得られた 1 分値データ（風向／風速、気温、湿度、気圧、日照、日射量、降水量、積雪深など）を 2015 年度の 1 年分まとめたものである。欠測部分や、飛び値となっている部分に関しては適時修正を行った。

Table 5-6 Outline of simulation condition

Building structure	Location	Chiyoda-ku, Tokyo		
	Total floor area	2-person household 55 m <sup>2</sup> 4-person household 110 m <sup>2</sup>		
	Number of floors	1		
	Q value	1.9 W/(m <sup>2</sup> · K)		
Equipment condition	SOFC	Rated operation 0.7kW		
	PV capacity	3.0kW, 4.6kW, 6.0kW, 7.5kW (setting direction: south 5°)		
	BT capacity	7.2kWh		
	Water heater	SOFC, EcoCute (daytime mode 11:00~18:00)		
	Water heater tank capacity	SOFC	90L	
EcoCute		2-person household 185 L 4-person household 370 L		
Lifestyle		Multi	Normal	Saving
	2-person household (one income)	○	○	○
	2-person household (two income)		○	
	4-person household (one income)		○	
	4-person household (two income)		○	

### 5.4.2 生活パターン

表 5-7 にライフスタイル別電力需要条件、表 5-8 にライフスタイル別給湯需要条件を示す。生活パターンは、世帯構成 2 パターン、世帯人員属性が 2 パターンの計 4 パターンとした。既往研究<sup>16)17)18)</sup>および「SCHEDULE」を参考に、内部発熱スケジュール、家電機器の電力消費スケジュール、給湯負荷スケジュールを夏季・中間期・冬季について設定した。空調の設定温度は 25°C、稼働時間は睡眠時間以外の在宅時間のみと設定した。家電機器の電力消費の設定および給湯需要に関しては、既往研究<sup>19)20)21)22)</sup>を参考にした。エコキュートの貯湯タンクは世帯ごとの給湯需要を考慮し 2 人世帯は 185 L、4 人世帯は 370 L とした。中間期と冬季は、朝・昼においても給湯需要があり、朝方にタンク蓄熱量が一定値を下回った場合は炊きましを行う設定とした。冬季は給湯効率が悪く給湯時間が長いため 10 時 30 分から出湯を開始する条件とした<sup>23)</sup>。

Table 5-7 Condition of energy demands in each lifestyle

		Multi	Normal*	Saving
Air conditioning	Setting temperature	25°C	25°C	25°C
	Operating time	Only in the housing (except sleeping)		
Hot water [L/15min]	Face wash	14.0	14.0	14.0
	Bath	20.0	20.0	20.0
	Shower	-	-	35.0
	Cook	14.5	14.5	14.5

\*: Normal conditions of 2-person household and 4-person household are the same

Table 5-8 condition of hot water demand in each lifestyle

unit: L/day

		Summer		Spring and Autumn		Winter	
		weekday	weekend	weekday	weekend	weekday	weekend
2-person household*	Multi	320	481	364	364	421	320
	Normal	240	351	324	324	351	240
	Saving	180	211	184	184	211	180
4-person household	One income	421		435		427	
	Two income	420		422		425	

\*: Normal conditions of one income and two income are the same

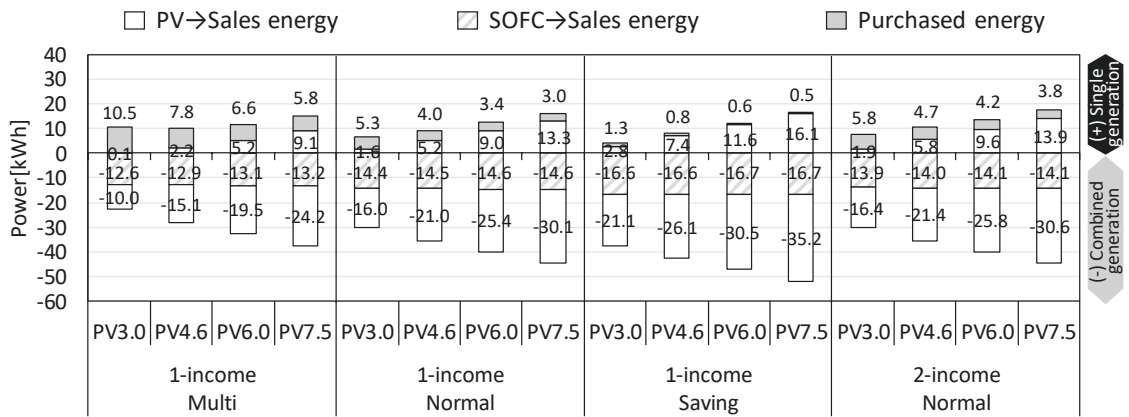
## 5.5 シミュレーション結果

### 5.5.1 2人世帯のライフスタイルによる評価

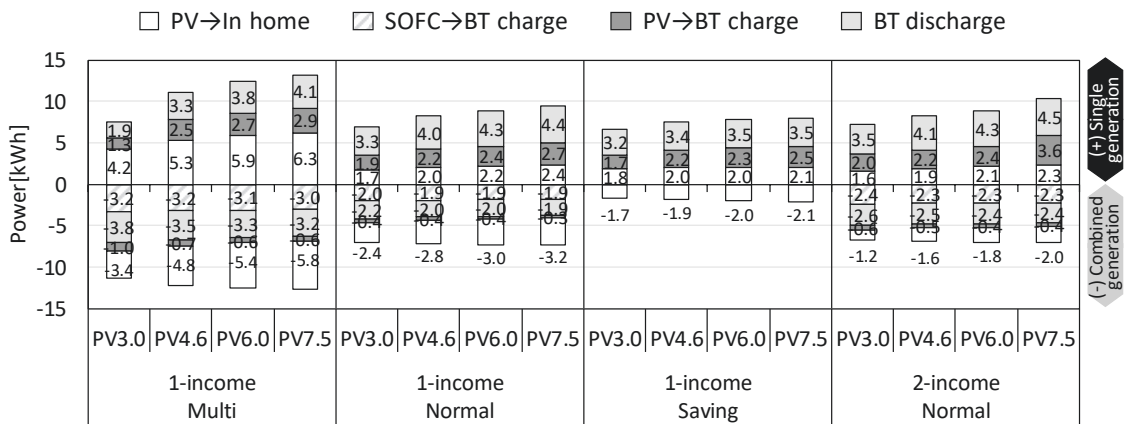
図 5-11 に 2 人世帯の日積算エネルギー消費（年間平均値）を示す。売買電力量に関して、PV のみによる単独発電では PV 容量の増加に伴い、売電量は増加し買電量は減少した。PV と SOFC による併用発電では PV 容量の増加に伴い、PV からの売電量は増加したが、買電量は発生しなかった。また、SOFC からの売電量はライフスタイルにより約 2.0~4.0kWh の差があったが、PV 容量による差異はなかった。単独発電の場合、売電量が買電量より大きくなる条件は、片働きの多消費型は PV7.5 kW、片働きの普通型は PV4.6 kW 以上、片働きの節約型は PV3.0 kW 以上、共働きの普通型は PV4.6 kW 以上であった。

PV から宅内への電力消費量は単独発電と併用発電の両条件共に、PV 容量の増加に伴い増加した。BT の充放電量に関して、単独発電では PV 容量の増加に伴い BT の充放電量が増加した。一方、併用発電ではライフスタイルによる BT 充放電量の差があったが、PV 容量による差異は小さかった。また、片働きの節約型以外の条件では深夜の時間帯にかけて SOFC から BT への充電量が約 2.0~3.5kWh 程度あった。一方、片働きの節約型の条件は BT 充放電量が発生しなかったことから、片働きの節約型は併用発電を利用する場合、BT の導入は不要なことが示された。

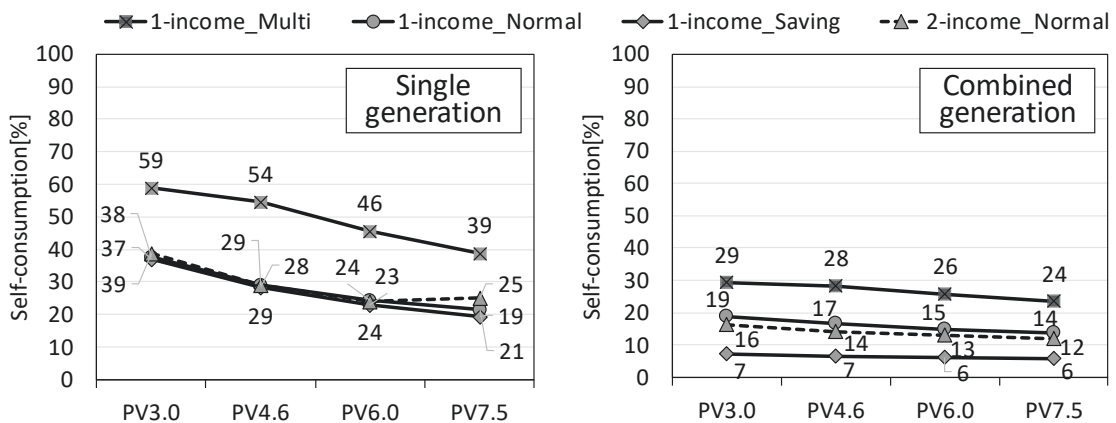
自家消費率<sup>注1)</sup>に関して、単独発電では 19~59%となった。全条件において PV3.0 kW 条件で自家消費率が最も高い結果となり、PV 容量の増加に伴い自家消費率は低下する傾向がみられた。一方、併用発電では自家消費率が 30%以下にとどまり、全体的に低い結果となった。PV 容量の増加に伴い自家消費率は低下したが、大きな差はみられなかった。また、片働きの節約型の自家消費率は 10%未満であり、併用発電が不要である可能性が示された。



(a) Total trading power



(b) BT charge · discharge



(c) Self-consumption

Fig. 5-11 Daily total energy consumption for 2-person household (annual average)

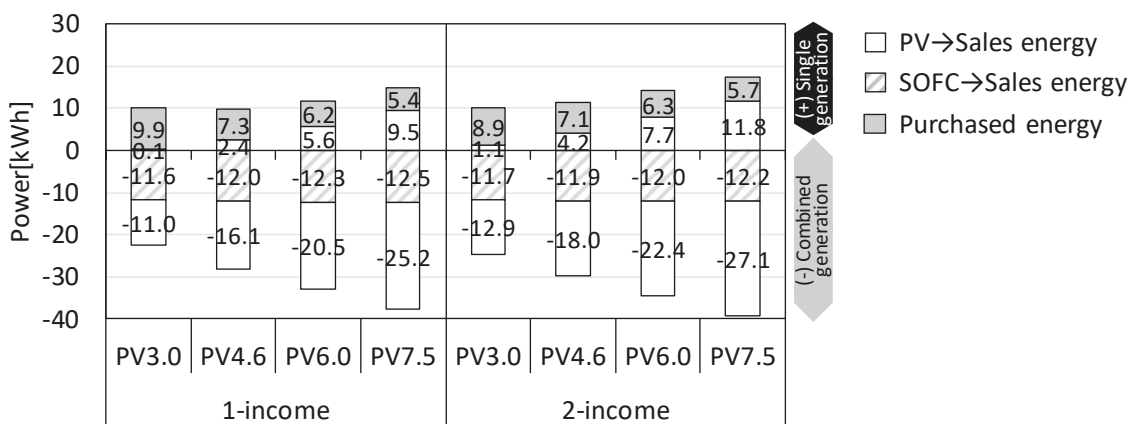
### 5.5.2 4人世帯のライフスタイルによる評価

図 5-12 に 4 人世帯の日積算エネルギー消費（年間平均値）を示す。売買電力量に関して、単独発電では PV 容量の増加に伴い、PV からの売電量は増加し買電量は減少した。併用発電では PV 容量の増加に伴い、PV からの売電量は増加したが、買電量は発生しなかった。また、全条件において SOFC からの売電量は約 12.0kWh 程度で大きな差はなかった。単独発電の場合、売電量が買電量より大きくなる条件は、片働きの普通型は PV7.5 kW、共働きの普通型は PV6.0 kW 以上であった。

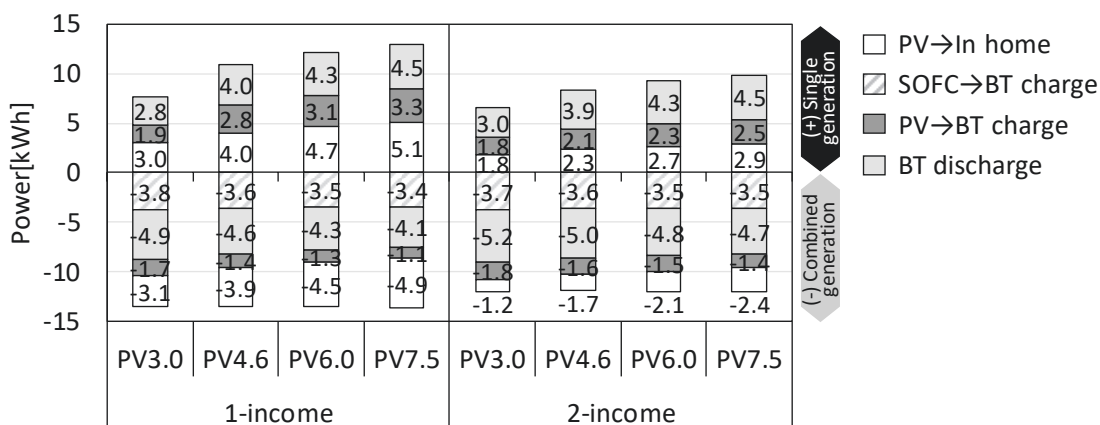
PV から宅内への電力消費量は単独発電と併用発電の両条件共に、PV 容量の増加に伴い増加した。BT の充放電量に関して、単独発電では PV 容量の増加に伴い BT の充放電量が増加した。一方、併用発電では BT の充放電量はやや減少したが、大きな差異はなかった。また、併用発電の場合は深夜の時間帯にかけて SOFC から BT への充電量が約 3.6kWh あった。

自家消費率<sup>注1)</sup>は、単独発電では 23～52%、併用発電では 18～33%となり、全条件において PV 容量の増加に伴い自家消費率は減少した。また、併用発電より単独発電の方が、自家消費率が高い結果となった。

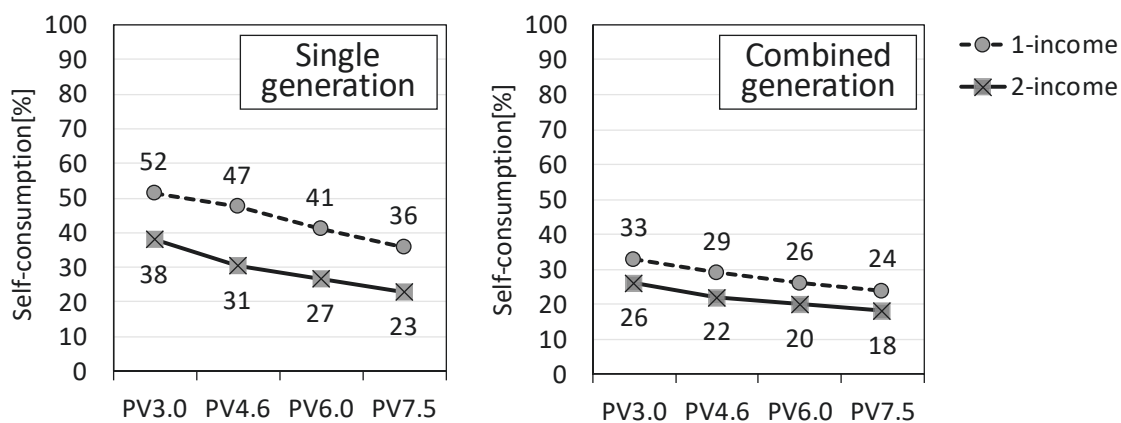




(a) Total trading power



(b) BT charge · discharge



(c) Self-consumption

Fig. 5-12 Daily total energy consumption for 4-person household (annual average)

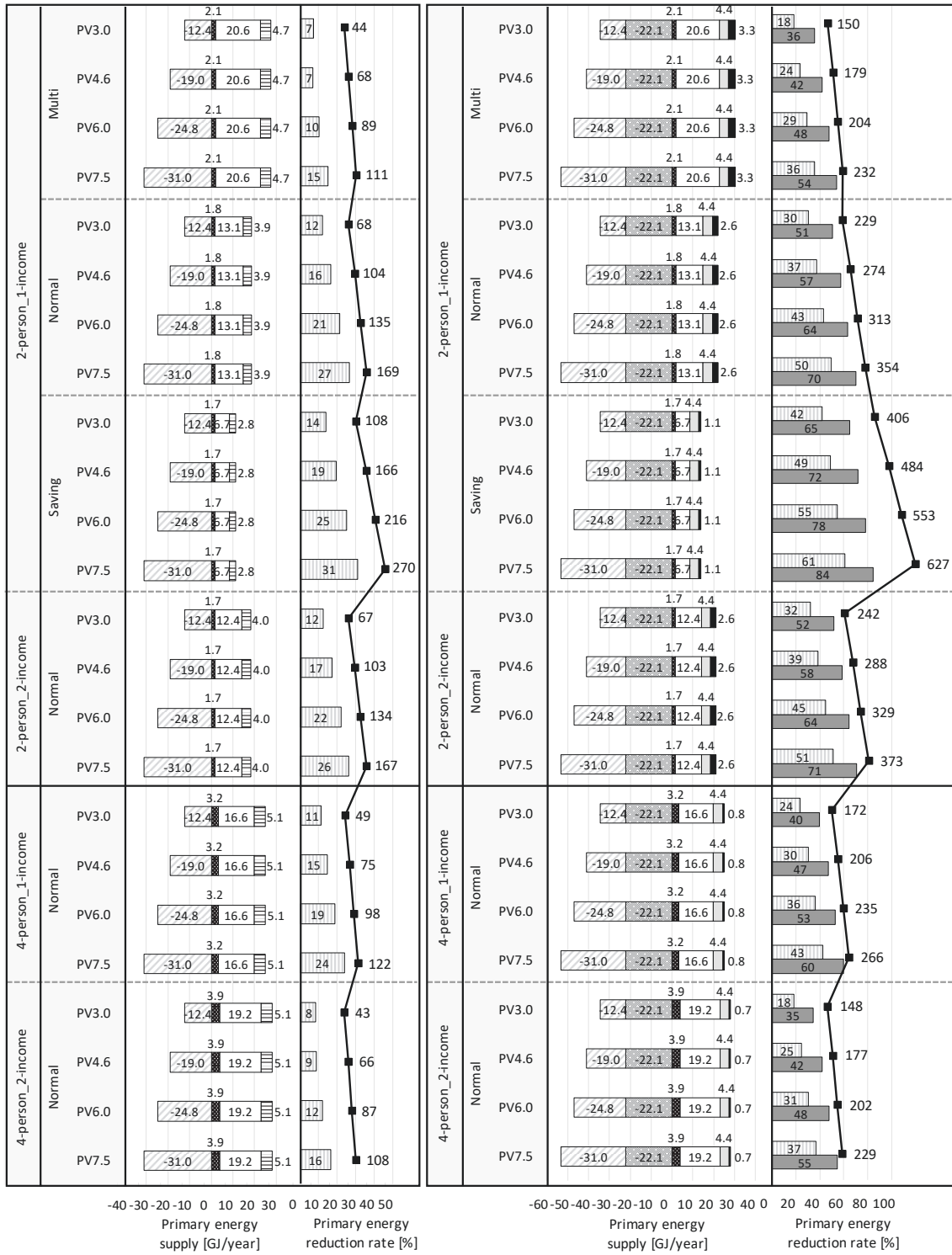
### 5.5.3 一次エネルギー削減率と ZEH 達成率の評価

図 5-13 に一次エネルギー削減率<sup>注2)</sup>と ZEH 達成率<sup>注3)</sup>を示す。2 人世帯の一次エネルギー消費量に関して、単独発電では、片働きの多消費型が 27.5GJ/年、片働きの普通型が 18.7GJ/年、片働きの節約型が 11.2GJ/年、共働きの普通型が 18.2GJ/年であった。併用発電では、片働きの多消費型が 30.4GJ/年、片働きの普通型が 21.9GJ/年、片働きの節約型が 13.9GJ/年、共働きの普通型が 21.2GJ/年であった。併用発電の場合は、ガス消費量と補助ボイラーの利用によるエネルギー消費があるため、各条件の一次エネルギー消費量が単独発電より併用発電の方が約 3.0GJ/年高くなった。ZEH 達成率に関して、単独発電と併用発電の両条件共に PV 容量の増加に伴い ZEH 達成率も増加した。単独発電において、片働きの多消費型は PV7.5 kW、片働きの普通型は PV4.6 kW 以上、片働きの節約型は PV3.0 kW 以上、共働きの普通型は PV4.6 kW 以上の条件で ZEH 達成率が 100%以上となった。併用発電においてはすべての条件で ZEH 達成率が 150～627%で高い結果となった。

4 人世帯の一次エネルギー消費量に関して、単独発電では片働きの普通型が 24.9GJ/年、共働きの普通型が 28.1GJ/年であり、併用発電では片働きの普通型が 25.0GJ/年、共働きの普通型が 28.1GJ/年であった。4 人世帯の場合は、併用発電のガスと補助ボイラーによるエネルギー消費量と EC によるエネルギー消費量が概ね同様の値となり、一次エネルギー消費量の差はみられなかった。ZEH 達成率に関して、単独発電と併用発電の両条件共に PV 容量の増加に伴い ZEH 達成率も増加した。単独発電において、片働きの普通型と共働きの普通型の両方共に PV7.5 kW の条件で ZEH 達成率が 100%以上となった。併用発電においてはすべての条件で ZEH 達成率が 148～266%で高い結果となった。

一次エネルギー削減率については単独発電と併用発電の両条件共に PV 容量の増加に伴い一次エネルギー削減率も増加した。平均一次エネルギー削減量は単独発電で 17%、併用発電 (PV の余剰電力のみ売る条件) で 37%、併用発電 (PV と SOFC の余剰電量を売る条件) で 56%となった。併用発電の場合は PV の余剰電力のみを売る条件に比べ、PV と SOFC の余剰電量を売る条件の方が、一次エネルギー削減率が平均 19%増加することが確認できた。

- Home appliance      ■ Air conditioning      ▨ EcoCute      ■ ZEH achievement ratio
- GAS for SOFC      ■ GAS for backup boiler      ▨ SOFC generation      ▨ PV generation
- ▨ Primary energy reduction rate (sales by PV)      ■ Primary energy reduction rate (sales by PV+SOFC)



(a) Single generation

(b) Combined generation

Fig. 5-13 Primary energy reduction rate and ZEH achievement ratio

以上より、自家消費率や ZEH 達成率、売買電力量などを考慮し、ライフスタイルと発電方法による設備機器容量を表 5-9 に提案した。以下の項目を満たす設備機器容量を示した。

- ZEH 達成率が 100%以上のこと
- 最も自家消費率が高いこと
- 売電量と買電量が同様、または売電量が買電量より多いこと

併用発電は、全てのライフスタイルにおいて PV3.0kW と SOFC、BT7.2kWh を併用することにより、買電なしで過ごせることが確認できた。一方、単独発電では、ライフスタイルによって必要な PV 発電量が異なり、全ての条件において買電が発生するが、売電量が買電量以上となっている。なお、2019 年以降 FIT が順次終了することにより、PV 発電の余剰電力の買取価格の下落が予想され、提案した設備機器容量では買電による支出を売電による収入で賄うことができない場合も考えられる。

Table 5-9 Equipment capacity by lifestyle and power generation method

Lifestyle			Power generation	PV [kW]	SOFC [kW]	BT [kWh]
2-persons household	One income	Multi	Single	7.5	-	7.2
			Combined	3.0	0.7	
		Normal	Single	6.0	-	
			Combined	3.0	0.7	
		Saving	Single	3.0	-	
			Combined	3.0	0.7	
	Two income	Normal	Single	4.6	-	
			Combined	3.0	0.7	
4-persons household	One income	Normal	Single	7.5	-	7.2
			Combined	3.0	0.7	
	Two income	Normal	Single	7.5	-	
			Combined	3.0	0.7	

### 5.6 経済性評価

表 5-10 に設備機器の導入コスト、表 5-11 に電力とガスのコストを示す。ライフスタイルと発電方法による設備機器容量を提案した表 5-9 に基づいて経済性評価を行った。PV 導入コストは 1kW 当たり 36.4 万円<sup>24)</sup>、BT 導入コストは 1kW 当たり 15 万円<sup>25)</sup>と設定し、設備機器導入コストを算出した。EC は 180L のものを 29 万円、370L のものを 25 万円とした<sup>注 4)</sup>。SOFC は 2020 年度の標準価格より 100 万円<sup>26)27)</sup>とし、SOFC の補助ボイラーは 30 万円と設定した<sup>注 5)</sup>。耐用年数については、PV システムは 30 年、BT システムや EC、SOFC、補助ボイラーは 15 年と設定した<sup>27)28)29)</sup>。

電力の買電価格は東京電力の料金プランより家庭用電力小売料金水準の 24.0 円/kW<sup>30)</sup>とし、販売価格は FIT 終了後における買取価格 8.5 円/kW とした。SOFC のガス購入費は東京ガスの「コージェネレーションパッケージ契約」料金プランの 2019 年度平均より 60.8 円/m<sup>331)</sup>とし、SOFC からの発電電力の売電価格は併用発電時の販売費より 24.0 円/kW<sup>32)33)34)</sup>と設定した。

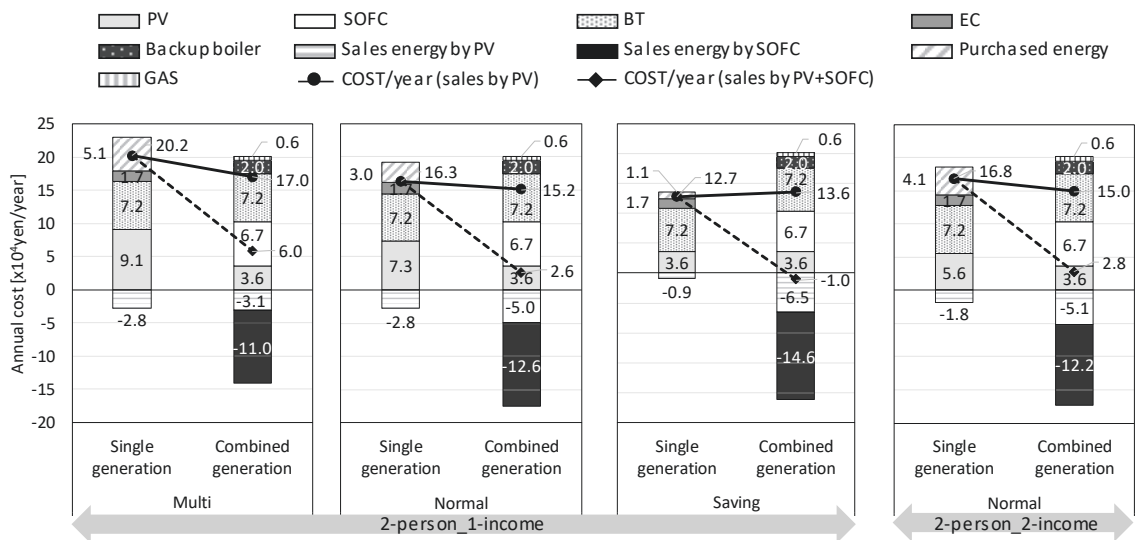
Table 5-10 Equipment introduction cost

	Capacity	Cost per 1kW [×10 <sup>4</sup> yen]	Introduction cost [×10 <sup>4</sup> yen]	Service life [year]	Cost per year [×10 <sup>4</sup> yen]
PV [kW]	3.0	36.4	109	30	3.6
	4.6	36.4	167	30	5.6
	6.0	36.4	218	30	7.3
	7.5	36.4	273	30	9.1
BT [kWh]	7.2	15.0	108	15	7.2
EC [L]	370	-	29	15	1.9
EC [L]	185	-	25	15	1.7
SOFC [kW] (water tank [L])	0.7 (90)	-	100	15	6.7
Backup boiler [L]	370	-	30	15	2.0

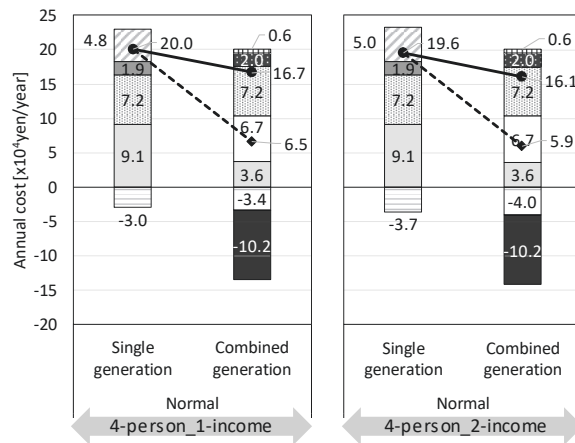
Table 5-11 Electricity and gas prices

Sales energy by PV [yen/kW]	Sales energy by SOFC [yen/kW]	Purchase electricity [yen/kW]	Purchase gas [yen/m <sup>3</sup> ]
8.5	24.0	24.0	60.8

図 5-14 にライフスタイルと設備容量による年間コスト<sup>注6)</sup>を示す。PV 発電の余剰電力のみを売る場合において、年間コストは単独発電に比べ併用発電の方が、2人世帯条件で平均 1.3 万円、4人世帯条件で平均 3.4 万円小さかった。一方、PV+SOFC 発電の余剰電力を売る場合では、単独発電より併用発電の方が平均 13.8 万円、年間コストが小さかった。また、併用発電は PV 発電の余剰電力のみを売ることより PV+SOFC 発電両方の余剰電力を売ることにより、平均 11.8 万円の年間コストが削減できることが確認された。



(a) 2-person household



(b) 4-person household

Fig. 5-14 Annual cost by lifestyle and power generation method

## 5.6 まとめ

本章では、ライフスタイルによる太陽光発電と燃料電池の併用発電の有効性検証を目的として、燃料電池、太陽光発電、蓄電池などの家庭用分散型エネルギーシステムのシミュレーションモデルを作成した。その後、ライフスタイルの違いがエネルギー消費量へ及ぼす影響の把握や ZEH 達成の核となる設備機器容量や発電方法に着目し、複数の生活パターンにおける設備導入効果及び経済性評価を行った。

### (1) エネルギー評価

売買電力量に関して、単独発電は2人世帯と4人世帯の両条件ともに PV 発電量の増加に伴い、売電量は増加し、買電量は減少した。一方、併用発電では、2人世帯と4人世帯の両条件ともに PV 発電量の増加に伴い、売電量は増加したが、買電量は発生しなかった。自家消費率に関して、単独発電と併用発電ともに PV 容量の増加に伴い、自家消費率が低下する傾向がみられた。一方、併用発電の場合は PV と SOFC により発電をするため、単独発電に比べ自家消費率が低い結果となった。

### (2) 一次エネルギー削減率及び ZEH 達成率の評価

一次エネルギー削減率に関して、平均一次エネルギー削減量は単独発電で 17%、併用発電 (PV の余剰電力のみ売る条件) で 37%、併用発電 (PV と SOFC の余剰電量を売る条件) で 56%となり、併用発電の場合は PV と SOFC の余剰電量を売ることで、一次エネルギー削減率が平均 19%増加した。また、単独発電と併用発電ともに PV 容量の増加に伴い、ZEH 達成率は増加した。単独発電の場合は、片働きの多消費型は PV7.5 kW、片働きの普通型は PV4.6 kW 以上、片働きの節約型は PV3.0 kW 以上、共働きの普通型は PV4.6 kW 以上の条件で ZEH 達成率が 100%以上となった。一方、併用発電においてはすべての条件で ZEH 達成率が 150~627%で高い結果となった。以上より、単独発電の場合、片働き2人世帯において多消費型は PV7.5kW+BT7.2kWh、普通型は PV6.0kW+BT7.2kWh、節約型は PV3.0kW+BT7.2kWh、共働き2人世帯の普通型は PV4.6kW+BT7.2kWh、片働きと共働きの4人世帯は PV7.5kW+BT7.2kWh の設備組み合わせが、適切である (ZEH 達成率 100%以上、自家消費率が最も高い、売電量が買電量以上の条件を全て満たす) ことが確認できた。また、併用発電の場合、すべてのライフスタイルにおいて PV3.0kW、SOFC0.7kW、BT7.2kWh の設備組み合わせが適切であることが確認できた。

### (3) 経済性評価

ライフスタイルによる適切な設備容量の組み合わせにおいて年間コストを評価した。PV 発電の余剰電力のみを売る場合は単独発電に比べ、併用発電の方が約 2.4 万円の年間コストが削減できた。また、PV と SOFC 発電の余剰電力を売る場合は単独発電より併用発電の方

が約 11.8 万円の年間コストが削減できた。

本研究では、単独発電と併用発電を導入する際に、ライフスタイルや生活パターンなどを考慮し、それぞれの発電方法に応じて適切な設備容量の提案を行い、提案した設備容量の組み合わせに基づいて経済性評価を行った。その結果、単独発電より併用発電の方が ZEH 達成率や一次エネルギー削減率が高いことが確認された。また、年間コストも併用発電の方が小さい結果となった。なお、本研究では、BT の容量を 7.2kWh と固定したことや PV と SOFC の設備容量及び価格、系統との売電・買電価格などの設定に制限があったため、BT の容量や SOFC の発電モードなどを考慮し、様々な設備の組み合わせなどの考察、評価は今後課題である。



注

注1) 自家消費率計算

■単独発電の場合、

$$\text{自家消費率} = (\text{PV から宅内への電力量} + \text{PV から BT への充電量}) / (\text{PV 発電量}) \times 100$$

■併用発電の場合、

$$\text{自家消費率} = (\text{PV から宅内への電力量} + \text{PV から BT への充電量} + \text{SOFC から宅内への電力量} + \text{SOFC から BT への充電量}) / (\text{PV 発電量} + \text{SOFC 発電量}) \times 100$$

注2) 一次エネルギー削減率計算

$$\text{一次エネルギー削減率} = \text{エネルギー消費削減量} / \text{基準エネルギー消費量} \times 100$$

$$\text{エネルギー消費削減量} = (\text{基準エネルギー消費量} - \text{平成 28 年省エネ基準による「暖房」「冷房」「換気」「給湯」「照明」の基準エネルギー消費量の合計}) + (\text{－太陽光発電などによる削減量} + \text{売電量})$$

注3) ZEH 達成率

■単独発電の場合、

$$\text{ZEH 達成率} = \text{PV 発電量} / (\text{家電} + \text{冷暖房} + \text{給湯}) \times 100$$

■併用発電の場合、

$$\text{ZEH 達成率} = (\text{PV 発電量} + \text{SOFC 発電量} - \text{ガス流量}) / (\text{家電} + \text{冷暖房} + \text{給湯}) \times 100$$

注4) EC において、2人世帯は 180L のもの、4人世帯は 370L のものとして、各メーカーの商品価格の平均料金と設定した。

注5) SOFC の補助ボイラーは高効率であるエコジョーズとし、各メーカーの商品価格の平均料金と設定した。

注6) 年間コスト算出式<sup>35)</sup>

■単独発電の場合、

$$\text{年間電気代} = 1 \text{ 年間の買電料金} - 1 \text{ 年間の売電料金}$$

$$\text{年間コスト} = \text{PV 導入コスト} / \text{耐用年数} + \text{BT 導入コスト} / \text{耐用年数} + \text{年間電気代} + \text{EC 導入コスト} / \text{耐用年数}$$

■併用発電の場合、

$$\text{年間電気代} = 1 \text{ 年間の買電料金} - 1 \text{ 年間の PV 売電料金} - 1 \text{ 年間の SOFC 売電料金}$$

$$\text{年間コスト} = \text{PV 導入コスト} / \text{耐用年数} + \text{BT 導入コスト} / \text{耐用年数} + \text{SOFC 導入コスト} / \text{耐用年数} + \text{補助ボイラー導入コスト} / \text{耐用年数} + \text{年間電気代} + \text{年間ガス料金}$$

## 参考文献

- 1) 渋谷ら：ゼロ・エネルギー住宅におけるライフスタイルがエネルギー消費量に与える影響，日本建築学会大会，環境工学Ⅱ， pp. 917-917, 2015
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁：再生可能エネルギー各電源の導入の動向について，2015
- 3) 中田祐司：低炭素社会を実現するスマートグリッドとスマートシティ，電気学会全国大会， pp. H1(10)-H1(13), 2012. 3
- 4) 国土交通省：国土技術政策総合研究所，第 3 章燃料電池等による建物の低炭素化技術，研究報告第 45 号， pp. 162-241
- 5) しなやかな技術研究会：関西初、家庭用燃料電池と太陽光発電を組み合わせた「W（併用）発電システム」を導入し一般公開します / プレスリリース 大阪ガス，  
[http://greenpost.way-nifty.com/sinaken/2007/11/post\\_40fd.html](http://greenpost.way-nifty.com/sinaken/2007/11/post_40fd.html) (2019/11/7 閲覧)，2007 年 11 月 1 日
- 6) 渡辺潔：水素エネルギーニュース，第 17 巻，第 3 号， pp. 87, 2010
- 7) 経済産業省資源エネルギー庁：ZEH の定義（改定版）＜戸建住宅＞，ZEH ロードマップ フォローアップ委員会，2019. 2
- 8) 竹中大史ら：熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンの協調制御 その 1：制御システムと評価対象建物概要，日本建築学会大会学術講演梗概集， pp. 159-160, 2014. 9
- 9) 江部真里奈ら：熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンの協調制御 その 2：協調制御とエアコン単体制御の電力消費量の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集， pp. 161-162, 2014. 9
- 10) 榎谷耕大：ゼロ・エネルギーハウスにおける創蓄連携設備の最適制御方法に関する研究，早稲田大学創造理工学部建築学科卒業論文，2015
- 11) 田子ら：太陽光ハイブリッドパネルの開発（第一報）パネルの基本性能と年間システム集熱性能，空気調和・衛生工学大会学術講演論文集， pp. 325-328, 2014
- 12) 高田ら：住宅における CO<sub>2</sub> ヒートポンプ式給湯器の稼働実態と性能評価に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，第 180 巻，第 2 報，2012. 3
- 13) 高田ら：住宅における CO<sub>2</sub> ヒートポンプ式給湯器の稼働実態と性能評価に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，第 205 号，第 4 報，2014. 4
- 14) 電力中央研究所：CO<sub>2</sub> ヒートポンプ給湯システムの高効率化を目指した貯湯タンク内温度分布計算手法の開発-給湯・ふろ湯張システム用モデルの構築
- 15) 常岡優吾：快適性を考慮したゼロ・エネルギーハウスの自立的運用に関する研究，空気調和・衛生工学大会学術講演論文集， pp. 293-296, 2017
- 16) 新野将平ら：エネルギー需要のばらつきが SOFC 導入効果に与える影響，空気調和・衛生工学大会学術講演論文集， pp. 61-64, 2014

- 17) 経済産業省資源エネルギー庁：省エネ性能カタログ（2014年夏版）
  - 18) 関東電気保安協会 HP, [https://www.kdh.or.jp/safe/energy\\_saving/estimation/rice\\_steamer.html](https://www.kdh.or.jp/safe/energy_saving/estimation/rice_steamer.html) (2019/11/7 閲覧)
  - 19) 渋谷ら：ゼロ・エネルギー住宅における住まい方と温熱環境がエネルギー消費量に与える影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 249-252, 2015
  - 20) NHK 放送文化研究所：2015年国民生活時間調査報告書
  - 21) 経済産業省資源エネルギー庁：省エネ性能カタログ 2016年夏版
  - 22) 高田ら：住宅用貯湯式給湯システムの稼働実態とその評価に関する研究 その10 給湯負荷モードによるエネルギー消費量・機器効率の検討, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第37巻, pp. 365-368, 2014
  - 23) 小林ら：HEMS 情報を活用したエコキュートの効率的な運転制御手法の検討 太陽光余剰電力を活用したエコキュートの昼間炊きげによる省エネルギー性向上, 空気調和・衛生工学大会学術講演論文集, pp. 61-64, 2015
  - 24) 経済産業省：第34回調達価格等算定委員会資料, 2017.12
  - 25) タイナビ：「エコキュートの耐用年数と交換費用, セルフメンテナンスの方法」, [https://www.tainavi.com/library/4082/?gclid=Cj0KCCQjwr-tBRCMARIsAN413WRk39cbYZJCHY\\_495kZE3IdL\\_A9MI195ukbZLN8Y4TxSRG964Dx8EIaAh9mEALw\\_wcB#](https://www.tainavi.com/library/4082/?gclid=Cj0KCCQjwr-tBRCMARIsAN413WRk39cbYZJCHY_495kZE3IdL_A9MI195ukbZLN8Y4TxSRG964Dx8EIaAh9mEALw_wcB#) (2019/11/6 閲覧)
  - 26) NEDO：燃料電池・水素技術開発ロードマップ
  - 27) 燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）：水素・燃料電池プロジェクト評価・課題共有ワークショップ資料「SOFCの現在と課題～今後取り組むべき基盤技術開発～」, 2019.6.21
  - 28) 国家戦略室：第2回コスト等検証委員会「資料7-2 コージェネレーションの全諸元について」, [https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02\\_02.html](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02_02.html) (2019/11/6 閲覧)
  - 29) 東京都地球温暖化防止活動推進センター：平成26年度オフィスビルなどのコージェネレーションシステム導入助成事業, 2014.9
  - 30) 経済産業省資源エネルギー庁：再生可能エネルギーの自立に向けた取組の加速化（多様な自立モデルについて）, 2018
  - 31) 東京ガス：「コージェネレーションパッケージ契約」, 2019.10.1
  - 32) ソーラーサポートセンター：太陽光発電の売電価格の推移
  - 33) 楽エネ：併用発電のメリット・デメリット, <https://rakuene-shop.jp/columns/2405/> (2019/11/6 閲覧)
  - 34) エネチェンジ：創エネ機器を併用する「併用発電」とは?, <https://enechange.jp/articles/double-power-generation> (2019/11/6 閲覧)
-

- 35) 環境共生住宅推進協議会：「一次エネルギー消費量の算定要領（平成 28 年省エネ基準  
準拠）資料 1-9, 2016

図・表リスト

Fig. 5-1	ZEH evaluation for combined power generation .....	108
Fig. 5-2	Overall simulation flow .....	109
Table 5-1	Setting value of thermal 6 elements of PMV .....	110
Table 5-2	Specification of SOFC .....	111
Fig. 5-3	Structure of SOFC model .....	111
Fig. 5-4	Relationship between generation efficiency and generation amount of SOFC .....	111
Table 5-3	Specification of PV panel .....	112
Fig. 5-5	Structure of PV model .....	112
Table 5-4	Specification of BT .....	112
Table 5-5	Specification of EcoCute .....	113
Fig. 5-6	Structure of PV model .....	113
Fig. 5-7	Comparison of measurement value and simulation value of SOFC generation .....	114
Fig. 5-8	Comparison of measurement value and simulation value of SOFC gas flow rate .....	114
Fig. 5-9	Simulation verification of PV generation .....	115
Fig. 5-10	Simulation verification of indoor temperature .....	115
Table 5-6	Outline of simulation condition .....	116
Table 5-7	Condition of energy demands in each lifestyle .....	117
Table 5-8	condition of hot water demand in each lifestyle .....	117
Fig. 5-11	Daily total energy consumption for 2-person household (annual average) .....	119
Fig. 5-12	Daily total energy consumption for 4-person household (annual average) .....	121
Fig. 5-13	Primary energy reduction rate and ZEH achievement ratio .....	123
Table 5-9	Equipment capacity by lifestyle and power generation method .....	124
Table 5-10	Equipment introduction cost .....	125
Table 5-11	Electricity and gas prices .....	125
Fig. 5-14	Annual cost by lifestyle and power generation method .....	126



## 第 6 章

総括





## 第6章 総括

本論文では、ゼロ・エネルギーハウス（Zero Energy House：以下 ZEH）の自家消費を向上させるために効率的な設備運用の提案を行うことを目的としている。実験住宅にて太陽光発電電力の有効利用に関する実験及び実測を行うとともに、数値計算を用いてヒートポンプ給湯器（HP 給湯器）の昼間運転や併用（W）発電の有効性に関する研究を行った。

第1章では、本研究の目的を述べるとともに、研究背景及び既往研究について概観した。

第2章では、本研究で扱う対象住宅の概要について述べた。対象住宅はエネマネハウス2014の際に早稲田大学が計画・建設した ZEH である。外断熱式を採用し、内装に ALC を利用しているため、熱容量が比較的大きな、高断熱住宅である。導入設備としては、太陽光発電システム（Photovoltaic: 以下 PV）、蓄電池システム（Storage Battery: 以下 BT）、固体酸化燃料電池システム（Solid Oxide Fuel Cell: 以下 SOFC）、自然換気窓、断熱ブラインド、日射遮蔽ブラインド、高性能エアコン、ヒートポンプ式放射冷暖房（床冷暖房・ラジエーター）、HP 給湯器、全熱交換器、有機 LED 照明がある。また、窓やブラインド等の建築設備とエアコン等の電気設備を連携制御するため、対象住宅では、ホーム・エネルギー・マネジメント・システム（Home Energy Management System: HEMS）を導入した。2018 年度は ECHONET Lite に対応した HP 給湯器を新規に導入した。

第3章では、夏季と冬季の予冷熱運転が PV 発電の自家消費率及び熱的快適性に与える影響の把握を目的として、熱容量が比較的大きく高断熱な対象住宅において空調運用条件の異なる 11 条件で物理環境・電力量・サーマルマネキンを用いた温冷感予測の実験を行った。また、発電量などの実験データを用いて HP 給湯器の昼間運転に関してシミュレーションを行い比較・分析を行った。温熱環境に関しては、予冷・予熱運転により、帰宅時と夜在宅時の予想平均温冷感申告（Predicted Mean Vote: 以下 PMV）が快適範囲内で安定した。また、空調方式で比較すると、放射冷暖房の方が予冷・予熱運転共に PMV が快適範囲内で安定した。さらに、3 時間稼働条件よりも 6 時間稼働条件の方が、蓄熱効果が長く持続し、非空調時間帯の快適性を向上できることがわかった。また、サーマルマネキンを用いた計測値により、放射による冷暖房は温度ムラが発生しにくいことを確認した。エネルギーについては、放射冷暖房を用いた予冷・予熱運転を行うことで夜在宅時及び、朝在宅時のエアコン PMV 制御による冷房・暖房の電力消費が削減できた。さらに、放射冷房より放射暖房の方が蓄熱効果が高く、在宅時間帯の電力消費がないことが確認できた。放射冷暖房による予冷熱運転によって、快適性を向上しながらエネルギーシフトを実現し、売買電力量の削減と自家消費率の向上を実現した。HP 給湯器の昼間運転によるエネルギー評価により、HP 給湯器を夜

間運転から昼間運転へ切り替えることで PV 発電の自家消費率が向上することを確認した。予冷熱運転と併用することで冬季の放射 6 時間予熱運転条件では宅内で発電した電力を全て使うことができた。これらの結果より、熱容量が比較的大きな高断熱住宅における予冷・予熱運転は、快適性を向上しながら、売買電力量の削減と自家消費率の向上を実現できることを示した。季節によって異なる PV 発電を予測し、予冷・予熱運転や、HP 給湯器、蓄電池などを併用しながら調整することで、快適性の向上と、さらなる売買電力量の削減、自家消費率の向上を実現できる。

第 4 章では、住宅における調整力として夏季のエアコンによる予冷運用に着目した。夏季日中のデマンドレスポンス (Demand Response : 以下 DR) を想定した予冷運用による電力需要のシフト効果と、予冷運用に合わせた居住者行動が予冷時や空調停止時における快適性や健康性に及ぼす影響の把握を目的に対象住宅で実験を行った。温熱環境評価に関しては、実験結果と数シミュレーションにより考察を行った。その結果、DR 終了時に PMV が 0.5 程度、WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) も熱中症に警戒が必要な 25°C より低く、今回の条件では DR 時にエアコンを停止しても予冷運用によって快適性・健康性が維持できる可能性が示された。エアコンの電力消費量に関しては、25°C 一定で稼働した予冷なし条件に比べ、予冷条件は DR 時間帯にエアコンを停止したため約 400Wh 削減できたが、予冷時と DR 後のエアコン再稼働時に約 1200Wh 増加した。DR 時間帯に設定温度を 27°C に上げた予冷条件では、DR 時間帯の電力需要は微増したが、再稼働後の電力消費量を抑制できる可能性が示された。予冷運用の居住者行動に関する主観申告を用いた評価より、DR 時の温熱環境に対する快不快感申告は DR 適応を目指した居住者行動を行った条件の方が有意に快適側になることが示された。また、家事を予冷時間帯に合わせて行うことで DR 時に快適に過ごせるエアコン停止時間が 35 分延長した。予冷運用時の居住者行動に関する生理量を用いた評価より、LF/HF (ストレス指標) に関しては、室内温度が比較的高い 27°C であっても、家事を予冷時間帯に合わせて行う居住者行動の工夫がある場合は有意に数値が低く、工夫がない場合はストレスに注意が必要とされる 2 を超えた。予冷に合わせた居住者行動で室温上昇によるストレスが抑制される可能性が示された。予冷運用の導入の際にはエアコン設定温度を上げる手法などを用いることで、DR 時の需要量はやや増大するものの、熱中症リスクを回避できる可能性がある。

第 5 章では、PV と SOFC の併用発電に与えるライフスタイルの影響を把握するために、PV・SOFC・BT などの家庭用分散型エネルギーシステムのシミュレーションモデルを作成した。ライフスタイルの違いがエネルギー消費量へ及ぼす影響やゼロ・エネルギー達成のための設備機器容量や発電方法に着目し、複数の生活パターンにおける設備導入効果及び経済性評価を行った。売買電力量に関して、単独発電は 2 人世帯と 4 人世帯の両条件ともに

---

PV 発電量の増加に伴い、売電量は増加し、買電量は減少した。自家消費率に関して、単独発電と併用発電ともに PV 容量の増加に伴い、自家消費率が低下する傾向がみられた。一方、併用発電の場合は PV と SOFC により発電をするため、単独発電に比べ自家消費率が低い結果となった。一次エネルギー削減率に関して、平均一次エネルギー削減量は単独発電で 17%、PV の余剰電力のみを売る条件の併用発電で 37%、PV と SOFC の余剰電量を売る条件の併用発電で 56%となった。併用発電の場合は PV と SOFC の余剰電量を売ることで、一次エネルギー削減率が平均 19%改善された。また、単独発電と併用発電ともに PV 容量の増加に伴い、ゼロ・エネルギー達成率は向上した。年間コストに関して、PV 発電の余剰電力のみを売る場合は単独発電に比べ、併用発電の方が約 2.4 万円削減できた。また、PV と SOFC 発電の余剰電力を売る場合は単独発電より併用発電の方が約 11.8 万円削減でき、単独発電より併用発電の方が経済的に有利であることが確認できた。本研究では、BT の容量を 7.2kWh と固定し、さらに PV と SOFC の設備容量及び価格、系統との売電・買電価格などを限られた範囲でのみ検討したため、今後は他の BT 容量や SOFC の発電モードなどを考慮した設備の組み合わせによる評価を行う必要がある。

第6章では、各章の研究結果を総括した。

本論文では、住宅における予冷・予熱運転や HP 給湯器の昼間運転による太陽光発電電力の有効利用に関して評価した。さらに、電力需要のシフトや電力ピークの平準化を目指し、予冷運転と居住者行動による DR やライフスタイル別に併用発電の有効性に関する評価を行い、ZEH における自家消費を向上させる効率的な設備運用方法を提案した。現代社会では共働き世帯が年々増加しているため、日中の住宅のエネルギー消費量が小さくなり、PV 発電の余剰電力問題がより一層懸念される。今後は自家消費に関する研究に加え、地域や町単位で行うグリッドのエネルギーマネジメントに関する研究が重要であると考えられる。また、日本は地震や台風、津波、火災などの災害発生率が高い国であるため、災害時のレジリエンスを考慮した ZEH に関する研究は今後の課題である。



# **APPENDIX A**

English abstract



## **Efficient Facility Operation Measures for Zero Energy House to Improve Self-consumption**

*Jungmin KIM*

In recent years, energy consumption in the Japanese consumer sector has been increasing, therefore energy saving and effective use of renewable energy are being promoted. As approved in 2014, the 4<sup>th</sup> Strategic Energy Plan targets to “set the standard of new homes by 2020, and achieve a net zero energy house on their average by 2030.” It is necessary to study equipment operation methods to improve self-consumption, because the Fee-in Tariff (FIT) for housing will end sequentially starting from November 2019. This thesis aims to propose an efficient equipment operation to improve the self-consumption of Zero Energy House (ZEH). An experiment on the effective use of photovoltaic (PV) generation was conducted in a ZEH, followed by a study on the effectiveness of daytime operation of heat pump hot water (HP hot water), as well as the combined generation of PV and Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) with simulation.

This thesis is composed of six chapters, each of whose main findings are explained as follows:

In Chapter 1, the research objectives, together with summarization of the relevant extant research, are presented.

In Chapter 2, the outline of the experimental house is described. The ZEH has a large capacity because it adopts an external insulation type and uses ALC (Autoclaved Lightweight aerated Concrete) for the interior insulation. The ZEH comprises a PV, storage battery (BT), SOFC, natural ventilation window, high performance air conditioner, radiant cooling and heating, HP hot water, total enthalpy heat exchanger, as well as LED illumination, are installed. In addition, a home energy management system has been introduced to help coordinate between the control and electrical equipment.

In Chapter 3, the purpose is to understand the effects of pre-cooling and pre-heating operations on the self-consumption of PV generation and thermal comfort. To evaluate these effects, we measured indoor environmental factors, energy consumption, skin surface temperature, and heat loss using thermal manikins in 11 cases (5 in summer and 6 in winter) with different air-conditioning operations. Moreover, the energy evaluation according to the daytime operation of HP hot water was simulated. For the thermal environment, the predicted mean vote (PMV) at the time of returning home and during evenings, was stabilized at a comfortable range ( $PMV = \pm 0.5$ , slightly warm and cool state) using pre-cooling and pre-heating. Meanwhile, the pre-cooling and pre-heating of the radiant system was more effective than the air conditioner, and the heat storage effect can be maintained longer at 6-h operation than at 3-h operation. In addition, the results of the thermal manikin confirmed that the radiant system

---

hardly caused the temperature unevenness. For the energy evaluation, the precooling and preheating of the radiant system decreased the total energy consumption of air conditioning by the air conditioner PMV control time. In addition, it can shift the energy, reduce trading power, and increase self-consumption. For the energy evaluation of the daytime operation of HP hot water, it is more effective in reducing the trading power and improving the self-consumption than nighttime operation. The results showed that the pre-cooling and pre-heating operation in ZEH can reduce the trading power and improve the self-consumption while maintaining thermal comfort.

In Chapter 4, the focus is on the pre-cooling operation of an air conditioner in summer to reduce the electric load during the demand response (DR). The aim is to evaluate the pre-cooling effects on the electric demand shift thermal comfort, and the occupant behavior health. For the thermal environment, the PMV was approximately 0.5, and the wet bulb globe temperature (WBGT) was lower than 25 °C, which was the temperature of heatstroke warning at the end of the DR. Hence, even if the air conditioner is stopped during DR, it is possible to maintain thermal comfort and health by pre-cooling. For the energy consumption of the air conditioner, the energy consumption of the pre-cooling case (AC off during DR) was reduced by approximately 0.4 kWh, compared to the case without pre-cooling, which was constantly operated at 25 °C. However, the energy consumption of the pre-cooling case (AC off during DR) increased by approximately 1.2 kWh when the air conditioner was restarted after DR. Under the pre-cooling case (AC on during DR), the set temperature was 27 °C, the power demand during DR slightly increased, but the energy consumption was shown to be reduced after restarting the air conditioner. For the subjective evaluation, the comfort in the thermal environment and satisfaction during DR was reported as significantly higher, while the air conditioner stop time extended by approximately 35 min using the occupant behavior was aimed at DR adaptation. For the physiological evaluation, the LF/HF (stress index) was decreased by the occupant behavior by matching the housework time to the pre-cooling time. The results showed that the combination of pre-cooling operation and occupant behavior was effective in shifting the energy and reducing the stress during DR.

In Chapter 5, a simulation model of distributed house energy systems was developed based on the performance test results of PV, SOFC, and BT, to evaluate the energy-saving effect and economic efficiency of different lifestyles. For the trading power, in the case of single generation, the sales energy was increased, while the purchased energy was reduced with the increase in PV generation capacity in both the 2-person and 4-person households. By contrast, in the case of combined generation, the sales energy increased with the increase in PV generation capacity, but conditions of both the 2-person and 4-person households exhibited no purchased energy. For the self-consumption, in both the



single - and combined generations, the self-consumption decreased as the PV generation capacity increased. For the primary energy reduction rate, its annual average was 17% for the single generation, 37% for the combined generation, which sold the PV surplus power, while 56% for the combined generation that sold the surplus power of PV and SOFC. The primary energy reduction rate was improved by approximately 19% by the combined generation, which sold the surplus energy of PV and SOFC. Meanwhile, the ZEH achievement ratio increased as the PV generation capacity increased. For the annual cost, the combined generation can save approximately  $2.4 \times 10^4$  yen compared to the single generation when selling only PV surplus power. Additionally, the combined generation can save approximately  $11.8 \times 10^4$  yen compared to the single generation when selling the surplus power of PV and SOFC. Therefore, the combined generation was confirmed to be more economical than single generation. However, in this study, the investigation was carried out within a limited condition, such as fixing the capacity and price of BT, PV, SOFC, as well as the price of the sold and purchased energy. Thus, the evaluation of the equipment combination considering the BT capacity and SOFC generation mode, would become necessary in the future.

Chapter 6 summarizes the conclusion of each chapter. In this study, we investigated the effective utilization of photovoltaic power generation by pre-cooling and pre-heating operations, as well as daytime operation of HP hot water in a ZEH. Furthermore, to examine the power demand shift and power peak leveling, we evaluated the effectiveness of the combined generation in different lifestyles through pre-cooling operation and occupant behavior to propose an efficient equipment operation to improve the ZEH self-consumption.

The number of double-income households has been increasing every year, which reduces the amount of household energy consumption; however, this increases the concern for the generation of PV surplus power. In the future, in addition to research on the self-consumption of PV surplus power, it would be important to study the grid energy management in the region or town unit. Moreover, as Japan is a country with a high disaster rate, such as earthquakes, typhoons, tsunamis, and fires, the study of ZEH considering disaster resilience could be another research topic for the future.



## **APPENDIX B**

被験者実験によるアンケート調査項目



### 被験者実験・自由記述アンケート(1回目)

デーラベル: \_\_\_\_\_

本日はお忙しい中、長時間の実験に参加していただきありがとうございました。

1. 本日の実験で、室内環境に関して気になった点、お気づきの点がございましたら、ご記入をお願いします。

2. その他（実験に関して気になったことなどございましたら、ご記入をお願いします。）

次回の参加もどうぞよろしくをお願いします。

## 被験者実験・自由記述アンケート(1回目)

デーラベル: \_\_\_\_\_

本日はお忙しい中、長時間の実験に参加していただきありがとうございました。

1. 本日の実験で、室内環境に関して気になった点、お気づきの点がございましたら、ご記入をお願いします。

2. その他（実験に関して気になったことなどございましたら、ご記入をお願いします。）

次回の参加もどうぞよろしくをお願いします。

### 被験者実験・自由記述アンケート(2回目)

データラベル: \_\_\_\_\_

本日はお忙しい中、長時間の実験に参加していただきありがとうございました。

1. 本日の実験で、室内環境に関して気になった点、お気づきの点がございましたら、ご記入をお願いします。

2. 前回の実験と比較して違いを感じられた点がございましたら、ご記入をお願いします。

## [実験が終わるまでは読まないでください]

電力会社が町全体の電力消費量に応じて電気料金を変化させ、夏場の日中などの電力消費のピーク時に家庭での電力使用料の削減を促すデマンドレスポンスというサービスが検討されています。

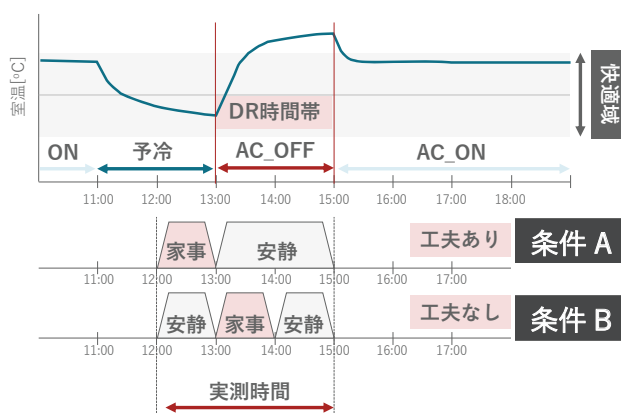
デマンドレスポンスでは、例えば真夏の昼間など電力が足りないときに、電気料金を上げ、それ以外の時間帯では電気料金を下げる。また、省エネを行った消費者に報奨金を払うなどの仕組みが想定されています。

このデマンドレスポンスという仕組みによって、電気料金が高い日中に節電に取り組んだ消費者は大幅に光熱費を削減する事も可能です。

本実験はそのデマンドレスポンスの際に室内を快適なままエアコンの電力消費を削減できる方法として、デマンドレスポンスの前にあらかじめ設定温度を下げて冷房をおこなっておく予冷というものを再現していました。

予冷時の室温は涼しい側に、デマンドレスポンスでエアコンを OFF にしている時間は暖かい側になるため、条件 A では涼しい予冷時間帯に体を動かさず家事を想定し、条件 B ではエアコン停止後の暖かくなる時間に家事を想定しました。

今回の実験は、デマンドレスポンスの要請に従ったエアコンのコントロールに合わせた居住者の行動が、エアコン停止時の快適性に及ぼす影響を検証するものでした。



以上の説明を聞いた後、以降の質問に回答してください。

1. デマンドレスポンスという制度をご存知でしたか？ Yes/No
  
2. 説明を聞いた後に、2 回の実験について気づいた違いなどがあれば教えてください。



3. デマンドレスポンス政策時の省エネ行動について教えてください。[該当するものに○をつけてください。]

電気料金が高い時間帯にどのような省エネ行動をしますか？電気料金が何倍になったら行いますか？

- |                                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|
| 3-1. エアコンをつけないようにする。              | しない・2倍・3倍・5倍・10倍 |
| 3-2. エアコンの設定温度を上げる。               | しない・2倍・3倍・5倍・10倍 |
| 3-3. 予冷を行い、エアコンをつけないようにする。[今回の実験] | しない・2倍・3倍・5倍・10倍 |
| 3-4. テレビをつけないようにする。               | しない・2倍・3倍・5倍・10倍 |
| 3-5. その他の電気機器の使用を控える。             | しない・2倍・3倍・5倍・10倍 |
| 3-6. 必要な用事、家事を別の時間帯に行うようにする。      | しない・2倍・3倍・5倍・10倍 |
| 3-7. 外出するようにする。                   | しない・2倍・3倍・5倍・10倍 |

DR時の電気代イメージ

家電	2時間の電気代				
	標準	DR			
	1倍	2倍	3倍	5倍	10倍
エアコン	20円	40円	60円	100円	200円
テレビ	10円	20円	30円	50円	100円

4. デマンドレスポンスの時間帯にエアコンを停止するために予冷を行いました。

予冷：デマンドレスポンスの時間にエアコンを消すために、あらかじめ設定温度を低くしてエアコンを作動させること

4-1. 予冷によって快適に過ごすことができましたか？

- ・条件 A                    とても快適・快適・やや快適・どちらでもない・やや不快・不快・とても不快・覚えてない
- ・条件 B                    とても快適・快適・やや快適・どちらでもない・やや不快・不快・とても不快・覚えてない

4-2. エアコン停止時間帯に踏み台を行った条件 B に比べ、

予冷で涼しい時間帯に踏み台を行った条件 A は快適性が向上していたと感じましたか？

向上した・同等・向上してない・覚えてない

4-3. デマンドレスポンス時に「予冷→エアコン停止」を行いますか？

また、それは金額が何倍の時ですか？

- ・普段通りの生活で行う（条件 B でもよい）                    →しない・2倍・3倍・5倍・10倍
- ・家事の時間を工夫して行う（条件 A）                        →しない・2倍・3倍・5倍・10倍

----- 実験に参加していただき誠にありがとうございました。 -----



# **APPENDIX C**

## 第 5 章 MATLAB 数値計算モデル



## 室温変動計算モデル

## 1.1 PMV 計算

$$PMV = f(M) \cdot L$$

$$f(M) = 0.303e^{-0.036M} + 0.028$$

$$L = M - (C + R + E) - (C_{res} + E_{res})$$

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

$$R = 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273.15)^4 - (t_r + 273.15)^4)$$

$$E = 3.05 \cdot (5.73 - 0.007M - p_a) + E_{sw}$$

$$C_{res} = 0.0014M \cdot (34 - t_a)$$

$$E_{res} = 0.0173M \cdot (5.87 - p_a)$$

$$t_{cl} = t_{sk} - 0.155I_{cl} \cdot (C + R)$$

$$(t_r + 273.15)^4 = (t_g + 273.15)^4 + 2.47 \cdot 10^8 \cdot v^{0.6} \cdot (t_g - t_a)$$

$$2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v} \text{ のとき, } h_c = 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25},$$

$$2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v} \text{ のとき, } h_c = (2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25}) \cdot \sqrt{v}$$

$$I_{cl} < 0.5[clo] \text{ のとき, } f_{cl} = 1.00 + 0.2I_{cl}$$

$$I_{cl} > 0.5[clo] \text{ のとき, } f_{cl} = 1.05 + 0.1I_{cl}$$

L : 人体の熱負荷[W/m<sup>2</sup>]

M : 代謝熱生産量[W/m<sup>2</sup>]

C : 対流による放熱量[W/m<sup>2</sup>]

R : 放射による放熱量[W/m<sup>2</sup>]

E : 呼吸による放熱量[W/m<sup>2</sup>]

C<sub>res</sub> : 呼吸による放熱顕熱量[W/m<sup>2</sup>]

E<sub>res</sub> : 呼吸による放熱潜熱量[W/m<sup>2</sup>]

f<sub>cl</sub> : 裸体時の表面積に対する着衣時の表面積の比[-]

h<sub>c</sub> : 対流熱伝達率[W/m<sup>2</sup>]

t<sub>cl</sub> : 着衣表面温度[°C]

t<sub>a</sub> : 室内温度[°C]

t<sub>r</sub> : 平均放射温度[°C]

p<sub>a</sub> : 水蒸気分圧[Pa]

E<sub>sw</sub> : 発汗蒸発放熱量[W/m<sup>2</sup>]

v : 気流速度[m/s]

I<sub>cl</sub> : 衣服の熱抵抗[clo](1[clo]=0.155[m<sup>2</sup> · K/W])

## 1.2 熱伝達率

式 (5.1) に内表面総合熱伝達率、式 (5.2) に内部総合熱伝達率、式 (5.3) に外表面総合熱伝達率、式 (5.4) に窓内表面総合熱伝達率、式 (5.5) に窓外表面総合熱伝達率を表す式を示す。添え字の 1, 2, 3, 4, 5, 6 は、南面・西面・北面・東面・天井面・床面を表している。

$$C_{i,n} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_n/2}{\lambda_w}} \quad (n = 1,2,3,4,5,6) \quad (5.1)$$

$$C_{d,n} = \frac{1}{\frac{d_n/2}{\lambda_w} + \frac{d_d/2}{\lambda_d}} \quad (n = 1,2,3,4,5,6) \quad (5.2)$$

$$C_{o,n} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{d_n/2}{\lambda_w}} \quad (n = 1,2,3,4,5,6) \quad (5.3)$$

$$C_{i,g} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_g}{\lambda_g} + \frac{d_a/2}{\lambda_a}} \quad (5.4)$$

$$C_{o,g} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{d_g}{\lambda_g} + \frac{d_a/2}{\lambda_a}} \quad (5.5)$$

$C_{i,n}$  : 内表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{d,n}$  : 内部総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{o,n}$  : 外表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{i,g}$  : 窓内表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{o,g}$  : 窓外表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$d_n$  : 各面コンクリート厚 [m]

$d_d$  : 断熱材厚 [m]

$d_g$  : 窓材厚 [m]

$d_a$  : 空気層厚 [m]

$\lambda_w$  : コンクリートの熱伝導率 [W/m°°C]

$\lambda_d$  : 断熱材の熱伝導率 [W/m°°C]

$\lambda_g$  : 窓材の熱伝導率 [W/m°°C]

$\lambda_a$  : 空気層材の熱伝導率 [W/m°°C]

$\alpha_i$  : 内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$\alpha_o$  : 外表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

### 1.3 熱容量

式 (5.6) に室内の熱容量、式 (5.7) にコンクリート壁の単位面積当たりの熱容量、式 (5.8) にコンクリート天井の単位面積当たりの熱容量、式 (5.9) コンクリート床の単位面積当たりの熱容量、式 (5.10) に断熱材の単位面積当たりの熱容量を表す式を示す。

$$Q_r = C_p \times \gamma \times V \times 3 \quad (5.6)$$

$$Q_{w,n} = C_{pc} \times \gamma_c \times d_n \quad (n = 1,2,3,4) \quad (5.7)$$

$$Q_c = C_{pc} \times \gamma_c \times d_5 \quad (5.8)$$

$$Q_f = C_{pc} \times \gamma_c \times d_6 \quad (5.9)$$

$$Q_{d,n} = C_{pd} \times \gamma_d \times d_{d,n} \quad (n = 1,2,3,4,5,6) \quad (5.10)$$

$C_p$  : 空気の定圧比熱 [J/kg°C]

$C_{pc}$  : コンクリートの定圧比熱 [J/kg°C]

$C_{pd}$  : 断熱材の定圧比熱 [J/kg°C]

$\gamma$  : 空気の比重量 [kg/m<sup>3</sup>]

$\gamma_c$  : コンクリートの比重量 [kg/m<sup>3</sup>]

$\gamma_d$  : 断熱材の比重量 [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  : 室容量 [m<sup>3</sup>]

$d_n$  : 各面コンクリート厚 [m]

$d_5$  : 天井面コンクリート厚 [m]

$d_6$  : 床面コンクリート厚 [m]

$d_{d,n}$  : 各面断熱材厚 [m]

$Q_r$  : 室内の熱容量 [J/°C]

$Q_{w,n}$  : コンクリート壁の単位面積当たりの熱容量 [J/ m<sup>2</sup>°C]

$Q_c$  : コンクリート天井の単位面積当たりの熱容量 [J/ m<sup>2</sup>°C]

$Q_f$  : コンクリート床の単位面積当たりの熱容量 [J/ m<sup>2</sup>°C]

$Q_{d,n}$  : 断熱材の単位面積当たりの熱容量 [J/ m<sup>2</sup>°C]

室内の熱容量は什器の影響を加味し、室容積当たり室の熱容量を 9 倍した。

また、ガラスの熱容量は 0[J/°C]とした。

## 1.4 外部表面日射量

### 1) 天井面(水平面)日射量

式 (5.11) に天井面(水平面)日射量を表す式を示す。

$$I_{o,s} = I_{DN} \times \sinh + I_{SH} \quad (5.11)$$

### 2) 壁面(垂直面)日射量

式 (5.12) に壁面(垂直面)日射量を表す式を示す。

$$I_{o,n} = I_{DN} \times \cosh \times \cos(\alpha - \delta_n) + 1/2 \times I_{SH} + 1/2 \times \rho \times I_{o,s} \quad (n = 1,2,3,4) \quad (5.12)$$

$I_{DN}$  : 直達日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$I_{SH}$  : 天空日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$I_{o,n}$  : 各壁面の外表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]( $n = 1,2,3,4$ )

$I_{o,s}$  : 天井面の外表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$h$  : 太陽高度 [rad]

$\alpha$  : 太陽方位角 [rad]

$\delta_n$  : 壁面の法線方向に対する南からの偏角 ( $0 \leq \delta_n < 2\pi$ ) [rad] ( $n = 1,2,3,4$ )

$$\delta_1 = 0 \quad \delta_2 = \pi/2 \quad \delta_3 = \pi \quad \delta_4 = -\pi/2$$

$\rho$  : アルベド [-]

ただし、 $-\pi/2 \leq \alpha - \delta_n \leq \pi/2$  とする。その他の値の場合は自動的に  $\cos(\alpha - \delta_n) = 0$  とする。



### 1.5 室内表面日射量

窓面より室内に流入する日射は、ガラス面では吸収と透過のみを考慮し、壁面に 40 %、天井面に 10 %、床面に 50 % ずつ拡散すると仮定した。また、反射は考慮していない。

#### 1) 室内日射流入量(J) [W]

式 (5.13) に室内日射流入量(J) [W]を表す式を示す。

$$J = \sum_{n=1}^4 A_{g,n} \times (1 - a_g) \times I_{o,n} \quad (5.13)$$

#### 2) 壁面へ拡散される室内日射量

式 (5.14) に壁面へ拡散される室内日射量を表す式を示す。

$$I_{i,n} = 0.4 \times J / (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad (5.14)$$

#### 3) 天井面へ拡散される日射量

式 (5.15) に天井面へ拡散される日射量を表す式を示す。

$$I_{i,5} = 0.1 \times J / A_c \quad (5.15)$$

#### 4) 床面へ拡散される日射量

式 (5.16) に床面へ拡散される日射量を表す式を示す。

$$I_{i,6} = 0.5 \times J / A_f \quad (5.16)$$

$J$ : 室内日射流入量 [W]

$I_{i,n}$ : 各壁面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>] ( $n = 1, 2, 3, 4$ )

$I_{i,5}$ : 天井面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$I_{i,6}$ : 床面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$I_{o,n}$ : 各壁面の外表面日射量 [W/m<sup>2</sup>] ( $n = 1, 2, 3, 4$ )

$A_{g,n}$ : 各窓面の面積 [m<sup>2</sup>] ( $n = 1, 2, 3, 4$ )

$A_n$ : 各壁面の面積 [m<sup>2</sup>] ( $n = 1, 2, 3, 4$ )

$A_c$ : 天井面の面積 [m<sup>2</sup>]

$A_f$ : 床面の面積 [m<sup>2</sup>]

## 1.6 内部発熱量

式 (5.17) に内部発熱量を表す式を示す。

$$H = A_f \times (\eta_H \times \rho_H \times H_H + \eta_L \times H_L + \eta_O \times H_O) \quad (5.17)$$

$H_H$  : 人体からの発熱量 [W/人]

$H_L$  : 照明機器からの発熱量 [W/m<sup>2</sup>]

$H_O$  : OA 機器からの発熱量 [W/m<sup>2</sup>]

$\rho_H$  : 人口密度 [人/m<sup>2</sup>]

$\eta_H$  : 在室者率 [-]

$\eta_L$  : 照明機器使用率 [-]

$\eta_O$  : OA 機器使用率 [-]

## 1.7 熱平衡式

各部材ごとの熱平衡式および室内の熱平衡式を以下に示す。

1) 壁面( $n=1,2,3,4$ )

式(5.18)、式(5.19)に壁面の熱平衡式を示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{w,n} \frac{d\theta_{w,n}}{dt} = C_{d,n}(\theta_{d,n} - \theta_{w,n}) + C_{i,n}(\theta_i - \theta_{w,n}) + \frac{C_{i,n}}{\alpha_i} a_i I_{i,n} \\ Q_{d,n} \frac{d\theta_{d,n}}{dt} = C_{o,n}(\theta_o - \theta_{d,n}) + C_{d,n}(\theta_{w,n} - \theta_{d,n}) + \frac{C_{o,n}}{\alpha_o} a_o I_{o,n} \end{array} \right. \quad (5.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{w,n} \frac{d\theta_{w,n}}{dt} = C_{d,n}(\theta_{d,n} - \theta_{w,n}) + C_{i,n}(\theta_i - \theta_{w,n}) + \frac{C_{i,n}}{\alpha_i} a_i I_{i,n} \\ Q_{d,n} \frac{d\theta_{d,n}}{dt} = C_{o,n}(\theta_o - \theta_{d,n}) + C_{d,n}(\theta_{w,n} - \theta_{d,n}) + \frac{C_{o,n}}{\alpha_o} a_o I_{o,n} \end{array} \right. \quad (5.19)$$

$I_{i,n}$  : 各壁面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$I_{o,n}$  : 各壁面の外表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$Q_{w,n}$  : 壁材の単位面積あたりの熱容量 [J/m<sup>2</sup>°C]

$Q_{d,n}$  : 断熱材の単位面積あたりの熱容量 [J/m<sup>2</sup>°C]

$C_{i,n}$  : 各壁面の内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{o,n}$  : 各壁面の外表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{d,n}$  : 各壁面の内部熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$a_i$  : 各壁面の内表面の日射量吸収率 [-]

$a_o$  : 各壁面の外表面の日射量吸収率 [-]

$\alpha_i$  : 内表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$\alpha_o$  : 外表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$\theta_i$  : 室内温度 [°C]

$\theta_o$  : 屋外温度 [°C]

$\theta_{w,n}$  : 各壁質点の温度 [°C]

$\theta_{d,n}$  : 各断熱材質点の温度 [°C]

## 2) 天井面

式(5.20)、式(5.21)に天井面の熱平衡式を示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_c \frac{d\theta_c}{dt} = C_{d,5}(\theta_{d,5} - \theta_c) + C_{i,5}(\theta_i - \theta_c) + \frac{C_{i,5}}{\alpha_i} a_i I_{i,5} \\ Q_{d,5} \frac{d\theta_{d,5}}{dt} = C_{o,5}(\theta_o - \theta_{d,5}) + C_{d,5}(\theta_c - \theta_{d,5}) + \frac{C_{o,5}}{\alpha_o} a_o I_{o,5} \end{array} \right. \quad (5.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_c \frac{d\theta_c}{dt} = C_{d,5}(\theta_{d,5} - \theta_c) + C_{i,5}(\theta_i - \theta_c) + \frac{C_{i,5}}{\alpha_i} a_i I_{i,5} \\ Q_{d,5} \frac{d\theta_{d,5}}{dt} = C_{o,5}(\theta_o - \theta_{d,5}) + C_{d,5}(\theta_c - \theta_{d,5}) + \frac{C_{o,5}}{\alpha_o} a_o I_{o,5} \end{array} \right. \quad (5.21)$$

$I_{i,5}$  : 天井面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$I_{o,5}$  : 天井面の外表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$Q_c$  : 天井材の単位面積あたりの熱容量 [J/m<sup>2</sup>°C]

$Q_{d,5}$  : 断熱材の単位面積あたりの熱容量 [J/m<sup>2</sup>°C]

$C_{i,5}$  : 天井面の内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{o,5}$  : 天井面の外表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{d,5}$  : 天井面の内部熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$a_i$  : 天井面の内表面の日射量吸収率 [-]

$a_o$  : 天井面の外表面の日射量吸収率 [-]

$\alpha_i$  : 内表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$\alpha_o$  : 外表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$\theta_i$  : 室内温度 [°C]

$\theta_o$  : 屋外温度 [°C]

$\theta_c$  : 天井質点の温度 [°C]

$\theta_{d,5}$  : 天井断熱材質点の温度 [°C]

## 3) 床面

式(5.22)、式(5.23)に床面の熱平衡式を示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_f \frac{d\theta_f}{dt} = C_{d,6}(\theta_{d,6} - \theta_f) + C_{i,6}(\theta_i - \theta_f) + \frac{C_{i,6}}{\alpha_i} a_i I_{i,6} \\ Q_{d,6} \frac{d\theta_{d,6}}{dt} = C_{o,6}(\theta_g - \theta_{d,6}) + C_{d,6}(\theta_f - \theta_{d,6}) \end{array} \right. \quad (5.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{d,6} \frac{d\theta_{d,6}}{dt} = C_{o,6}(\theta_g - \theta_{d,6}) + C_{d,6}(\theta_f - \theta_{d,6}) \end{array} \right. \quad (5.23)$$

$I_{i,6}$  : 床面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]

$Q_f$  : 床材の単位面積あたりの熱容量 [J/m<sup>2</sup>°C]

$Q_{d,6}$  : 断熱材の単位面積あたりの熱容量 [J/m<sup>2</sup>°C]

$C_{i,6}$  : 床面の内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{o,6}$  : 床面の外表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{d,6}$  : 床面の内部熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$a_i$  : 床面の内表面の日射量吸収率 [-]

$\alpha_i$  : 内表面総合熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$\theta_i$  : 室内温度 [°C]

$\theta_o$  : 屋外温度 [°C]

$\theta_f$  : 床質点の温度 [°C]

$\theta_{d,6}$  : 床断熱材質点の温度 [°C]

#### 4) 窓面( $n = 1\sim 8$ )

式(5.24)に窓面の熱平衡式を示す。

$$0 = a_g I_{o,n} + C_{o,g} (\theta_o - \theta_{a,n}) + a_g I_{i,n} + C_{i,g} (\theta_i - \theta_{a,n}) \quad (5.24)$$

- $I_{i,n}$  : 各壁面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]
- $I_{o,n}$  : 各壁面の外表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]
- $C_{i,g}$  : 窓面の内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]
- $C_{o,g}$  : 窓面の外表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]
- $a_g$  : ガラスの日射吸収率 [-]
- $\theta_i$  : 室内温度 [°C]
- $\theta_o$  : 屋外温度 [°C]
- $\theta_{a,n}$  : 窓の質点の温度 [°C]

#### 5) 自然換気窓面( $n = 2$ )

式(5.25)に窓面の熱平衡式を示す。

$$Q_{al,n} \frac{d\theta_{al,n}}{dt} = a_{al} I_{o,n} + C_{o,al} (\theta_o - \theta_{al,n}) + a_{al} I_{i,n} + C_{i,al} (\theta_i - \theta_{al,n}) \quad (5.25)$$

- $I_{i,n}$  : 各壁面の内表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]
- $I_{o,n}$  : 各壁面の外表面日射量 [W/m<sup>2</sup>]
- $Q_{al,n}$  : 自然換気窓（アルミ）の単位面積あたりの熱容量 [J/m<sup>2</sup>°C]
- $C_{i,al}$  : 自然換気窓面の内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]
- $C_{o,al}$  : 自然換気窓面の外表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]
- $a_{al}$  : 自然換気窓面（アルミ）の日射吸収率 [-]
- $\theta_i$  : 室内温度 [°C]
- $\theta_o$  : 屋外温度 [°C]
- $\theta_{al,n}$  : 自然換気窓の質点の温度 [°C]

## 6) 室内

式(5.26)にモデル 1 の室内における熱平衡式を示す。

$$Q_r \frac{d\theta}{dt} = \sum_{n=1}^6 A_n C_{i,n} (\theta_{w,n} - \theta_i) + \sum_{n=1}^4 A_{g,n} C_{i,g} (\theta_{a,n} - \theta_i) + C_p \gamma n V (\theta_o - \theta_i) + H \quad (5.26)$$

$A_n$  : 各壁面・天井面・床面の面積 [m<sup>2</sup>] ( $n = 1 \sim 6$ )

$A_{g,n}$  : 各窓面の面積 [m<sup>2</sup>]

$C_p$  : 空気の定圧比熱 [J/kg°C]

$C_{i,n}$  : 各壁面の内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$C_{i,g}$  : 窓面の内表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$H$  : 室内の熱負荷 [W]

$n$  : 換気回数 [回/h]

$Q_r$  : 部屋の熱容量 [J/°C]

$V$  : 室容積 [m<sup>3</sup>]

$\gamma$  : 空気の比重量 [kg/m<sup>3</sup>]

$\theta_i$  : 室内温度 [°C]

$\theta_o$  : 屋外温度 [°C]

$\theta_{w,n}$  : 各壁質点の温度 [°C]

$\theta_{a,n}$  : 窓の質点の温度 [°C]

## 1.8 前進差分法

熱平衡式の式中において、

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{k\theta - k-1\theta}{dt} \quad (5.27)$$

として、2.4.1~2.4.5 に示す 23 個の熱平衡の微分方程式を前進差分法により差分した式を式(5.28)~式(5.36)に示す。1 分間毎と 5 分間毎の計算を行うため  $dt=1$  [min] および  $dt=5$  [min] とし、また、他の単位においてもすべて 1 分間毎および 5 分間毎あたりに換算して、23 個の未知数  $k\theta_i$ 、 $k\theta_{w,1}$ 、 $k\theta_{w,2}$ 、 $k\theta_{w,3}$ 、 $k\theta_{w,4}$ 、 $k\theta_c$ 、 $k\theta_f$ 、 $k\theta_{d,1}$ 、 $k\theta_{d,2}$ 、 $k\theta_{d,3}$ 、 $k\theta_{d,4}$ 、 $k\theta_{d,5}$ 、 $k\theta_{d,6}$ 、 $k\theta_{a,1}$ 、 $k\theta_{a,2}$ 、 $k\theta_{a,3}$ 、 $k\theta_{a,4}$ 、 $k\theta_{a,5}$ 、 $k\theta_{a,6}$ 、 $k\theta_{a,7}$ 、 $k\theta_{a,8}$ 、 $k\theta_{al,1}$ 、 $k\theta_{al,2}$  についての 23 個の連立方程式を逆行列より解いた。



1) 壁面(n=1~4)

$$Q_{w,n} \frac{k\theta_{w,n} - k-1\theta_{w,n}}{dt} = C_{d,n}(k\theta_{d,n} - k\theta_{w,n}) + C_{i,n}(k\theta - k\theta_{w,n}) + \frac{C_{i,n}}{\alpha_i} a_i \times kI_{i,n} \quad (5.28)$$

$$Q_{d,n} \frac{k\theta_{d,n} - k-1\theta_{d,n}}{dt} = C_{o,n}(k\theta_o - k\theta_{d,n}) + C_{d,n}(k\theta_{w,n} - k\theta_{d,n}) + \frac{C_{o,n}}{\alpha_o} a_o \times kI_{o,n} \quad (5.29)$$

2) 天井面(n=5)

$$Q_c \frac{k\theta_c - k-1\theta_c}{dt} = C_{d,n}(k\theta_{d,n} - k\theta_c) + C_{i,n}(k\theta - k\theta_c) + \frac{C_{i,n}}{\alpha_i} a_i \times kI_{i,n} \quad (5.30)$$

$$Q_{d,n} \frac{k\theta_{d,n} - k-1\theta_{d,n}}{dt} = C_{o,n}(k\theta_o - k\theta_{d,n}) + C_{d,n}(k\theta_c - k\theta_{d,n}) + \frac{C_{o,n}}{\alpha_o} a_o \times kI_{o,n} \quad (5.31)$$

3) 床面(n=6)

$$Q_f \frac{k\theta_f - k-1\theta_f}{dt} = C_{d,n}(k\theta_{d,n} - k\theta_f) + C_{i,n}(k\theta - k\theta_f) + \frac{C_{i,n}}{\alpha_i} a_i \times kI_{i,n} \quad (5.32)$$

$$Q_{d,n} \frac{k\theta_{d,n} - k-1\theta_{d,n}}{dt} = C_{o,n} \times (k\theta_g - k\theta_{d,n}) + C_{o,n} \times (k\theta_g - k\theta_{d,n}) \quad (5.33)$$

4) 窓面(n=1~8)

$$0 = a_g \times kI_{o,n} + C_{o,g}(k\theta_o - k\theta_{a,n}) + a_g \times kI_{i,n} + C_{i,g}(k\theta_i - k\theta_{a,n}) \quad (5.34)$$

5) 自然換気窓面(n=1, 2)

$$Q_{al,n} \frac{k\theta_{al,n} - k-1\theta_{al,n}}{dt} = a_{al} \times_k I_{o,n} + C_{o,al}(k\theta_o - k\theta_{al,n}) + a_{al} \times_k I_{i,n} + C_{i,al}(k\theta_i - k\theta_{al,n}) \quad (5.35)$$

6) 室内

$$Q_r \frac{k\theta_i - k-1\theta_i}{dt} = \sum_{n=1}^6 A_n C_{i,n}(k\theta_{w,n} - k\theta_i) + \sum_{n=1}^4 A_{g,n} \times C_{i,g}(k\theta_{a,n} - k\theta_i) + C_p \mathcal{M}V(k\theta_o - k\theta_i) +_k H \quad (5.36)$$

## 1. 燃料電池発電モデル (SOFC)

燃料電池の発電量は最大 700W で、それ以下は電力消費量の入力値と同値となる。

式 (5.37) に発電効率の算出式を示す。

$$K_{ce} = 0.0002 E_c + 0.3061 \quad (5.37)$$

$K_{ce}$  : 発電効率[-]  
 $E_c$  : 発電量[W]

式 (5.38) に燃料電池ガス流量の算出式を示す。

$$V = E_c / (G_c \times K_{ce}) \times t \quad (5.38)$$

$V$  : 燃料電池ガス流量[m<sup>3</sup>]  
 $t$  : 発電時間[s]

式 (5.39) に燃料電池排熱量の算出式を示す。

$$Q = V \times G_c \times K_{ch} \quad (5.39)$$

$Q$  : 燃料電池排熱量[J]  
 $K_{ch}$  : 給湯効率[-]

式 (5.40) に貯湯温度の算出式を示す。

$$T_{ct} = T'_{ct} + Q / (C_p \times V_{ct}) \quad (5.40)$$

$T_{ct}$  : 貯湯温度[°C]  
 $T'_{ct}$  : 前回貯湯温度[°C]  
 $V_{ct}$  : 貯湯タンク容量[m<sup>3</sup>]

給湯を行った場合は、以降に示す式を用いて、貯湯タンクからの出湯、貯湯タンクへの給水を模擬し、補助ボイラーガス消費量を算出する。

式 (5.41) にタンクからの出湯流量の算出式を示す。

$$V_{hw} = V_{sw} \times (T_{sw} - T_{cw}) / (65 - T_{cw}) \quad (5.41)$$

$V_{hw}$  : 出湯流量[m<sup>3</sup>]  
 $V_{sw}$  : 給湯流量[m<sup>3</sup>]  
 $T_{sw}$  : 給湯温度[°C]  
 $T_{cw}$  : 市水温度[°C]

式 (5.42) に補助ボイラーガス流量の算出式を示す。

$$V_{cb} = (65 - T_{ct}) \times (V_{hw} \times C_p) / (K_b \times G_c) \quad (5.42)$$

$V_{cb}$  : 補助ボイラーガス流量[m<sup>3</sup>]  
 $T_{ct}$  : 貯湯温度[°C]

式 (5.43) にタンク給水後の貯湯温度の算出式を示す

$$T_{ct} = (T'_{ct} \times (V_{ct} - V_{hw}) + T_{cw} \times V_{hw}) / V_{ct} \quad (5.43)$$

但し、

$$C_p = 4.186 \times 10^6$$

$$K_b = 0.95$$

$$G_c = 45 \times 10^6 \times 273.15 / (273.15 + 15)$$

## 2. 太陽光発電モデル (PV)

式(5.44)に斜面日射量の算出式を示す。

$$\begin{aligned}
 I &= I_D + I_d \\
 I_D &= I_{DN} \times (\sin \alpha \cos \theta_a + \cos \alpha \sin \theta_a \cos(\theta_A - A)) \\
 I_d &= I_{Sky} \times (1 + \cos \theta_a) / 2
 \end{aligned} \tag{5.44}$$

$I$  : 斜面日射量[W/m<sup>2</sup>]  
 $I_{DN}$  : 法線面直達日射量[W/m<sup>2</sup>]  
 $I_{Sky}$  : 水平面天空日射量[W/m<sup>2</sup>]  
 $\alpha$  : 太陽高度[°]  
 $A$  : 太陽方位角[°]  
 $\theta_a$  : パネル水平面設置角度[°]  
 $\theta_A$  : パネル設置方位角[°]

式(5.45)に発電量の算出式を示す。

$$E_{pv} = I \times A_p \times K_{pe} \times \{1 - (K_p + (\theta_p - 25) \times K_{pt})\} \tag{5.45}$$

$E_{pv}$  : 発電量[W]  
 $A_p$  : パネル面積[m<sup>2</sup>]  
 $\theta_p$  : パネル表面温度[°C]  
 $K_{pe}$  : 発電効率[-]  
 $K_{pt}$  : 温度損失係数[-]  
 $K_p$  : その他損失係数[-]

### 3. 蓄電池モデル (BT)

式 (5.46) に蓄電池へ充電した場合の蓄電量の算出式を示す。

$$E_{st} = E'_{st} + E_i \times K_i \quad (5.46)$$

$E_{st}$  : 蓄電量[Wh]  
 $E'_{st}$  : 前回蓄電量[Wh]  
 $E_i$  : 充電量[Wh]  
 $K_i$  : 充電時電力変換効率[-]

式 (5.47) に蓄電池から放電した場合の蓄電量の算出式を示す。

$$E_{st} = E'_{st} + E_o \times K_o \quad (5.47)$$

$E_o$  : 放電量[Wh]  
 $K_o$  : 放電時電力変換効率[-]

## 4. エコキュートモデル (EC)

温度成層再現モデルでは、タンクを5つの温度層 (CV1~5) に分割した。タンクから外部への放熱および各温度層間での熱収支を計算し、タンク内の温度分布を再現した。HPはタンク最下層 (CV1) から取水し、最上層 (CV5) に出湯するものとした。宅内への給湯時は最上層 (CV5) から取水し、最下層 (CV1) に市水が流入するものとした。

式(5.48)にタンクの最上層温度計算式を示す。

$$C_w \left( \frac{\partial T_i}{\partial t} \right) = \frac{T_{n-1} - T_n}{R_w} + \frac{T_a - T_n}{R_w} + \frac{T_a - T_n}{R_{atop}} \quad (5.48)$$

式(5.49)にタンクの最上層温度計算式を示す。

$$C_w \left( \frac{\partial T_i}{\partial t} \right) = \frac{T_{i-1} - T_i}{R_w} + \frac{T_{i+1} - T_i}{R_w} + \frac{T_a - T_i}{R_a} \quad (5.49)$$

式(5.50)にタンクの最上層温度計算式を示す。

$$C_w \left( \frac{\partial T_i}{\partial t} \right) = \frac{T_2 - T_1}{R_w} + \frac{T_a - T_1}{R_a} + \frac{T_a - T_1}{R_{abot}} \quad (5.50)$$

ここで、熱抵抗値  $R$  はそれぞれ以下のように示される。

$$R_{atop} = \frac{1}{\pi r^2 K_{top}} \quad R_{abot} = \frac{1}{\pi r^2 K_{bot}} \quad R_a = \frac{1}{2\pi r \Delta z K}$$

$$R_w = \frac{\Delta z}{\lambda \pi r^2} \quad C_w = \rho \pi r^2 \Delta z c_p$$

$C_w$  : 水の熱容量[J/K]

$T_i$  : 温度層  $i$  の温度[°C]

$T_a$  : 外気温 [°C]

$t$  : 時間[sec]

$R_w$  : 温度層間の水の熱抵抗[K/W]

$R_a$  : タンク壁面の熱抵抗[K/W]

$R_{atop}$  : タンク天面の熱抵抗[K/W]

$R_{abot}$  : タンク底面の熱抵抗[K/W]

$r$  : 貯湯タンク半径[m]

$K$  : 貯湯タンク中間部の熱貫流率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$K_{top}$  : 貯湯タンク天面の熱貫流率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$K_{bot}$  : 貯湯タンク底面の熱貫流率[W/(m<sup>2</sup>・K)]

$\Delta z$  : 各 CV の高さ[m]

$\lambda$  : 熱伝達率[W/(m・K)]

$\rho$  : 密度[kg/m<sup>3</sup>]

$c_p$  : 低圧比熱[J/(kg・K)]



## **APPENDIX D**

### 第5章 ライフスタイル別エネルギー需要





## 1. 世帯別電力需要

表 5-4 にライフスタイル別家電需要条件を示す。電力消費量は、各住設・家電機器の使用時間、使用タイプ、機器タイプ、待機電力の有無によって設定した。電力需要の時間設定は「SCHEDULE」に従って行った。

Table 5-1 Energy consumption list of home appliance in each lifestyle unit: W

		Multi type	Normal type	Saving type	Standby
Bedroom	Lighting	70	70	70	
	Stand	21	21	21	
Hallway	Lighting (LED)	24	24	24	
Entrance	Lighting (LED)	16	16	16	
Washroom	Lighting (LED)	20	20	20	
	Dryer	800	800	437	
	Washing machine	126	73	50	
Bathroom	Lighting	15	15	15	
	Bath tube	2	2	2	
Living room	Lighting (LED)	132.5	132.5	132.5	
	Vacuum	500	164	108	
	Iron	500	500	500	
	Television	199	64	38	0.2
	Notebook	55	55	55	2.1
	Stand	21	21	21	
Kitchen	Lighting	40	40	40	
	Refrigerator	81	48	35	
	IH	100	726	0	
	Dishwasher	620	620	0	
	Electric kettle	1,000	1,000	0	
	Microwave	1,070	1,070	917	
	Electric rice cooker	123.4	123.4	123.4	0.18
Toilet	Lighting (LED)	8	8	8	
	Bidet	35	26	10	

図1、2に片働き若年夫婦世帯（多消費型）の電力・給湯負荷スケジュール（冬季・中間期・夏季/平日・週末）、図3、4に片働き若年夫婦世帯（標準型）の電力・給湯負荷スケジュール（冬季・中間期・夏季/平日・週末）を示す。

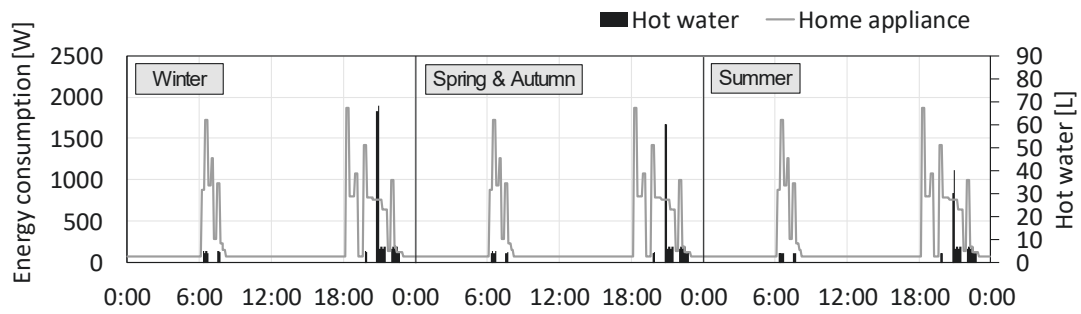


Fig. 1 Multi type of one income in weekday

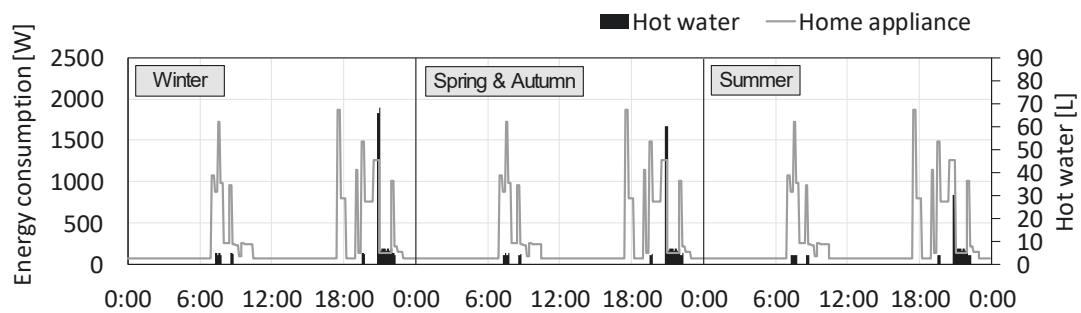


Fig. 2 Multi type of one income in weekend

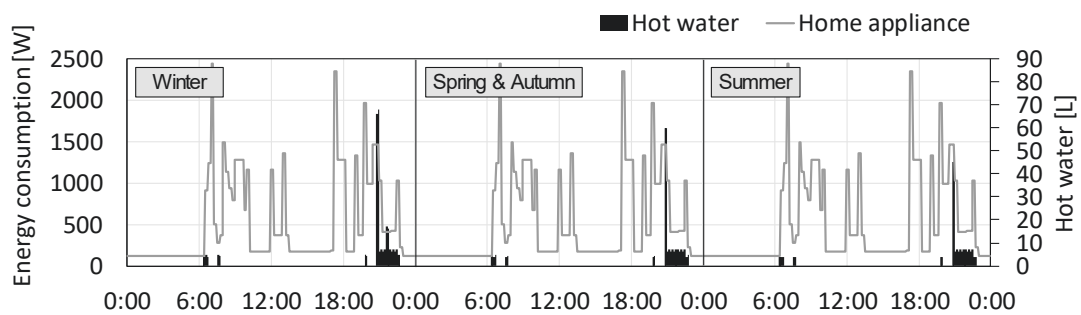


Fig. 3 Normal type of one income in weekday

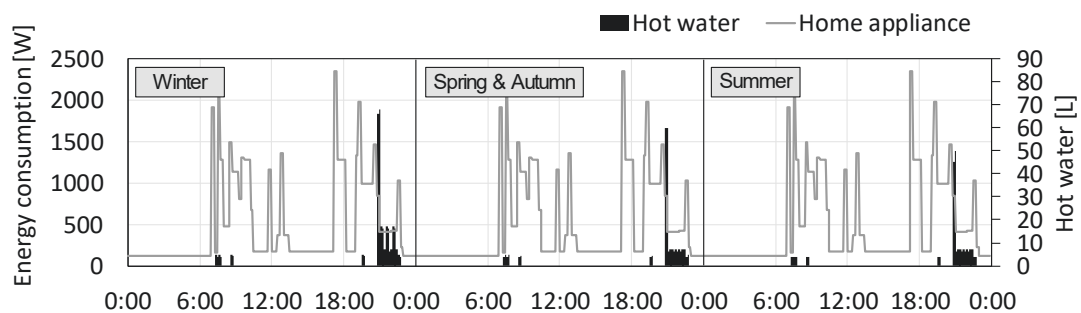


Fig. 4 Normal type of one income in weekend

図5、6に片働き若年夫婦世帯（節約型）の電力・給湯負荷スケジュール（冬季・中間期・夏季/平日・週末）、図7、8に共働き若年夫婦世帯（標準型）の電力・給湯負荷スケジュール（冬季・中間期・夏季/平日・週末）を示す。

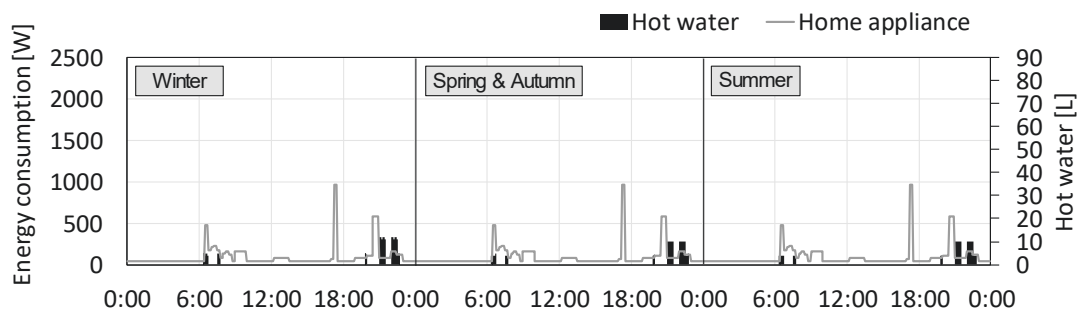


Fig. 5 Saving type of one income in weekday

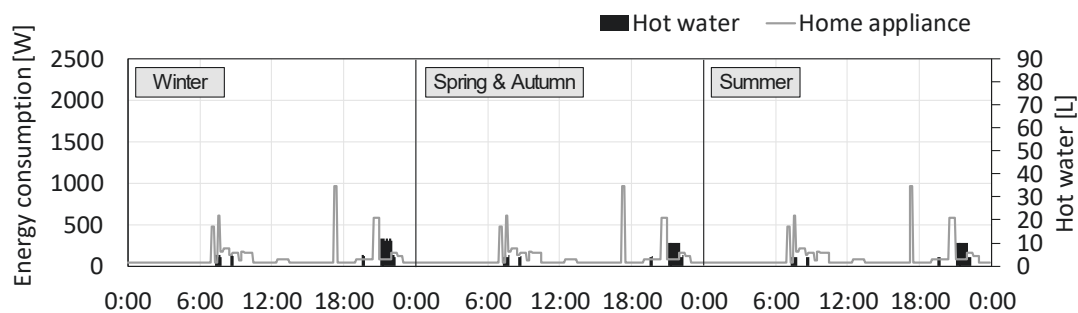


Fig. 6 Saving type of one income in weekend

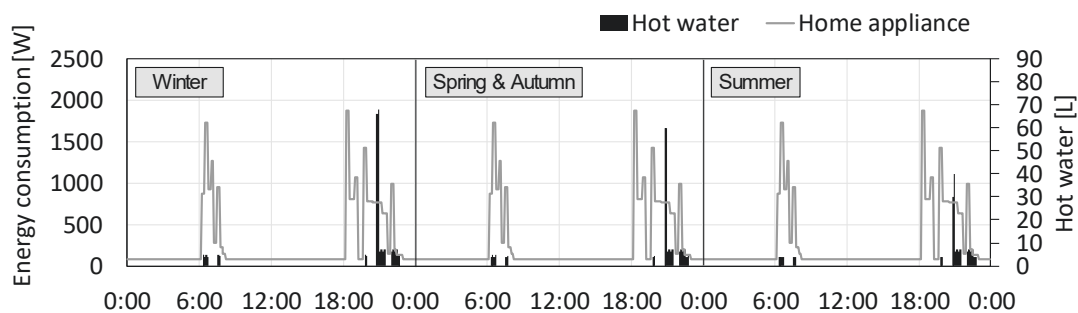


Fig. 7 Normal type of double income in weekday

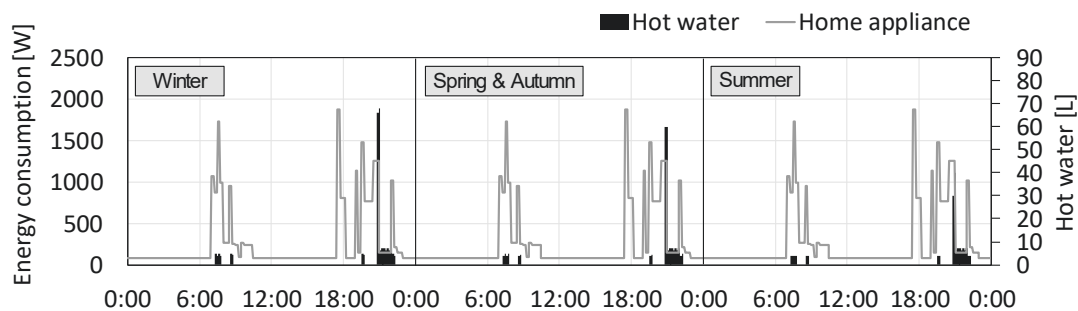


Fig. 8 Normal type of double income in weekend

図9、10に片働き4人世帯（標準型）の電力・給湯負荷スケジュール（冬季・中間期・夏季/平日・週末）、図11、12に共働き4人世帯（標準型）の電力・給湯負荷スケジュール（冬季・中間期・夏季/平日・週末）を示す。

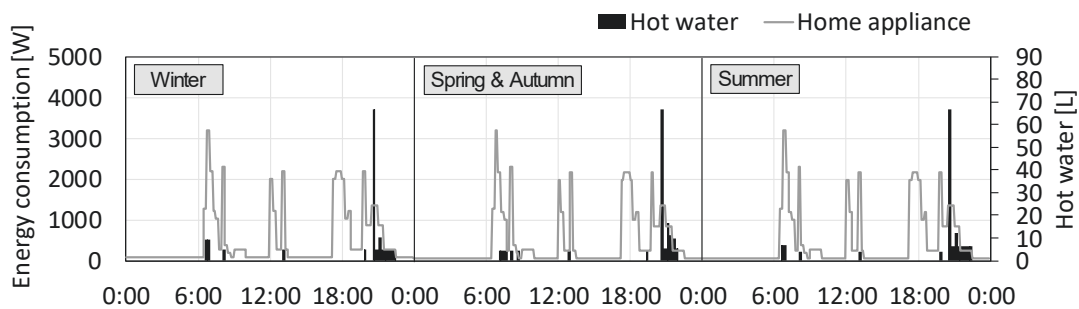


Fig. 9 Normal type of one income in weekday

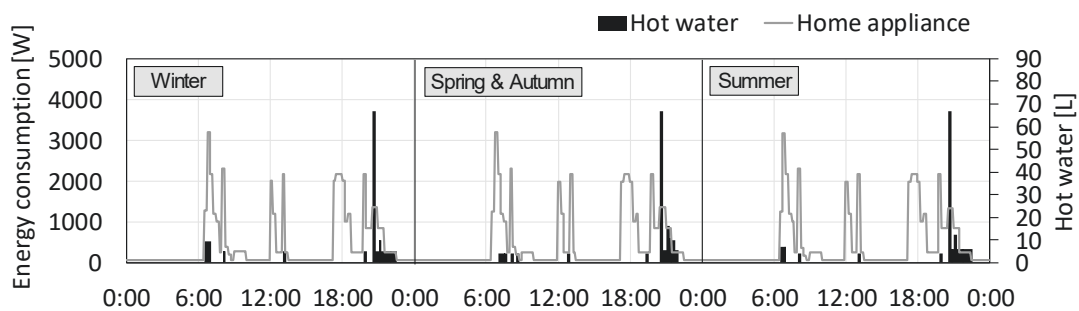


Fig. 10 Normal type of one income in weekend

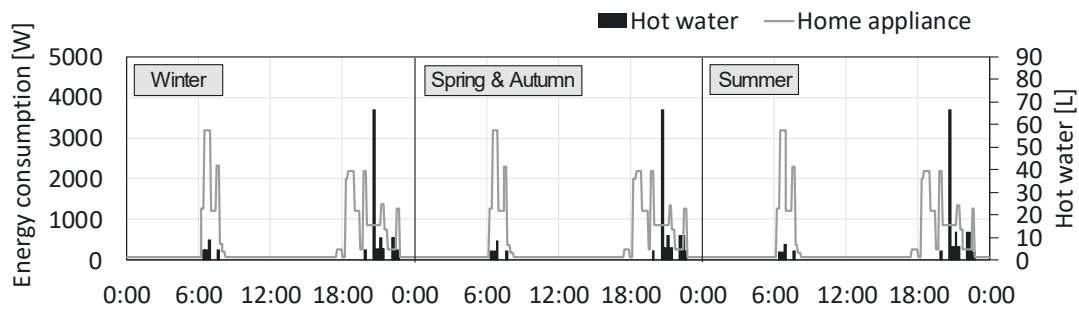


Fig. 11 Normal type of double income in weekday

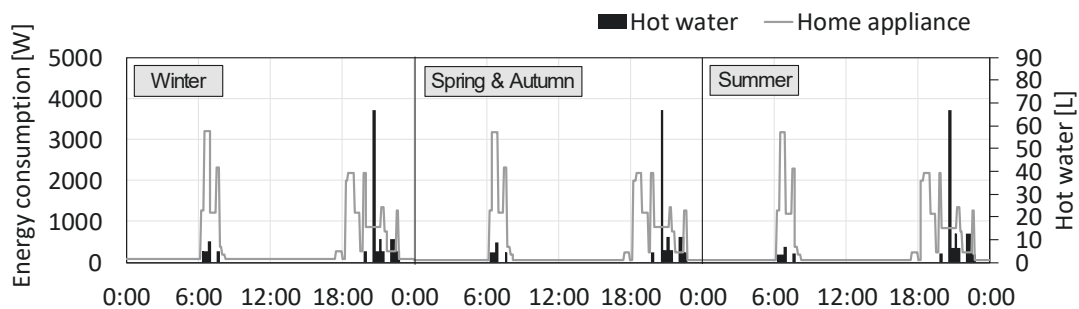


Fig. 12 Normal type of double income in weekend

# **APPENDIX E**

研究業績リスト



## 研究業績

### 査読論文

秋元瑞穂, 金ジョンミン, 常岡優吾, 大木玲奈, 田辺新一, 林泰弘, 森戸直美, 「電気自動車の利用を考慮したゼロ・エネルギー住宅の自家消費運用手法の提案」, 日本建築学会環境系論文集, 一般社団法人日本建築学会, 第 85 巻, 第 770 号, 2020. 04

金ジョンミン, 常岡優吾, 大木玲奈, 田辺新一, 林泰弘, 森戸直美, 「住宅における予冷運転によるデマンドレスポンスへの適応を目指した実証研究」, 日本建築学会環境系論文集, 一般社団法人日本建築学会, 第 85 巻, 第 769 号, 2020. 03

金ジョンミン, 徐天舒, 常岡優吾, 田辺新一, 林泰弘, 森戸直美, 「住宅における予冷予熱運転による太陽光発電電力の有効利用に関する実証研究」, 日本建築学会環境系論文集, 一般社団法人日本建築学会, 第 84 巻, 第 755 号, pp. 73-81, 2019. 01

(韓国語) JungminKIM, MyunghoKIM, A Study on the Correlation Analysis of EEG and Vibrance due to Auditory and Olfactory Stimulation, Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Vol.16, No.6, pp.4291-4297, 2015

(韓国語) JungminKIM, KwangsooSEO, MyunghoKIM, A Study on the Multi-sensory Stimulation of Aroma and Color Temperature effects on Neuro-energy, Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Vol.16, No.5, pp.3579-3586, 2015

(韓国語) JungminKIM, MyunghoKIM, A Study on the Indoor Temperature effects on Neuro-energy, Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Vol.15, No.4, pp.2436-2442, 2014

(韓国語) JungminKIM, MyunghoKIM, Sound Service Modeling for the Improvement of Amenity in Disamenity Environmental Space, The transactions of the korea institute electrical engineers, Vol.62P, No.2, pp.103-109, 2013

(韓国語) MyunghoKIM, JungminKIM, A Study on the Variation of Physiology Signals based on EEG with Humidity, The transactions of the korea institute electrical engineers, Vol.62P, No.1, pp.50-55, 2013

### SCOPUS

JungminKIM, MyunghoKIM, Development of the Multi-sensory Augmented DDC (Direct Digital

Control) to improve the Cognitive Characteristic of the Nursery Facilities, International journal of applied engineering research, ISSN 0973-4562, Vol.11, No.2, pp.1243-1246, 2016

DongsikKANG, **JungminKIM**, MyunghoKIM, A Study about Multi-sensory Stimulation of Fluctuation and Color Temperature effects on Neuro-energy, International journal of applied engineering research, ISSN 0973-4562, Vol.11, No.2, pp.1247-1250, 2016

**JungminKIM**, MyunghoKIM, Construction of the Multi-sensory Service Space to increase the Neuro-energy, International journal of applied engineering research, ISSN 0973-4562, Vol.10, No.11, pp.27569-27574, 2015

#### 国際学会

**Jungmin Kim**, Tianshu Xu, Yuka Maruyama, Yugo Tsuneoka, Shingo Yamaguchi, Shin-ichi Tanabe, Yasuhiro Hayashi, Naomi Morito, 「Verification of thermal comfort and PV generation self-consumption operation effect under precooling operation」, Indoor air 2018

**Jungmin Kim**, Ayane Shibutani, Yuka Maruyama, Tianshu Xu, Yugo Tsuneoka, Junta Fujisawa, Maho Ichikawa, Naomi Morito, Shin-ichi Tanabe, 「Verification of thermal comfort and self-consumption operation effect under preheating operation」, Healthy Buildings 2017 Asia

**JungminKIM**, MyunghoKIM, A Study about Multi-sensory Stimulation effects on Cognitive Characteristic of the Nursery Facilities, International conference on advanced science and technology, 2016

DongsikKANG, **JungminKIM**, JongminKIM, MyunghoKIM, A Study about Multi-sensory Stimulation of Fluctuation and Color Temperature effects on Amenity and Physical Stability, International conference on advanced science and technology, 2016

**JungminKIM**, MyunghoKIM, Design of the Multi-sensory Stimulation Space to improve the Neuro-energy, International conference on advanced science and technology, 2015

#### 国内学会

森戸直美、**金ジョンミン**、大木玲奈、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、「マンドレスポンス適用を目指した予冷運用および居住者行動の効果検証(その1) 温熱環境および電力需要の評価」、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.301-304、2019

---



---

大木玲奈、金ジョンミン、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、森戸直美、「マンドレスポンス適用を目指した予冷運用および居住者行動の効果検証（その2）居住者行動の違いによる快適性・健康性評価」、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.305-308、2019

森戸直美、金ジョンミン、常岡優吾、大木玲奈、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、「デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用に関する研究（その1）温熱環境及び電力需要の評価」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.621-622、2019

大木玲奈、金ジョンミン、常岡優吾、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、森戸直美、「デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用に関する研究（その2）居住者行動が快適性へ及ぼす影響についての被験者実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.623-624、2019

金ジョンミン、大木玲奈、常岡優吾、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、森戸直美、「デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用に関する研究（その3）居住者行動の違いによる快適性評価」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.625-626、2019

常岡優吾、金ジョンミン、山口真吾、田辺新一、林泰弘、「住宅における暖房の予熱運用を用いた太陽光発電の自家消費効果に関する研究（その1）サーマルマネキンを用いた温熱環境評価」、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.109-112、2018

金ジョンミン、常岡優吾、山口真吾、田辺新一、林泰弘、「住宅における暖房の予熱運用を用いた太陽光発電の自家消費効果に関する研究（その2）太陽光発電の自家消費運用に関するエネルギー評価」、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.113-116、2018

森戸直美、金ジョンミン、徐天舒、丸山由香、常岡優吾、山口真吾、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その8）予冷運転による快適性及び自家消費運用効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.557-558、2018

金ジョンミン、徐天舒、丸山由香、常岡優吾、山口真吾、田辺新一、森戸直美、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その9）空調方式による予熱運転の快適性及びPV自家消費運用効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.559-560、2018

金ジョンミン、丸山由香、徐天舒、常岡優吾、森戸直美、田辺新一、「温熱快適性に配慮した太陽光発電の自家消費に関する研究」、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.289-292、2017

---

金ジョンミン、渋谷彩音、丸山由香、徐天舒、常岡優吾、藤澤順太、市川真帆、森戸直美、田辺新一、「ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その 7）予熱運転による快適性及び自家消費運用効果の検証」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.551-552、2017

（韓国語）JungminKIM, DongsikKANG, MyunghoKIM, A Study on the Auditory Stimulus of Educational Facilities Effects on Characteristic of Sense, Recognition, and Behavior, Korean society for emotion and sensibility, Academic conference, pp.238-241, 2015

（韓国語）JungminKIM, YoungjoYOO, MyunghoKIM, JongminKIM, A Study on Analysis of Human's Neuro-energy due to the Indoor Temperature Variation, Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Academic conference, pp.238-241, 2014

（韓国語）YoungjoYOO, JungminKIM, MyunghoKIM, JongminKIM, A Study on efficiency improvement of productivity using the 'a' index of sound source, Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Academic conference, pp.337-339, 2014

（韓国語）JungminKIM, JongminKIM, YoungjoYOO, MyunghoKIM, Multi-sensory Stimulation Modeling for Energy Saving, The society of air-conditioning and refrigerating engineers of korea, Academic conference, pp.251-254, 2013

#### 国際ワークショップ

Jungmin Kim, Reina Oki, Shin-ichi Tanabe, 「Thermal comfort and health evaluation of pre-cooling operation in house」, 2019 JST-NSF-RCN Workshop on Distributed Energy Management Systems, Bellesalle Roppongi, Tokyo, Japan, 2019.6.20-21

#### セミナー

金ジョンミン、大木玲奈、田辺新一、「次世代住宅 / 床暖房 / ZEH」、ACROSS ハイレベルセミナー2 ポスターセッション、早稲田大学日早稲田キャンパス 63 号館 2 階 03-05 室、2019.10.15

謝辭



## 謝 辞

本論文は、2016年から2019年、早稲田大学大学院博士後期課程 田邊新一研究室にて実施した研究の成果をまとめたものです。多くの方々からのご指導ご鞭撻、応援激励とご助言により本論文をまとめることができましたことをここに記し、厚く御礼申し上げます。どうも有り難うございました。

本稿を終えるにあたり、終始丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました、早稲田大学教授 田邊新一先生に、心より感謝と敬愛の意を表します。田邊先生は学問の指導と研究への支援を惜しまず、多くの貴重な機会を与えてくださり、また、研究の進め方や悩みについて親身に相談にのってくださいました。田邊先生から“ジョンミンさんは大丈夫です。頑張ってください。”と一言いただいたことで道を迷わずに前へ進むことができました。心より深く感謝を申し上げます。本当にありがとうございました。

学位論文審査の労をお執りくださいました、早稲田大学教授 長谷見雄二先生、早稲田大学教授 高口洋人先生、芝浦工業大学教授 秋元孝之先生には、暖かいご支援と貴重なご助言を賜りました。記して感謝申し上げます。

早稲田大学教授 林康弘先生には、本研究成果を発表する様々な機会を与えていただきました。また、なかなか接する機会がないスマートグリッドに関する研究を専門の先生方から学ぶことができました。深く感謝いたします。

旭化成ホームズ研究所 森戸直美様、千葉陽輔様、大石匡様、渡辺直哉様には、研究の計画段階から丁寧に数多くのご助言、ご指導をいただきました。また、一緒に学会で発表していただき、貴重な機会をいただきました。本論文3章、4章で得られた成果は森戸様のご協力によって実現した研究を基にしたものです。ご多用の折、実測・実験を行うために様々なご協力をいただき、誠にありがとうございました。心より感謝を申し上げます。また、本研究の趣旨を理解し快く協力して頂いた、被験者実験の皆様には謝意を示します。

私が研究者の道へ進んだのは韓国の嘉泉大学教授 金名鎬(김명호)先生に声をかけていただいたためです。金先生のおかげで早稲田大学へ進学することができました。私がこの場にいられることを心より感謝を申し上げます。

---

早稲田大学建築学科田邊研究室の皆様には、研究室生活を通して、研究に限らず多くのことを学ばせていただき、大変お世話になりました。深く感謝致します。特に、不慣れな研究室での生活で途方に暮れる私に積極的に声をかけ助言と激励をくださった渋谷彩音様、丸山由香様、徐天舒様には感謝の念が絶えません。常岡優吾様、大木玲奈様には、研究の遂行にあたり多大なるご協力、ご助言をいただきました。また、同じ研究グループであった、山口真吾様、菅野颯馬様、秋元瑞穂様、稲葉愛永様におかれましては、共に実験に励み、研究内容について議論できたことは、大変楽しく勉強になりました。ここに記して謝意を表します。對馬聖菜博士、尾方壮行博士には、論文の執筆を進めるにあたり多くのご助言をいただきました。

最後に、これまで私をあたたく見守り、限りない応援をしてくださった両親に心から感謝の意を表して謝辞といたします。

2020年 2月  
金 姫玫

審査委員

主査 早稲田大学理工学術院 教授 工学博士 (早稲田大学) 田邊 新一

田邊 新一 2020年2月6日

早稲田大学理工学術院 教授 工学博士 (早稲田大学) 長谷見雄二

長谷見 雄二 2020年2月6日

早稲田大学理工学術院 教授 博士 (工学) 早稲田大学 高口 洋人

高口 洋人 2020年2月6日

芝浦工業大学建築学部 教授 博士 (工学) 早稲田大学 秋元 孝之

秋元 孝之 2020年2月6日