

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

建築と街区における次世代エネルギーシステムに関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-02-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 今成, 岳人 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1367

博士学位論文

建築と街区における
次世代エネルギーシステムに関する研究

平成 28 年度

(2016 年 9 月)

今成 岳人

目次

目次.....	i
第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的と意義.....	3
1.3 建築と街区におけるエネルギーシステムの現状と課題.....	4
1.4 次世代のエネルギーシステム	5
1.5 関連する既往研究と本研究の特徴.....	6
1.5.1 建物エネルギー消費状況	6
1.5.2 建築物の時刻別エネルギー消費変動および標準負荷データ	7
1.5.3 街区のエネルギーシステム評価に関するシミュレーションツール	8
1.5.4 建物における先進的エネルギー消費削減技術	8
1.5.5 熱融通を伴うエネルギーシミュレーション	9
1.6 論文の構成	10
1.7 要約	12
第2章 空調システムおよび建物用途別エネルギー消費実態の把握.....	13
2.1 序論	13
2.2 代表的な空調システムの特徴	13
2.2.1 個別分散システム	13
2.2.2 建物個別熱源セントラルシステム	14
2.2.3 地域冷暖房システム	15
2.3 空調システム別エネルギー消費状況	16
2.3.1 DECC 基礎データベース概要	16
2.3.2 DECC 最新データの分析	22
2.3.3 空調タイプおよび建物用途別年間一次エネルギー消費量	23
2.3.4 地域冷暖房から熱供給を受ける建物	35
2.4 震災前後のエネルギー消費量の変化	37
2.5 分析のまとめと現状のエネルギーシステムの課題	39
2.5.1 分析のまとめ	39
2.5.2 現状の空調エネルギーシステムの課題	39
2.6 要約	40
第3章 建物用途別負荷データの構築	41
3.1 序論	41
3.2 DECC 詳細データベースの概要.....	41
3.3 データ解析による事務所ビルのエネルギー消費特性	42
3.3.1 分析対象.....	42
3.3.2 時刻別エネルギー消費データ	45

3.4	時刻別標準負荷データの構築.....	47
3.4.1	LCEM ツールを利用した負荷分析.....	47
3.4.2	エネルギー消費量と熱源機出力との関係式の導出.....	47
3.4.3	負荷の計算方法.....	50
3.4.4	エネルギー消費量と熱源機出力との関係式適用における誤差要因.....	50
3.4.5	計算精度の検証.....	51
3.4.6	建物用途別の標準負荷データ.....	54
3.4.7	既存時刻別負荷データとの比較.....	63
3.5	要約.....	68
第4章	建築・街区のエネルギー性能評価シミュレーションツールの開発.....	69
4.1	序論.....	69
4.2	供給側における対策.....	69
4.2.1	エネルギーの面的利用.....	69
4.2.2	スマートエネルギーネットワーク.....	69
4.2.3	地域冷暖房.....	70
4.3	シミュレーションモデル.....	71
4.3.1	計算フロー.....	71
4.3.2	熱源システム.....	72
4.3.3	二次側空調システム.....	81
4.3.4	その他の計算条件等.....	86
4.4	評価ツールの精度検証.....	91
4.4.1	検証用地域冷暖房の概要.....	91
4.4.2	計算条件.....	96
4.4.3	計算結果の検証.....	97
4.5	要約.....	99
第5章	建築物における先進的エネルギー消費量削減の取組み.....	100
5.1	序論.....	100
5.2	需要側建築物における省エネルギー技術.....	100
5.2.1	パンプ的手法.....	101
5.2.2	運用による手法, その他.....	102
5.3	二次側空調システムによる省エネ手法: 天井放射冷暖房.....	103
5.3.1	数値シミュレーションによるエネルギー消費量.....	103
5.3.2	快適性の評価.....	109
5.3.3	天井放射冷暖房についてのまとめ.....	116
5.4	熱源システムの改修による省エネ手法: アースポート ZEB 化への検討.....	116
5.4.1	改修の概要.....	118
5.4.2	各設備の稼働状況.....	120
5.4.3	エネルギー消費量.....	124

5.4.4	室内環境.....	125
5.4.5	ZEB化改修のまとめと今後の展開.....	127
5.5	要約.....	128
第6章	熱融通による次世代エネルギーシステムの評価.....	129
6.1	序論.....	129
6.2	再生可能エネルギー融通によるZEB化の検討.....	129
6.2.1	検討対象施設.....	130
6.2.2	エネルギー融通により建物単体でZEB化を目指すケース.....	131
6.2.3	街区全体でのZEB化の可能性.....	134
6.2.4	再生可能エネルギー設備増設によるZEB化の可能性.....	138
6.3	地域冷暖房プラントの高効率化の検討.....	140
6.3.1	熱源システム構成.....	141
6.3.2	計算条件.....	143
6.3.3	計算結果.....	144
6.3.4	プラントの評価手法.....	150
6.4	プラント間で熱融通するスマートエネルギーネットワーク.....	154
6.4.1	想定街区.....	154
6.4.2	計算条件.....	158
6.5	スマートエネルギーネットワークの効果.....	158
6.5.1	一次エネルギー消費量合計値の評価.....	158
6.5.2	熱融通による評価.....	161
6.6	将来的な街区におけるエネルギーシミュレーション.....	162
6.6.1	エネルギー負荷減少とZEB化の進展.....	162
6.6.2	将来の需要想定.....	162
6.6.3	負荷減少時のシミュレーション.....	163
6.7	エネルギー消費削減技術が普及した場合の効果.....	164
6.8	要約.....	164
第7章	総括および結論.....	166
7.1	各章のまとめおよび総括.....	166
7.2	今後の課題.....	168
7.3	結論.....	169
	記号.....	170
	参考文献.....	173
	謝辞.....	178

第1章 緒論

1.1 研究の背景

地球環境問題に対する意識の高まりの中、エネルギー問題が注目を集めている。地球温暖化による海面水位の上昇や異常気象の増加、海洋・大気・土壌の汚染等は、化石燃料の使用が大きな原因とされている。

エネルギーの使用に際して、有効利用された残りのエネルギーは最終的には排熱として環境に放出されることになる。特にエネルギー消費密度の高い都市部における人工排熱は膨大な量となり、ヒートアイランド現象等の問題が指摘されて久しいが、有効な対策が講じられたとは言い難い状況である。空調システムにより室内側環境を快適にすることの代償として屋外に放出される熱も含め、熱汚染の根幹はエネルギーの使用の問題であり、エネルギーの枯渇を防止するためにも「エネルギーの合理的な利用」いわゆる「省エネルギー」が重要なテーマとなる。

エネルギーの使用に伴い排熱と同様に問題となるのが化石燃料の使用により発生する二酸化炭素（CO₂）であり、温暖化をはじめとする地球規模での問題が指摘されている。先進国はもとより新興国や発展途上国における人々の生活の近代化に伴い、建築・都市におけるエネルギー使用量は急激に増大している。IPCCの第5次報告書第三作業部会報告書¹⁾には、「建築部門は2010年の最終エネルギー消費の32%を占めており、有効な措置がなされなければ、今世紀中頃にはその値は2倍に達する予想である」と記されており、建築部門でのエネルギー削減が急務であると警告している。

日本においては、1970年代の石油ショックを契機に「エネルギーの使用の合理化に関する法律（通称：省エネ法）」を定め、世界に先駆けて化石燃料の合理的な使用（＝効率向上）に取り組んできており、特に産業部門におけるエネルギー消費効率は世界的にトップレベルと言われている。一方で、都市・建築部門は、産業部門と比較すると省エネルギーの進展が遅れている感が否めない。

図1.1に日本におけるエネルギー消費とGDPの変遷を示す²⁾。石油ショックの1973年から2012年まで、実質GDPの伸びが2.4倍であったのに対し、産業部門での最終エネルギー消費量は0.8倍で、エネルギー消費効率が大幅に向上し省エネが高度に進展したことが伺える。一方、民生業務部門では2.8倍と、GDPの伸びを超えるエネルギー消費量の伸びとなっている。直近の2010年～2012年においては、産業、運輸、家庭用各部門がエネルギー消費を削減しているのに対し、業務用部門のみが増加している。このように、地球温暖化対策の面からも、エネルギー消費削減の面からも、都市・建築部門におけるエネルギー消費の削減は急務である。

建築部門のエネルギー消費削減の取組として、EUでは、2002年よりEPBD（Energy Performance of Buildings Directive）³⁾により建築物の省エネルギー性能基準が定められており、2010年の指令では、2018年以降に新築されるすべての公共建築物、2021年にはすべての新築建築物をZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）とすることを各国に求めている。ZEBの定義やZEB化に向けたロードマップ作成等の詳細は各国の決定に委ねられているものの、超省エネであるZEBの法制化を求めている点では、同時期の日本よりもはるかに厳しい取り組みであっ

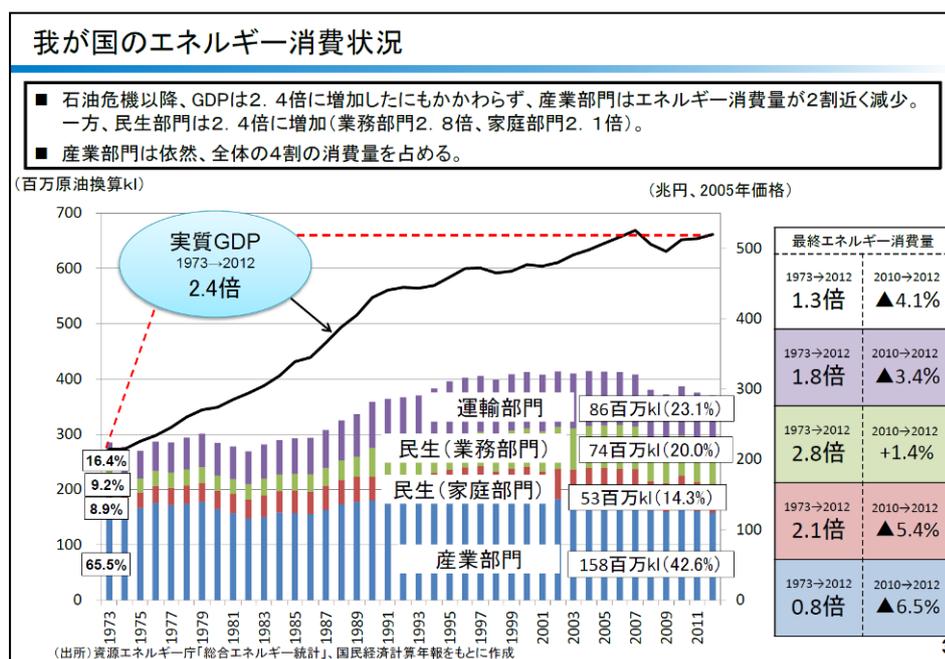


図 1.1 日本におけるエネルギー消費状況
 (総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会 (第2回) 配布資料より)

たと言えるであろう。

日本においては、狭隘な土地に中高層の建物が建設されることが多いため、欧米の事例で見られる、広大な土地において低層建築物の屋根全面に太陽光パネルを設置して ZEB を実現するような、建物単体での ZEB 化は困難なケースが多い。現時点で ZEB には世界的に統一された明確な定義は存在せず、EPBD でも各国の事情に応じて規定するよう定めている。日本においては、2010 年の経済産業省による「ZEB の実現と展開に関する研究会」報告書⁴⁾や「ZEB ロードマップ委員会」によるとりまとめ⁵⁾および空気調和・衛生工学会の「ZEB 定義検討小委員会」等で検討しているが⁶⁾、日本の風土・文化にあった合理的な定義が望まれる。特に太陽光発電パネルのみによる再生可能エネルギー導入には限界があるケースが多いため、近隣ビルとのエネルギー融通をはじめとする、高効率なエネルギー利用に効果的な手法を積極的に評価する必要があり、エネルギー需給システムを含めた総合的な検討が必要である。

明確な四季があり、特に高温高湿度の夏季と低温低湿度の冬季という我が国の気象条件は、室内の湿度や空気質に比較的敏感な居住者の要求と相まって、日本の建築物における空調システムのエネルギー使用量を増加させる一因となっている。夏季の除湿と冬季の加湿にエネルギーが必要なことに加え、熱源機の容量は夏季・冬季のピークに対応させる必要性から、結果として年間のほとんどは部分負荷で運転することになる。また、街区に目を向ければ、平地の少ない日本においては、比較的狭いエリアに高密度に街区が形成されることになる。

このような日本の都市において更なる省エネルギーを進めるための方策のひとつが、次世代のエネルギー需給システムである「スマートエネルギーネットワーク」⁷⁾⁸⁾である。スマートエネルギーネットワークでは、複数建物や地域冷暖房プラントの負荷を集積することにより負荷平準化

が図られること、負荷が大きくなることで、より高効率な大規模システムを採用できることに加え、大規模化により排熱や再生可能エネルギーの導入も比較的容易となる。さらに ICT (Information and Communication Technology: 情報通信技術) を活用したエネルギーの需要側・供給側を統合した最適制御により、常に高効率状態で供給側、利用側双方の機器を稼働させることも可能となる。近年になって、日本国内にも熱融通を活用した高効率なシステムの事例が現れつつある⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。これらのネットワーク化を計画するためには、建物用途それぞれのエネルギー消費構造を把握した上で、熱融通等の時刻別シミュレーションを行い、年間を通してエネルギー供給側・需要側双方が高効率運転となるような事前の検討に基づく計画が必須である。本章では、スマートエネルギーネットワークについて1.4に詳述する。

エネルギー需給システムと同様に、建築物単体においても、更なる省エネルギー化を進展させる必要がある。日本においては、東日本大震災とそれに続く電力需給ひっ迫により、節電対策のひとつとして LED 照明の採用をはじめとする照明分野での省エネ化が飛躍的に進んでいる。これまで、事務所ビルで消費されるエネルギーの約4割が照明、3割が空調と言われていたが¹²⁾、照明器具の省エネ化により相対的に空調によるエネルギー消費の比率が増大しつつある。また、照明器具や OA 機器等の省エネが進むことにより室内発熱が減少し、冬季の暖房負荷増大が現実に観察され始めている。これらから、熱源機等の排熱や自然エネルギーを活用した空調システムの更なる高効率化は非常に重要な課題となっている。

以上述べてきたように、我が国において建築・業務用部門のエネルギー消費削減は急務であるものの、気象条件やそのほかの様々な事情により対応が遅れている状況であり、次世代エネルギーシステム導入等の効果的な対策が切望されている。また、東日本大震災以降に大きく変化したエネルギーの使用状況や建物の熱負荷等についての最新の情報に基づく分析が必要である。

1.2 本研究の目的と意義

前節1.1で述べた背景に対応するため、本研究では都市におけるエネルギー消費を削減するために、建築および街区における次世代のエネルギーシステムであるスマートエネルギーネットワークについて検討し、実現に向けた計画・設計のための基礎データを得ること目的とする。次世代エネルギーシステムの導入による、街区としてのエネルギー消費量削減効果を定量的に把握するための手法を開発する。エネルギー消費削減効果を定量的に把握することにより、対策の優先順位付けや投資評価等が可能となり、対策案を具体的に検討する基礎データとなる。

上記の目的のため、本論文では以下の諸点について考察する。

(1) 建物用途ごとのエネルギー消費状況の把握

実際の建物におけるエネルギー消費実態を、建物用途ごとに空調システム・熱源エネルギー種別に分類する。建物用途および空調システムそれぞれの一次エネルギー消費の特徴を把握することにより、適応したエネルギー消費削減策を検討する基礎データとする。

(2) 時刻別のエネルギー消費・負荷データ

建築・街区における更なるエネルギー削減手法検討のためには、建物および街区の特性を考慮した上でエネルギー性能を検討・評価する必要がある。そのためには、現状および対策後のエネルギー消費特性を正確にシミュレートするツールが必要であり、そのツールに必要な建物用途ごとの時刻別標準負荷データを作成する。

(3) 建築・街区エネルギー性能評価ツール開発

建築・街区における更なるエネルギー消費削減手法を検討するため、建物および街区の特性を考慮した上でエネルギー性能を検討・評価できるシミュレーションツールを開発する。開発したツールにおいて実測データとの比較により精度を確認した後に、街区におけるエネルギー消費削減のシミュレーションを実施する。

(4) 建築物における先進的なエネルギー消費削減技術

エネルギー消費側である建築物において、エネルギー消費を削減する先進的な技術について検討する。建物二次側空調システムによる削減技術として天井放射冷暖房を、熱源システムについては、ソーラークーリングを含めた熱利用ネットワークを構成して ZEB 化を目指す事例を対象とする。それぞれにおいて、エネルギー消費削減技術を実験・実測や数値シミュレーションにより検証することにより、その特徴と効果を把握し、将来的な建築と街区のエネルギーシミュレーションの入力データの一部とする。

(5) スマートエネルギーネットワークの効果

熱融通を活用したスマートエネルギーネットワークの効果を定量的に把握するため、(3)で開発した評価ツールを地域冷暖房間の熱融通ケースに適用する。更に将来を想定した街区・建築におけるスマートエネルギーネットワークの有用性を評価する。

以上の通り、次世代エネルギーシステムとして期待されているスマートエネルギーネットワークの効果について検討し、導入によるエネルギー消費削減量について定量的予測を試みる。これまで建物単体についてエネルギー消費量削減を検討した研究は多いが、街区全体として、また、エネルギー供給側と需要側双方の統合的な対策を検討した例はほとんどなく、本研究を進める意義は大きいものと考えられる。

1.3 建築と街区におけるエネルギーシステムの現状と課題

都市におけるエネルギーシステムは、これまで主として需要側に着目して検討されてきた。エネルギー消費量を削減しようとする場合は、需要を削減することに注力し、供給側は需要に対応する形を基本として検討されてきた。しかし、需要側のみに着目した対策では、東日本大震災の直後に散見された、空調設備の極端な設定温度緩和により熱源機の部分負荷運転状況が悪化し、設定温度を緩和したにもかかわらずエネルギー消費量が意図されたように減少しない、といった

ような事態を招きがちである。

エネルギーシステムを考える場合は、需要側・供給側双方について検討する必要があるが、双方のバランスは計画時には検討されるものの運用時での対応は十分とはいえない。

計画時においても、供給側能力を決定する際に年間の最大需要に対応できるように能力を設定するが、その際、需要の不確定要素に対応するために需要を過大評価して供給側能力を決定する傾向がある。また、個別分散空調の場合、建物内の空調エリアの状況（方角、隣室等）により、1日のうちの最大需要が発生する時間帯は異なるものであるが、室外機容量を決定する際には安全を見込んで、接続される室内機それぞれの最大能力の合計値を選択してしまうケースがほとんどである。結果として、年間を通して部分負荷運転となり、冷暖房のピーク期以外は極端な低負荷で非効率的な運転をすることになる。

需要集積と稼働時の熱源機台数制御運転等により上記の問題への対応が可能な地域冷暖房においても、需要家側となる街区の再開発が計画通りに進まない場合や、稼働開始後に移転や閉店等の理由で需要家が脱落してしまうこと等により、需要と供給能力の不一致が発生するリスクが存在する。また、ヒートアイランドや温暖化等の気候変動、ZEB化政策の加速等、計画段階で予想し得なかったレベルまで急激に需要が変動する可能性もある。

地域冷暖房や建物の熱源設備等は一旦設置してしまうと20年近くの間大規模更新は困難な状態になるため、将来を含めた様々な変化に対応できるように計画していくことが重要である。しかし、エネルギーシステム、特に空調システムの計画に当たっては、個々の建物・街区における様々な状況を考慮し、いわばオーダーメイド的に進める必要があり、一般解を求めることが非常に困難である。

以上のように、様々な原因により需要側と供給側の不一致が発生し、それに対応すべき一般解が存在しないことが現状のエネルギーシステムの課題となっている。本論文では、その課題に対応し得るシステムとして、スマートエネルギーネットワークを提案し、計画時に個別対応を可能とするシミュレーションツールを開発する。

1.4 次世代のエネルギーシステム

近年、スマートコミュニティーやスマートシティと呼ばれる社会システムの概念が注目され、わが国でも様々な実証事業やプロジェクトが検討・開始されている。スマートコミュニティーとは、再生可能エネルギー・新エネルギーや排熱利用等を含めた多様なエネルギーの導入・面的利用に加えて、ICTを活用しながら、電力、熱、水、交通、医療、生活情報等、あらゆるインフラの統合的な管理・最適制御を実現し、地域全体でエネルギーの有効活用を含めたスマート化を目指す次世代の社会システムである¹³⁾。

スマートコミュニティーを構成する次世代のエネルギーシステムがスマートエネルギーネットワークである。スマートエネルギーネットワークとは、様々なエネルギーシステムと負荷設備を、ICTを活用してスマートに（賢く）制御し、省エネ・省コストとエネルギーセキュリティ向上等多様な付加価値を提供するものである。この場合のエネルギーシステムとは、地域冷暖房プラントのような複数建物に供給する熱源プラントと個々の建物における熱源機器の両方を指す。スマ

ートエネルギーネットワークの主な技術要素，サービス内容は以下のようなものとなる．

- ① 複数建物，複数需要家間の電力，熱融通（エネルギーの面的利用）
- ② 需要集積によるコージェネレーションシステム（以降，CGS）をはじめとする設備機器の大型化による高効率化と単位出力当たりのコスト低減
- ③ 電力，熱（冷水，温水，蒸気）需要に対する系統電力，再生可能エネルギー・未利用エネルギー，CGS・空調機器等のベストミックスによる省エネ・省コスト
- ④ 分散電源の活用による，事故・災害時のエネルギーセキュリティ向上（BCP・LCP 提供）
- ⑤ BEMS／HEMS によるエネルギー管理と負荷平準化／新サービス提供
- ⑥ 今後導入が進むと考えられる電気の時間帯別料金制や需要抑制指令（ディマンドレスポンス：DR）に対応する発電・需要制御
- ⑦ 太陽光発電パネルの大量導入時に懸念される出力変動対策としての CGS の出力調整機能の活用によるネットワーク安定化

スマートエネルギーネットワークの概念を図 1.2 に示す．

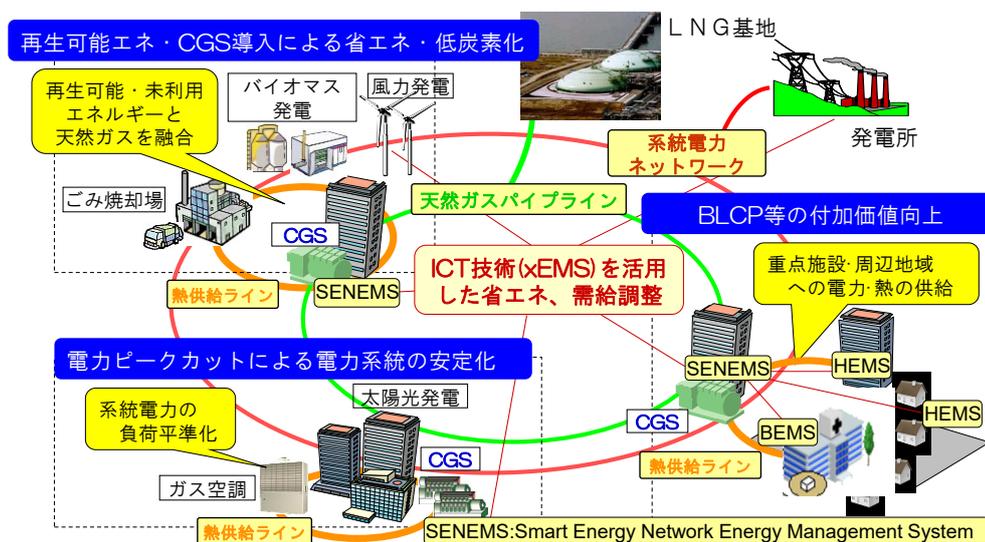


図 1.2 スマートエネルギーネットワークのイメージ

本論文では，街区におけるスマートエネルギーネットワークの構築について，主として冷暖房空調システムに着目し，その効果を定量的に把握するとともに，将来を想定した街区における効果について試算する．

1.5 関連する既往研究と本研究の特徴

1.5.1 建物エネルギー消費状況

建築・都市部門のエネルギー使用量削減を検討する際には，現在の建築物の実態を把握すること，具体的には建物概要とエネルギー使用量に関するデータベースが不可欠であるが，日本においては大学等の研究機関により断続的に，あるいは限られた用途や地域において調査されている

のみであった。米国では省エネ政策の基礎資料とするため、エネルギー省（Department of Energy：DOE）が1986年から3～4年おきに調査を実施し、CBECS（Commercial Building Energy Consumption Survey）¹⁴と呼ばれるデータベースを作成しているが、サンプル調査から一般解を求める拡大調査であるため、その一般性を巡って議論があり、いったん調査したデータが公表中止となる等、2003年版以降の公開が遅れている。カリフォルニア州ではCEUS（Commercial End-Use Survey）¹⁵と呼ばれる、時刻別のデータを含む詳細なデータベースが整備されつつある。EUでもODYSSEE¹⁶と呼ばれるエネルギー効率データベースや、不動産取引時の省エネ診断等を義務付けたEPBDがある。いずれもエネルギー使用量についてのデータベースであり、空調システムをはじめとするエネルギーシステムを設計する際に必要となる時刻別の熱負荷については別途推算する必要があるが、推算に必要なエネルギー消費機器の情報は十分でないケースが多い。

日本においては、全国33の大学、研究機関が連携し、既存建築物のエネルギー使用量調査を行い、DECC（Database for Energy Consumption of Commercial buildings）としてデータベースを作成した¹⁷。本論文では2013年に公開されたDECCの概要と公開された基礎データベースの概要を述べる。また、最新のDECCデータを用いて、建物用途別に空調システム・熱源エネルギー種ごとにエネルギー消費原単位の分布を分析するとともに、東日本大震災以降のエネルギー消費量の変化についても言及する。

DECCデータの東日本大震災前後のエネルギー消費量の変化について、様々な建物用途・空調システムについて横断的に分析を試みている研究はこれまでほとんどなく、本論文の特徴の一つである。

1.5.2 建築物の時刻別エネルギー消費変動および標準負荷データ

前述したDECCには、時刻別・最終消費先別のデータを格納する「詳細データベース」があり、それを活用した事務所ビルにおける、エネルギー消費タイプ別の時刻別エネルギー消費変動データおよび標準負荷データを作成した結果について述べる。

建物の時刻別・消費先別のエネルギー消費についての調査事例は多くはなく、本論文のように比較的多数の建物データから最新の時刻別エネルギー消費変動を算出した研究は貴重である。

建築物のエネルギーシミュレーション等で用いる時刻別の建物標準負荷については、HASP¹⁸等の動的熱負荷計算によるもの、国交省官庁営繕部の「建築設備設計基準」¹⁹に基づく計算方法、空気調和・衛生工学会「都市ガスによるコージェネレーションシステムの計画・設計と評価」²⁰や「都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用」¹³に掲載された負荷データを用いる方法のほか、古川らによる実測で求めた標準負荷²¹⁾²²⁾²³⁾等がある。実測をベースとする古川らの測定対象の多くは地域冷暖房に接続されており、受入冷温水熱量が明らかなケースであった。地域冷暖房でないケースにおいては、エネルギー消費量から熱負荷を算出する際には、機器効率を定数と仮定して求めている。本論文では熱源機の部分負荷効率を考慮する、より精度の高い計算方法を開発した。特に、GHP（ガスエンジンヒートポンプ）やEHP（電気熱源ヒートポンプ）等の個別分散空調のビルにおける建物全体の時刻別負荷データを算出した事例はこれまで存在せず、個別分散空調のみのビルも含めた標準的な空調負荷データは貴重な資料であると考えられる。

また、本論文では東日本大震災以降の実績データを用いて負荷を算出しており、震災以降のエネルギー使用状況を反映した熱負荷データとしてより現状に近いシミュレーションが可能となっている。

1.5.3 街区のエネルギーシステム評価に関するシミュレーションツール

地域冷暖房システムと建物個別熱源システムの省エネルギー性能の比較を行った研究は今まで比較的多数あり、その一つが実態分析による比較である。「エネルギー高度利用型地域熱供給システム研究会」²⁴⁾では業務施設を対象とした地域冷暖房プラント 108 件と個別熱源システム 36 件のエネルギー効率の実態が分析され、地域冷暖房システムの優位性が確認された。しかし実態分析ではプラント同士を完全に同一条件で比較することは困難であり、省エネルギーとなる要因を定量的に解析することも困難であるため、地域冷暖房システムの省エネルギー性を主張するには説得力に欠ける部分がある。また、実態分析は現時点での評価に留まるため、地域冷暖房システムの今後の改修等の可否を議論する上で必要な予測が行えないという問題もある。

小此木ら²⁵⁾は、同一の条件でエネルギー効率を評価する手法としてシミュレーションを用いてきたが、設計どおりの理想的な熱源システムの運用が仮定されているため、実在する様々な不具合・非効率的な運転等が考慮されておらず、シミュレーション結果で得られたエネルギー効率は実態に比べ高い値となっており、前述の実態分析との整合がとれていない。

地域冷暖房システムのエネルギー消費特性の検討として、名古屋からは実在の熱源プラントを対象としてシミュレーションを行っている²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾。実態分析とシミュレーション結果を比較することで精度の検証を行った上で地域冷暖房の熱負荷集約効果の検証等のケーススタディーを行っている。しかし、システムの評価対象が一次側熱源システムに限られており、CGS による発電や二次側空調システムの評価は行われていない。本論文のように、実測値をベースとする負荷データを入力値とした建物・街区のエネルギーシミュレーションは未実施である。

ライフサイクルエネルギーマネジメント (LCEM) ツールは、国土交通省が官公庁施設の空調システムの最適化を促進するために作成したシミュレーションツールであるが、民間施設的设计・施工・運用においても有用であることから、Web 上に公開されている³⁰⁾。LCEM ツールでは、設計時および運用時における空調熱源システムの運転状況を評価して改善につなげるシミュレーションが可能である。ただし、建築物を前提に開発されているために、融通による搬送ロスの考慮や複数需要家への対応等スマートエネルギーネットワーク導入検討への適用は容易でない。

本論文で開発したシミュレーションモデルは、地域冷暖房やスマートエネルギーネットワークの導入評価を行うためのエネルギー消費量を実用的な精度で求めることができる。また、熱融通の際の熱および圧力損失、いわゆる搬送ロス等も的確に求めることができるため、様々な形態の熱融通についても適切にシミュレート可能である。

1.5.4 建物における先進的エネルギー消費削減技術

建築物における全エネルギー消費構造については、IEA EBC Annex53³¹⁾で建物のエネルギー消費量に影響する 6 つの要素を定義している。すなわち

- ① 気象条件

- ② 建物外皮性能
- ③ 建物設備・エネルギーシステム
- ④ 建物の維持管理状況
- ⑤ 建物利用用途および居住者行動
- ⑥ 室内環境

である。Annex53 ではこれら 6 要素を考慮した建築物のエネルギー消費量評価方法を検討しているが、暖房主体の欧州を中心に検討されており、現在の日本へそのまま適用できるとはいい難く、我が国の気象条件や文化的・慣習的な状況を考慮した分析評価が望まれている。

空調の二次側システムとして快適性と省エネ性の両立が期待される天井放射冷暖房は、1990 年頃から欧州で導入されはじめた³²⁾。天井放射冷暖房では、放射パネルにより顕熱の一部もしくは全てを処理するため、空調機の循環空気量を削減でき空気搬送動力の低減が期待される。一方で、高温多湿の日本の夏季においては放射パネル表面での結露防止のために室内空気の除湿が必須となり、除湿システムのエネルギー消費量について十分に検討する必要がある。欧米を中心にエネルギー消費削減の観点から最適運転条件の研究がなされているが³³⁾³⁴⁾、これまで日本においての研究は多くはない。また、冬季の天井暖房時に「頭寒足熱」の逆となり不快感を生じること懸念される。近年になって潜熱分離空調としての放射冷暖房の研究事例が現れているが、本論文 5.3 では、日本の気象条件における天井放射冷暖房の快適性と省エネ性を被験者実験および数値シミュレーションにより検証する。

ZEB 化については、日本では 2009 年に資源エネルギー庁に設置された「ZEB の実現と展開に関する研究会」⁴⁾が発端となり検討が開始された。5.4 で述べる東京ガスアースポートは、ZEB 化実証の先駆的存在である。「ライフサイクル省エネルギーオフィス」を標榜して設計され、既にトップレベルの省エネビルであったアースポート³⁵⁾を対象として更なる省エネに取り組むことにより、ZEB 化を目指す上での課題抽出と解決策探索を行った。建築物においては、省エネ性を追求するあまり快適性を犠牲にするようなことがあってはならないため、エネルギー消費量の削減と快適性の維持について検討する。

本論文では、上記のような最先端の取り組みによる定量的なエネルギー削減効果を把握し、それらが適用された将来的な街区を想定した場合のエネルギーシミュレーションを実施する。

1.5.5 熱融通を伴うエネルギーシミュレーション

都市におけるエネルギー消費を削減するためには、日本における気候や風土に適応した対応策を検討することが必要である。前述の通り、ZEB 化の進展等により建築物のエネルギー需要は減少していくことが予想される。また、LED 照明の普及や建物内で使用する OA 機器等の高効率化により、室内発熱は減少し冷暖の熱需要バランスも変化していくことが想定される。

そのような状況を考慮し、将来的な街区におけるエネルギーシステムとしてスマートエネルギーネットワークの導入段階の状態を想定する。すなわち、地域冷暖房プラント同志を連携させることにより熱源の低負荷運転を回避し、総合効率の向上をはかる。地域冷暖房プラントの連携については、林ら^{36) 37)}がマイクロソフトエクセルを用いた比較的簡易なシミュレーションツールを開発しているが、エクセルで計算可能な範囲のモデル化となっている。また、実際のエネルギー

プラントを検討・評価することを目的としており、既存システムの改善に主眼を置いている。

本論文第6章では、スマートエネルギーネットワークが適用された将来的な街区を想定し、ZEB化の進展等による負荷の減少に対応しつつエネルギー需要・供給双方の最適化をシミュレーションする。

1.6 論文の構成

本論文の構成を図 1.3 に示す。

第1章では研究の背景および本研究の目的と意義について記述する。現状の都市エネルギーシステムの課題について記し、その対応策としてスマートエネルギーネットワークを提案し、その適切な計画・設計のために必要なデータ整備とシミュレーションツールを開発することを述べる。

第2章では、代表的な空調システムの特徴について述べた後に、DECCの一次エネルギー消費原単位を、建物用途ごとに空調システム・熱源エネルギー種別に分析する。また、東日本大震災前後の建物用途別エネルギー消費原単位の変化について検討し、現状のエネルギーシステムの課題について述べる。

第3章では、第2章の建物用途別のエネルギー消費状況から、事務所ビルを対象に時刻別のエネルギー消費データを分類・解析し、標準エネルギー消費変動データを作成する。更に時刻別のエネルギー消費量データから熱負荷を算出する方法を開発し、精度確認の後にDECC詳細データベースの実物件に適用し、標準熱負荷データを作成する。

第4章では、地域冷暖房評価のためのシミュレーションツールを開発し、第3章で作成した標準負荷データを利用してシミュレーションを行い、実績値との比較により計算精度を確認する。

第5章では、建物側における先進的エネルギー消費削減技術について概説し、空調システムの二次側では天井放射冷暖房を、熱源側ではソーラークーリングおよびCGSにおける熱利用ネットワークについて述べる。ここで求めた建物によるエネルギー消費削減量を第6章で対策技術が普及した際の計算に利用する。

第6章では、熱融通を行う次世代エネルギーシステムの評価を行う。最初に、再生可能エネルギーを近隣と融通することによるZEB化の可能性を簡易計算によって検討する。次に、第3章で作成した負荷データおよび第4章で開発したシミュレーションツールを用いて、地域冷暖房プラントの効率向上のためCGS導入を含む改修シミュレーションを行い、効果を定量的に把握する。その際、CGSを導入した地域冷暖房プラントの評価手法についても言及する。また、スマートエネルギーネットワークの基本的な形態として、地域冷暖房プラント間で熱融通を行う場合の効果を定量的に求める。そして、将来的な街区を想定したエネルギーシミュレーションを行うとともに、本論文で検討したエネルギー消費削減技術が普及した場合の効果を試算する。

第7章は本論文の総括と今後の課題について述べる。

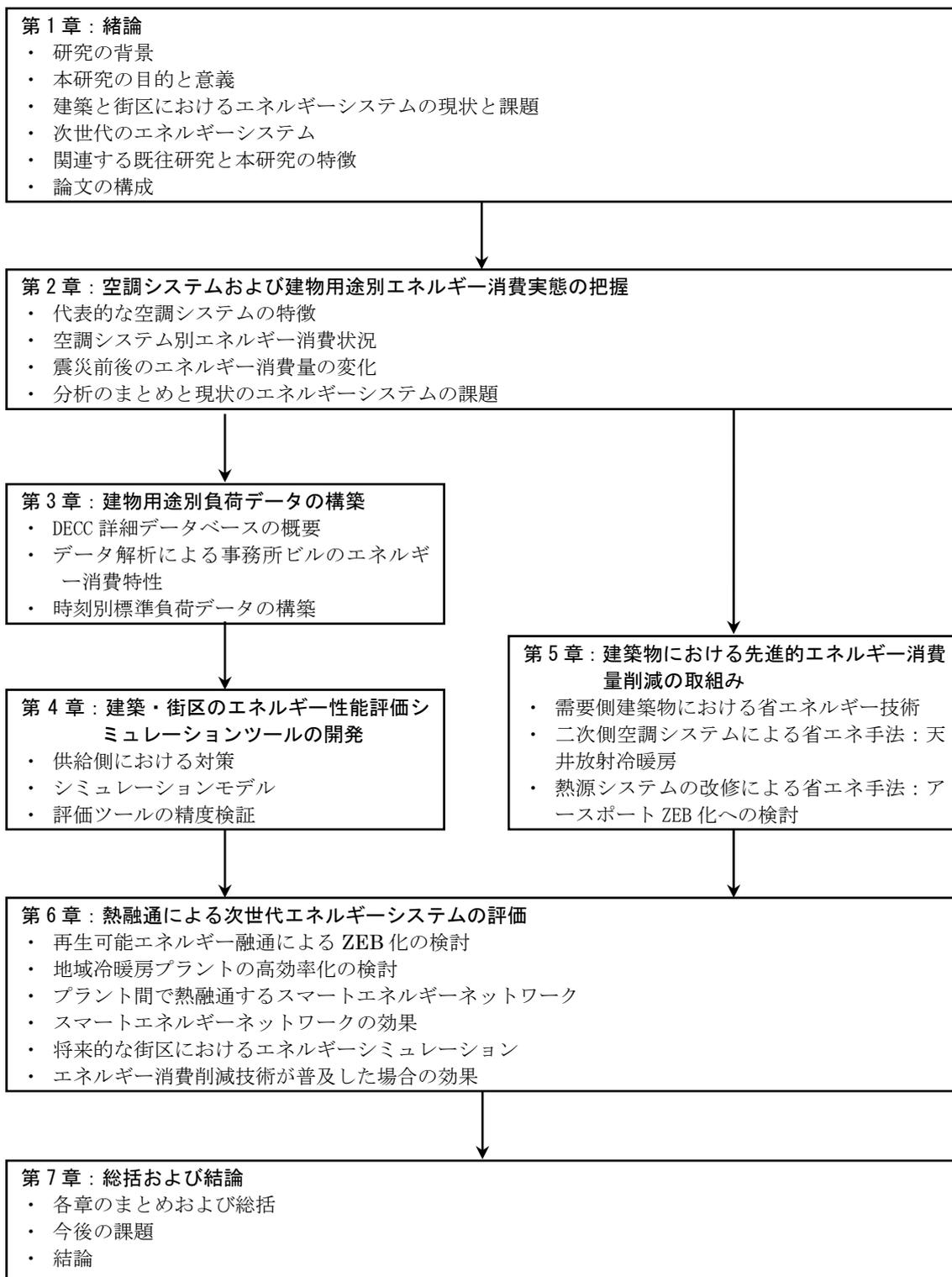


図 1.3 本論文の構成

1.7 要約

本章では、本研究の背景となる、建築・都市部門におけるエネルギー消費削減の必要性について概説し、本研究の目的および既往の研究について述べ、本研究の位置付けを明らかにした。また、本論文の構成について概説した。

本研究では、我が国の都市域における更なるエネルギー消費削減のための次世代エネルギーシステムとしてスマートエネルギーネットワークを提案し、その計画・設計および評価に必要な基礎データの整備と評価シミュレーションツールを開発する。そしてシミュレーションによる定量的な評価から、今後のスマートエネルギーネットワークシステム導入時における基本的な情報を提供することを目的とした。

第2章 空調システムおよび建物用途別エネルギー消費実態の把握

2.1 序論

建築と街区のエネルギー消費削減を検討するためには、現状の空調システムの特徴とエネルギー消費の実態を把握する必要がある。実態把握によって課題を明らかにして解決のための方策を検討する。本章では、代表的な空調システムとして建物個別熱源セントラル空調システムと個別分散空調に加えて、地域冷暖房から熱供給を受ける場合について、DECCの最新データから熱源エネルギー別にエネルギー消費原単位の実態について分析するとともに、現状のシステムにおける課題について考察する。更に、東日本大震災前後のエネルギー消費原単位の変化について、建物用途別に分析する。

2.2 代表的な空調システムの特徴

2.2.1 個別分散システム

個別分散空調システムとは、空調対象エリアそれぞれ個別に熱源機および室内機を設置するタイプの空調システムで、ビル用マルチエアコン（通称ビルマル）に代表される。ビル用マルチエアコンは、1台の室外機で複数の室内機を個別に運転できるエアコンであり、中小規模のビルを中心に広く普及している。図2.1に個別分散システムのイメージを示し、以下に特徴を示す。

長所

- 温度の個別制御が容易に行え、部分稼働が可能（在室者が操作できる）
- テナントビルの場合はテナント別の冷暖房エネルギー使用量の把握が比較的容易
- 既設ビルにも設置が比較的容易
- 空調機械室が不要なため、レントブル比を大きくできる

短所

- 外気導入(換気)のシステムは別途必要であり、冬季の加湿が課題となっている（建物側では設置されずに使用者任せとするケースが多い）
- 再生可能エネルギーとのマッチングは困難
- 過大機器設置による低効率運転となっているケースが非常に多い（過大な安全率および室内機の担当エリアごとの最大値で室外機容量を決める際に、実際には窓方位等により最大負荷は同時には発生しないにもかかわらず最大値の合計で最大容量を決めるため）

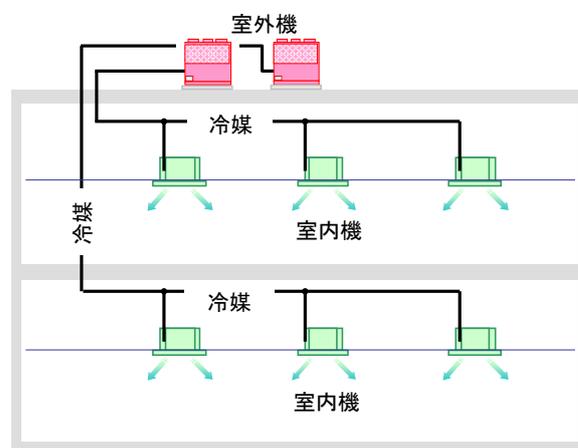


図 2.1 個別分散システムの例

- ・ 実稼働状況（負荷率・COP等）の把握は非常に難しい
- ・ 多数のユニットが分散設置となるので、運転操作の簡略化、集中管理システムの対応等が必要

2.2.2 建物個別熱源セントラルシステム

建物の一部または全体の空調負荷を賄う熱源機を屋上や機械室等に設け、熱源機で製造された冷温水等を空調機に送り空調を行う。図 2.2 に建物個別熱源セントラルシステムのイメージを示す。図のように室内まで冷温水を搬送してファンコイルで空調する場合と、機械室に設置した空調機に冷温水を搬送し、空調空気はダクトで搬送するケースがある。セントラルシステムは比較的大規模なビルで採用されるケースが多い。以下に特徴を示す。

長所

- ・ 熱源機の制御や運転管理等が集中制御となり、比較的容易であるとともに、専門の運転員による高度な運用も期待できる
- ・ CGS 排熱の利用や再生可能エネルギーの導入により高効率な運転が可能
- ・ 加湿システムとの連動、外気冷房等の省エネ運転が可能
- ・ 熱源機の台数制御等により、部分負荷時の対応が可能

短所

- ・ 休日出勤や夜間残業等へのきめ細かな対応等が困難
- ・ テナントビルでは一律の課金システムとなるケースが多く、省エネインセンティブが働かない
- ・ 新築時に計画しないと、既設ビルへの導入は困難
- ・ 個別分散システムに比べるとダクト敷設・冷温水配管等、初期コストが高くなる
- ・ 空調機械室が必要となるケースが多い

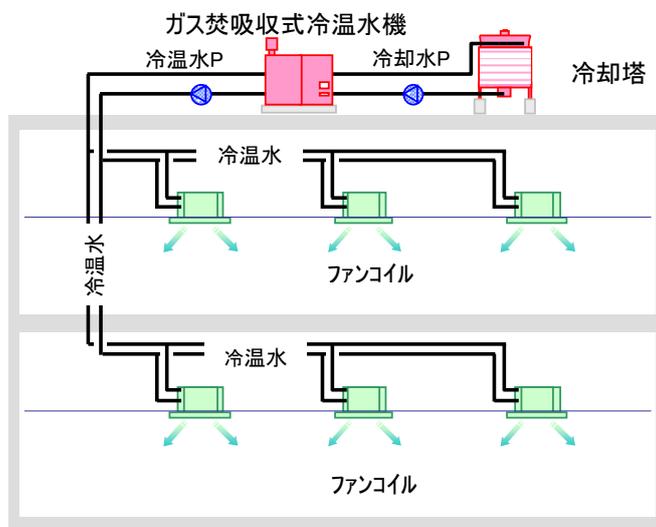


図 2.2 建物個別熱源セントラルシステムの例

2.2.3 地域冷暖房システム

複数建物や需要家に対して冷温熱エネルギーを供給する。通常、冷熱は冷水で供給し、温熱は蒸気と温水のケースがある。近年では、空調用エネルギーに加えて CGS による排熱や電力を供給するケースも現れてきた。地域冷暖房システムのイメージを図 2.3 に示し、主な特徴を以下に示す。

長所

- ・ 負荷集積の効果により、高効率な大規模システムの導入が可能
- ・ 負荷平準化効果により高負荷率運転が可能
- ・ 専門の運転員により高度な省エネ運転が可能
- ・ 多くの大型熱源機は水冷のため、都市のヒートアイランド対策に有効である
- ・ 建物側に熱源機械室が不要となり、レントラブル比を増大できる

短所

- ・ 長期的な需要予測が難しいため、将来負荷を見込んで過剰設備となる傾向があり、結果的に低負荷運転となることがある
- ・ 需要家が脱落すると全体の効率に影響する
- ・ 供給熱の販売価格は熱源システムの初期コストを含むものとなるため、需要ビル側の見かけ上の光熱費が比較的高価となる



図 2.3 地域冷暖房方式の例

2.3 空調システム別エネルギー消費状況

本節では、DECC(Database for Energy Consumption of Commercial buildings)データ¹⁷⁾の分析により、前節 2.2 で述べたそれぞれの空調システムを主な熱源とする建物におけるエネルギー消費状況を分析する。エネルギー消費に影響を及ぼすと思われる事項から以下に示す通り分類した。

気候条件	: 全国平均, 標準地, 寒冷地
空調システム	: 個別分散, 建物個別セントラル, 地域冷暖房
熱源エネルギー種	: ガス熱源, 電気熱源

2.3.1 DECC 基礎データベース概要

DECC は日本サステナブル建築協会に設置された「非住宅建築物の環境関連データベース委員会」により調査・集計された、建築物のエネルギーや水使用量に関するデータベースである。基礎データベースと詳細データベースで構成され、基礎データベースは建築物の月毎の一次エネルギー消費量、詳細データベースは消費先別のエネルギー消費量を時刻毎に保有している。いずれのデータベースも表 2.1 に示すような建物属性情報を保有している³⁸⁾。建物の匿名性を確保するため、公開されているデータベースでは延床面積は階級で示されているが、本研究の第3章では、階級表示でない実際の延床面積を用いている。エネルギーに関連するデータと単位を表 2.2 に示す。

表 2.1 DECC に保存される建物属性データ

(1) 建物ID	調査対象地域ID(アルファベット)+建物用途ID(2桁)+通し番号(6桁)
(2) 地域区分	拡張デグリーデー法における地域区分
(3) 建物用途	建物用途名称(事務所、電算・情報センター、官公庁、デパート・スーパー、その他物販、コンビニ、飲食店、ホテル・旅館、病院、福祉施設、幼稚園・保育園、小学校・中学校、高等学校、大学・専門学校、研究機関、劇場・ホール、展示施設、スポーツ施設、複合施設、家電量販店、郊外大型店舗、一般小売、理髪店・理容店、その他)
(4) 所有形態	自社ビル or 貸しビル
(5) 面積区分 (屋内駐車場面積を除く)	300 m ² 未満 300 m ² 以上 2,000 m ² 未満 2,000 m ² 以上 10,000 m ² 未満 10,000 m ² 以上 30,000 m ² 未満 30,000 m ² 以上
(6) 竣工年代	1位切り捨て
(7) 階数	地上、地下に区分 単位 階
(8) 営業時間	平日、土曜、日曜に区分 単位 h/日
(9) 空調期間	冷房開始月、冷房開始日、冷房終了月、冷房終了日、暖房開始月、暖房開始日、暖房終了月、暖房終了日
(10) 契約電力	単位 W/m ² or VA/m ²

表 2.2 エネルギー消費に関連するデータ・単位

データ	所有データ・単位	単位2
(1) データ収集年度	年度	
(2) 電力消費量	単位 kWh/(m ² ・年)	kWh/(m ² ・月)
(3) ガス消費量	種別 単位 m ³ ×10 ⁻³ /(m ² ・年)	m ³ ×10 ⁻³ /(m ² ・月)
(4) LPG消費量	単位 m ³ ×10 ⁻³ /(m ² ・年) or 単位 g/(m ² ・年)	m ³ ×10 ⁻³ /(m ² ・月) g/(m ² ・月)
(5) 石油類消費量	種別 単位 L/(m ² ・年)	L/(m ² ・月)
(6) 地域熱供給受入量	種別 単位 MJ/(m ² ・年)	MJ/(m ² ・月)
(7) 単位延床面積当たり年間一次エネルギー消費量	単位 MJ/(m ² ・年)	

DECC 基礎データベースは 2013 年 4 月に Web 上に一般公開³⁹⁾された。公開に際しては、以下のような手順で外れ値の除去を行っている。

- ① 建物用途、延床面積、およびエネルギー消費量のどれか一つでも欠けている場合は、当該データは掲載しない
- ② 単位床面積当たり年間一次エネルギー消費量が、①を母数とする建物用途別平均値の 10 分の 1 未満もしくは 10 倍以上の場合は、外れ値として排除
- ③ スミルノフ・グラブス検定で、有意水準を 0.05 に設定して検討を行い、外れ値を排除

ここで、スミルノフ・グラブス検定の概要を以下に示す。

母集団から得た N 個の標本 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ において、標本平均を \bar{x} 、標本分散を s^2 とする。

この中で最大値 x_k が極端に大きい値であるとする。

帰無仮説： x_k は外れ値でない。

対立仮説： x_k は外れ値である

このとき、 $T(x_k)$ を以下の式のように求める。

$$T(x_k) = \frac{x_k - \bar{x}}{s} \quad (2.1)$$

さらにスミルノフ・グラブス検定の有意点 t を求め、 $T(x_k) \geq t$ の時、帰無仮説を棄却し、 $T(x_k) < t$ の時、帰無仮説を採択する。 $T(x_k)$ が棄却された際には、 $N-1$ 個のデータについても同様に検定を繰り返す。これを仮説が採択されるまで続ける。このようにして、他のデータから大きく外れている値を除外する。

DECC では、有意水準 t を 5% として検定を行った。この検定後のサンプルを解析用データとして扱い、一次エネルギー消費量の算出を行った。

上記の外れ値除去の結果として、2013 年 12 月時点で 38,273 件のデータが公開されている。以下、本節 2.3.1 では、2013 年 12 月時点での公開データを対象に分析することとし、次節 2.3.2～2.4 では、震災後の最新の調査結果も含めたデータを対象とする。

収集年度ごとのデータ数を表 2.3 に示す。

表 2.3 公開データ数

年度	データ件数
2006	8,783
2007	12,927
2008	11,782
2010	4,781
公開数	38,273

2011年3月の東日本大震災とその後が続いた電力需給ひっ迫の影響を把握するため、2011年度に緊急調査を行ったが、緊急調査として調査対象を限定したため、2010年度実績のデータ件数が少なくなっている。

DECCで公開されている建物用途ごとのデータ件数を図2.4に示す。ほとんどの建物用途および地域において統計的に有意なデータ数となっている。自治体教育委員会の協力により、非常に多くの小中学校データが集められている。

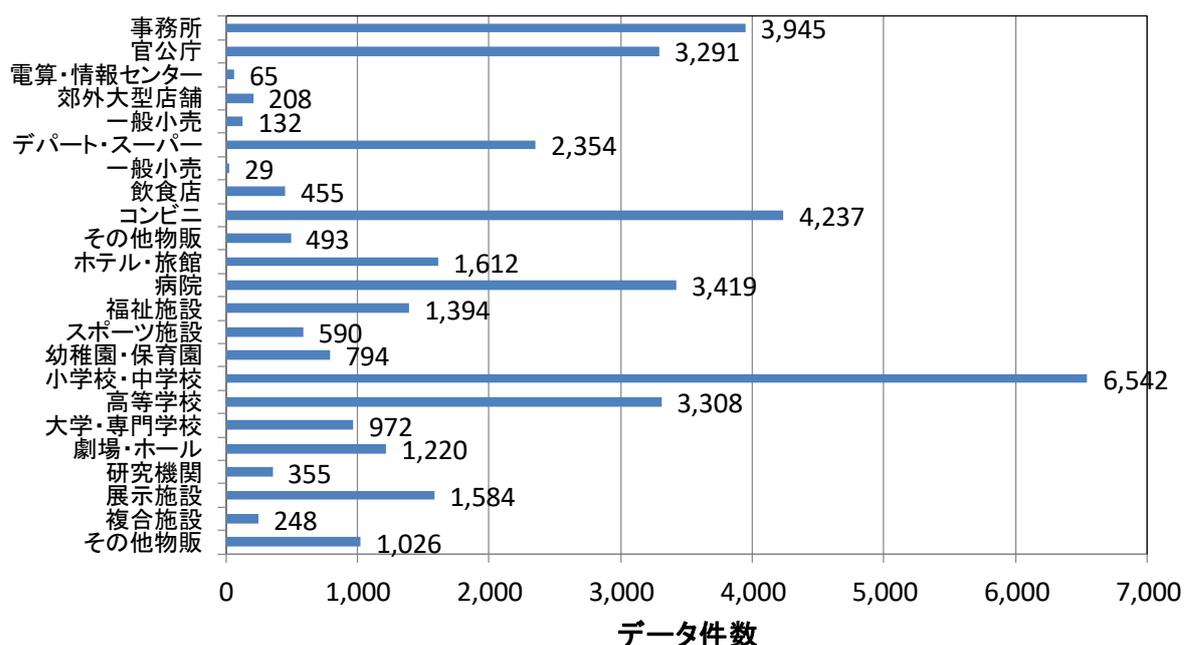


図 2.4 DECC で公開されている建物用途ごとのデータ件数

公開されている2008年度データの建物用途ごとのデータ数と一次エネルギー消費原単位平均値を表2.4に、建物用途ごとのデータ数と一次エネルギー消費原単位の分布を図2.5に示す。2008年度単年度の場合、建物用途によっては統計的に有意なデータ数に満たないケースがあることに注意が必要である。

データセンターやコンビニエンスストア等、24時間稼働している建物では一次エネルギー消費原単位が非常に大きく、一方で夏季休暇等により非稼働日が多く、夜間利用の少ない学校等では一次エネルギー消費原単位が小さいことがわかる。

2008年度の事務所ビルの平均値は1,702 MJ/m²・年であった。事務所ビルのそれぞれの地域区分における、延床面積別・竣工年代別の一次エネルギー消費原単位を図2.6および図2.7に示す。延床面積が大きいほどエネルギー消費原単位も増加する傾向であることが読み取れる。また、エネルギー消費原単位は1990年頃から上昇に転じている。OA化等の進展によりエネルギー使用量が増加したものと推察される。

表 2.4 公開されている2008年度データの集計

		事務所	官公庁	郊外大型店舗	家電量販店	ホテル・旅館	病院	福祉施設	幼稚園・保育園	小・中学校	高校	大学・専門学校	研究機関	劇場・ホール	展示施設	スポーツ施設	複合施設	その他	電算・情報センター	デパート・スーパー	コンビニ	その他物販	飲食店	平均値合計	
北海道	平均値	2,065	1,524			2,286				508	427	927		777	948	1,445				5,853					1,676
	データ数	11	23	0	0	10	0	0	0	342	128	19	0	9	87	11	0	0	0	27	0	0	0	0	667
東北	平均値	1,346	1,054	2,801	2,767	2,550	2,108	1,990	411	330	386	985	2,182	1,198	1,352	2,545				4,624	16,388	2,031	14,350	3,232	
	データ数	232	95	26	37	72	68	92	52	503	257	44	3	36	23	5	0	0	0	206	777	19	12	2,559	
北信越	平均値	1,494	931			2,698	2,287	1,002	432	253	225	732	2,534	910	752	1,164				4,181	10,795		5,301	2,231	
	データ数	29	143	0	0	24	72	88	100	282	156	15	4	25	9	17	0	0	0	51	5	0	2	1,022	
関東	平均値	1,996	1,230	2,871		2,660	2,518	1,996	336	373	304	1,190	2,780	1,446	1,375	2,074	1,620	1,301	20,213	4,655	24,824	3,802	21,779	4,826	
	データ数	359	227	40	0	124	218	0	19	417	220	45	51	80	116	22	7	73	11	79	6	10	16	2,140	
中部	平均値	1,627	1,147			2,554	2,357	1,543	340	282	358	825	2,656	1,063	909	1,695	2,075	1,380		3,492		3,036	10,927	2,126	
	データ数	205	33	0	0	26	125	26	19	369	42	31	12	57	28	29	33	10	0	17	0	7	12	1,081	
関西	平均値	2,006	1,166	1,760		2,628	2,658	1,912	606	296	364	881	2,570	1,086	1,479	3,025	2,724	1,789	9,733	3,717		3,603	28,863	3,643	
	データ数	205	125	3	0	98	173	75	15	26	65	70	22	56	26	55	21	38	14	52	0	20	59	1,218	
中国・四国	平均値	1,449	985	1,679	3,589	2,495	2,231	1,286	218	291	298	865	1,657	1,004	1,351	719		2,118		4,119	9,326		16,286	2,735	
	データ数	189	160	4	1	61	124	108	54	53	127	59	36	55	54	23	0	82	0	90	2	0	16	1,298	
九州	平均値	1,561	1,218			2,455	2,362	1,261	624	225	309	1,041	2,030	971	1,227	715	2,202	528		3,392		1,725	11,636	1,971	
	データ数	145	145	0	0	60	94	47	77	225	194	64	7	179	90	54	9	212	0	42	0	152	1	1,797	
全国	平均値	1,702	1,120	2,735	2,789	2,578	2,414	1,498	436	336	330	952	2,376	1,085	1,217	1,688	2,240	1,114	14,344	4,357	16,399	2,078	22,352	3,915	
	データ数	1,375	951	73	38	475	874	436	336	2,217	1,189	347	135	497	433	216	70	415	25	564	790	208	118	11,782	

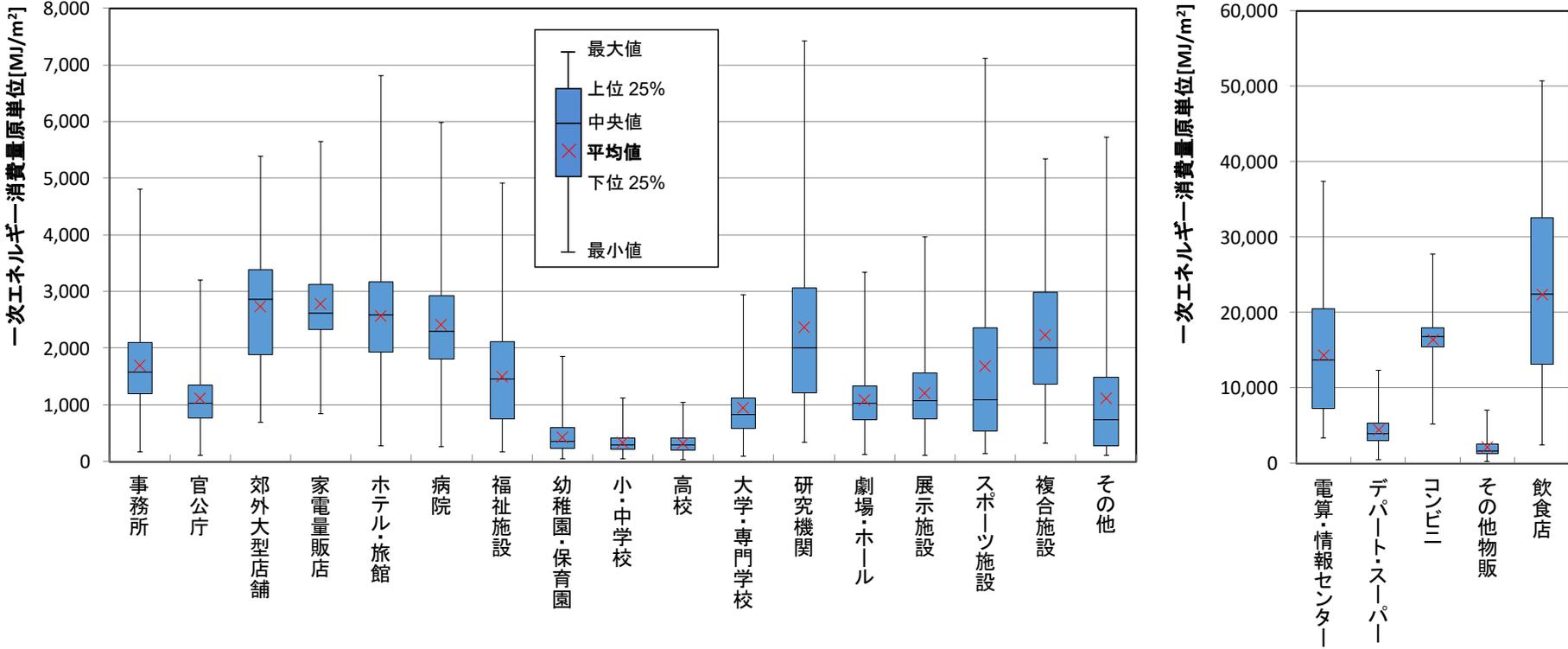


図 2.5 建物用途ごとの 2008 年度一次エネルギー消費原単位の分布

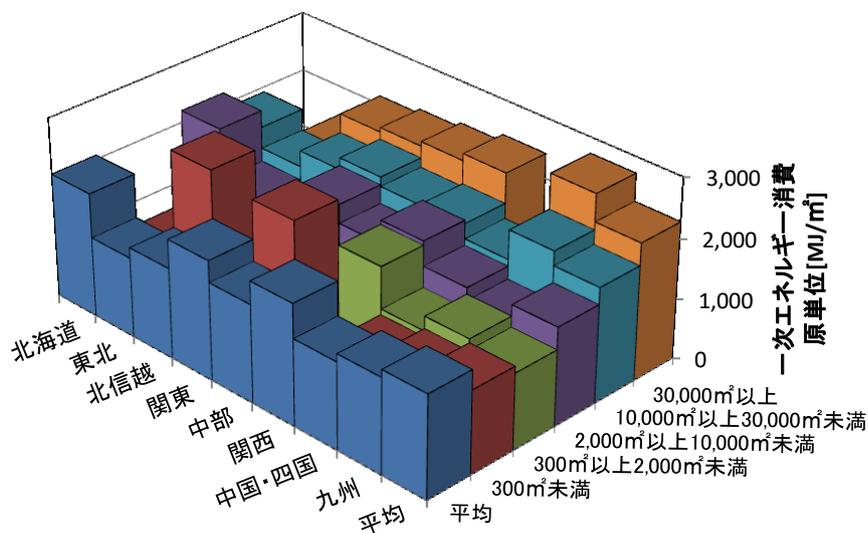


図 2.6 事務所ビルの地域別・延床面積別一次エネルギー消費原単位

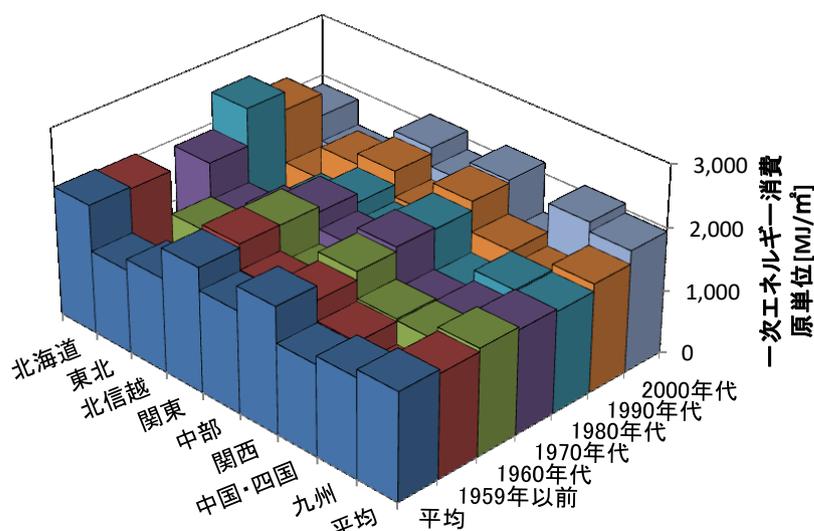


図 2.7 事務所ビルの地域別・竣工年代別一次エネルギー消費原単位

2.3.2 DECC 最新データの分析

前項では公開されている DECC データを用いて分析を行ったが、ここでは、最新のデータを用いて、建物用途ごとのエネルギー消費状況および東日本大震災前後のエネルギー消費量の変化について分析する。分析に用いたのは 2008 年度～2012 年度実績のデータで、データ総数は 11,806 件である。複数年度の調査結果を分析したため、同一建物の実績データが複数年度分含まれているケースがある。分析に用いたデータの建物用途および地域別のデータ数を表 2.5 に示す。

表 2.5 建物用途・地域別データ数

建物用途	地域								合計
	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	
事務所	44	416	502	324	420	294	125	272	2,397
官公庁	70	218	517	294	297	163	101	232	1,892
郊外大型店舗	3	28	53	34	23	6	4	18	169
デパート・スーパー	8	109	84	72	104	75	16	72	540
病院	183	204	310	300	315	111	39	106	1,568
福祉施設	0	178	129	92	143	128	35	36	741
小中学校	146	393	91	347	161	74	23	129	1,364
高校	158	500	74	182	162	208	95	419	1,798
大学・専門学校	49	58	70	86	141	79	36	80	599
研究機関	0	3	66	31	26	21	14	4	165
宿泊施設	13	73	168	86	111	48	28	46	573
合計	674	2,180	2,064	1,848	1,903	1,207	516	1,414	11,806

2.3.3 空調タイプおよび建物用途別年間一次エネルギー消費量

建物エネルギーの省エネルギー・省電力性を検討するため、最新の DECC データによる建物用途別年間一次エネルギー消費原単位を算出し、セントラル空調方式および個別分散空調それぞれについて、熱源のエネルギー種類によりガス空調・電気空調に分けて比較を行った。分析時の各カテゴリーの定義を示す。

- 【ガス空調】 吸収式，GHP 等，全てのガス空調熱源
- 【電気空調】 ターボ型，スクルー型，EHP 機等，全ての電気空調熱源。なお，エネルギー消費量には冬季のボイラ機器等の消費分も含まれる。
- 【地域冷暖房】 地域冷暖房から冷水・温水・直接蒸気のいずれかもしくは複数の供給を受けている建物

建物用途および空調タイプ別のデータ数および年間一次エネルギー消費原単位の平均値を表 2.6～表 2.9 に示す。

表 2.6 建物用途および空調タイプ別データ数および年間一次エネルギー消費量原単位の平均値 (全国データ)

全国		ガスセントラル					電気セントラル					ガス個別分散					電気個別分散				
		300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上
事務所	データ数	16	152	173	34	4	57	260	151	62	3	29	64	20	1	17	185	704	233	25	
	平均値	1,834	1,369	1,591	1,785	1,911	1,162	1,280	1,698	2,083	2,275	1,375	1,376	1,629	1,838	771	1,361	1,261	1,602	1,924	2,292
官公庁	データ数	17	202	171	32	0	72	211	57	12	2	12	39	12	1	25	180	225	42	8	
	平均値	1,172	1,106	1,149	1,403	0	1,045	1,110	1,311	1,415	1,178	984	1,182	1,195	1,827	1,295	976	1,049	1,069	1,500	
デパート・スーパー	データ数	0	7	45	39	0	18	62	76	36	0	0	8	4	2	0	16	109	67	17	
	平均値	0	3,988	3,289	3,349	0	6,188	4,709	3,269	4,380	0	0	3,658	3,296	2,779	0	5,911	4,485	3,468	4,560	
病院	データ数	6	107	177	94	0	13	101	95	52	2	2	63	25	6	2	21	147	94	24	
	平均値	993	1,805	2,401	2,788	3,215	0	1,856	2,338	2,849	3,469	366	1,688	2,130	2,071	2,031	2,349	1,814	2,186	2,467	3,121
福祉施設	データ数	24	57	8	0	2	21	50	5	2	4	28	39	4	0	24	40	85	5	0	
	平均値	990	1,727	1,981	1,623	0	919	1,739	1,794	2,191	1,144	2,112	1,438	1,914	1,258	0	838	1,350	1,903	2,143	0
ホテル・旅館	データ数	4	60	57	18	0	5	65	56	17	0	0	8	2	0	0	14	61	27	7	
	平均値	2,417	2,958	2,862	2,772	0	998	2,911	2,852	3,271	0	0	3,048	2,687	0	0	2,012	2,384	2,966	3,671	
大学・専門学校	データ数	0	31	42	94	0	1	13	26	38	0	3	22	19	30	0	10	37	32	45	
	平均値	0	994	1,183	1,154	0	1,718	796	935	1,147	0	446	1,044	1,059	1,065	0	945	748	860	1,097	
高校	データ数	0	18	49	0	0	1	13	79	1	0	0	28	10	2	0	1	37	244	6	
	平均値	0	496	504	0	0	106	436	411	180	0	0	439	398	660	0	106	342	350	370	
小中学校	データ数	0	22	6	0	0	1	36	0	0	0	0	63	12	0	0	5	310	23	0	
	平均値	0	441	230	0	0	389	310	459	0	0	0	367	284	0	0	280	280	319	0	

表 2.7 建物用途および空調タイプ別データ数および年間一次エネルギー消費量原単位の平均値 (標準地域データ)

全国		ガスセントラル					電気セントラル					ガス個別分散					電気個別分散				
		300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上
事務所	データ数	9	90	133	27	3	21	139	109	51	0	18	47	11	1	2	79	426	175	21	
	平均値	1,512	1,740	1,825	1,897	1,193	1,366	1,832	2,094	2,318	0	1,525	1,746	1,848	771	1,207	1,299	1,703	1,953	2,254	
官公庁	データ数	10	125	116	28	0	25	93	40	6	0	8	26	12	1	20	77	101	23	4	
	平均値	1,290	1,137	1,164	1,371	0	1,032	1,102	1,322	1,576	0	1,042	1,168	1,195	1,827	1,489	1,033	1,113	1,048	1,339	
デパート・スーパー	データ数	0	5	36	30	0	5	26	40	18	0	0	5	3	2	0	8	71	46	12	
	平均値	0	4,200	3,322	3,471	0	6,124	4,527	3,304	4,470	0	0	3,383	3,454	2,779	0	5,684	4,583	3,342	4,975	
病院	データ数	6	72	126	64	0	5	66	48	34	2	2	48	15	2	2	15	99	45	18	
	平均値	1,805	2,421	2,834	3,118	0	1,772	2,381	2,753	3,685	366	1,688	2,208	2,245	1,706	2,349	1,977	2,270	2,346	3,315	
福祉施設	データ数	16	46	6	0	0	11	28	4	2	3	15	32	4	0	18	14	49	4	0	
	平均値	990	2,014	2,038	1,571	0	1,489	1,688	2,198	1,144	1,991	1,624	2,014	1,258	0	707	1,347	1,831	2,139	0	
ホテル・旅館	データ数	4	39	42	16	0	1	35	19	11	0	7	1	0	0	0	14	48	21	6	
	平均値	2,417	3,020	2,845	2,732	0	1,387	2,805	2,961	3,502	0	2,946	3,035	0	0	2,012	2,387	3,047	3,594		
大学・専門学校	データ数	0	24	28	59	0	1	9	14	27	0	2	13	8	18	0	6	22	15	29	
	平均値	0	1,087	1,047	1,155	0	1,718	786	864	1,161	0	414	1,120	733	1,056	0	1,114	826	843	1,073	
高校	データ数	0	9	22	0	0	1	0	25	0	0	0	10	54	1	0	1	5	65	1	
	平均値	0	584	514	0	0	106	0	418	0	0	0	537	392	733	0	106	302	388	572	
小中学校	データ数	0	13	3	0	0	0	23	1	0	0	0	37	5	0	0	0	176	8	0	
	平均値	0	449	114	0	0	0	304	95	0	0	0	361	202	0	0	0	321	283	0	

表 2.8 建物用途および空調タイプ別データ数および年間一次エネルギー消費量原単位の平均値 (寒冷地域データ)

全国		ガスセントラル					電気セントラル					ガス個別分散					電気個別分散				
		300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上	300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上
事務所	データ数	3	17	16	2	1	17	49	26	5	1	6	13	5	0	4	43	99	30	1	
	平均値	1,026	1,425	1,567	952	1,068	1,142	1,564	1,929	2,204	660	1,269	1,132	1,910	0	1,509	1,181	1,505	1,853	2,415	
官公庁	データ数	2	23	18	0	0	11	40	1	1	0	2	5	0	0	0	48	15	1	0	
	平均値	1,091	1,240	1,178	0	0	1,191	1,258	959	248	0	1,091	1,389	0	0	0	1,028	1,087	1,373	0	
デパート・スーパー	データ数	0	2	4	2	0	5	14	16	7	0	0	3	1	0	0	8	28	17	5	
	平均値	0	3,457	3,101	2,721	0	6,054	5,014	3,074	4,057	0	0	4,116	2,823	0	0	6,139	4,263	3,656	3,565	
病院	データ数	0	12	8	11	0	3	17	21	3	0	0	7	2	4	0	3	18	23	1	
	平均値	0	1,851	2,709	3,372	0	2,526	2,168	2,749	3,656	0	0	1,395	1,474	2,194	0	1,543	1,923	2,022	4,105	
福祉施設	データ数	8	4	1	0	1	7	7	0	0	0	10	1	0	0	6	10	15	0	0	
	平均値	1,153	2,248	2,218	0	728	1,917	2,199	0	0	0	1,246	1,562	0	0	1,231	1,528	2,195	0	0	
ホテル・旅館	データ数	0	4	6	0	0	0	20	19	2	0	0	1	1	0	0	0	10	6	0	
	平均値	0	3,055	2,826	0	0	0	2,741	2,670	3,088	0	0	3,760	2,338	0	0	0	2,281	2,682	0	
大学・専門学校	データ数	0	0	4	4	0	0	3	6	6	0	0	1	6	7	0	1	4	3	4	
	平均値	0	0	1,332	1,030	0	0	721	1,147	1,340	0	0	693	1,328	814	0	874	467	550	1,489	
高校	データ数	0	3	13	0	0	0	6	19	0	0	0	5	21	0	0	0	10	26	1	
	平均値	0	416	576	0	0	0	489	438	0	0	0	444	535	0	0	0	448	411	666	
小中学校	データ数	0	9	3	0	0	1	13	4	0	0	0	15	3	0	0	0	15	2	0	
	平均値	0	430	346	0	0	389	320	550	0	0	0	410	346	0	0	0	346	60	0	

表 2.9 建物用途別地域冷暖房ケースのデータ数および年間一次エネルギー消費量原単位の平均値(全国データ)

		地域熱供給				
		300㎡未満	300-2,000㎡	2,000-10,000㎡	10,000-30,000㎡	30,000㎡以上
事務所	データ数	0	0	5	45	107
	平均値	0	0	1,661	2,117	2,333
官公庁	データ数	0	5	16	5	14
	平均値	0	2,384	1,121	1,967	1,778
デパート	データ数	0	1	0	16	22
	平均値	0	6,464	0	3,885	4,094
スーパー	データ数	0	1	5	19	26
	平均値	0	2,290	3,292	3,207	3,281
病院	データ数	0	3	2	2	0
	平均値	0	1,395	901	1,468	0
福祉施設	データ数	0	0	0	19	36
	平均値	0	0	0	3,153	2,558
ホテル・旅館	データ数	0	0	4	5	9
	平均値	0	0	3,514	1,906	1,560
大学・専門学校	データ数	0	0	0	0	0
	平均値	0	0	0	0	0
高校	データ数	0	0	2	1	0
	平均値	0	0	180	1,269	0
小中学校	データ数	0	0	0	0	0
	平均値	0	0	0	0	0

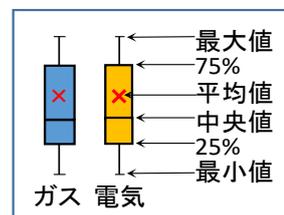


図 2.8 凡例

図 2.9～図 2.17 に建物用途別・空調タイプ別の一次エネルギー消費原単位の分布を熱源エネルギー毎に、全国データ、標準地域および寒冷地域について示す。図中の凡例は図 2.8 に示す通り全てのグラフで同一である。

なお、各地域の定義は以下の通りとする。

【全国】 下記の標準地域・寒冷地域を含む全国。

【標準地域】 「東京,千葉,神奈川,埼玉,茨城,静岡,愛知,三重,京都,大阪,奈良,滋賀,兵庫,和歌山,広島,岡山」の16都道府県。

【寒冷地域】 「北海道,青森,秋田,岩手,山形,宮城,福島,新潟,富山,長野」の10都道府県。

(1) 事務所

事務所ビルでは延床面積が大きくなると一次エネルギー消費原単位も増加する傾向があるが、その傾向は電気熱源の方が大きい。そのため、延床面積 300 m²~2,000 m²では、ガス・電気熱源とも同程度の原単位であるが、延床面積が大きくなるに電気熱源の方が大きい傾向となる。また、ガス熱源の方がデータによるばらつきが少ない。

寒冷地域では暖房負荷が増えるものの、夏季の冷房負荷が少ないことの影響がより顕著であり、標準地域と比較してエネルギー消費原単位が少ない傾向である。

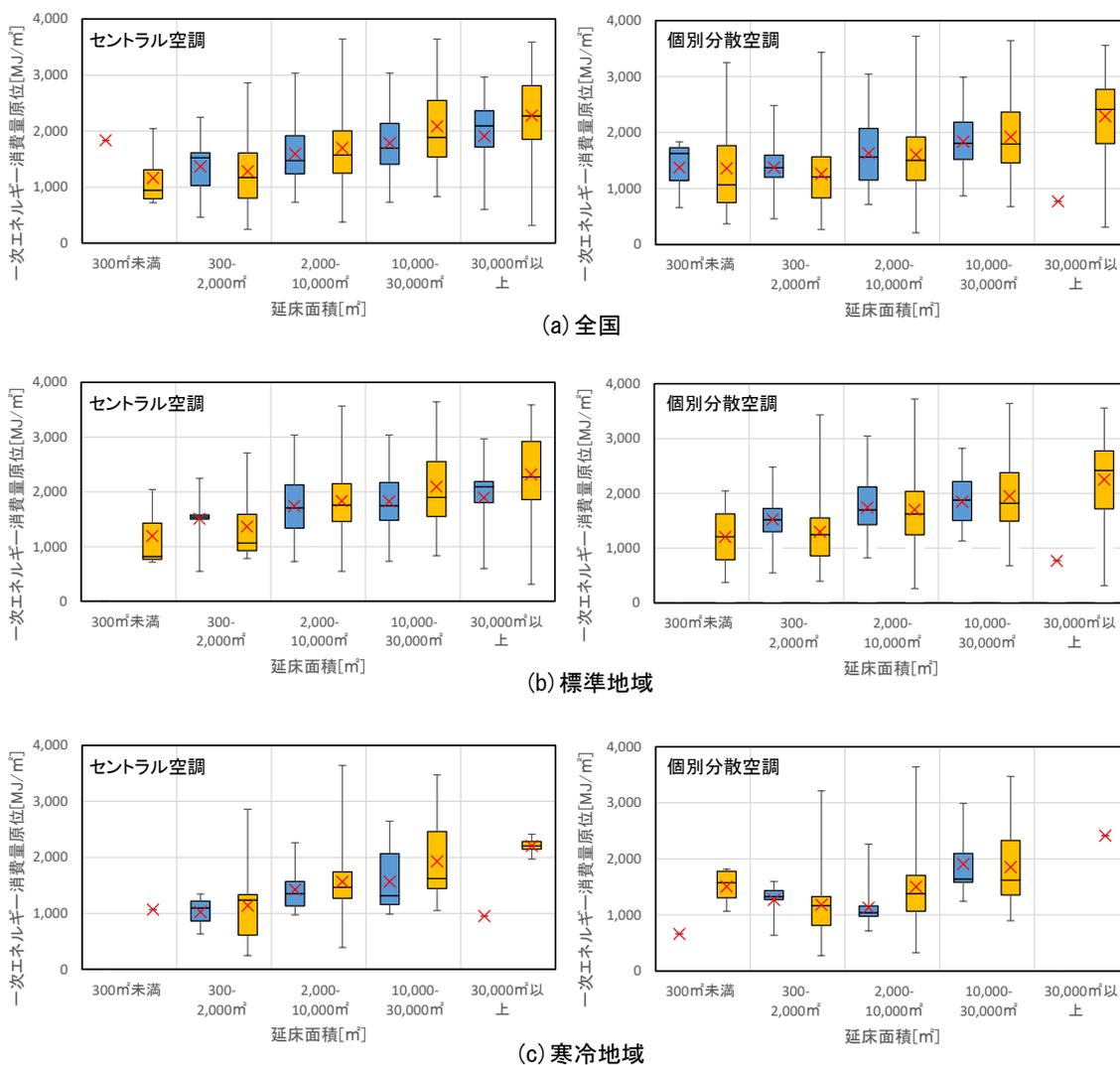


図 2.9 事務所ビルのエネルギー消費量原単位の分布

(2) 官公庁

官公庁は、一次エネルギー消費原単位は事務所よりも小さいが、全国および標準地域のセントラル空調では事務所とほぼ同様の傾向を示している。個別分散空調では延床面積に関わらず概ね一定の原単位となる傾向が見受けられ、寒冷地域と標準地域で原単位はほぼ同様である。

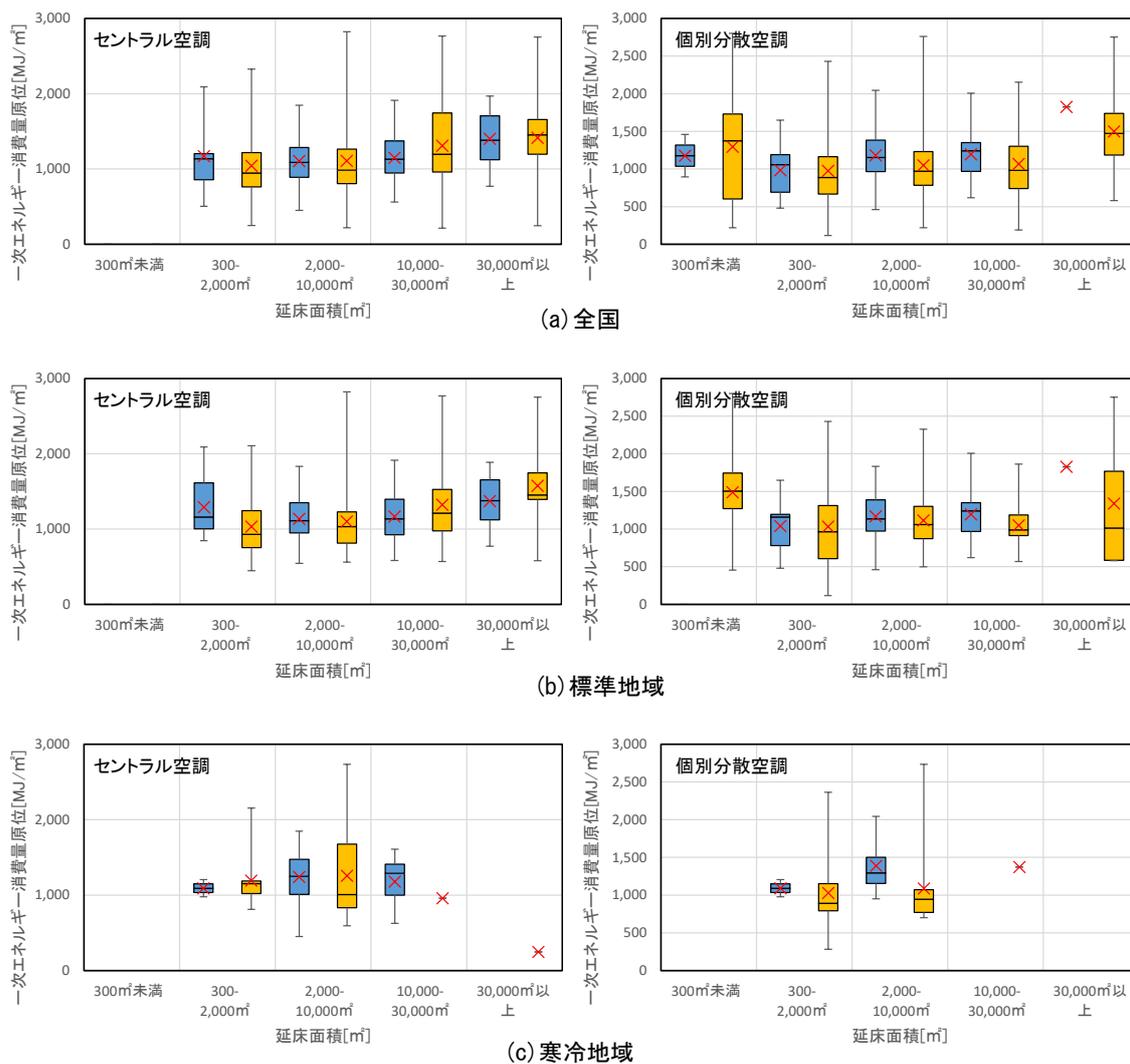


図 2.10 官公庁のエネルギー消費量原単位の分布

(3) デパート・スーパー

デパート・スーパーでは、エネルギー消費原単位が非常に大きく、小規模および大規模の建物でエネルギー消費原単位が大きくなり、延床面積 10,000~30,000 m²で原単位が極小をとる傾向が認められる。他の用途と同様に、ガス熱源の方が電気熱源よりもばらつきが少ない傾向がみられる。また、ガス熱源の方が原単位の低い傾向が認められる。

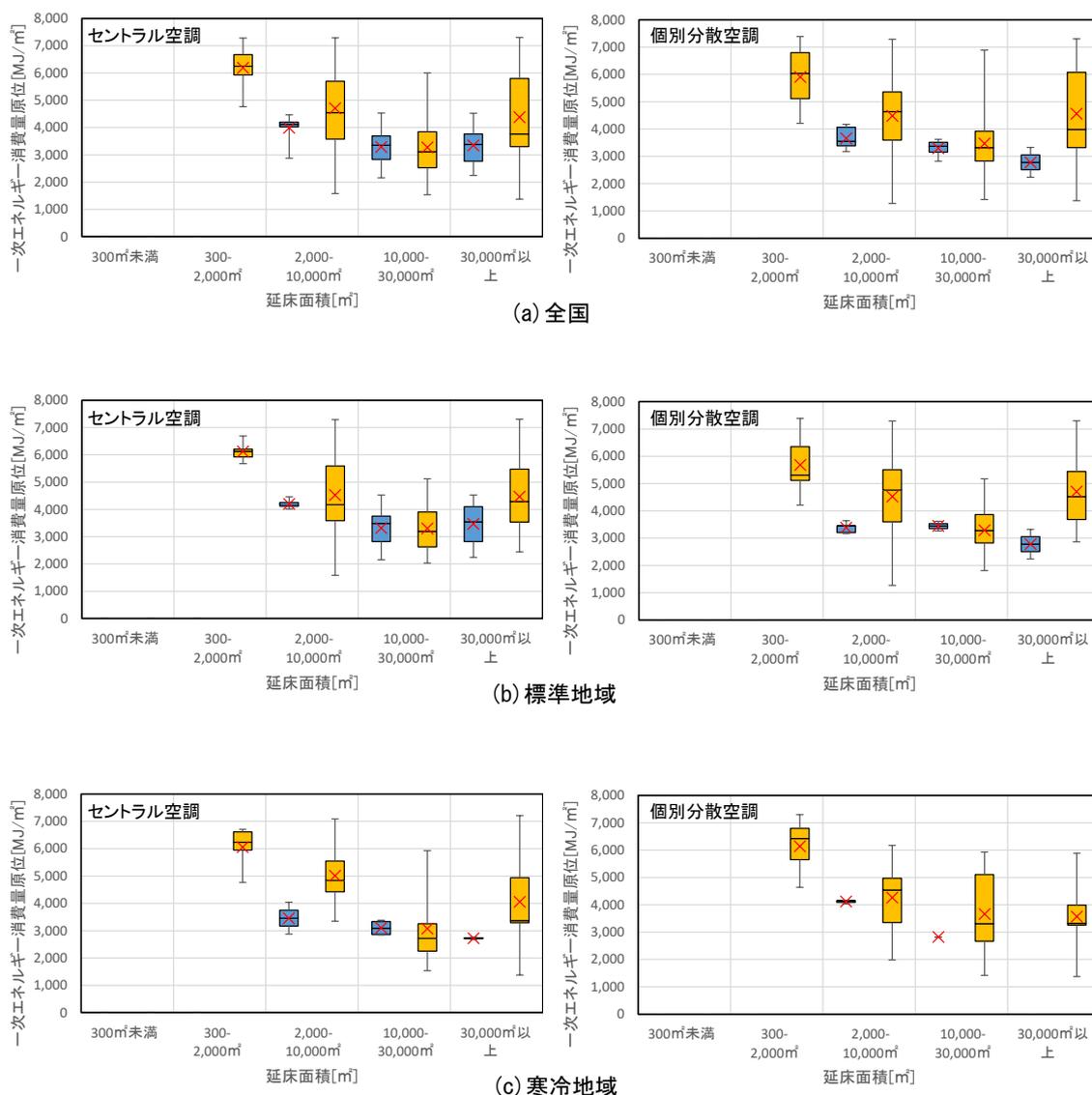


図 2.11 デパート・スーパーのエネルギー消費量原単位の分布

(4) 病院

病院は規模が大きくなるとエネルギー消費原単位も増加する傾向が認められ、特にセントラル空調で顕著である。熱源タイプによる差はほとんど見られず、どちらの熱源においても非常にばらつきが大きい。病院には診療科や稼働機器により、空調以外でのエネルギー消費量が大きく異なることが原因のひとつであろう。

個別分散空調では延床面積との相関がみられないが、これは個別分散空調機を設置するのは、病棟や個室の多い療養所タイプの医療施設が多いためと考えられる。そのため、個別分散空調の方が原単位の低い傾向がみられる。

寒冷地ではガス熱源の方が原単位の低い傾向が認められる。寒冷地は暖房が主体となるが、電気ヒートポンプの場合は低温環境下では能力が低下することが原因と考えられる。

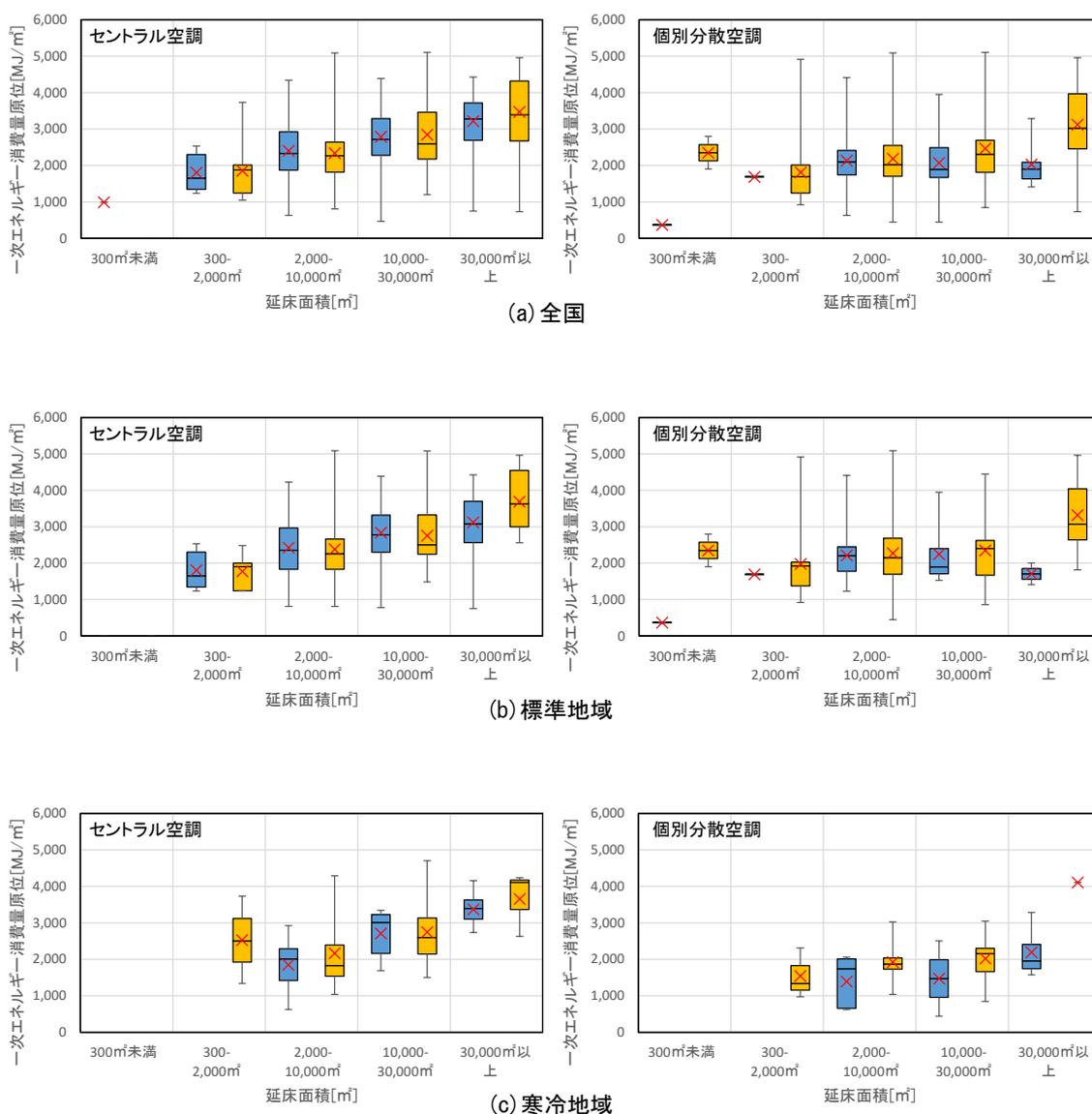


図 2.12 病院のエネルギー消費量原単位の分布

(5) 福祉施設

福祉施設は大規模なものは少なく、延床面積 10,000 m²未満がほとんどである。建物によるばらつきが非常に大きく、熱源による違いはほとんど見られない。給湯負荷の大きな施設ではガス熱源を選択する傾向があるため、ガス熱源の建物の方が原単位の高い傾向となっている。

寒冷地の小規模建物で原単位が低いのは、冷房負荷が小さいためと考えられる。

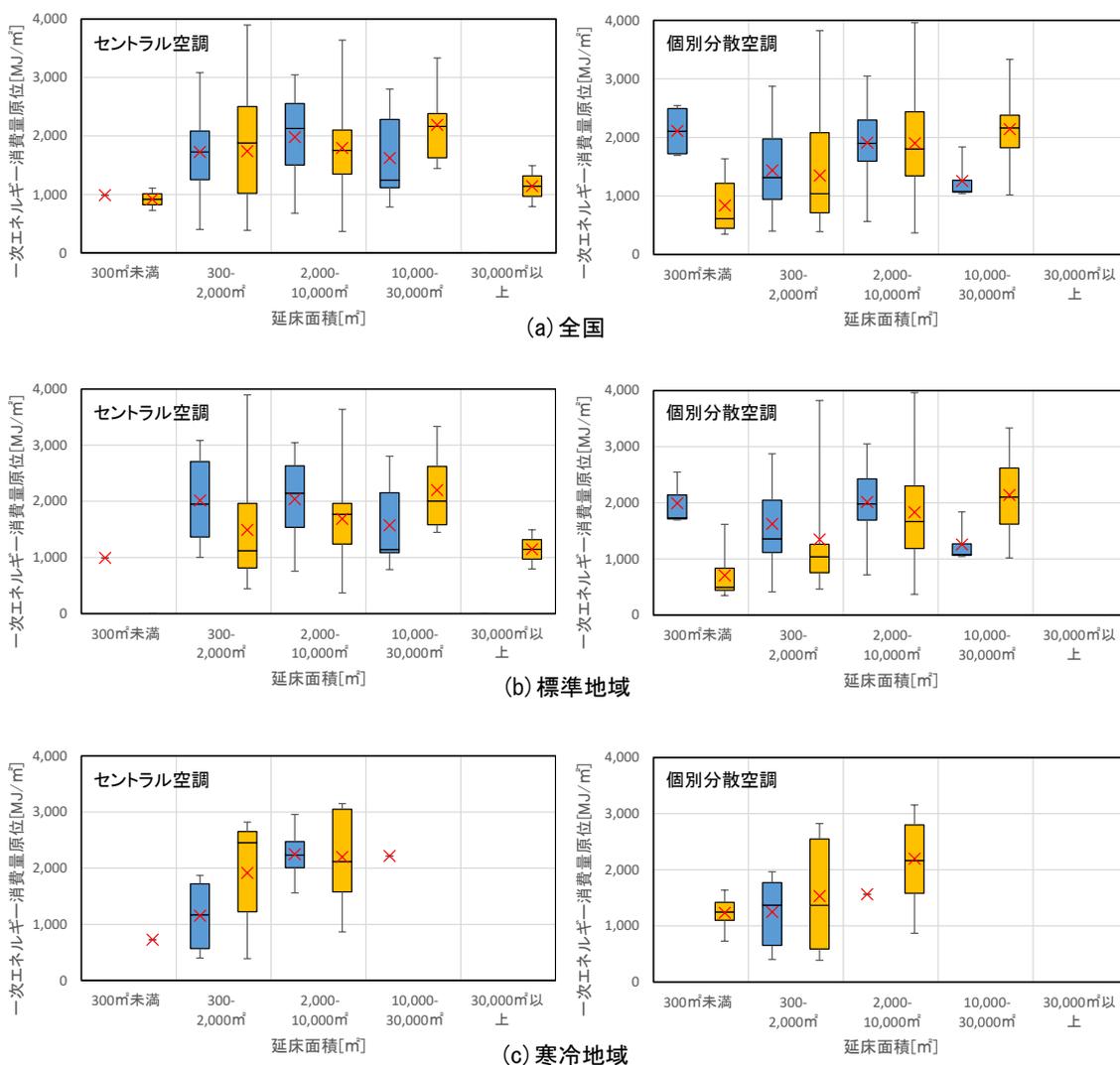


図 2.13 福祉施設のエネルギー消費量原単位の分布

(6) ホテル・旅館

ホテル・旅館は、セントラル空調の場合は規模による原単位の差がほとんど見られないのに対し、個別分散空調では規模が大きくなると原単位も大きくなる傾向がみられる。これは、セントラル空調のホテルは比較的グレードが高く、規模が小さくても宴会場やレストラン等、比較的多くのエネルギーを使用する施設が揃っているのに対し、個別分散のホテルはいわゆるビジネスホテルであり、客室での原単位はほとんど変わらないが、大規模になるほど客室以外の設備も増えていくためと考えられる。

寒冷地域と標準地域で原単位に大きな傾向の違いは見られない。

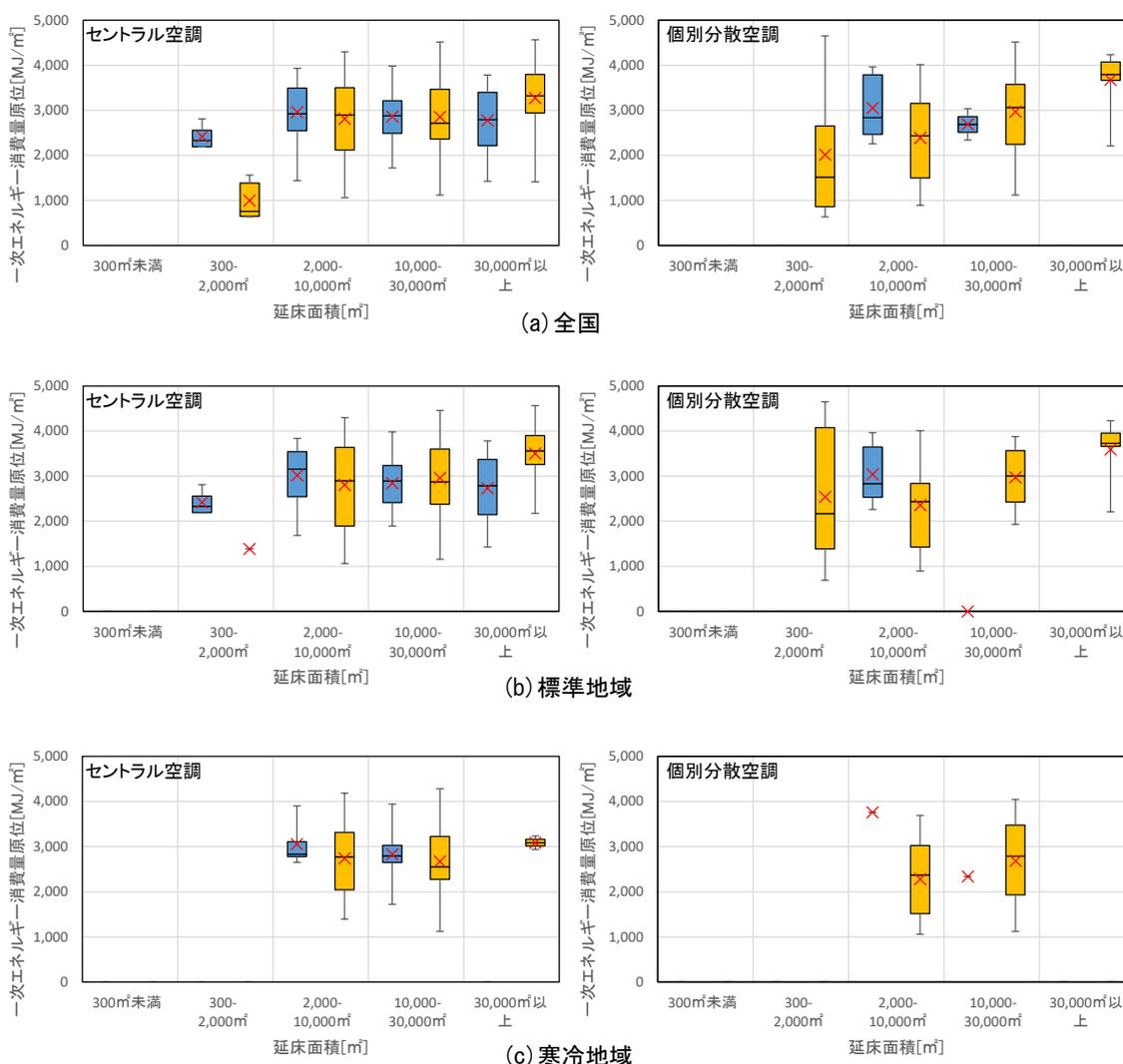


図 2.14 ホテル・旅館のエネルギー消費量原単位の分布

(7) 大学・専門学校

大学・専門学校では、規模による原単位の違いがほとんど見られない。ほとんどの空調設備が教室等に設置され、同様の使い方をされているためと考えられる。熱源別には、ガス熱源の方が原単位のやや高い傾向がみられる。契約電力量削減等のため、比較的エネルギー消費量の大きな施設でガス熱源が選択される傾向があることが理由のひとつと考えられる。

寒冷地域では標準地域よりもエネルギー消費量が多くなる傾向がある。

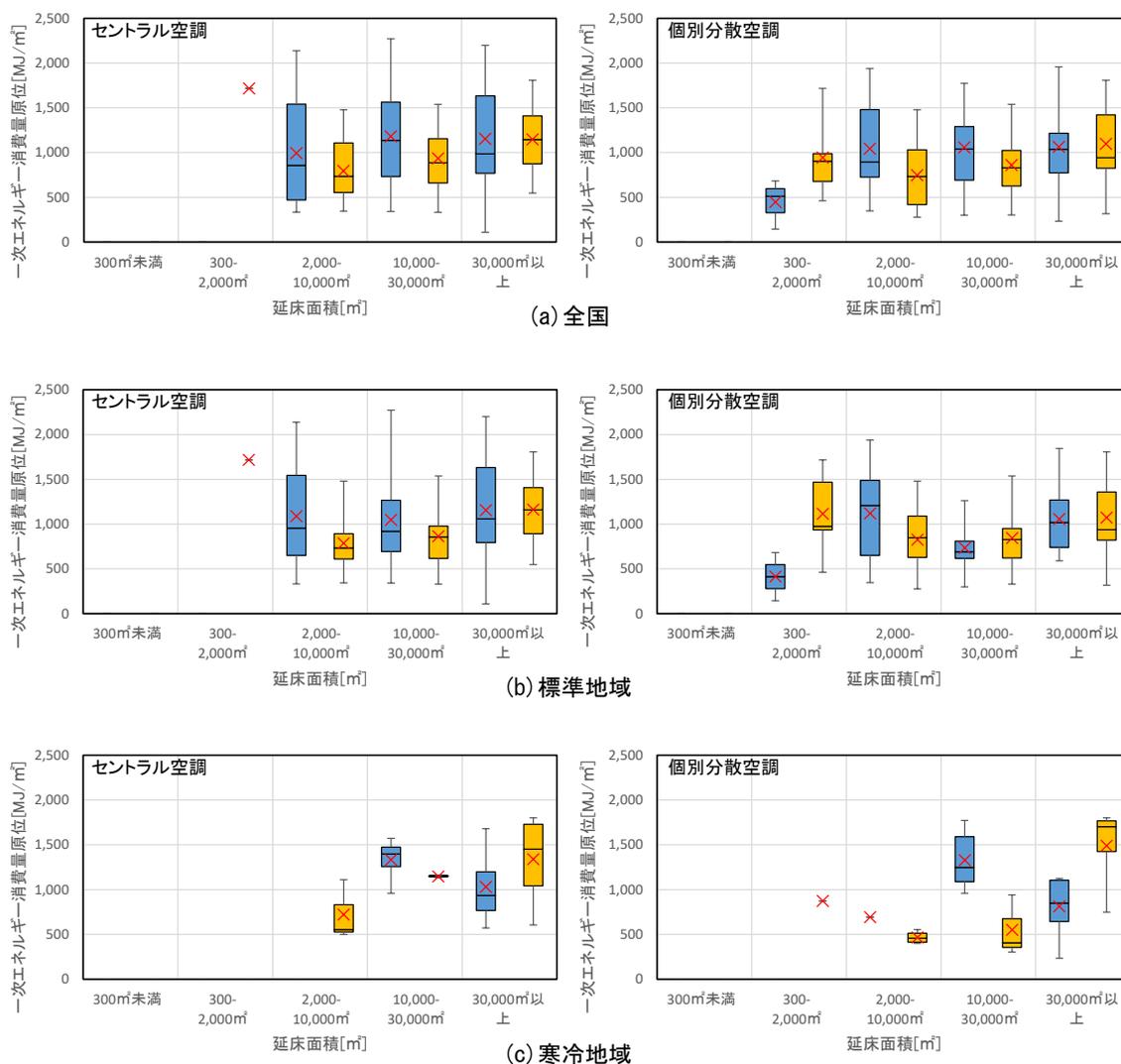


図 2.15 大学・専門学校のエネルギー消費量原単位の分布

(8) 高校

高校も大学と同様に規模による原単位の違いが大きくなり、個別分散空調では規模が大きい方が原単位の小さくなる傾向も認められる。理由についてはより詳細な調査が必要であるが、大規模校では稼働率の低い教室がある可能性が考えられる。

寒冷地域と標準地域の原単位は概ね同等である。夏季・冬季の休暇により季節的な影響が少なくなっていることが理由の一つと考えられる。

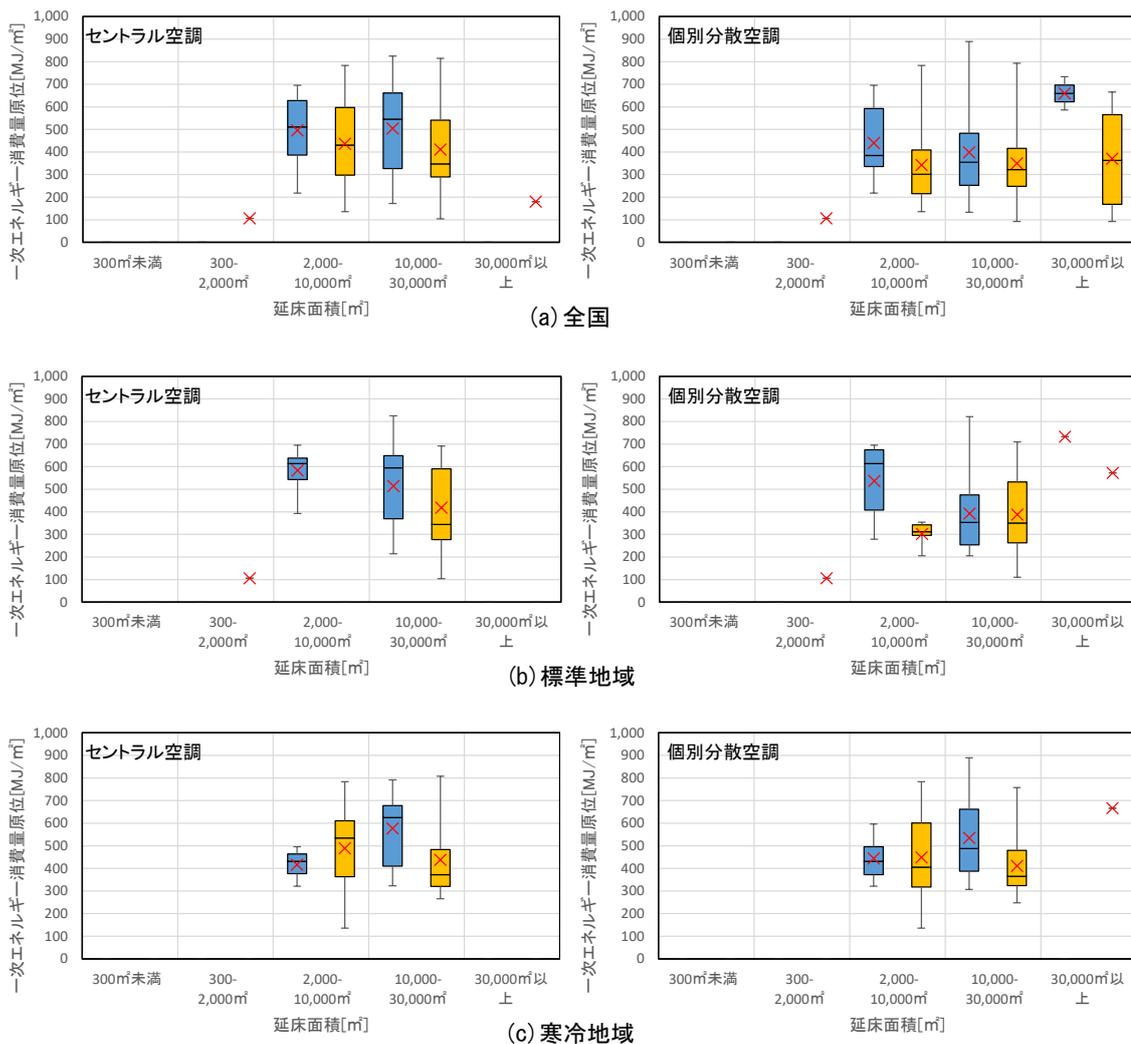


図 2.16 高校のエネルギー消費量原単位の分布

(9) 小中学校

小中学校では、規模によるエネルギー消費原単位の差異はほとんど見られず、エネルギー消費原単位は非常に小さい。また、建物によるばらつきも非常に小さい傾向である。

寒冷地域では標準地域と比較して若干原単位が高い傾向がみられる。

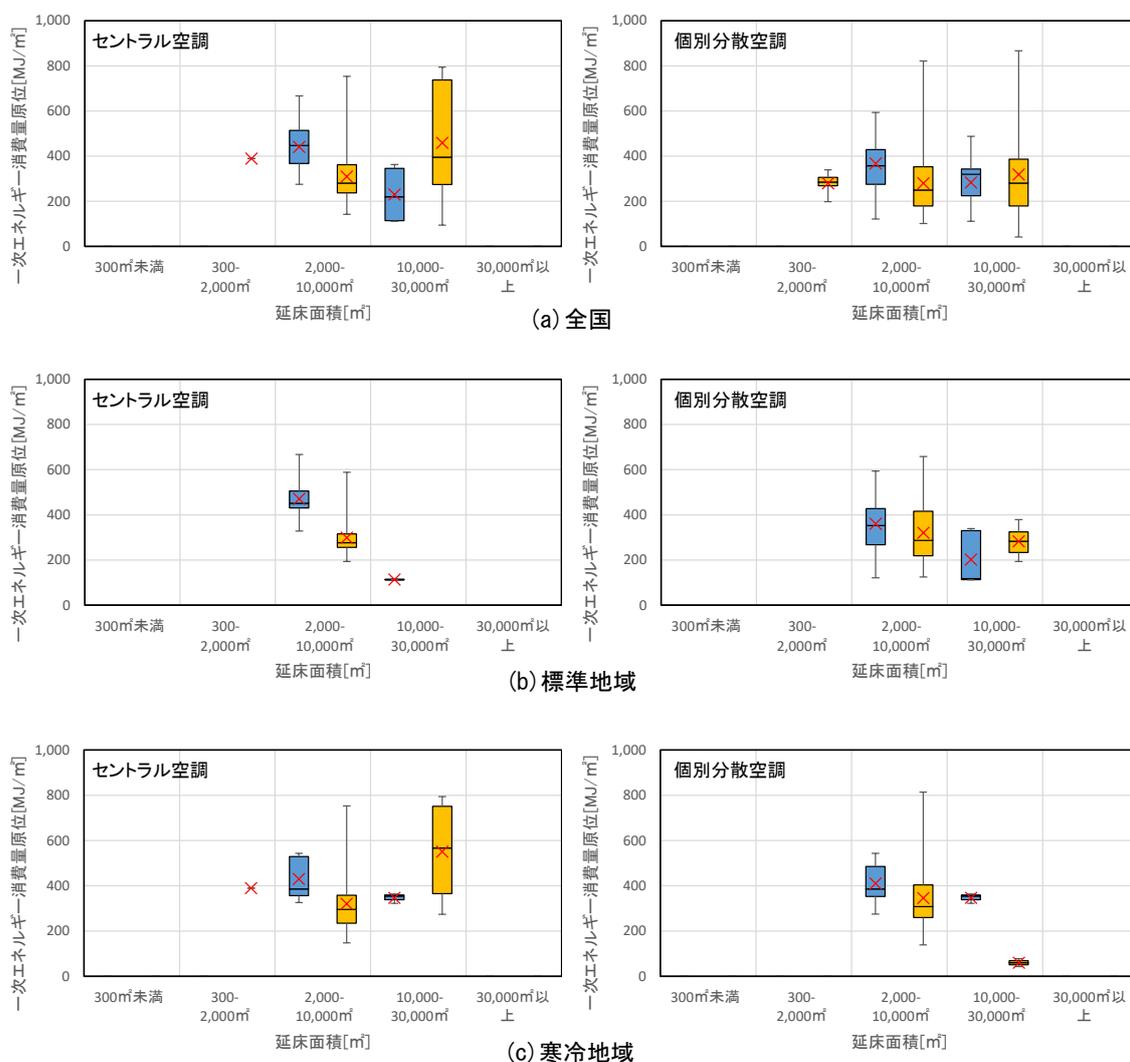


図 2.17 小中学校のエネルギー消費量原単位の分布

2.3.4 地域冷暖房から熱供給を受ける建物

図 2.18 に地域冷暖房から熱供給されている建物の一次エネルギー消費原単位の分布を示す。地域冷暖房から熱供給を受けるのは比較的大規模な建物が多い。また、本分析においては、福祉施設や学校等ではデータ数が十分でないことに注意が必要である。なお、凡例は図 2.8 に示した通りである。

地域冷暖房から熱供給されている建物においては、主となる空調システムはセントラル空調と考えられるため、次頁でガス・電気熱源のセントラル空調の平均値と比較することとする。

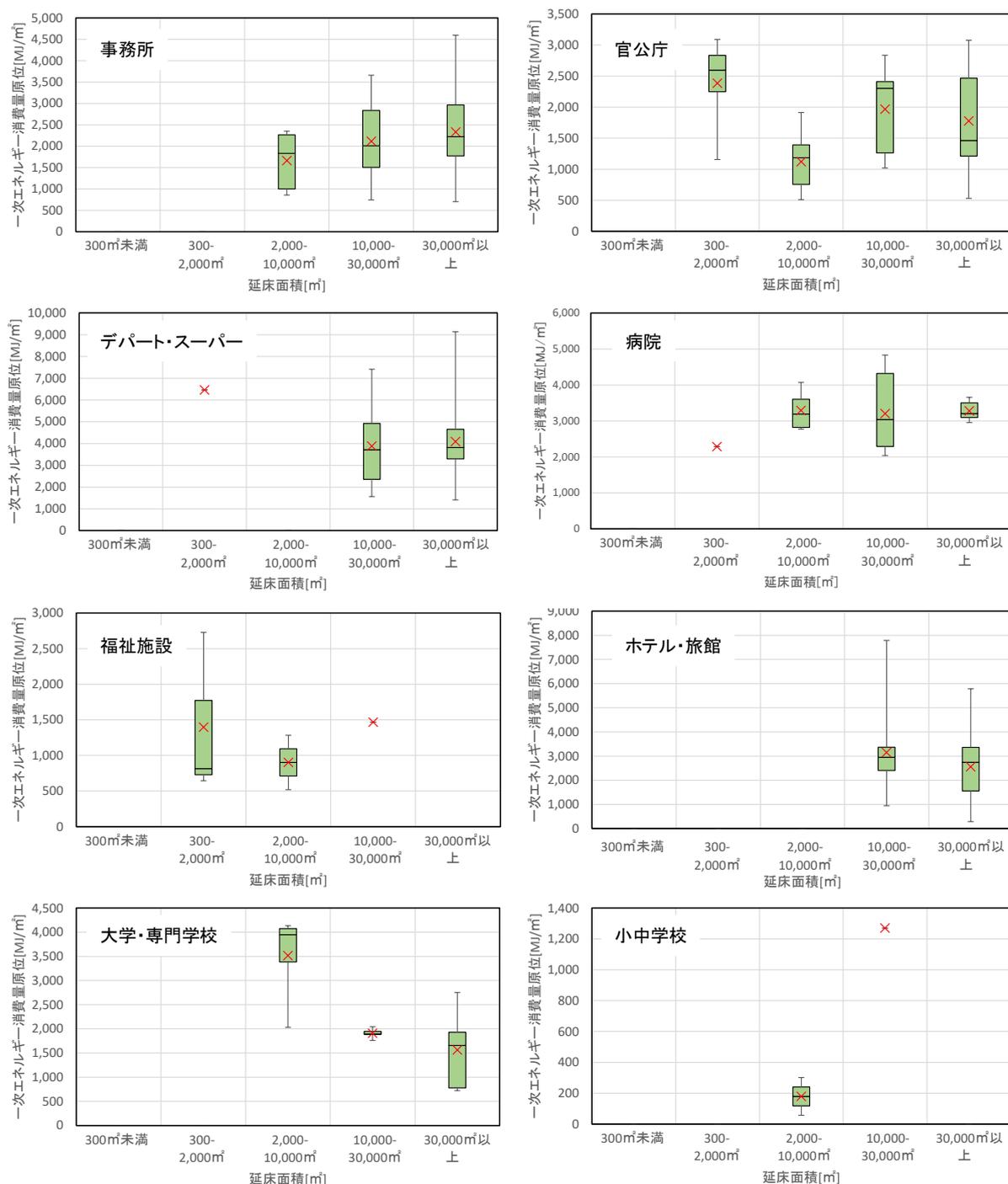


図 2.18 地域冷暖房の場合の用途別エネルギー消費原単位の分布

表 2.10 に、ガスおよび電気熱源セントラル空調の一次エネルギー消費原単位と地域冷暖房との比較を示す。それぞれのカテゴリーで、データ数が5件以上の場合のみ示している。地域冷暖房は中規模以上の建築物に導入されることが多く、その傾向が表れている。

事務所ビルでは、10,000 m²以上の建物において8~9%、官公庁で20~40%程度地域冷暖房の方がエネルギー消費原単位が大きい。事務所ビルにおいては、データサーバー等比較的定常的に大きな空調需要のある建物が地域冷暖房を採用する傾向があることが原因のひとつであろう。

事務所ビル以外においても地域冷暖房の方が一次エネルギー消費原単位が大きい傾向が認められる。地域冷暖房供給を受ける建物は、省エネルギーの意識が現在ほど浸透する以前に建設された建物が多いことも理由の一つと考えられる。

地域冷暖房から供給された熱は、通常は省エネ法に則り一次エネルギー換算を行う。その際の換算係数にデフォルト値 1.36[GJ/GJ]を使うケースと、実際の熱源プラントの運転実績から求めた換算係数を使うケースがあるが、DECC では省エネ法における原油換算方法に則り、一律に 1.36[GJ/GJ]を用いて一次エネルギー換算をしている。省エネ法のデフォルト値 1.36[GJ/GJ]はプラント効率 0.735 程度に相当し、プラント効率がそれよりも高い地域冷暖房から供給されている場合にデフォルト値を用いると、一次エネルギー消費量を過大に見積もることになることも原因のひとつと考えられる。

表 2.10 セントラル空調(ガス・電気熱源)と地域冷暖房の一次エネルギー消費原単位比較

全国		一次エネルギー原単位平均					地域冷暖房との差の割合				
		300m ² 未満	300- 2,000m ²	2,000- 10,000m ²	10,000- 30,000m ²	30,000m ² 以上	300m ² 未満	300- 2,000m ²	2,000- 10,000m ²	10,000- 30,000m ²	30,000m ² 以上
事務所	セントラル			1,657	1,924	2,146			0.2%	9.1%	8.0%
	DHC			1,661	2,117	2,333					
官公庁	セントラル		1,069	1,108	1,190	1,407		55.2%	1.2%	39.5%	20.9%
	DHC		2,384	1,121	1,967	1,778					
デパート ・スーパー	セントラル		6,188	4,636	3,277	3,844				15.6%	6.1%
	DHC				3,885	4,094					
病院	セントラル		1,840	2,371	2,809	3,306			28.0%	12.4%	-0.7%
	DHC			3,292	3,207	3,281					
福祉施設	セントラル		1,733	1,894	1,841						
	DHC										
ホテル ・旅館	セントラル		1,629	2,881	2,857	3,015				9.4%	-17.8%
	DHC				3,153	2,558					
大学・ 専門学校	セントラル			935	1,088	1,152					26.2%
	DHC					1,560					
高校	セントラル			471	447						
	DHC										
小中学校	セントラル			360	334						
	DHC										

2.4 震災前後のエネルギー消費量の変化

東日本大震災とそれに続く電力需給のひっ迫の影響を受け、エネルギー消費量に大きな変化があったと言われているが、その実態を DECC データより確認する。

図 2.19 に建物用途別の原単位分布の年度変化を示す。震災以降の年度変化については、図中に前年度との平均値の変化を示している。また、図中には、気象庁 Web ページによる日本の年平均気温偏差⁴⁰も示している。気象庁の値は暦年別であり、DECC データは年度別であることに注意が必要である。

事務所と官公庁では震災以降の節電行動の効果が表れており、2011 年度から原単位が減少傾向となっている。2010-2011 年度は事務所・官公庁とも平均値が 11%減少しており、2011-2012 年度も 2～3%減少し、エネルギー消費量が減少後に再び増加するリバウンドは、本データからは見られない。平均気温偏差から、2010 年度は気温が高く 2011 年度は 0.5℃程度平均気温が低下したことは考慮する必要があるが、全般的に DECC データと年平均気温偏差との相関性は高くなく、本件においてもエネルギー消費原単位の低下は気温よりは建物利用者の行動(節電)によるものと考えられる。

一方、デパート・スーパーでは、2010-2011 年度は原単位平均値が 3%減少したものの、2011-2012 年度は 8%増加している。病院、ホテル・旅館や学校では、2010-2011 年度に目立った変化は見られない。これらの施設では、建物全体で使用しているエネルギー量に比べて節電可能な量が相対的に少なく変化が顕著にならないことや、建物内で行う業務の性質上、大幅な節電等が困難であったこと等が理由であると思われる。

学校等では、比較的省エネルギーの意識が高く、震災以前より不在時のスイッチオフ等をはじめとした節電行動が行われていた可能性が高い。

以上より、エネルギー消費に占める空調や照明等の割合が大きい事務所や官公庁においては、節電行動による影響が一次エネルギー消費原単位に現れたが、空調・照明以外の様々な業務用途でのエネルギー消費の割合が大きいその他の用途の建物では、節電は実施したものの、建物全体のエネルギー消費への影響は大きくないため顕著には現れなかったと考えられる。

エネルギー消費の状況は、東日本大震災を契機に大きく変化しており、エネルギー消費シミュレーションを行う際には、最新のエネルギー消費データに基づくことが必要である。また、そのためには継続的なエネルギーデータの収集が必須であると言える。

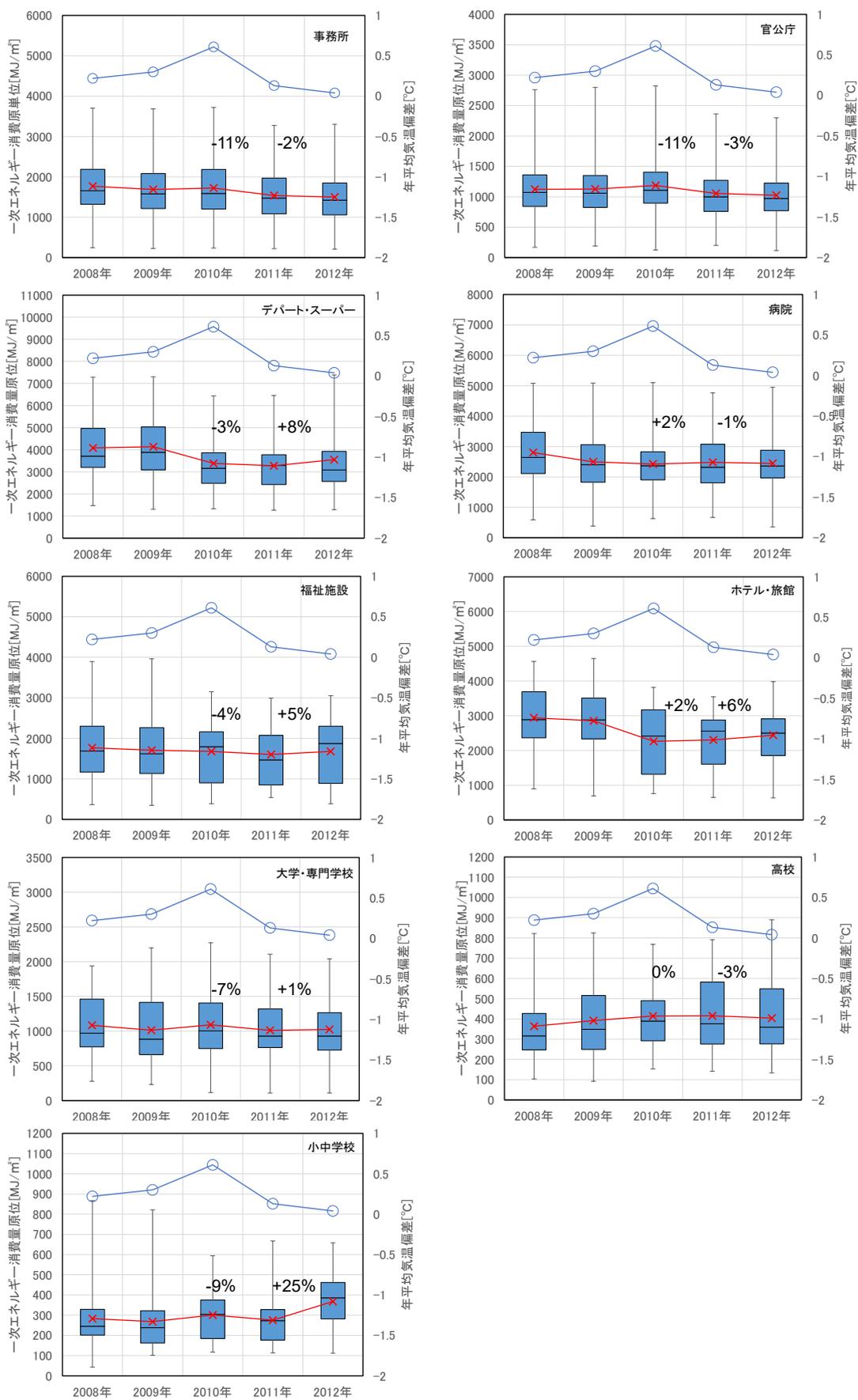


図 2.19 建物用途別原単位の変化(左軸)と年平均気温偏差(右軸)

2.5 分析のまとめと現状のエネルギーシステムの課題

2.5.1 分析のまとめ

前節では、最新の DECC データを用いて、主な空調システム別に一次エネルギー消費原単位を分析した。

建築物におけるエネルギー消費状況は、建物用途はもちろんのこと、空調の熱源システムによっても異なり、更には熱源のエネルギー種別によっても傾向が異なることを示した。事務所用途や官公庁等、各建物で比較的使用状況が似通っている場合は、熱源や空調システムによる違いが明確になりやすく、寒冷地の電気空調建物は同規模建物でのガス空調建物に比較してエネルギー消費量が大きい傾向となった。地域冷暖房から熱供給を受ける建物では、個別に空調熱源を持つ建物と比較してエネルギー消費量が大きい傾向となったが、地域冷暖房から熱供給を受ける建物は大規模でデータサーバー等の定常的に大きな空調負荷のあるハイスペックな建物が多いことや、DECC では地域冷暖房から供給された熱を $1.36[\text{GJ}/\text{GJ}]$ で一次エネルギー換算していることも要因の一つと考えられる。

震災前後のエネルギー消費量の変化については、事務所や官公庁等では節電行動等によるエネルギー消費の低下傾向が明確に現れたが、病院等、建物での総エネルギー使用量に比較して節電可能な割合が小さい建物用途では、節電の影響が明確には現れなかった。

2.5.2 現状の空調エネルギーシステムの課題

一般に、空調システムを設計する際には最大負荷条件に対応できるように機器容量を決定せざるを得ず、設計段階においては、執務者数や室の使用用途等に不確定要素があることから、安全率を考慮した設計をすることになるが、その際に空調能力不足となるリスクを避けるために過大な安全率を設定する傾向がある。結果として実際の稼働時に極端な部分負荷状態で運転されているケースが非常に多い。個別分散システムでは特にこの傾向が顕著であり、以下のような理由があげられる

- ・ 方位により室内でのピーク時間帯が異なり、実際には同時にピークにならない場合でも、それぞれのピークに対応できるよう機器を選定することになる
- ・ 運転員が設置されないため、あらゆる状況に対応できるよう能力の大きな熱源を選定する
- ・ 始業前の予冷・予熱等の操作が期待できないため、立ち上がり時間を短縮するために大きな能力を選定する

一方、セントラルシステムや地域冷暖房では、熱源機の分割台数制御等により、部分負荷運転にある程度は対応可能なケースが多い。

空調システム最適設計のためには、適切な負荷予測により最適な設計をする必要があるが、日本においては実態に即した負荷予測の事例が非常に少ないのが現状である。

本研究では、3.4 で実際の建物エネルギー消費データから建物用途ごとの標準的な時刻別負荷データを作成する。このような実態に即した負荷モデルの利用により、上記の課題は軽減されていくことが期待される。

地域冷暖房プラントにおいては、中間期等の空調需要が少ない時期においても、エリア内に少しでも熱需要があれば機器にとって非常に低い負荷であっても熱供給しなければならず、プラン

トの総合熱効率が低くなる原因の一つとなっている。このような問題を回避するためには、地域冷暖房の計画時に様々な運転状況を想定したシミュレーションを行い、熱源機器の容量分割等を適切に設計することが重要であるとともに、第6章で述べる地域冷暖房プラント間の熱融通をはじめとするスマートエネルギーネットワークの構築により、時刻毎に最適な熱源で運転することが有効な対策となる。

2.6 要約

本章では、2.2 で代表的な空調システムとして個別分散システム、建物個別熱源セントラルシステムおよび地域冷暖房システムを挙げ、それぞれの特徴を述べた後に、2.3 で DECC の一次エネルギー消費原単位を建物用途ごとに空調システム別・熱源エネルギー種別に分類し、それぞれの傾向を分析した。

セントラル空調と個別分散空調は室の使用目的・状況により使い分けられている様子が観察された。また、エネルギー種による違いは標準地域ではほとんど見られず、寒冷地では電気空調の方がより多くのエネルギーを消費している傾向が観察された。

地域冷暖房から供給を受ける建物では一次エネルギー消費量が多い傾向がみられたが、エネルギー消費の多いハイスペックなビルが多いこと、および DECC では一次エネルギー換算係数に一律に 1.36[GJ/GJ]を用いていることが原因と考えられることを示した。

年度別のエネルギー消費原単位の変化としては、事務所や官公庁においては震災後にエネルギー消費原単位が 10%程度減少し、翌年度もリバウンドは見られないが、デパート・スーパーや小学校ではリバウンドが観察された。

2.5 では、現状の空調システムにおける課題として、熱効率の高くない極端な部分負荷で運転されているケースが多いことを挙げ、解決の一方策として、セントラル空調システムや地域冷暖房を採用し、適切な熱源機台数制御等により対応することを述べた。また、地域冷暖房プラントにおいては、スマートエネルギーネットワークの構築によりプラントの総合効率を向上させる可能性について言及した。ただし、それらの計画の際には適切なデータを用いたエネルギーシミュレーションに基づく計画が必須であり、そのためには本章で述べたようなエネルギー消費データの整備・分析が不可欠である。

建築物におけるエネルギー消費の状況は、東日本大震災を契機に大きく変化しており、エネルギー消費シミュレーションを行う際には、最新データに基づくことが必要である。また、そのためには継続的なエネルギーデータの収集が不可欠となる。

次章では、エネルギーシステム計画時に必要な建築物の時刻別エネルギー消費および負荷データの作成について述べる。

第3章 建物用途別負荷データの構築

3.1 序論

街区のエネルギーシステムを検討する際には、それぞれの建築物の適切なエネルギー消費データを基に検討することが必要となる。エネルギー消費量は時々刻々と変化するため、時刻別のデータから熱源機の台数制御等を適切に計画しなければならない。そのため、この章では、非住宅建築物の環境関連データベース DECC (Database for Energy Consumption of Commercial buildings) の詳細データベースから時刻別の標準負荷データを作成した。DECC の概要および基礎データベースについては、2.3.1 で述べたが、本章では 3.2 で時刻別データを含む詳細データベースについて述べ、3.3 では事務用途の建物をエネルギー消費傾向から分類し、分類ごとに標準エネルギー消費変動データを作成する。3.4 では DECC 詳細データベースから、建物用途ごとに時刻別負荷データを算出する方法を開発し、実用的な精度であることを確認する。また、既存の負荷データとの比較も試みる。

3.2 DECC 詳細データベースの概要

DECC 委員会では、NEDO の補助を受けて BEMS (Building Energy Management System) を設置した建物を中心にデータを収集しており、2011 年度の調査では回収率 41% で 121 件のデータを回収している。しかし、BEMS データは建物用途や BEMS の提供メーカー等により、その形式や保存されているデータの種類の千差万別である。そのため、以下のように標準フォーマットを定め、収集されたデータを整理した。

スプレッドシートの横軸に測定または演算で求められたエネルギー消費機器ごとのエネルギー消費量を、縦軸を時刻 (4 月 1 日の 0:00 から 3 月 31 日の 23:00 まで 1 時間ごと) として年度間のエネルギー消費データを整理した。BEMS データが 1 時間以下の時間ステップでデータを保有している場合は、1 時間の平均値をその時刻の値とした。エネルギー消費先については、詳細に分類すればするほど該当する建物が少なくなるため、使用目的等により選択できるよう、数通りの分類項目が必要となる。2015 年に公開された詳細データベースでは、エネルギー消費先は①照明と②その他の 2 種類の分類となっている。

本研究では、表 3.1 に示す比較的詳細な分類を用いた。

表 3.1 詳細データベースの保有データ項目

エネルギー種	電力	都市ガス	油	地域冷暖房	CGS・発電機
単位	kJ/m ²	kJ/m ²	kJ/m ²	kJ/m ²	kJ/m ²
一次エネルギー消費量	照明・コンセント 熱源 熱源補機 搬送動力 パッケージ A/C 空気搬送 輸送動力 その他	熱源 パッケージ A/C その他	熱源 その他	冷水 温水 蒸気	エネルギー消費量 発電量 排熱利用量

3.3 データ解析による事務所ビルのエネルギー消費特性

3.3.1 分析対象

前項で作成した詳細データベースを用いて、事務所ビルのエネルギー消費特性の分類とともに、東日本大震災前後でのエネルギー消費構造の変化について分析を試みる。表 3.2 に分類に用いた 26 件の事務所ビルと熱源機等を、後に述べるクラスター分析の結果とともに示す。対象とした建物は、事務所面積比が 50%以上で、気象条件が同等と思われる関東、中部および関西エリアのビルで、東日本大震災の前後である 2010 年度と 2011 年度両方のデータを保有するビルとした。

分析に際しては、1 か月以上のデータ欠損がある場合は、前後の年の同期間が年間に占める割合を用いて欠損部分を補完し、1 か月未満の欠損は無視した。

表 3.2 に示した 26 件の事務所ビルの一次エネルギー消費原単位の平均値は、東日本大震災前である 2010 年度は 2,112MJ/m²、震災以降となる 2011 年度で 1,785MJ/m²である。2010 年度では、DECC 基礎データベースの 2008 年度実績における事務所ビル平均値(1,702 MJ/m²)よりも大きかったが、震災以降は概ね同等となった。対象ビルは BEMS を設置しており、エネルギー消費に対する認識が比較的高く、エネルギー消費量も少ないと期待されるビルであるが、BEMS を設置するビルは比較的大規模な場合が多く、大規模ビルではエネルギー消費原単位も増加傾向であるため、震災前は平均値より大きかったと考えられる。しかし、震災以降は節電・省エネに対する意識の高さから約 16%の削減となったと考えられる。以降は、震災後である 2011 年度のデータを用いて分析する。

対象ビルをエネルギー消費特性ごとに分類するために、年間一次エネルギー消費量と夏季(7-9 月)および冬季(12 月 - 2 月)の一次エネルギー消費量を用いてクラスター分析を行った。その結果、表 3.2 に示したように、I, II, III タイプの категорияに分類された。時刻毎のエネルギー消費を考える場合にはそれぞれのタイプにおいて、蓄熱システムの有無によってさらに分類する必要があり、エネルギー消費の変動傾向としては 6 通りに分類した。

表 3.2 分析対象建物

タイプ	モデル	延床面積 [m ²]	竣工年	事務所 割合[%]	一次エネルギー消 費原単位 [MJ/m ²]		熱源機器																		
					2010	2011	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	DHC			
I	1	9,400	1988	100	1,189	1,105																			
		6,100	1991	100	1,120	1,044																			
		29,700	1969	100	1,694	1,336	x		x																
		7,100	1990	80	1,581	1,387																			
		12,500	1992	91	1,518	1,159																			
	19,100	1993	57	1,165	1,018																				
	19,600	2004	100	1,915	1,334																				
	5,000	1988	100	1,816	1,439																				
	11,700	1985	70	1,445	1,334																				
	平均	13,400	1,989	89	1,494	1,317	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II	3	25,500	1991	100	2,017	1,635																			
		34,500	1987	98	1,920	1,695	x	x	x	x															
		15,600	1992	58	1,750	1,721																			
		9,600	1989	71	2,603	1,823																			
		39,100	1992	99	1,923	1,500																			
	10,800	1991	100	2,145	1,771																				
	11,900	1988	69	1,408	1,669																				
	18,800	1976	55	2,163	1,590																				
	90,300	1962	59	1,859	1,704	x																			
	平均	28,400	1,985	79	1,976	1,679	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III	5	10,300	1993	50	3,010	2,757																			
		21,700	1994	96	3,185	2,654																			
		15,200	1989	85	3,605	2,581																			
		164,300	1993	100	2,841	2,233																			
		183,100	1976	70	2,601	2,168																			
	130,200	1968	67	2,396	2,106																				
	43,100	1963	81	3,833	3,701																				
	23,400	2003	61	2,218	1,950																				
平均	73,900	1,985	76	2,961	2,519	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
全平均	37,200	1,986	81	2,112	1,785	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

A: 蒸気ボイラ, B: 温水ボイラ, C: ターボ冷凍機, D: スクリュー冷凍機, E: 空気熱源ヒートポンプ (セントラル),
 F: 水熱源ヒートポンプ, G: 単効用吸収冷凍機, H: 二重効用吸収冷凍機, I: 吸収冷温水機, J: パッケージ空調機 (ビルマル含),
 K: 水冷パッケージ空調機 (ビルマル含), L: GHP, M: 水蓄熱ユニット, N: 氷蓄熱ユニット, O: その他・不明, DHC: 地域冷暖房

月毎の一次エネルギー消費原単位を図 3.1 に示す。図はそれぞれの建物の各月の一次エネルギー消費原単位を示し、太線は平均値である。

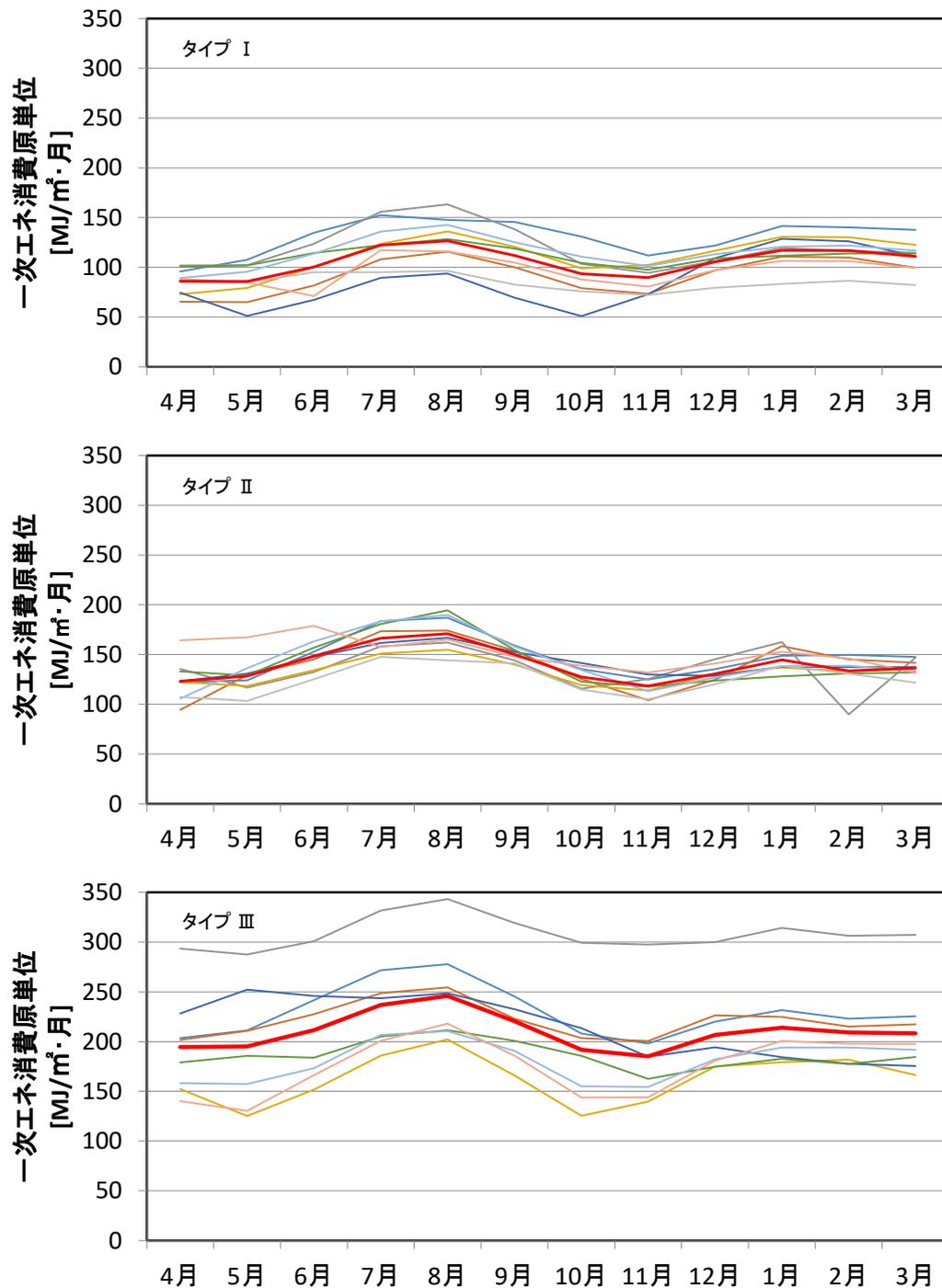


図 3.1 カテゴリー分類された月毎のエネルギー消費量

タイプⅠは年間エネルギー消費原単位が比較的小さい(約 1,300 MJ/m²年)カテゴリーで、一次エネルギー消費原単位の最大月と最小月との差が 50 MJ/m²月程度である。

タイプⅡは年間一次エネルギー消費原単位が中程度(約 1,700 MJ/m²年)程度であり、最大消費月と最小との差が 60 MJ/m²月程度のカテゴリーである。

タイプⅢは年間一次エネルギー消費原単位が大きく(約 2,500 MJ/m²年)、最大消費月と最小との差が 70 MJ/m²月近くであり、建物内での熱発生量が多いため、夏季におけるエネルギー消費量が非常に大きくなっている。

3.3.2 時刻別エネルギー消費データ

建築物の時刻別エネルギー消費は、蓄熱システムの有無により大きく異なるため、3.3 でカテゴリー分類した各タイプを蓄熱の有無で分けて標準エネルギー消費データを求めることとする。DECC 詳細データベースより、各月平日・土曜・日祝日代表日の消費データを以下の式により求めた。

$$E_{av.(w,m,h)} = \frac{\sum E_{(w,m,h,n)}}{n_{(w,m,h)}} \quad (3.1)$$

- w : 平日, 土曜, 日祝日
 $E_{av.(w,m,h)}$: m 月 w 日時刻 h における平均エネルギー消費量
 $E_{(w,m,h,n)}$: m 月 w 日時刻 h におけるエネルギー消費量
 $n_{(w,m,h)}$: m 月 w 日時刻 h における建物数

3 タイプを蓄熱システムの有無で分けた 6 通りのモデルについて平均値 $E_{av.(w,m,h)}$ を求めた。それぞれのモデルを表 3.3 に、代表日のエネルギー消費変動データを図 3.2 に示す。色はエネルギー消費量による分類タイプを示し、点線は蓄熱システムがある場合である。

表 3.3 エネルギー消費モデル

モデル	タイプ	エネルギー消費量	標準的な一次エネルギー消費原単位	蓄熱	説明
1	Ⅰ	小	1,300 MJ/m ²	無し	比較的小規模
2				有り	エネルギー消費少ない
3	Ⅱ	中	1,700 MJ/m ²	無し	平均的な建物
4				有り	エネルギー消費も平均的
5	Ⅲ	大	2,500 MJ/m ²	無し	比較的大規模な建物
6				有り	エネルギー消費も大きい

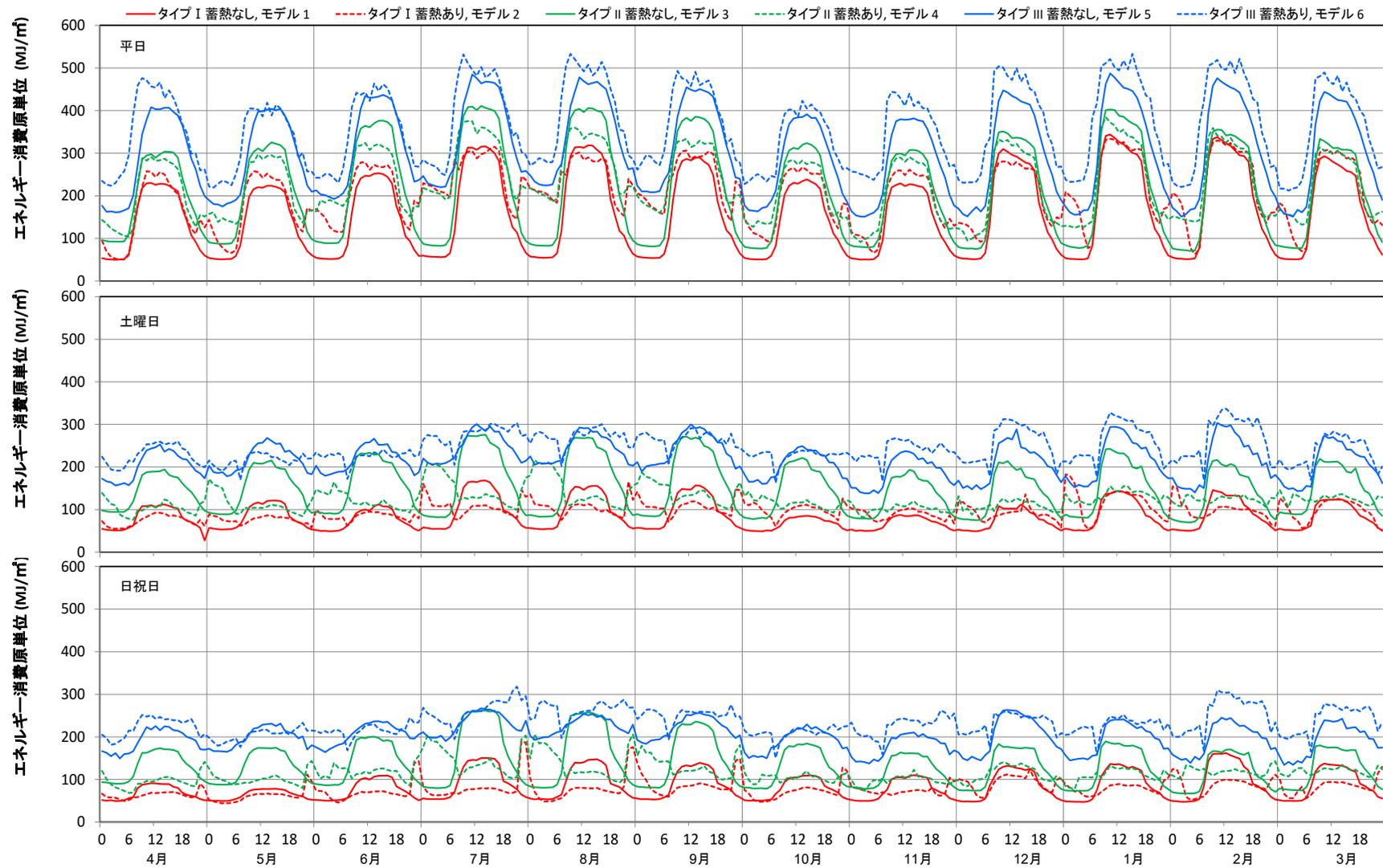


図 3.2 カテゴリー分類ごとの代表日エネルギー消費変動データ

2011年度は東日本大震災とそれに続く電力の需給ひっ迫のため、土曜日を非稼働日とした建物が多く、日祝日と大きく変わらない変動パターンとなっている。点線の蓄熱システムを保有する建物では、夜間にエネルギーを消費している様子がわかる。

本節で求めた時刻別エネルギー消費変動データは、それぞれの建物で必要とされるエネルギー量を時刻別に把握することができるので、エネルギー融通やスマートエネルギーネットワークの計画段階において、非常に有用な情報となる。

3.4 時刻別標準負荷データの構築

本節では、前節で作成した DECC 詳細データベースの熱源機の時刻ごとのエネルギー消費量を用いて、公開されている LCEM ツール³⁰⁾に内包される、熱源機の特性曲線から簡易に熱負荷を算出する手法を開発した。熱源機の種類ごとに測定データと本算出手法による製造熱量の比較を行い、実用上の許容範囲内の精度で計算できていることを確認した。

3.4.1 LCEM ツールを利用した負荷分析

LCEM ツールは、様々な条件下での空調システムの年間エネルギー消費量を簡易にシミュレートするツールとして、国交省官庁営繕部の Web ページよりダウンロード可能である。LCEM ツールでは、各種機器の特性曲線を内包した熱源機オブジェクトに、運転条件となる種々のパラメータを入力することによりエネルギー消費量を計算している。

3.4.2 エネルギー消費量と熱源機出力との関係式の導出

LCEM ツールの熱源機オブジェクトにおける特性曲線適用範囲の最小負荷と最大負荷を含む数点の負荷を入力条件としてエネルギー消費量を計算し、計算結果のエネルギー消費量定格比(エネルギー消費量と定格値の比)と負荷率から両者の関係式を求める。本研究では、二次式で近似した。その際に、外気温や冷却水入口温度等の、熱負荷と消費エネルギーの関係に最も大きな影響を与えるパラメータについては、条件毎での計算を行うが、その他の影響の小さいパラメータについては定格条件の定数とした。

表 3.4 および図 3.3 に、求めた関係式の一覧およびエネルギー消費量定格比と負荷率の関係を示す。LCEM ツールには、熱源機の種類ごとに特性が異なる数種類のオブジェクトが準備されているが、本研究では「高効率タイプ」や「高期間効率タイプ」ではなく、標準的と思われる熱源機オブジェクトを用いた。実際に稼働している熱源機の特性にできるだけ近い熱源機オブジェクトを選択することや、実測値等によって得られる、負荷率とエネルギー消費量の関係式を作成すれば、より高精度に負荷を算出することが可能と考えられる。本研究では、手法の汎用性を把握するため、敢えて標準的な機器を用いることとした。

表 3.4 エネルギー消費量定格比と負荷率の関係式

機器			$y=ax^2+bx+c$			使用オブジェクト	
			パラメータ範囲	a	b		c
吸収冷温水機	冷房	冷却水入口温度	20°C	21°C未満	-0.22458	1.44854	-0.04534
			22°C	21°C~24.5°C未満	-0.21308	1.41099	-0.04534
			27°C	24.5°C~29.5°C未満	-0.18322	1.30839	-0.04534
			32°C	29.5°C以上	-0.15400	1.19953	-0.04534
	暖房		全領域	0.00000	1.00000	0.00000	
ターボ冷凍機	冷房	冷却水入口温度	20°C	21°C未満	-2.02655	4.35768	-1.15055
			22°C	21°C~24.5°C未満	-1.71097	4.00017	-1.14602
			27°C	24.5°C~29.5°C未満	-1.42496	3.64706	-1.14155
			32°C	29.5°C以上	-1.16718	3.29760	-1.13712
空気熱源ヒートポンプ	冷房	外気温度	25°C	27.5°C未満	-1.94018	4.02423	-0.94634
			30°C	27.5°C~32.5°C未満	-1.30819	3.19211	-0.78924
			35°C	32.5°C~37.5°C未満	-0.83010	2.46183	-0.63403
			39°C	37.5°C以上	-0.10842	1.33687	-0.29971
	暖房	外気温度	-5°C	-2.5°C未満	-0.29899	1.32651	-0.26659
			0°C	-2.5°C~2.5°C未満	-0.64468	2.07963	-0.56729
			5°C	2.5°C~7.5°C未満	-0.80375	2.47145	-0.71129
			10°C	7.5°C~12.5°C未満	-0.96124	2.88491	-0.87374
			15°C	12.5°C以上	-1.30086	3.56182	-1.13500
スクリーフ冷凍機	冷房	冷却水入口温度	20°C	21°C未満	-0.93817	2.25033	-0.01995
			22°C	21°C~24.5°C未満	-0.72617	1.98032	-0.06408
			27°C	24.5°C~29.5°C未満	-0.56962	1.73768	-0.09530
			32°C	29.5°C以上	-0.41585	1.50508	-0.13731
水熱源HP	冷房	熱源水入口温度	15°C	17.5°C未満	-0.34070	1.36531	-0.01728
			20°C	17.5°C~22.5°C未満	-0.23955	1.16450	-0.05716
			25°C	22.5°C~27.5°C未満	-0.17702	1.01099	-0.09577
			30°C	27.5°C以上	-0.10184	0.81143	-0.11591
	暖房	熱源水入口温度	10°C	11°C未満	0.36458	0.44924	-0.01075
			12°C	11°C~13.5°C御南	0.31530	0.60455	-0.03359
			15°C	13.5°C~17.5°C未満	0.29509	0.75243	-0.04787
			20°C	17.5°C以上	0.40180	0.83886	-0.04806
GHP	冷房	外気温度	25°C	27.5°C未満	-1.10291	2.13863	-0.03788
			30°C	27.5°C~32.5°C未満	-0.90840	1.94090	-0.03788
			35°C	32.5°C~37.5°C未満	-0.83893	1.86521	-0.03788
			40°C	37.5°C以上	-0.73390	1.73877	-0.03693
	暖房	外気温度	-5°C	-2.5°C未満	-0.51876	1.78097	-0.53557
			0°C	-2.5°C~2.5°C未満	-0.85572	2.28737	-0.53557
			5°C	2.5°C~7.5°C未満	-1.26514	2.68057	-0.42592
			10°C	7.5°C~12.5°C未満	-1.30660	2.69803	-0.39850
			15°C	12.5°C以上	-1.33461	2.72679	-0.39850
EHP	冷房	外気温度	25°C	27.5°C未満	-0.95588	2.29326	-0.17097
			30°C	27.5°C~32.5°C未満	-0.69830	1.96008	-0.17097
			35°C	32.5°C~37.5°C未満	-0.51539	1.68391	-0.17094
			40°C	37.5°C以上	-0.42821	1.51042	-0.16157
	暖房	外気温度	-5°C	-2.5°C未満	-0.19402	1.03751	-0.05286
			0°C	-2.5°C~2.5°C未満	-0.17676	0.98030	-0.05015
			5°C	2.5°C~7.5°C未満	-0.21807	1.14384	-0.05991
			10°C	7.5°C~12.5°C未満	-0.30478	1.42298	-0.06849
			15°C	12.5°C以上	-0.37006	1.56797	-0.06849

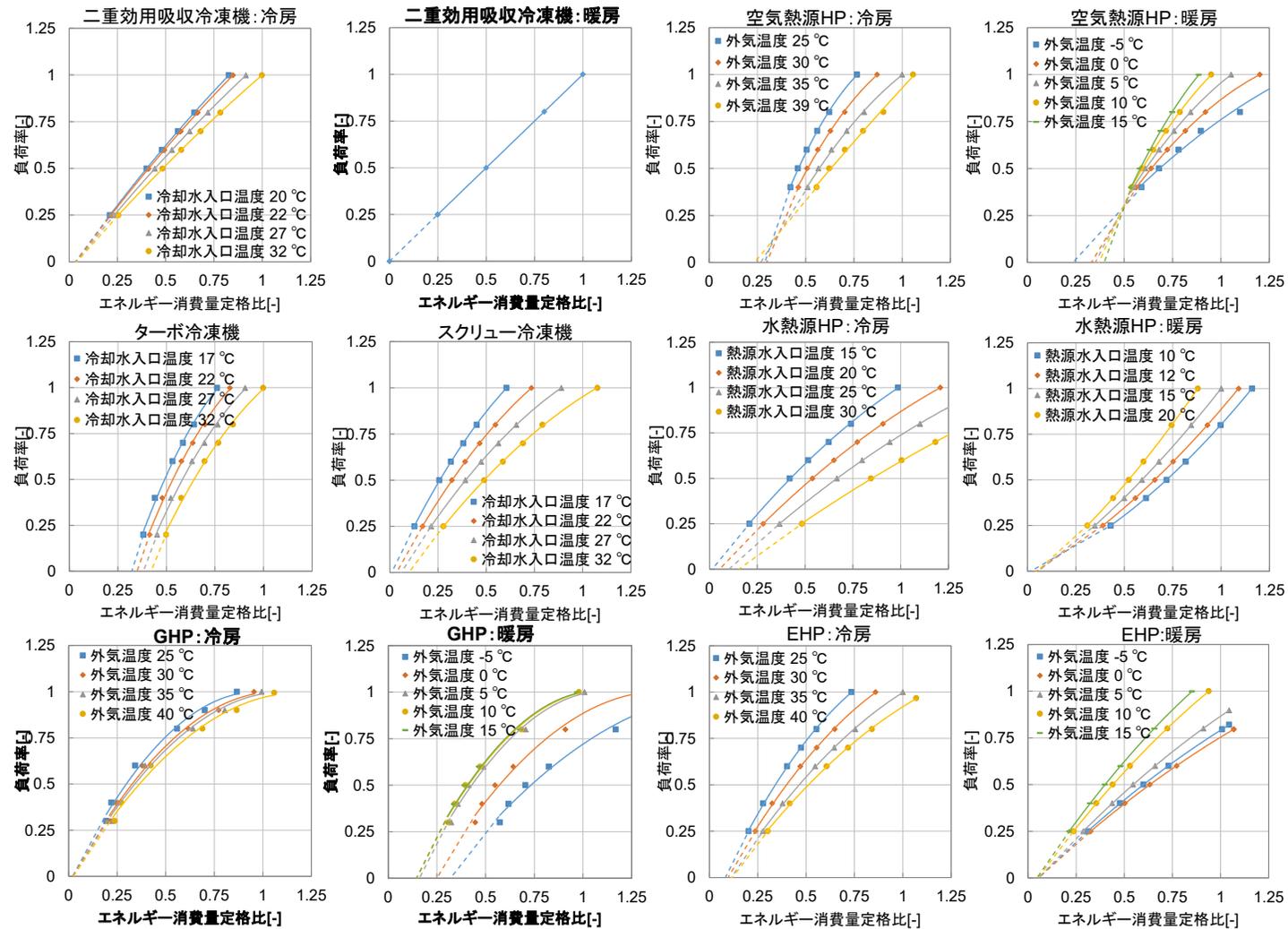


図 3.3 エネルギー消費量定格比と負荷率の関係

3.4.3 負荷の計算方法

BEMS データ等の時刻別エネルギー消費量を機器の定格消費量で除して定格比を求め、表 3.4 に示した関係式に代入して機器負荷率を求める。負荷率に定格出力を乗じることにより熱負荷を求めることができる。

3.4.4 エネルギー消費量と熱源機出力との関係式適用における誤差要因

エネルギー消費量と熱源機出力との関係式適用に際しては、以下のような取り扱いとした。これらはいずれも誤差要因となるものである。ここでの目的は、機器の詳細な性能評価ではなく、シミュレーション等で利用するための負荷データを作成することであり、年間の一次エネルギー消費量評価に大きな影響を与えないと考えられる項目については簡略化した考え方を適用した。

(1) 低負荷領域の扱い

LCEM オブジェクトでは、機器ごとに特性式適用範囲を明示しており、通常は負荷率 0.2~0.35 程度が適用下限値となっている。これは、実機では低負荷領域で間欠運転となり性能の定式化が困難なためである。LCEM ツールを利用する通常の計算では、低負荷領域の特性式適用範囲外において Warning 表示をするものの同一特性式を用いて計算しているため、本報でも同様の扱いとし、適用下限値以下でも同じ特性式を適用した。その際、図 3.3 に示した空気熱源 HP やターボ冷凍機に顕著に見られるように、エネルギー消費量が少ない領域では機器出力が負値に計算されてしまう場合がある。本報告では、このようなケースを出力ゼロとして取り扱ったが、実際の熱源機は間欠的に稼働しているはずであり、低負荷域の扱いには今後更なる検討が必要である。

(2) 定格を超える入力

特に電気駆動式の熱源機においては、立ち上がり時等に定格値の 3 倍以上の時刻別電力消費量となるケースがあり、非常に大きな誤差要因となる。本報では、簡易的な扱いとして、定格値を超える入力の場合は、エネルギー消費量定格比と負荷率を同値とした。これは、結果的に定格 COP を用いていることとなる。

(3) 関係式のパラメータについて

BEMS データに外気の温・湿度データが含まれない場合やデータに欠損がある場合は、近隣のアメダス気象データから該当年の時刻別温・湿度データを得た。

冷却水入口温度がパラメータの場合は、外気の温・湿度から湿球温度を求め、湿球温度+5℃を冷却水入口温度とした。なお、厳密には熱源機の負荷率に対応した冷却水入口温度を計算することが望ましいが、検討の結果、大きな差異が生じないことを確認している。

(4) 熱源機ごとのエネルギー消費量データが無い場合

複数台の熱源機のエネルギー消費量の合計値を計測しており個々のエネルギー消費量データがない場合、運転データ等から運転優先順位が明らかである、もしくは熱源機が同一の機器である

場合は以下の方法を用いた。

エネルギー消費量が1台目の機器の定格エネルギー消費量以下である場合は、1台運転と想定し熱負荷を算出する。1台目の定格エネルギー消費量を超え、かつ2台運転の定格エネルギー消費量合計値以下の場合、2台同負荷で運転と想定し、負荷を算出する。以降、設置台数まで同様とした。

(5) 個別分散型熱源機について

個別分散型熱源機では、室外機毎に個々のエネルギー消費量を計測しているケースは皆無で、全室外機の合計値のみが計測されている。そこで、本報告では、全室外機が平均的な負荷率で運転されていると仮定して、全室外機のエネルギー消費量の合計値と定格値の合計を用いて負荷を求めることとした。

(6) 冷・暖房運転の切り替え時期

冷房・暖房運転の切り替え時期が不明な場合は、一律に5月1日～10月30日を冷房期間とし、それ以外を暖房期間とした。

3.4.5 計算精度の検証

DECCの詳細データや、既存の研究報告を用いて本手法の精度の検証を行った。前述のように、実際に設置されている熱源機の機種を特定し、その機種の特性曲線に近い特性を示すLCEM機器オブジェクトを用いて関係式を作成すれば精度を向上させることが可能であるが、本報では、本手法の汎用性を考慮して、機種を特定できないケースに本手法を適用した場合の精度を把握するため、表3.4で示した関係式をそのまま用いることとした。

以下に、代表的な熱源機に対する検証の概要を述べ、外気温別の実測された製造熱量と本手法により求めた計算値の比較を図3.4に、年間での精度検証結果を表3.5に示す。なお、建物の延床面積については、DECC取得データの匿名性を担保するために、端数処理がされており、本計算でもこの数値を用いている。

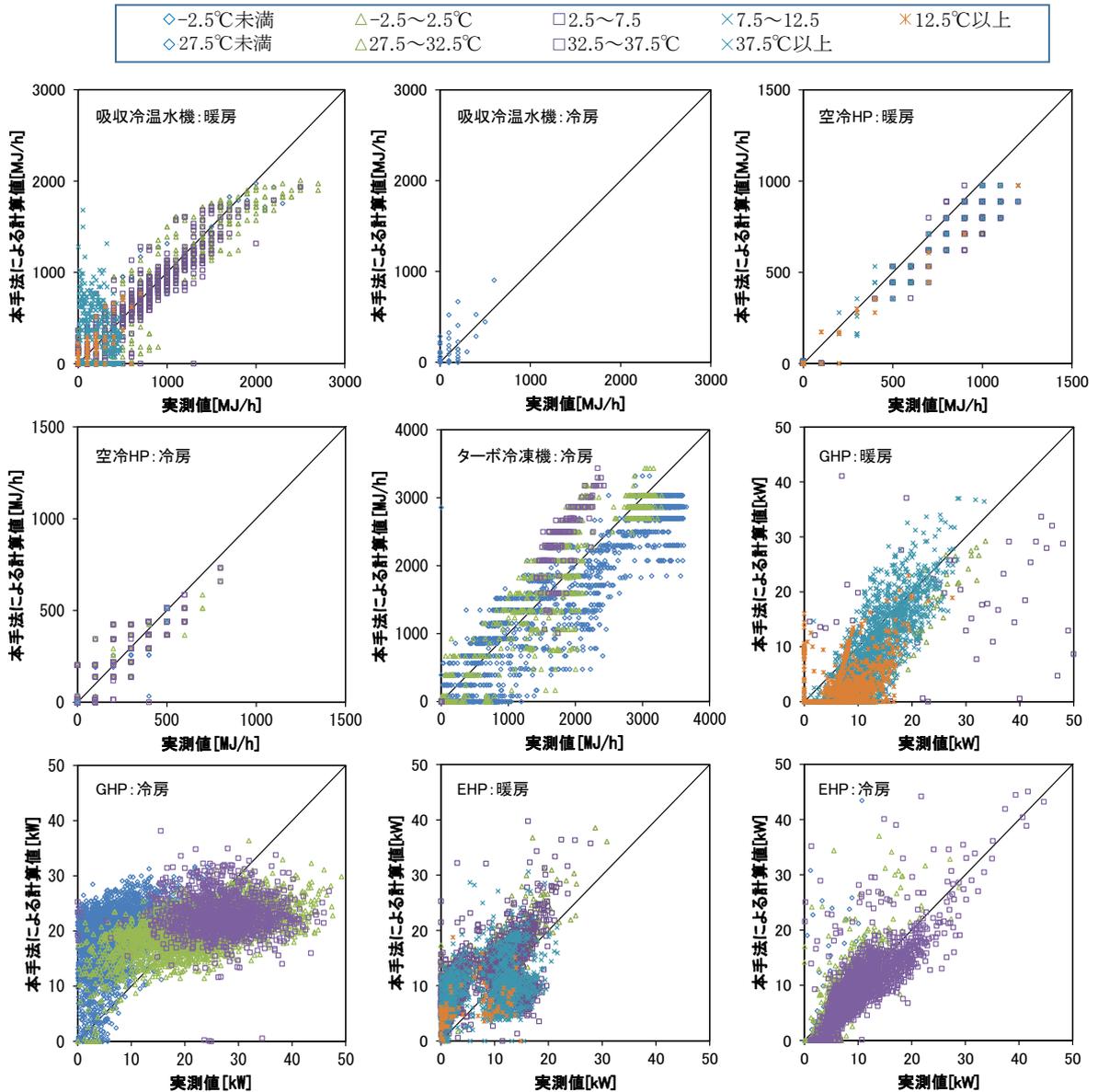


図 3.4 製造熱量実測値と本手法による計算値の比較

(1) 吸収冷温水機

中部地方の延床面積約 6,000 m²事務所ビルのデータを用いた。ガス吸収冷温水機 3 台を熱源としたセントラル空調方式で、2011 年 10 月下旬以降は冷温水製造熱量の合計値が測定されているため、本手法で求めた熱負荷と、BEMS 中の冷温水製造熱量データを比較した。

暖房時は低負荷領域を除き概ね良好な一致といえるが、冷房はデータが少ないため、更なる検証が必要である。

(2) 空冷ヒートポンプ

関西に立地する延床面積約 19,000 m²の事務所ビルのデータを用いた。空冷ヒートポンプ 2 台

によるセントラル空調と GHP および EHP の個別分散空調機を併用している。測定系の最小単位が粗いため、データは連続的ではない。暖房時は全負荷領域において計算値の方が小さい値となっている。

(3) ターボ冷凍機

関東地方の延床面積 20,000 m²の事務所ビルを対象とした。2 台のターボ冷凍機と水蓄熱システムで計測された製造熱量と、本手法で求めた製造熱量を比較した。全負荷領域において、概ね同程度の誤差を示している。

(4) 個別分散空調機

実測結果の事例⁴¹⁾から、GHP および EHP のそれぞれについてプローブ法⁴²⁾による 10 分ごとの製造熱量と、本手法による熱量の値を比較した。特に GHP 機での誤差が大きいが、これは実測機が高期間効率型であり、本計算で用いた標準型との部分負荷特性が異なることに起因する。

精度検証の結果を表 3.5 に示す。前出の 3.4.4 の(1)~(6)で述べた誤差要因に加え、実測機器と負荷特性を求めた機器を必ずしも一致させていないための差異もあり、本計算手法と実測負荷との間に最大 30%程度の誤差が生じている。したがって、より正確な熱源計画のためには、導入する熱源機に合致した特性式を用いることが望ましい。

しかし、これまで熱負荷の推計が非常に困難であった個別分散空調機の、時刻毎の熱負荷や負荷率が概ね把握できる等、最適熱源の計画時における本手法の活用可能性は大きいものとする。

また、本手法はエネルギー消費量からほぼリアルタイムに負荷を算出できることから、空調設備や地域冷暖房設備の運転管理において、よりきめ細かな分析が可能となり、様々な場面で活用されることが期待される。

表 3.5 精度検証の結果

	実測時期		実データ	本手法	誤差	備考
吸収冷温水機	2011年10月~2012年3月		1,187,100	1,148,822	-3.3%	大部分は温熱
空冷ヒートポンプ	2010年度	暖房	523,100	441,813	-18.4%	
		冷房	277,500	288,739	3.9%	
	2011年度	暖房	441,800	370,665	-19.2%	
		冷房	200,100	209,201	4.4%	
ターボ冷凍機	2010年度	冷房	6,711,570	6,323,683	-6.1%	2基合計値
	2011年度	冷房	3,879,205	3,659,705	-6.0%	
EHP	2010年12月17日~ 2011年10月12日	暖房	33,868	44,415	23.7%	プローブ法との比較
		冷房	35,747	33,408	-7.0%	
GHP	2011年2月16日~ 2012年2月15日	暖房	50,938	70,072	27.3%	プローブ法との比較
		冷房	178,561	137,076	-30.3%	

3.4.6 建物用途別の標準負荷データ

本節で述べてきた手法を、DECC 詳細データベースに適用して建物用途ごとの標準負荷を求める。東日本大震災以降である、2011 年度～2012 年度のデータから以下の条件を満たすデータを選択し表 3.6 に示す 50 事例について各負荷の推定を行った。

- ① 1年以上の詳細なエネルギー消費量データがあるデータ
- ② そのうち、熱負荷（冷房負荷、暖房負荷等）が明らかである（地域冷暖房からの受け入れ熱データや、熱源機器の製造熱量、蓄熱槽からの放熱量）、もしくは本章の推定手法を用いて、熱負荷を算出可能な建物データ

表 3.6 標準負荷作成対象建物

事例名称	地域	電力負荷	冷房負荷	暖房負荷	給湯負荷	分析期間	備考
事務所01	北海道	A	B	C	×	2011/4/1-2012/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所02	関東	A	B	B	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所03	関東	A	B	B	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所04	関東	A	B	C	C	2012/4/1-2013/3/31	給湯は夏期温熱負荷より推定
事務所05	関東	A	C	C	×	2012/1/1-2012/12/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所06	関東	A	B	B	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所07	関東	A	B	B	C	2012/1/1-2012/12/31	
事務所08	関東	A	C	C	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所09	関東	A	C	C	×	2012/1/1-2012/12/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所10	関東	A	A	A	C	2011/4/1-2012/3/31	
事務所11	関東	A	A	A	×	2012/1/1-2012/12/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所12	関東	A	C	C	×	2011/4/1-2012/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所13	関東	A	B	B	C	2011/4/1-2012/3/31	
事務所14	関東	A	C	C	×	2011/4/1-2012/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所15	関東	A	A	B	C	2012/1/1-2012/12/31	
事務所16	関東	A	C	C	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所17	関東	A	A	A	×	2011/4/1-2012/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所18	北信越	A	C	C	×	2011/4/1-2012/3/31	給湯負荷のデータは無い。
事務所19	中部	A	A	A	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷は暖房負荷に含まれる
事務所20	中部	A	A	A	C	2011/4/1-2012/3/31	
事務所21	関西	B	C	C	×	2011/4/1-2012/3/31	電力負荷に水冷EHPの電力が含まれる。
事務所22	関西	A	B	B	C	2012/4/1-2013/3/31	
事務所23	関西	A	C	C	A	2011/4/1-2012/3/31	GHPの冷暖房負荷が含まれていない
事務所24	関西	A	C	C	×	2012/1/1-2012/12/31	
事務所25	中国・四国	C	C	C	×	2011/4/1-2012/3/31	一部期間のデータ欠損
事務所26	九州	A	B	A	×	2011/4/1-2012/3/31	給湯負荷のデータは無い。
官公庁01	東北	A	B	B	A	2012/1/1-2012/12/31	
官公庁02	中部	B	×	C	×	2012/4/1-2013/3/31	冷房負荷が推定出来ない。
官公庁03	関西	A	C	C	A	2012/1/1-2012/12/31	
官公庁04	中国・四国	A	C	C	A	2012/1/1-2012/12/31	
官公庁05	九州	A	C	C	A	2012/1/1-2012/12/31	3月の電力負荷が一部欠損
商業施設01	北海道	A	C	C	C	2012/1/1-2012/12/31	
商業施設02	北海道	B	A	C	C	2011/4/1-2013/3/31	2012/1/1-12/31はデータ欠損
商業施設03	東北	A	A	A	×	2012/1/1-2012/12/31	給湯負荷のデータは無い。
商業施設04	東北	A	C	C	×	2012/1/1-2012/12/31	
商業施設05	関東	A	A	C	C	2012/1/1-2012/12/31	給湯は夏期温熱負荷より推定
商業施設06	関東	A	C	C	C	2012/1/1-2012/12/31	給湯は夏期温熱負荷より推定
商業施設07	関東	A	A	C	C	2012/1/1-2012/12/31	給湯は夏期温熱負荷より推定
商業施設08	北信越	A	A	C	C	2012/1/1-2012/12/31	給湯は夏期温熱負荷より推定
医療施設01	関東	A	C	C	C	2011/10/1-2012/9/30	
医療施設02	関東	A	C	C	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷は暖房負荷に含まれる
医療施設03	関東	A	A	A	A	2012/4/1-2013/3/31	
医療施設04	北信越	A	C	C	×	2011/10/1-2012/9/30	給湯負荷は暖房負荷に含まれる
医療施設05	中部	C	×	C	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷は暖房負荷に含まれる
医療施設06	関西	A	A	A	C	2012/1/1-2012/12/31	
医療施設07	中国・四国	A	C	C	C	2012/4/1-2013/3/31	
宿泊施設01	関東	A	A	A	C	2011/10/1-2012/9/30	
宿泊施設02	関東	A	A	A	B	2011/11/1-2012/10/31	
大学施設01	関東	A	A	A	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷は暖房負荷に含まれる
大学施設02	関東	A	A	A	×	2012/4/1-2013/3/31	給湯負荷は暖房負荷に含まれる

表中の各負荷の A, B, C, ×の意味は、以下の通りである。

A: 「100%実測値」

B: 「負荷の一部を推定」

C: 「負荷の100%を推定、もしくは一部データ欠損」

×: 「負荷の推定が出来ない」

表 3.6 に示した事務所 26 件、官公庁 5 件、商業施設 8 件、医療施設 7 件、宿泊施設 2 件、大学施設 2 件について月代表日各時刻における負荷を求め平均化することにより標準負荷データを求めた。先に述べた条件①②を満たすデータに限られるので、建物用途によっては十分なサンプル数が確保できておらず、今後更なるデータ収集が必要である。

以降、各建物用途の時刻別標準負荷データについて述べる。標準負荷は、各月の平日、土曜および日曜休日代表日の 24 時間データで示している。

(1) 事務所

事務所ビル 26 件の負荷データ平均値を標準負荷として図 3.5 に示す。電力負荷が他の負荷よりも大きく、電力負荷は年間を通してほぼ同様の変動パターンである。冷房負荷の方が暖房負荷よりも大きい、震災前によく言われた「年間を通して冷房需要」という傾向は薄らいでおり、冬季暖房の立ち上がり時に大きな負荷が発生している。給湯負荷は BEMS にデータ化されていないケースが多くあり、それら含めた平均値であるため値が小さくなっており、適用に当たっては注意が必要である。

土曜日および日曜・休日は、稼働しているビルは平日とほぼ同様、非稼働ビルは冷暖房負荷がほとんど発生しないが、それらの平均が示されている。土曜日と日曜・休日の負荷変動パターンがほぼ等しいことから、土曜日に稼働するビルは日曜・休日も稼働し、非稼働ビルも同様であることがわかる。

(2) 官公庁

官公庁 5 件の負荷変動データ平均値を標準負荷として図 3.6 に示す。電力負荷は事務所ビルの半分以下である。また、昼休み時間の消灯の影響が明確に表れている。冷房負荷と暖房負荷が拮抗しているが、暖房負荷の方がわずかに大きい。また、中間期は冷暖房 off が徹底されている様子もうかがえる。土曜日および日曜・休日はほとんど非稼働である。

(3) 商業施設

商業施設 7 件の負荷変動データ平均値を標準負荷として図 3.7 に示す。商業施設では電力負荷と冷房負荷が非常に大きく、夏季の最大冷房負荷も非常に大きい。日中に大きな冷房負荷が発生するが、深夜は負荷がほとんどゼロとなる。平日と土曜日および日曜・休日で負荷変動パターンが同様であるが、最大負荷は日曜・休日に発生している。年間を通して給湯負荷も発生している。これは商業施設に飲食や温浴施設等の給湯需要のある施設が存在するためと考えられる。

(4) 医療施設

医療施設 7 件の負荷変動データ平均値を標準負荷として図 3.8 に示す。冷房よりも暖房負荷が大きく、夜間も冷房・暖房負荷が発生している。給湯負荷は年間を通して時間帯によらず概ね一定に発生している。

(5) 宿泊施設

宿泊施設 2 件の負荷変動データ平均値を標準負荷として図 3.9 に示す。サンプル数が少ないため、取り扱いには注意が必要である。冷房負荷が大きく、夏季は夜間でも非常に大きな値となっている。中間期・夏季には暖房負荷はほとんど発生していない。夜間から深夜にかけて給湯負荷にピークが発生していることが特徴的である。

(6) 大学施設

大学施設 2 件の負荷変動データ平均値を標準負荷として図 3.10 に示す。サンプル数が少ないため、取り扱いには注意が必要である。冷房負荷は夏季にもそれほど大きくなりませんが、夏季休暇等で生徒数が減っているためと考えられる。冬季立ち上がり時には大きな暖房負荷が発生している。今回の 2 件では、給湯関係のデータが存在しなかった。

現状では一部の用途では更なるデータ蓄積が必要であるものの、実績値をベースとした負荷の作成が可能となった。本手法は BEMS と組み合わせることにより自動化が可能であり、今後データの蓄積を重ねることで信頼性が向上していくものと思われる。

東日本大震災以降、エネルギー消費構造は大きく変わったが、今後も緩やかに変化していくものと考えられる。本手法により継続的に負荷データを求めていくことは、定点観測的なデータとしても意義があると考えられる。

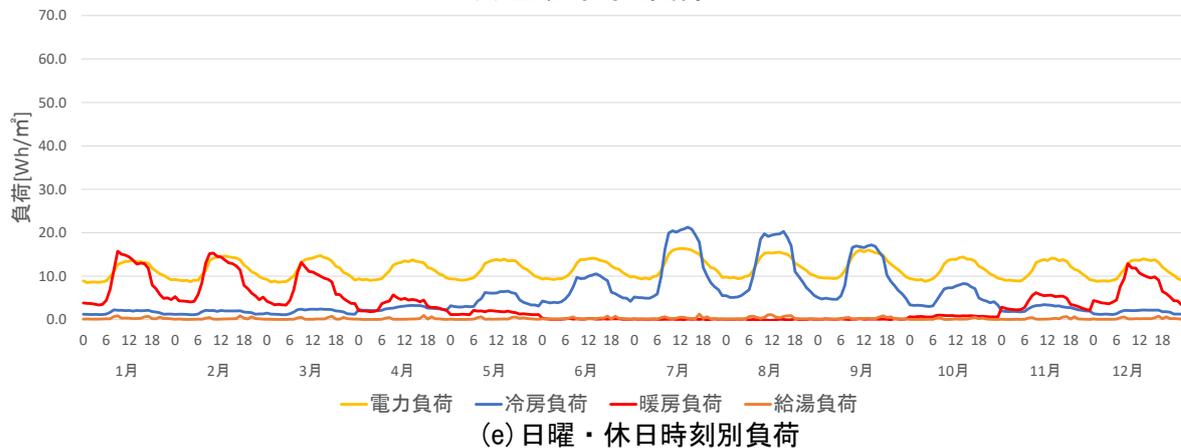
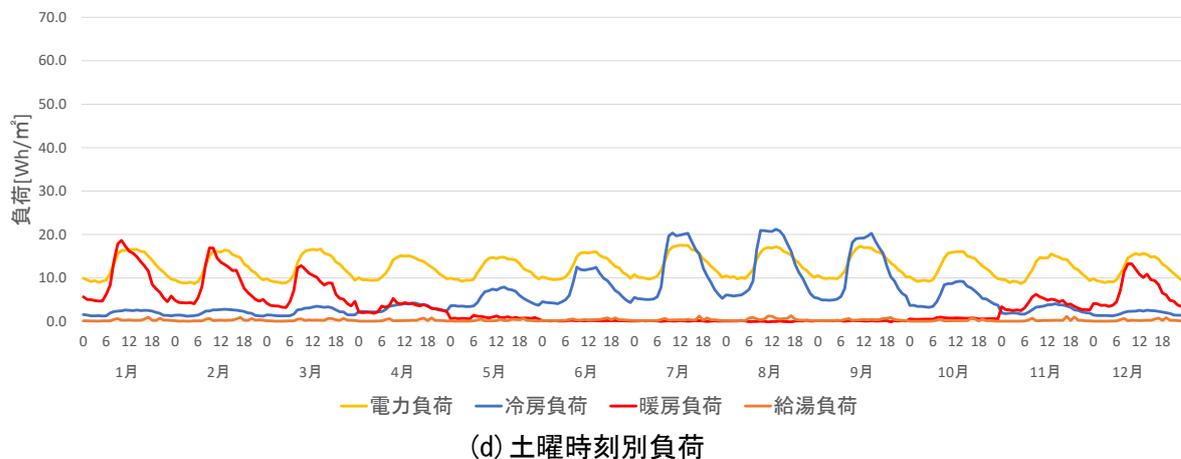
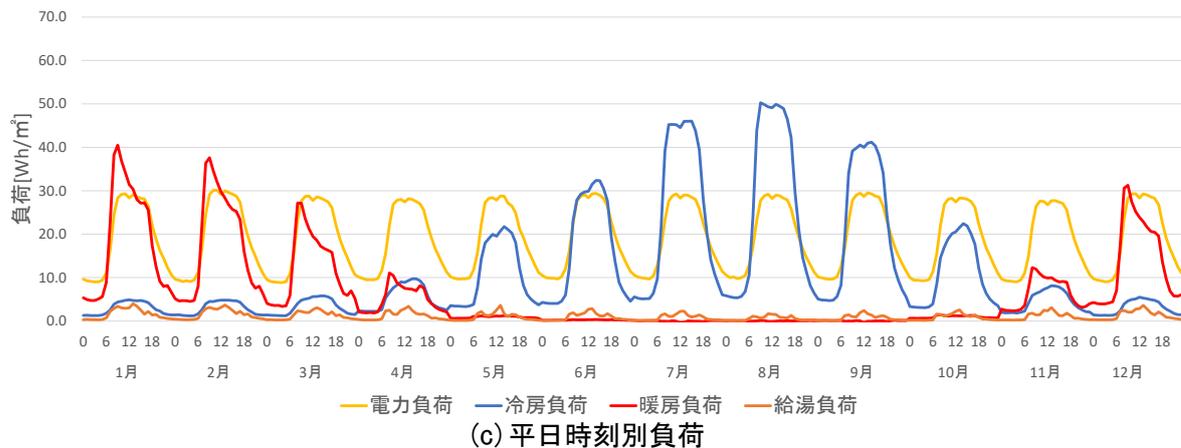
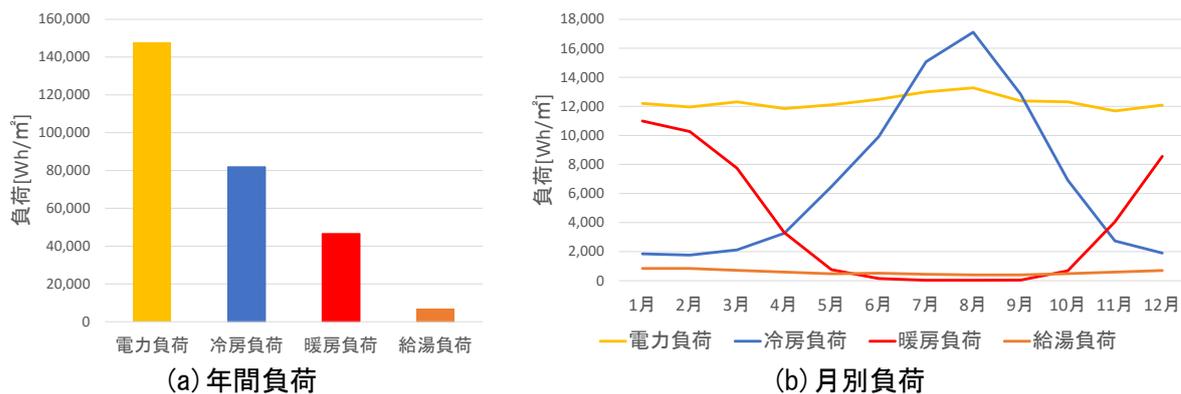


図 3.5 事務所ビルの標準負荷

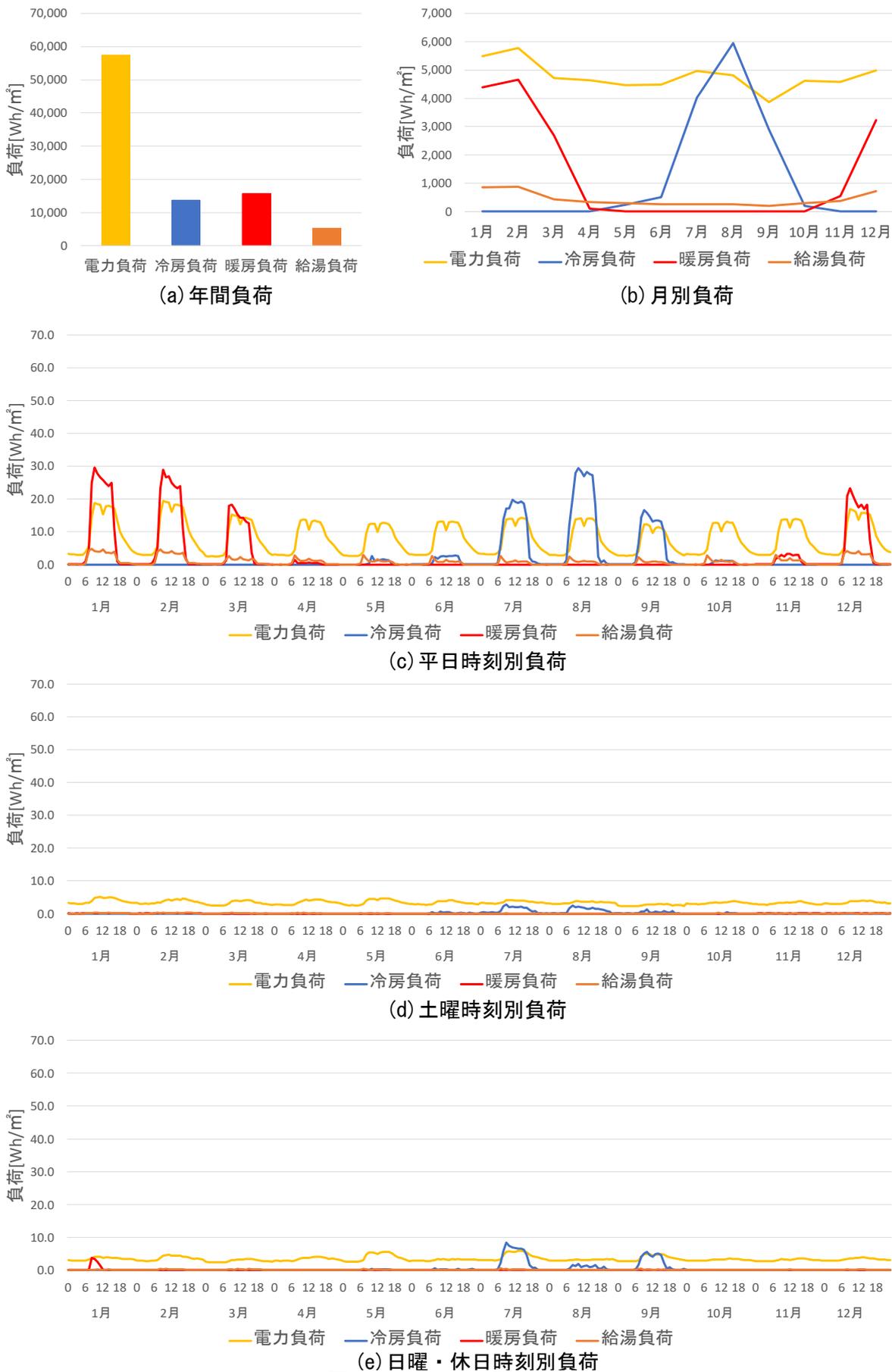


図 3.6 官公庁の標準負荷

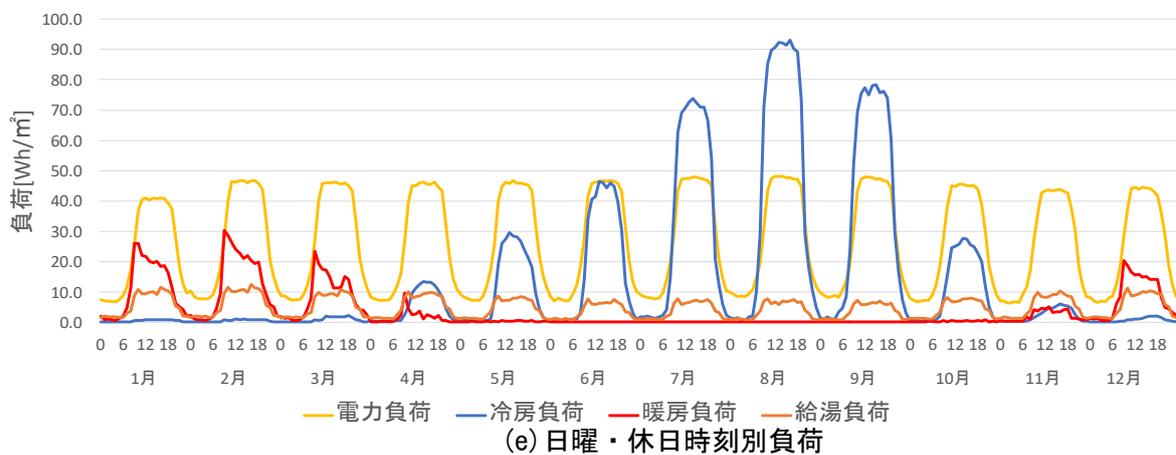
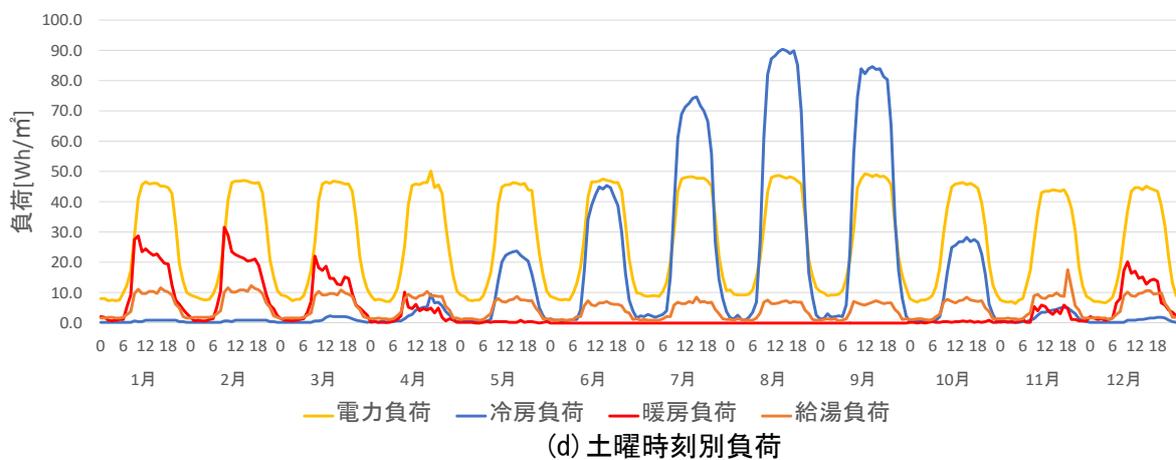
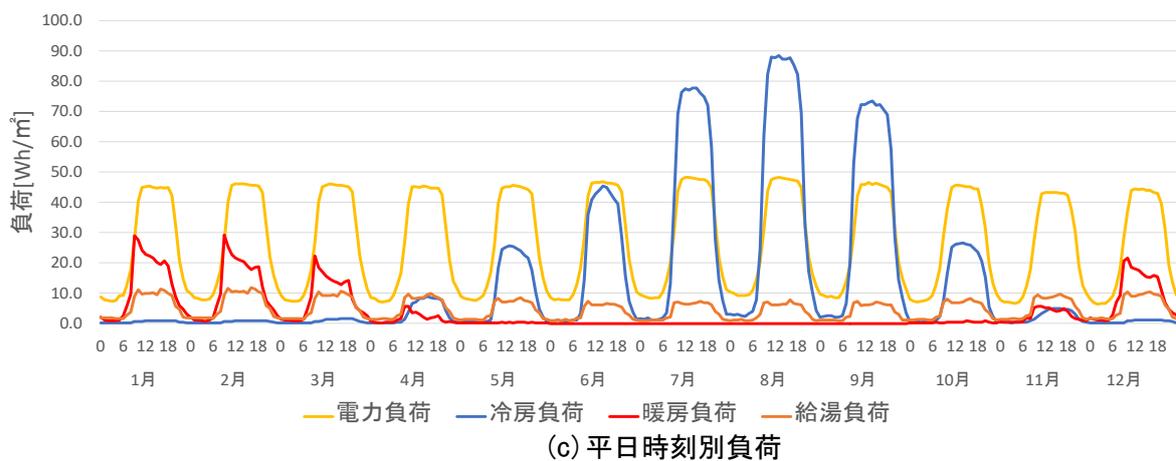
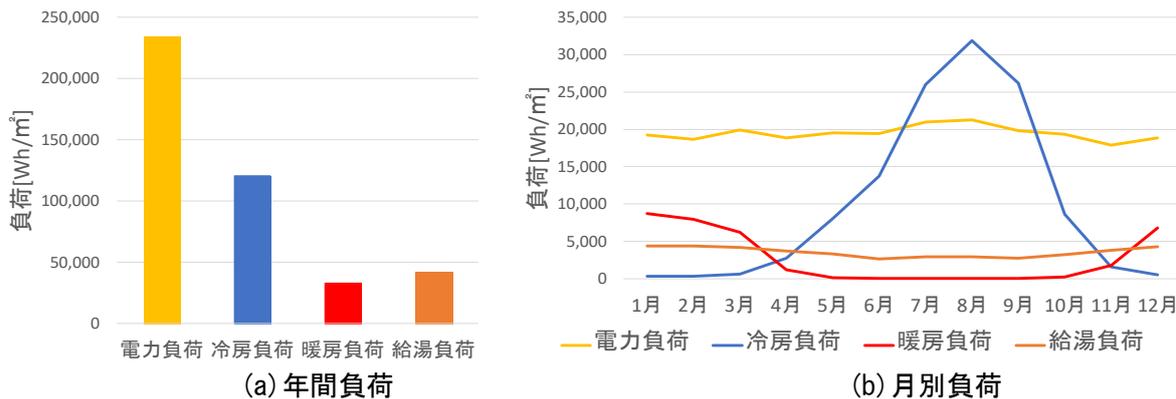


図 3.7 商業施設の標準負荷

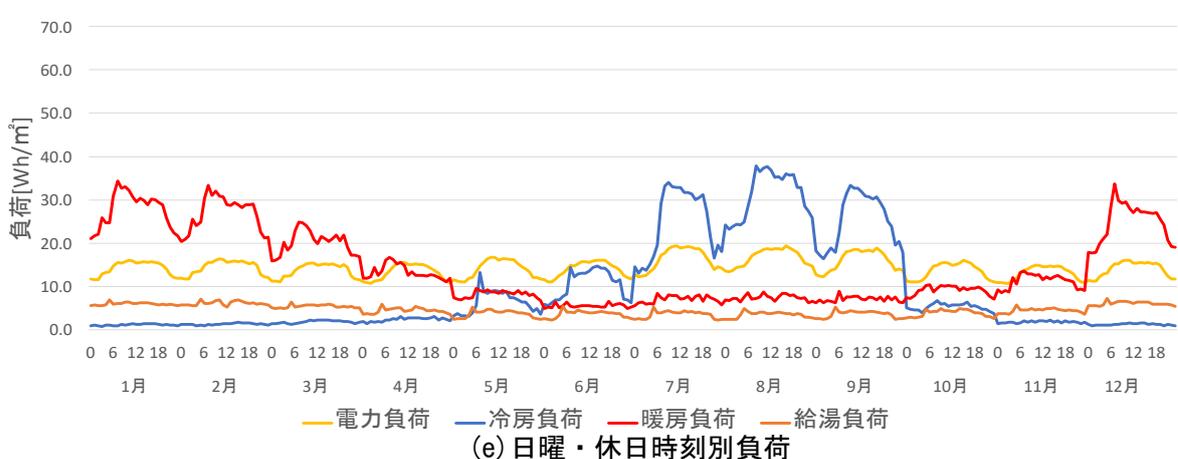
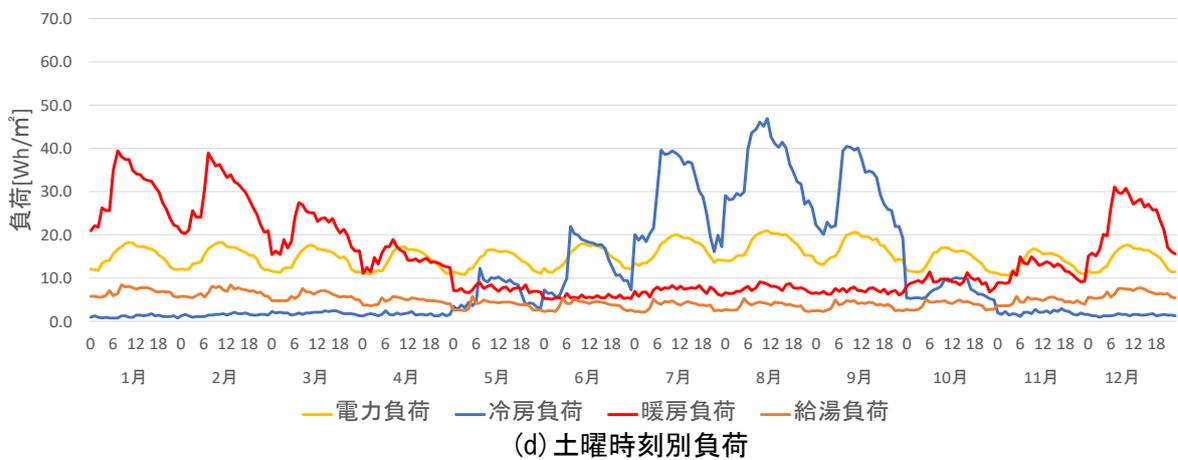
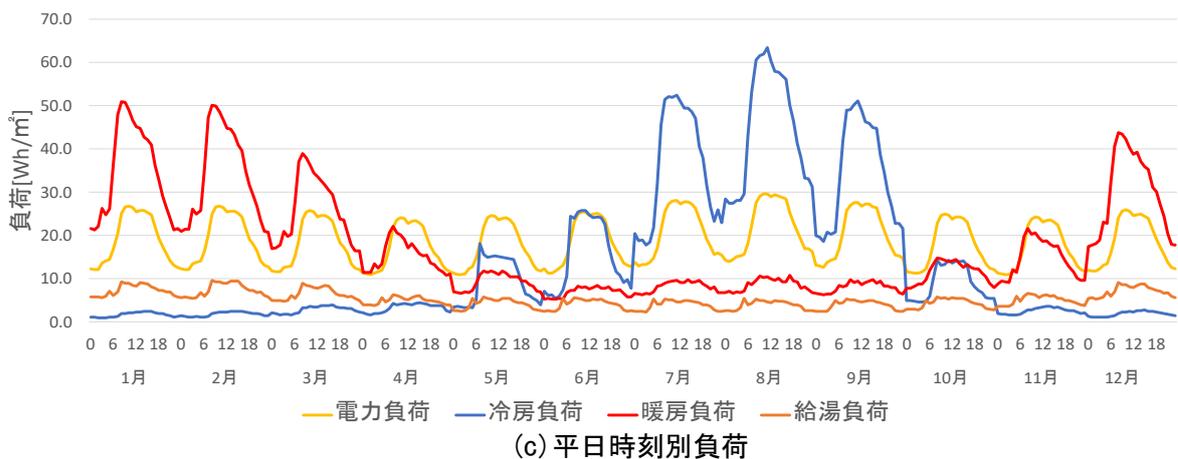
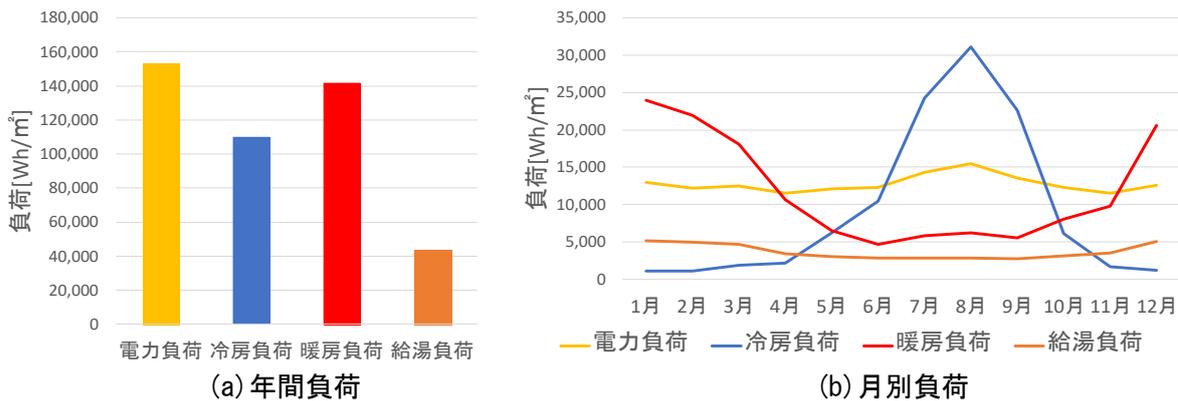


図 3.8 医療施設の標準負荷

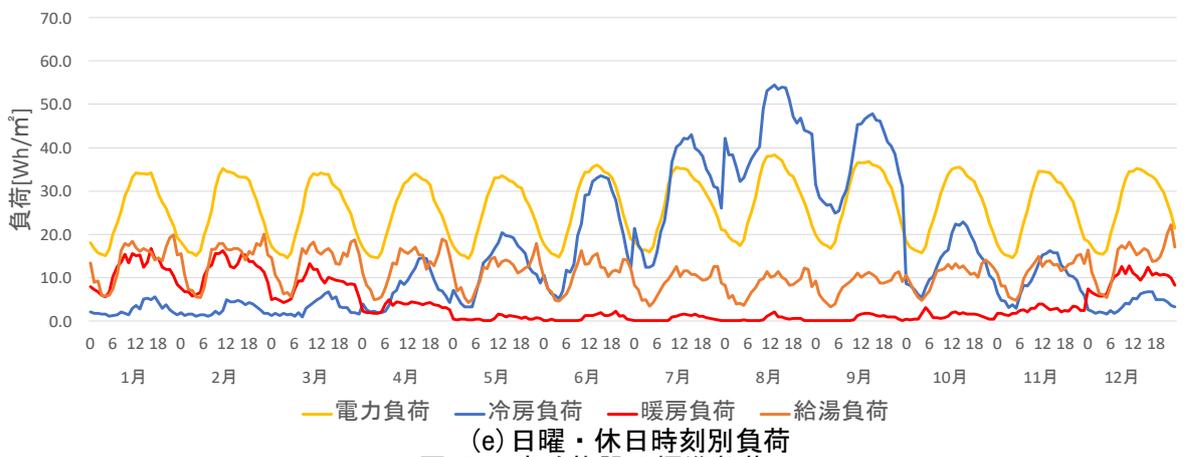
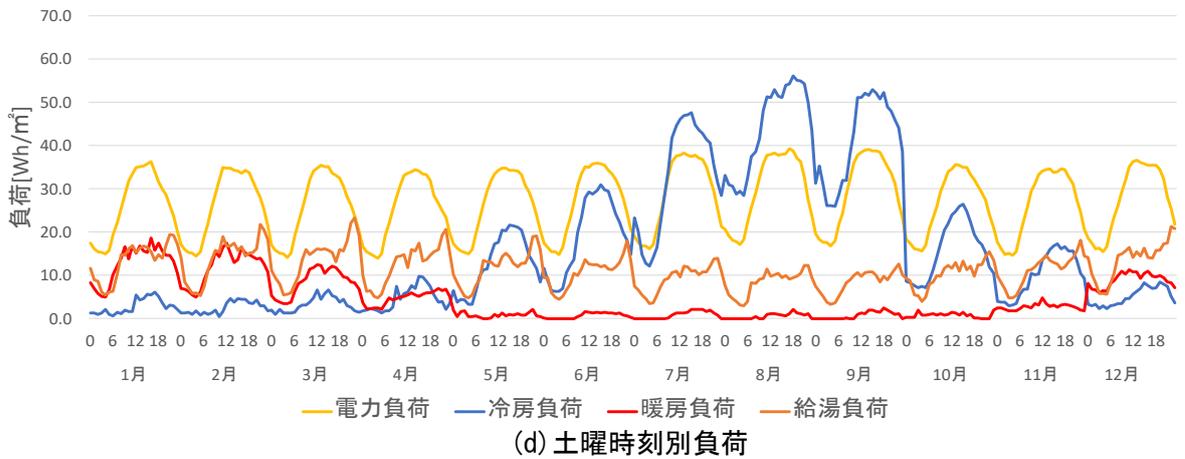
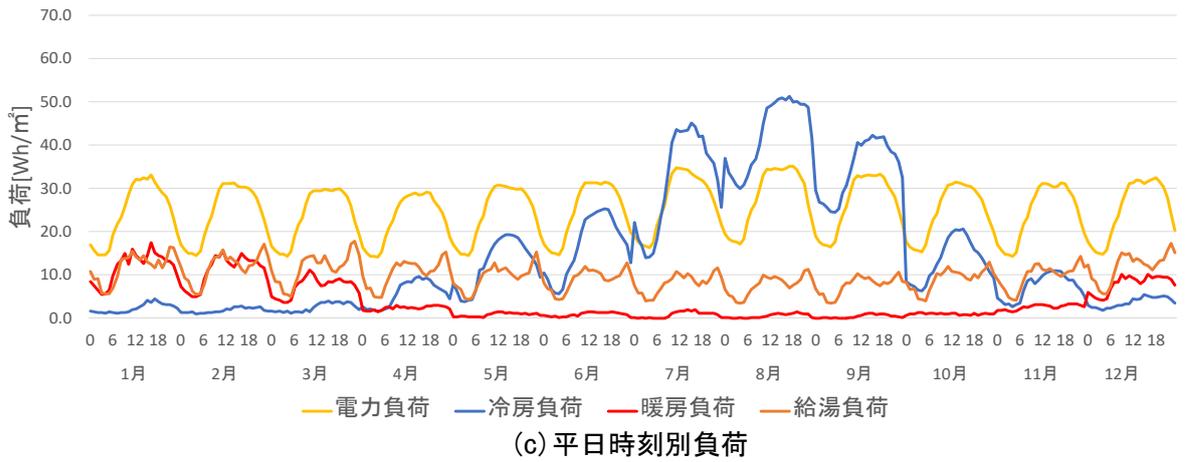
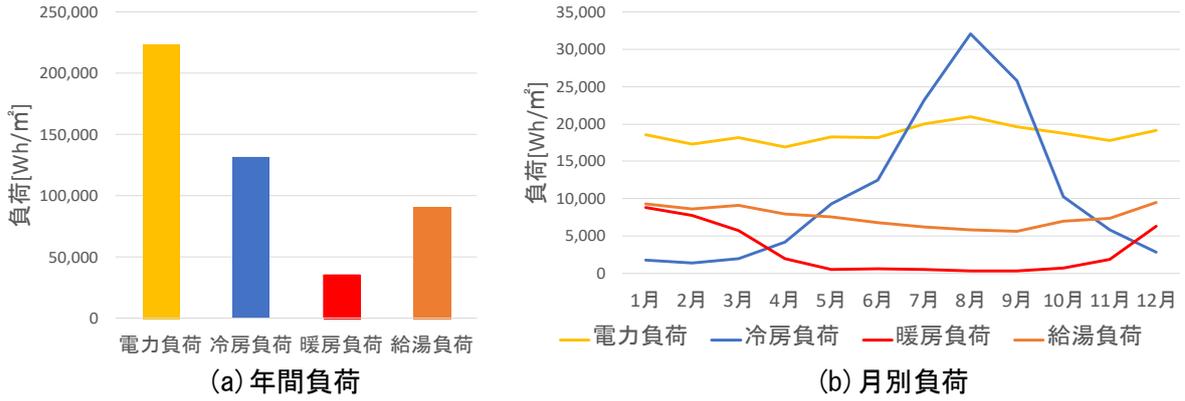


図 3.9 宿泊施設の標準負荷

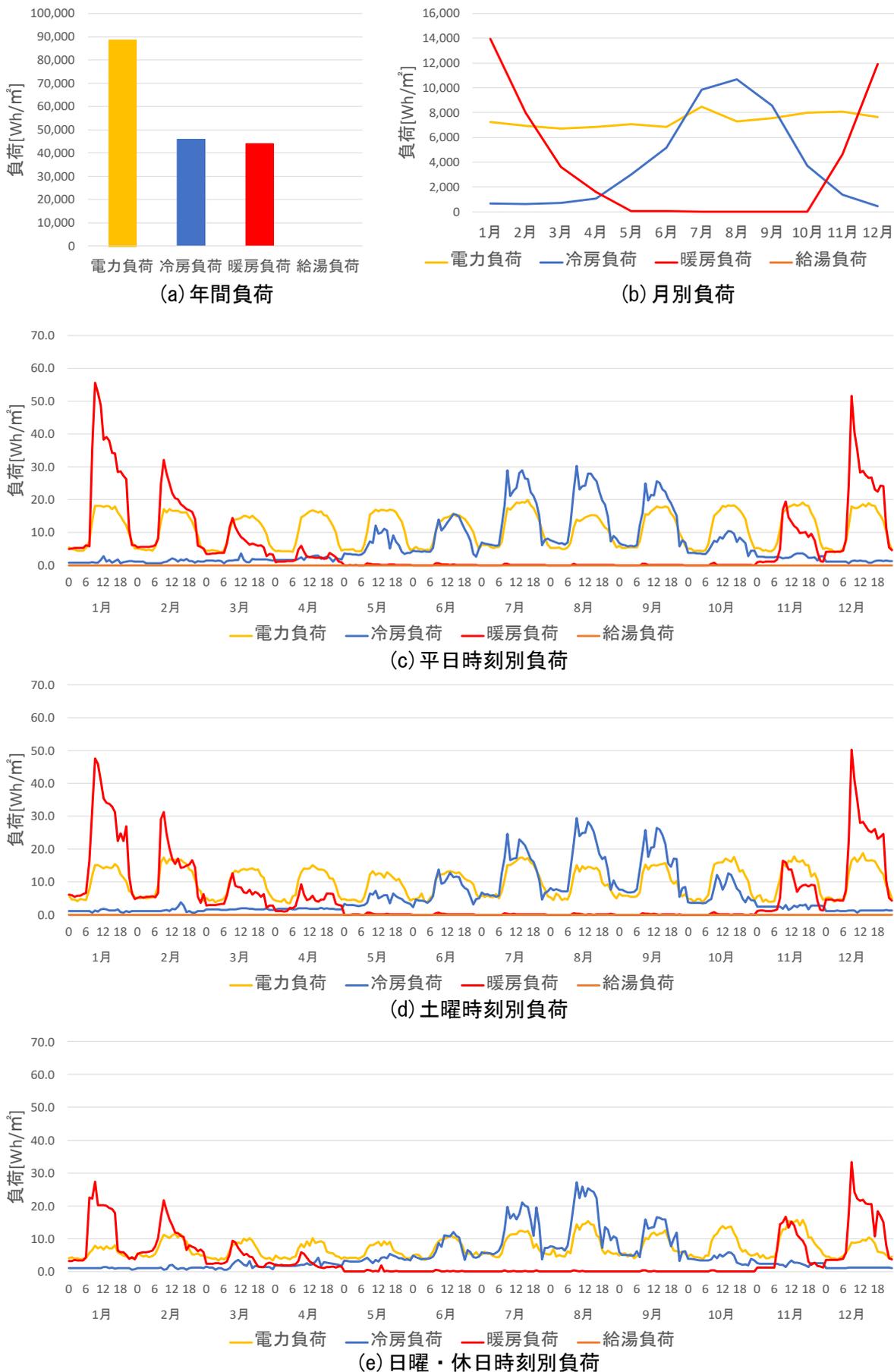


図 3.10 大学施設の標準負荷

3.4.7 既存時刻別負荷データとの比較

前節 3.4.6 で求めた建物ごとの時刻別負荷データを既存文献「都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価(1994)」²⁰⁾および「都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用(2015)」¹³⁾に示されている事務所、病院、宿泊、商業施設における負荷データと比較する。文献 20)は 1994 年の発行であり、1994 年以前の研究・調査等に基づき負荷が作成されている。また、文献 13)の負荷は CGS の設計を目的とする際の設計条件として作成されているため、例えば、近年の事務所や商業施設では局所給湯を採用することがほとんどであるが、局所給湯の場合は CGS の負荷とはならないため、文献 13)では事務所や商業施設の給湯負荷がゼロとなっていること等に注意が必要である。また、文献 13)に示されているのは、標準的な建物を想定してその負荷を BEST⁴³⁾で計算した結果であり、必ずしも既存ビルの代表として示されているわけではない。

以上の理由から、本手法の妥当性を確認する参考情報のひとつという位置付けで比較することとする。それぞれの年間負荷の合計を表 3.7 に、月別の合計負荷と 1 月および 8 月代表日における時刻別負荷データを図 3.11～図 3.14 に示す。

OA 機器等による内部発熱の増加により震災以前までは事務所の暖房負荷は減少傾向であったが、震災による電力需給ひっ迫を契機に OA 機器や照明の省電力化が進み、結果として暖房負荷は増加傾向にあると言われている。本研究で作成した DECC 平均値では暖房負荷が大きな結果となった。医療施設においても、DECC の暖房負荷が大きい結果となったが、いくつかの建物で給湯負荷が暖房に含まれていることが原因のひとつと考えられる。

時刻別の電力および冷房負荷は、DECC データの方がピークが低い傾向にあるが、これらは文献の負荷が設計条件であることが理由の一つであろう。一方で、夜間の負荷はいずれの建物用途においても DECC の方が高くなっている。宿泊および商業施設においては、年間負荷・時刻別データとも空衛学会データと同様の結果となった。

表 3.7 年間負荷の既存負荷データとの比較

	事務所			医療施設			宿泊施設			商業施設		
	空衛 2015	空衛 1994	DECC 平均									
電力[kWh/m ²]	115	140	148	209	170	153	183	200	224	284	226	234
冷房[MJ/m ²]	295	293	295	363	335	395	366	419	472	627	523	434
暖房[MJ/m ²]	56	130	168	162	310	510	200	335	127	188	147	119
給湯[MJ/m ²]	0	365	25	270	335	158	420	335	327	0	96	152
合計(一次) [MJ/m ²]	1,470	2,154	1,929	2,839	2,639	2,558	2,777	3,040	3,109	3,591	2,972	2,987

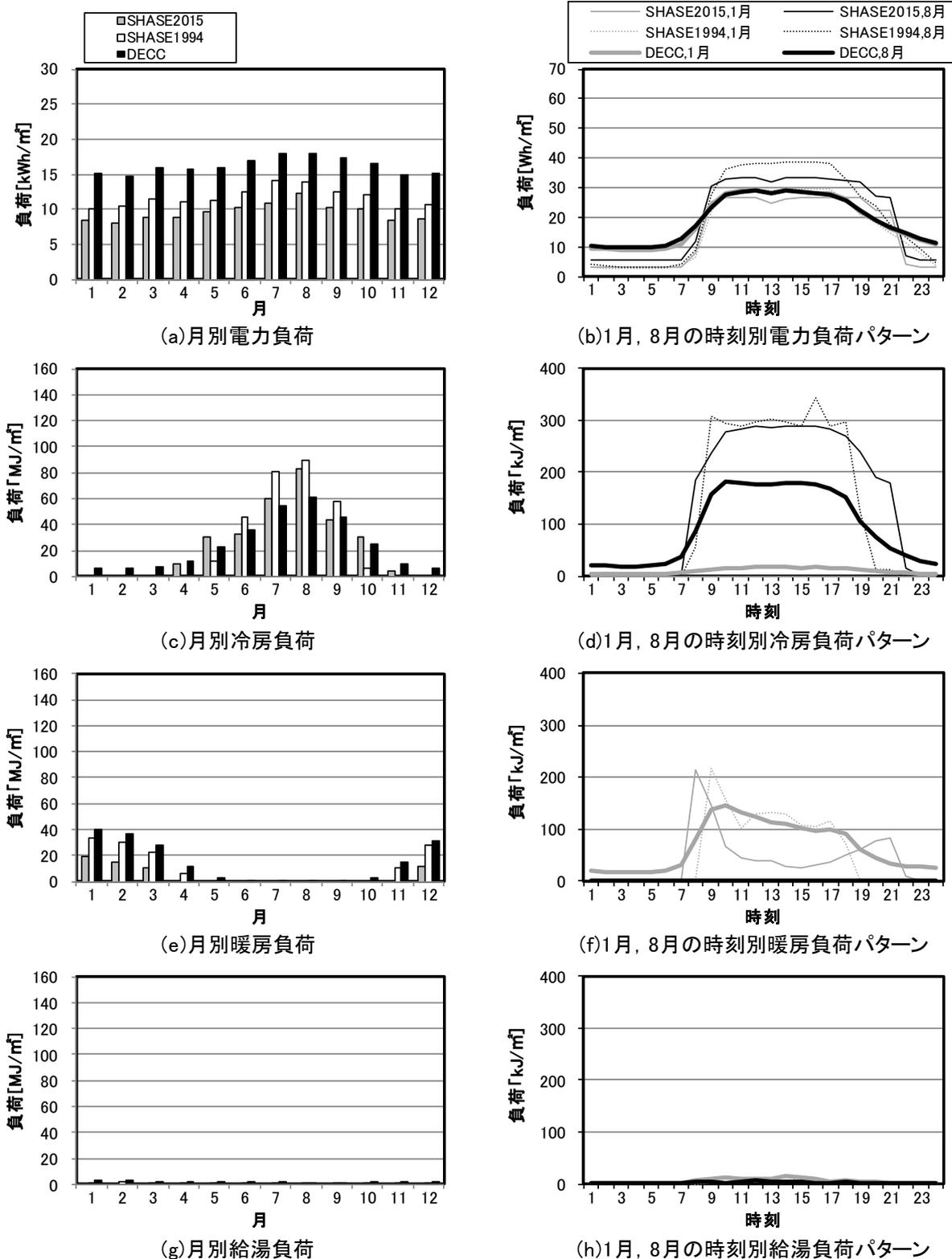


図 3.11 事務所ビルの負荷データ比較

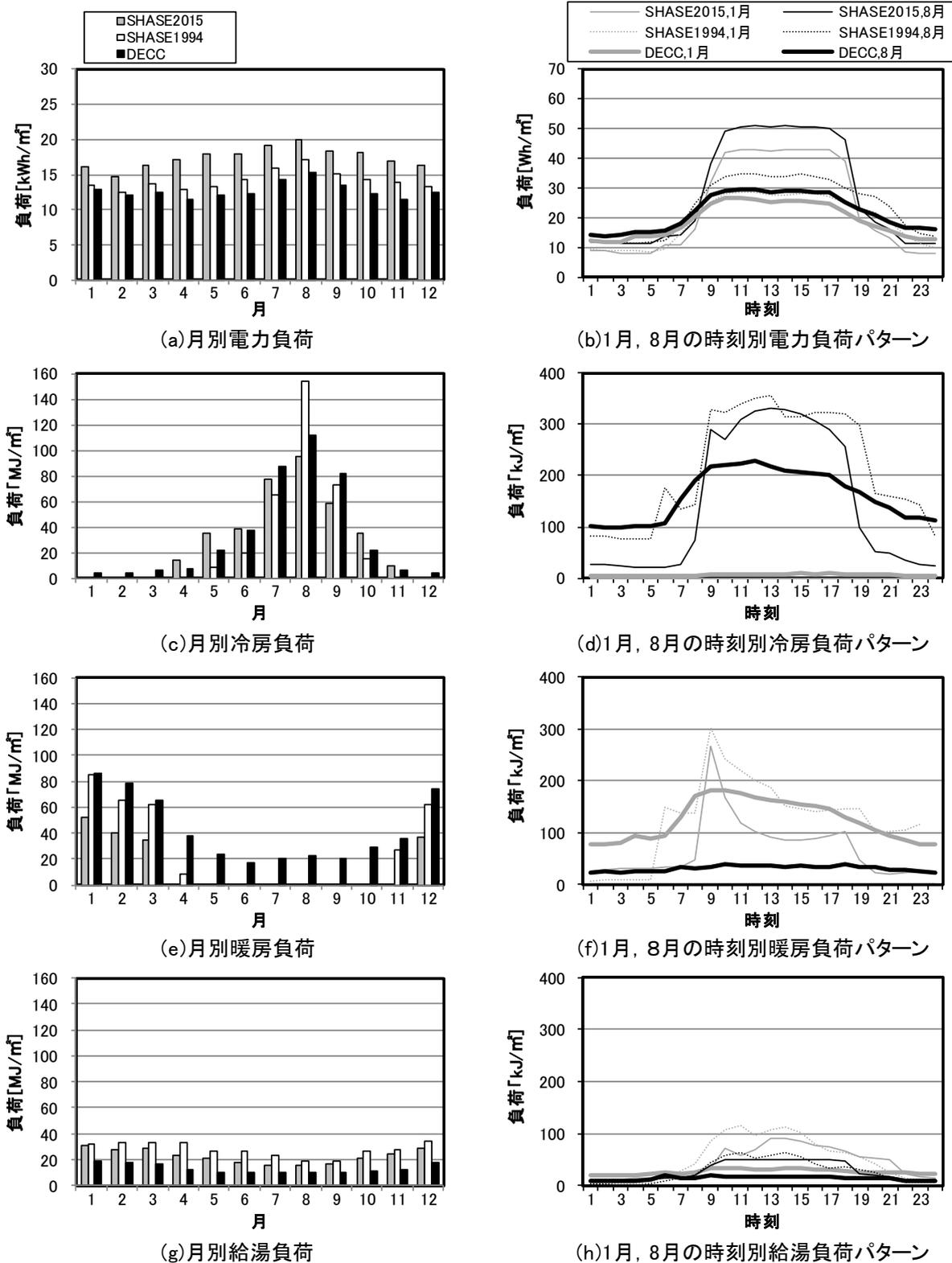


図 3.12 医療施設の負荷データ比較

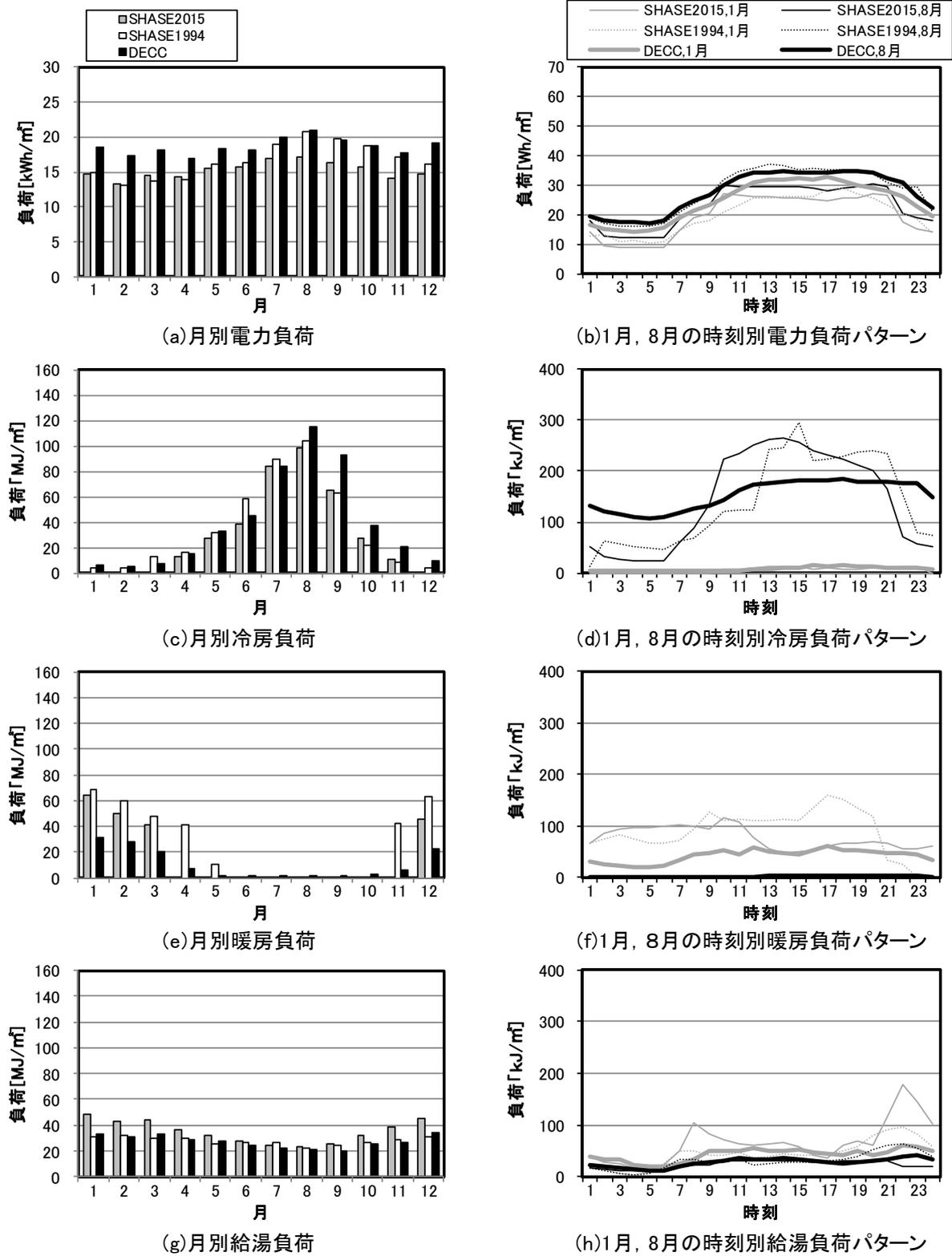


図 3.13 宿泊施設の負荷データ比較

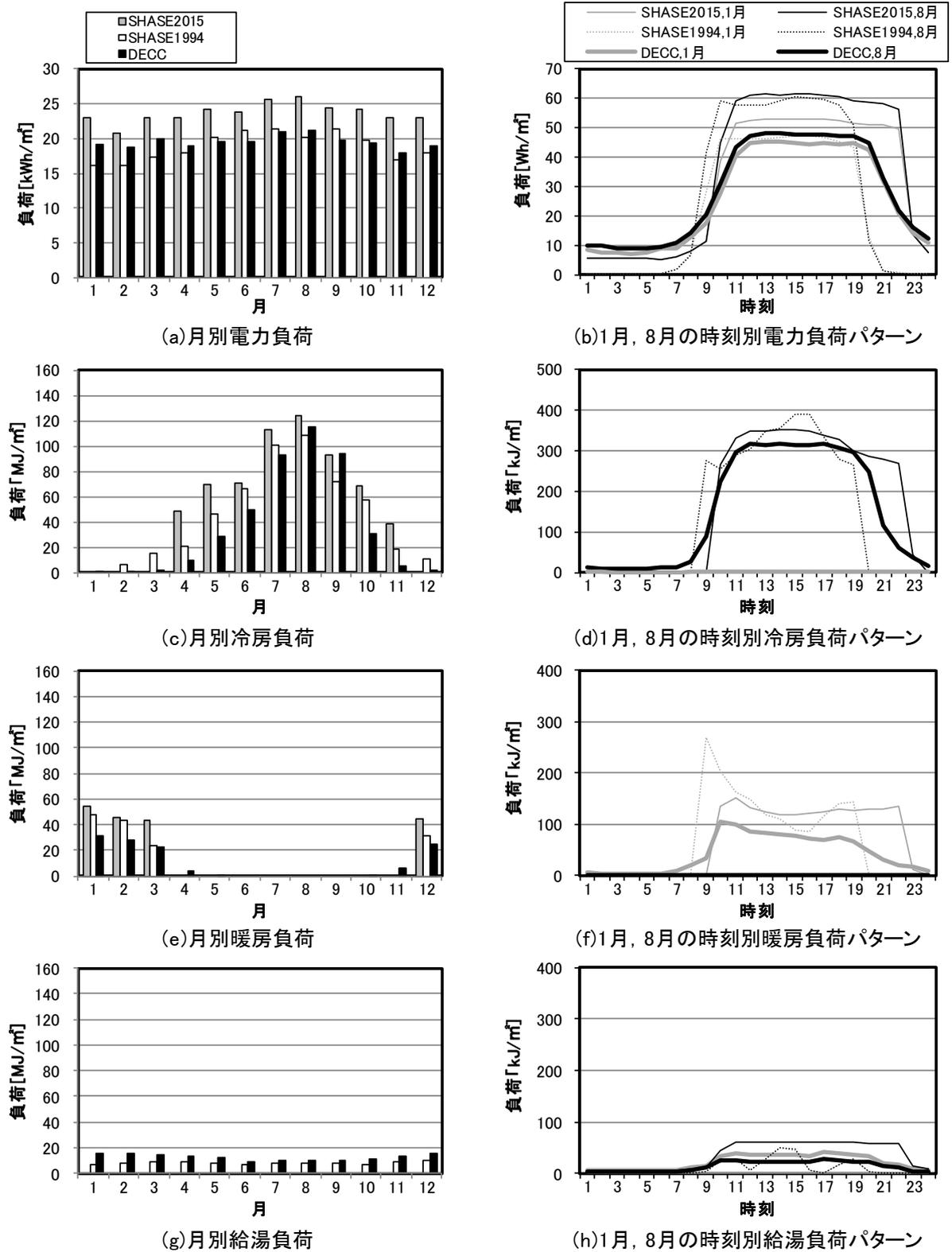


図 3.14 商業施設の負荷データ比較

3.5 要約

本章では、3.2で時刻別データを含む詳細データベースについて概説した。

3.3では、事務所用途を例として、26件の事務所ビルについて詳細データベースから一次エネルギー消費量をクラスター分析し、6通りに分類されたエネルギー消費変動データを作成した。

3.4では、LCEMに内包される各種熱源機器の特性式を用いて、詳細データベースの時刻別エネルギー消費量から熱負荷データを算出する手法を開発した。熱源タイプ毎に実測された負荷と比較し、開発された手法は実用的な精度であることを確認した。その手法をDECC詳細データベースに格納された50件のビルのBEMSデータに適用し、事務所・官公庁・商業施設・医療施設・宿泊施設・大学施設について、標準負荷データを作成した。現時点でサンプル数が十分でないことは否めないが、本研究で開発した手法により比較的容易に時刻別等の負荷データを求めることができるため、今後サンプル数を増加させていくことが可能である。

作成した標準負荷データは、実際の建築物や地域冷暖房施設を計画・設計する際に活用されることが期待され、エネルギー消費変動データは街区等でのエネルギー融通を計画・検討する際に時刻別の融通量等を見積る際に有効である。また、熱負荷算出手法はエネルギー消費量からほぼリアルタイムに負荷が算出できることから、空調設備や地域冷暖房設備の運転管理において、よりきめ細かな分析が可能となり、様々な場面で活用されることが期待される。

第2章および第3章では、建物単体におけるエネルギー消費について述べたが、第4章ではエネルギー供給側である地域冷暖房のシミュレーションツールの開発について述べる

第4章 建築・街区のエネルギー性能評価シミュレーションツールの開発

4.1 序論

本章では、複数建物にエネルギーを供給する、スマートエネルギーネットワークや地域冷暖房システムの性能評価を行うシミュレーションツールを開発する。4.2 で供給側における省エネ・省CO₂対策について概説し、4.3 で計算モデルについて述べる。4.4 で実際の地域冷暖房システムを対象として精度の検証を行う。

4.2 供給側における対策

都市部における省エネルギー・省CO₂を進める上では、需要家側の対策も重要であるが、それに加えて、前提となる都市のエネルギーシステムのあり方についても検討を加える必要がある。当該地域のエネルギーの需要・賦存状況に応じて、地域のエネルギー負荷を集約し、エネルギー効率が高くなる形で地域冷暖房システムの導入を促進し、建物間のエネルギー需給の補完関係を利用して相互にエネルギー融通を図ること等により、エネルギー効率の高い都市形成を進めていくことが重要である。以下に、都市のエネルギー効率を高める手法について述べる。

4.2.1 エネルギーの面的利用

「エネルギーの面的利用」とは、ある街区における建物同士での一体的取り組みやネットワークを形成することによる効率化に着目した供給システムをいう。通常、建物個別熱源システムでの高効率化には限界があることから、複数建物あるいは街区単位で熱・電力需要を総合的に検討することでエネルギー使用効率の改善をはかるものである。面的利用システムのメリットは、街区における複数のエネルギー需要を総合的に扱うことで、スケールメリットを活かした高効率機器の長時間における高効率運転を可能とすることにある。しかし、このシステムを効率的に運用するためには、設計段階におけるプラントシステム、熱源機器容量、地域導管システム等の検討はもとより、プラントの計画および設計等に有用となる建物用途毎の詳細な負荷モデルが必要不可欠となっている。

4.2.2 スマートエネルギーネットワーク

街区へのエネルギー供給という概念において、近年では次世代のエネルギー供給システムとして「スマートエネルギーネットワーク」の発想がある。これは、都市ガスや電気等の大規模ネットワークと、高効率コージェネレーションシステム・燃料電池等の分散型エネルギーや太陽光・太陽熱等の再生可能エネルギーを組み合わせ、さらに排熱等の未利用エネルギーも活用して、地域（街区）全体で高効率運用が可能なエネルギーネットワークを構築するものである。このシステムを具現化した場合のメリットは、大幅な省エネルギーおよびCO₂排出量の削減という環境性の向上はもとより、大規模ネットワークとの協調・協働およびエネルギー供給の多重化によるエネルギーセキュリティの向上を画策することが可能となる。すでにスマートエネルギーネットワ

一クの実証実験⁴⁴⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾が開始されているが、将来的に、普及を促進するためには前出の面的利用システムを含め、その街区におけるそれぞれの建物用途におけるエネルギー消費特性や熱源機器の出力特性等について、時間特性を含めた精細なデータの収集と、様々な状況を想定したエネルギー供給および消費に関する数値シミュレーション等を通じて幅広く検証する必要がある。

4.2.3 地域冷暖房

エネルギーの面的利用を実用レベルで活用しているシステムとして地域冷暖房が挙げられる。地域冷暖房とは、一定の地域内で冷房、暖房、給湯およびその他の熱需要を満たすため、1ヶ所または数カ所の熱供給設備（地域冷暖房プラント）で集中的に製造された冷水、温水、蒸気等の熱媒を、地域導管を用いて複数の需要家建物へ供給するシステムをいう。個別熱源システムでは、熱需要を満たすために冷凍機、ボイラ等の熱源機器を建物単位で設置するのに対し、地域冷暖房では地域内にある複数の建物に熱媒を供給するために熱供給設備を設け、そこに熱源機器を集約し冷温熱を製造し、地域導管によって各建物へ供給する。

地域冷暖房は、地域の熱源設備を集中するとともに、様々なエネルギーや各種のシステムを有効に組み合わせることにより、地域全体としての省エネルギー化を図ることができ、以下のようなメリットがある。

- ・ 熱源機器の集約によって機器の運転効率向上を図り、省エネルギーに貢献できる
- ・ 熱源機器の複数台設置・台数制御運転により、個別熱源システムに比べて、部分負荷時を含めた高効率運転が実現できる
- ・ CGSの導入により、熱と電力を有効に利用することができ、一次エネルギー消費量の削減が図れる
- ・ オフィスとホテル等、地域内の需要家間の熱需要ピーク発生時間帯にずれがあることから、それぞれが個別に熱源を持つよりも、全体として設備容量を低減することができ、結果として部分負荷率の向上となる
- ・ 個別の建物で冷暖房・給湯を行うよりも、大型の熱源機器を採用することができエネルギー効率が上がる

地域冷暖房方式と個別熱源システムのイメージを図4.1に示す。

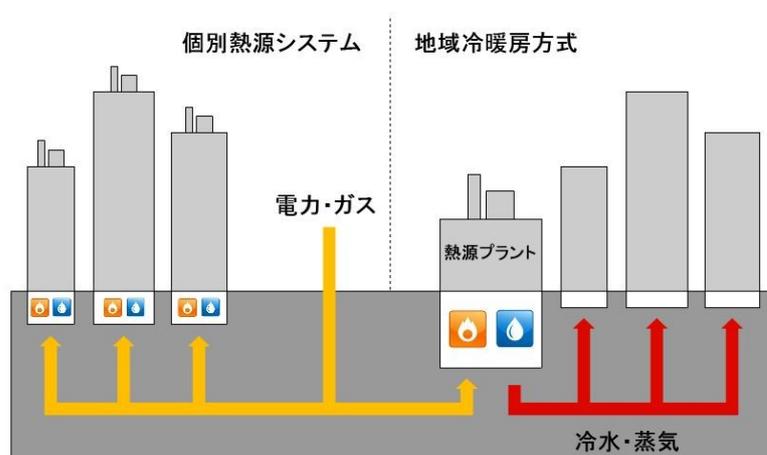


図 4.1 地域冷暖房方式と個別熱源方式

4.3 シミュレーションモデル

本節では、熱源等の時刻別稼働状況の把握が可能なシミュレーションモデルについて述べる。地域冷暖房システムやスマートエネルギーネットワークにおける運転を評価するためには、エネルギー供給を行う熱源システムの運転状況に加えて、時刻毎のエネルギーの融通状況をシミュレートする必要がある。また、熱融通に際しての熱および圧力ロスの影響を適切に考慮して街区全体として評価することが重要である。

4.3.1 計算フロー

前述の必要条件を考慮したフローチャートの例として、CGS 導入効果の評価シミュレーションを図 4.2 に示す。スマートエネルギーネットワークにおける熱融通の計算方法については、第 6 章で述べる。本シミュレーションでは、時刻毎に建物側の熱負荷合計に応じた熱源システムの運転条件を計算し、消費エネルギー量を求める。また、熱源プラントから需要家までの配管損失（圧力・熱）を考慮し、熱源機は需要家の負荷に加えて配管損失を賄うエネルギーを供給することとした。

熱源システムに CGS が含まれ、CGS の電力負荷がプラント内での消費電力である場合は、各時刻の計算において CGS の電力負荷が既知ではない。そのため、初期値として直前の時刻の電力負荷を用い、熱源機・一次ポンプや補機等のプラント内の電力消費量の合計値を電力負荷として、「CGS 運転判断」から再計算を行い、電力負荷が収束するまで繰り返し計算を行うこととした。

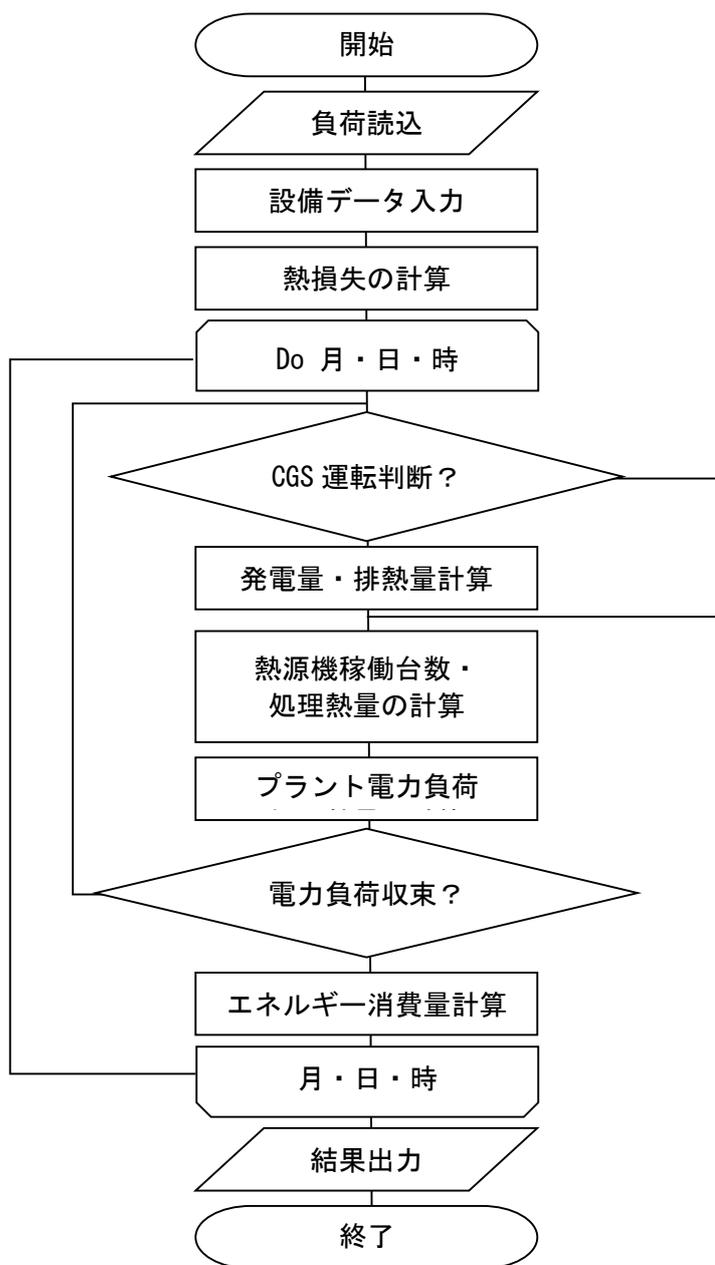


図 4.2 CGS 導入評価の計算フローチャート

4.3.2 熱源システム

熱源システムの計算対象は、地域冷暖房システムでは熱源プラントと需要家建物の受け入れ設備の熱源プラント側，個別熱源システムでは行きヘッダと還りヘッダの熱源側である。具体的には，以下の機器・項目が計算対象となる。

- ・ 熱源機（ターボ冷凍機・ガス吸収冷温水機・蒸気吸収式冷凍機・排熱投入型吸収冷温水機）
- ・ 冷却塔（ファン・ポンプ）
- ・ ポンプ（冷温水）

- ・ 蒸気ボイラ
- ・ CGS
- ・ 配管圧力損失
- ・ 配管熱損失

以下にそれぞれの計算モデルについて述べる。

(1) 熱源機

熱源機の部分負荷特性は、メーカーカタログ、技術資料に記載された特性曲線または特性表を最小二乗法にて関数化し、負荷率と冷却水温度を入力して成績係数 COP を求める。定格 COP と部分負荷 COP、負荷率は以下の式によって求める。

$$COP_{rated} = \frac{Q_{rated}}{E_{rated}} \quad (4.1)$$

COP_{rated} : 定格成績係数 [-]
 Q_{rated} : 定格能力 [kW]
 E_{rated} : 定格消費電力 [kW]

$$COP = \frac{Q}{E} \quad (4.2)$$

COP : 部分負荷成績係数 [-]
 Q : 冷房能力または暖房能力 [kW]
 E : 消費電力 [kW]

$$LF = \frac{Q_{req}}{Q_{rated}} \quad (4.3)$$

LF : 負荷率 [-]
 Q_{req} : 要求能力 [kW]
 Q_{rated} : 定格能力 [kW]

各冷凍機の負荷特性はメーカーカタログ⁴⁵⁾から得た。図 4.3 に吸収冷凍機およびターボ冷凍機の負荷率と COP 定格比を、排熱投入型吸収冷温水機については燃料消費量・排熱回収量の定格比を示す。

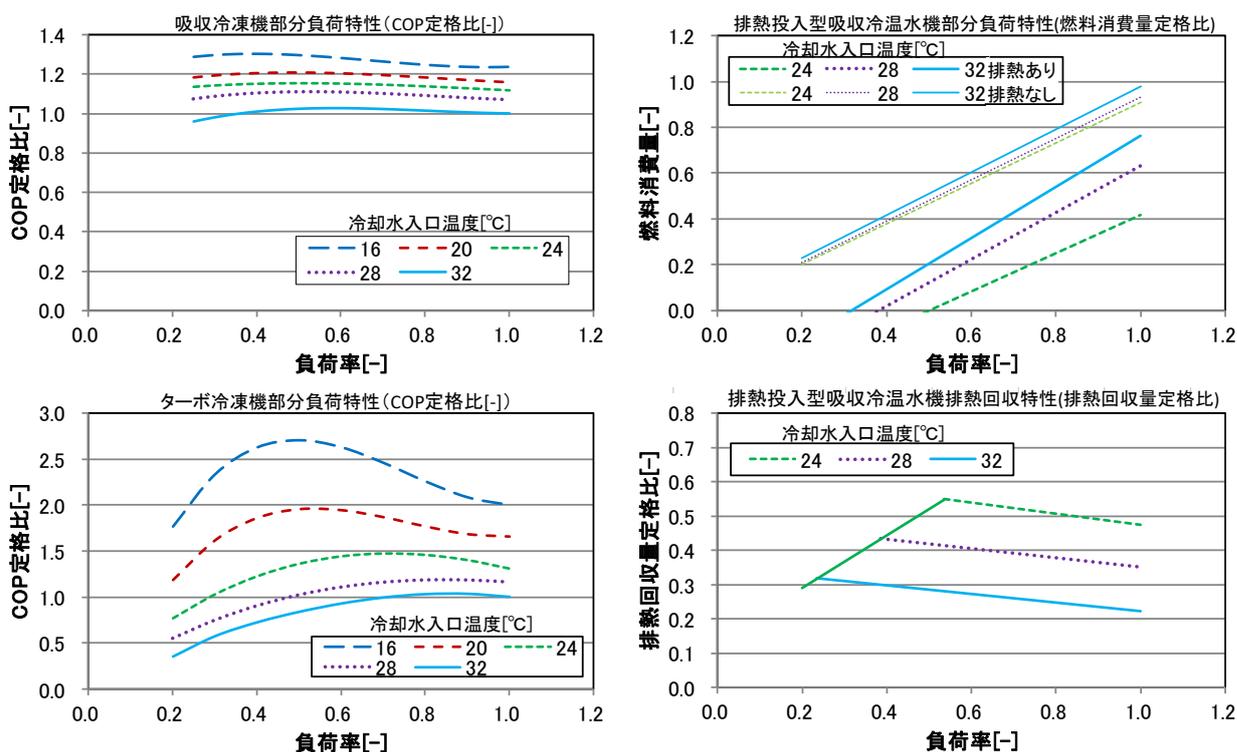


図 4.3 熱源機器の特性曲線

排熱投入型吸収冷温水機は冷却水入口温度で決まる一定の負荷率以下の時、必要排熱量を回収した場合、排熱単独運転が可能である。例えば、冷却水入口温度が 24℃の時、負荷率 0.5 以下の場合に排熱単独運転が可能となる。

負荷特性に関して、運転下限負荷率以下の領域では冷凍機が ON-OFF 運転に入るため COP は一定値をとるものとした。

(2) 冷却塔

冷却塔は開放型を想定した。冷却塔の性能は冷却水量、風量、冷却水温度、外気湿球温度等多くのパラメータに依存しているが、無次元数である移動単位数 (NTU) を用いることで解析を容易にすることができる⁴⁶⁾。

本シミュレーションでは移動単位数 (NTU) を以下の式(4.4)を用いて計算した。冷却水の温度レベルは、ターボ冷凍機は 37.0~32.0℃, 吸収式冷凍機, 排熱投入型吸収冷温水機には 37.5~32.0℃を採用した。表 4.1 に求めた NTU を示す。ファンの消費電力はカタログ値を利用し、負荷に関わらず定格運転とする。

$$NTU = \int_{T_{w,out}}^{T_{w,in}} \frac{c_w}{h_s - h} dT_w \quad (4.4)$$

- NTU : 移動単位数 [-]
- $T_{w,in}$: 冷却水入口温度 [℃]
- $T_{w,out}$: 冷却水出口温度 [℃]

- c_w : 水の比熱 [kJ/kg・K]
- h_s : T_w に相当する飽和空気のエンタルピ° [kJ/kg(DA)]
- h : T_w に相当する空気のエンタルピ° [kJ/kg(DA)]

表 4.1 移動単位数

	水温レンジ	NTU
ターボ冷凍機	37~32°C	0.7398
吸収式冷凍機	37.5~32°C	0.8031

(3) ポンプ

ポンプの電力消費量は、冷水流量および揚程より軸動力をメーカーカタログから選定し、電動機の力率 90%としてポンプ消費電力を計算した。ポンプ流量は以下の式(4.5)で算出する。

個別熱源システムにおける各ポンプの循環温度差、揚程を表 4.2 に示す。個別熱源システムの揚程に関しては熱源機器まわり配管の圧力損失を仮定し、接続する熱源機器の機内圧力損失（メーカーカタログ値）⁴⁷⁾を加えて求める。

地域冷暖房システムでは、地域導管内で発生する圧力損失をダルシー・ワイズバッハの式で算出する。式に関しては式(4.7)に後述する。算出した必要揚程をメーカーカタログより関数化したポンプ必要動力の式に入力することで、搬送距離をパラメータとした地域冷暖房のエネルギーシミュレーションが可能である。一次側ポンプは定流量運転、二次側ポンプはインバーター運転を行う。二次側の冷温水ポンプのインバーター特性を図 4.4 に示す。

$$q_p = \frac{60 \times Q_{sl}}{c_w \times \Delta t_w} \tag{4.5}$$

- q_p : ポンプ流量 [L/min]
- Q_{sl} : 全熱負荷 [kW]
- c_w : 水の比熱 [kJ/(kg・K)] ←4.2 kJ/(kg・K)
- Δt_w : 循環温度差 [°C]

表 4.2 ポンプの循環温度差と揚程

ポンプの種類		往還温度差	揚程(機内圧損+配管圧損)
一次側	冷温水ポンプ	5°C	チラー内圧損+20m
	ボイラ用温水ポンプ	15°C	ボイラ内圧損+20m
	冷却水ポンプ	5°C	チラー内圧損+冷却塔内圧損+10m
二次側	冷温水ポンプ	7°C	AHU 内圧損+50m

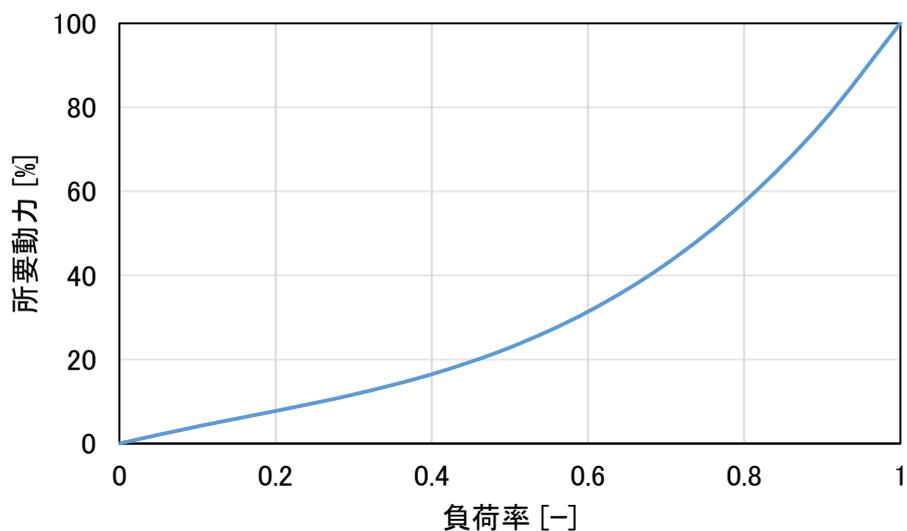


図 4.4 二次側ポンプのインバーター特性

(4) 蒸気ボイラ

本計算では、温熱源機として蒸気ボイラおよび CGS の排熱を使用する。蒸気ボイラの部分負荷特性はメーカーカタログ⁴⁸⁾から得た図 4.5 に示す特性を使用する。

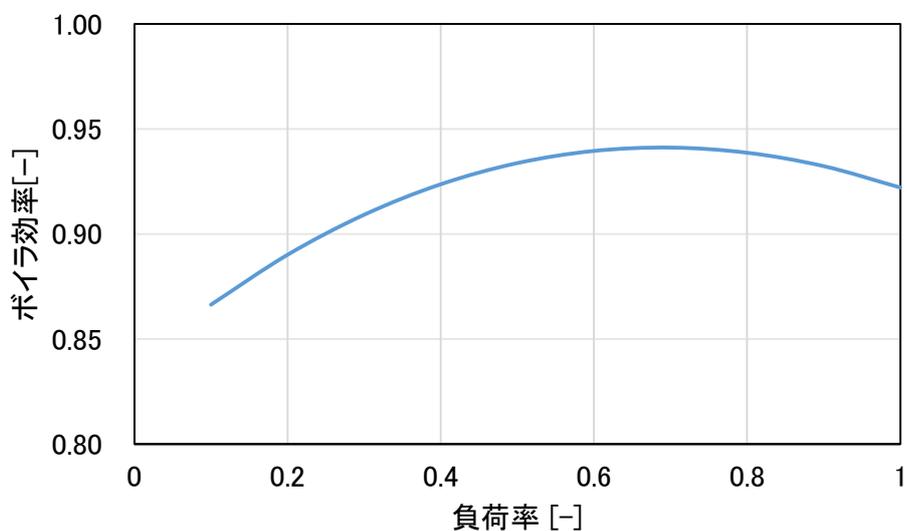


図 4.5 蒸気ボイラの部分負荷特性

(5) CGS

CGS の稼働条件は、電力負荷が発電機容量の 50%を超えた時とする。電力負荷追従運転を行う場合、瞬時的な電力負荷変動による逆潮流を回避するため最低買電量を最大電力負荷の 5%と設定する。また、発電した電力のうち 5%は発電機の補機動力として使用される。

本研究では業務用での適用を想定するため、原動機は発電効率の高いガスエンジンとし、370kWクラスおよび2MWクラスを想定し、文献⁴⁹⁾より図4.6に示す特性を使用する。2MWクラスでは、負荷率0.7程度以上の領域では、系統電力(36.9%HHV)よりも高い発電効率となっている。

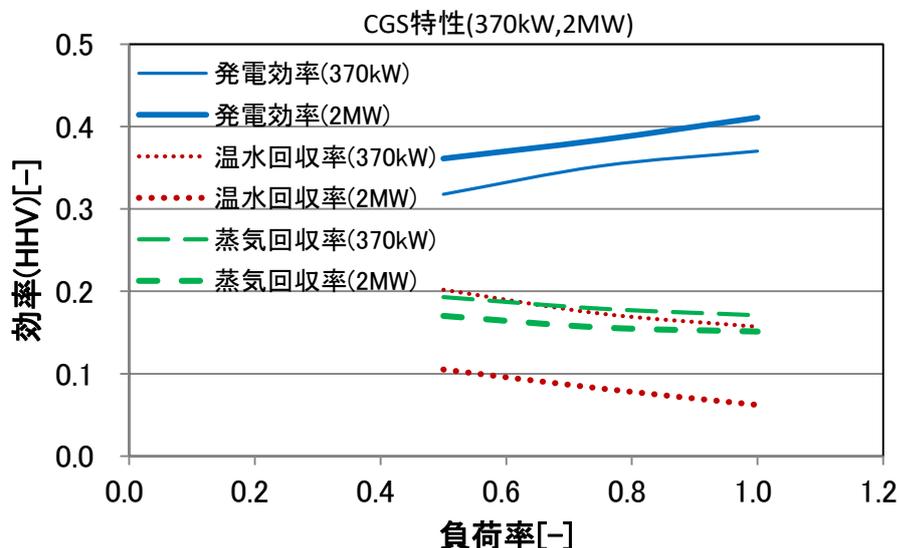


図 4.6 CGS の部分負荷特性(HHV)

(6) 配管圧力損失

地域冷暖房モデルにおいて、地域導管系で必要とされる冷水ポンプの全揚程は式(4.6)で求められる。このうち実揚程（静水頭）は、密閉配管ではゼロとなる。機器内の圧力損失は、接続する冷水ポンプおよび熱交換器の機内圧力損失（0.05MPa）を加えて求める。

$$H = H_s + h_p + h_d + h_m \quad (4.6)$$

- H : ポンプの全揚程 [mAq]
- H_s : 実揚程（静水頭） [mAq]
- h_p : 直管部分の圧力損失 [mAq]
- h_d : 配管の局部抵抗 [mAq]
- h_m : 機器類の圧力損失 [mAq]

直管部分の圧力損失はダルシー・ワイズバッハの式で算出する。これは、「流れが十分に発達した円管内定常流の管摩擦損失」を与える式で、式(4.7)のように表される。管摩擦損失は、管の口径に反比例し、管長ならびに管内平均流速の二乗にそれぞれ比例することを示している。

$$\Delta P = \mu \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \rho \quad (4.7)$$

ΔP	: 直管部分の圧力損失 [Pa]
μ	: 管の摩擦係数 [-]
l	: 管の長さ [m]
d	: 管の内径 [m]
v	: 流速 [m/s] ←2.75m/s
ρ	: 流体の密度 [kg/m ³]

管の摩擦係数は、レイノルズ数と管内面の粗さや管径により決まるもので、ムーディー線図により求めることができる。地域冷暖房の水配管においては、ほぼ乱流域の範囲となると考えられるので、このような領域ではムーディーの提案した近似式(4.8)が適用できる。

$$\mu = 0.0055 \left\{ 1 + \left(20000 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (4.8)$$

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (4.9)$$

ε	: 管壁等価粗さ [m] ←0.003m
Re	: レイノルズ数 [-]
ν	: 動粘度 [m ² /s] ←1.332×10 ⁻⁶ m ² /s

配管の継ぎ手および弁類の局部抵抗は式(4.10)で表される。

$$\Delta P_d = \zeta \frac{v^2}{2} \rho \quad (4.10)$$

ΔP_d	: 局部抵抗による圧力損失 [Pa]
ζ	: 局部抵抗係数 [-]
v	: 流速 [m/s] ←2.75m/s
ρ	: 流体の密度 [kg/m ³]

(7) 配管熱損失

地域冷暖房システムは搬送距離が延長するほどポンプ消費量はもとより、地域導管内での熱損失量が増大し、熱源システムへの影響が顕著である。そこで、本シミュレーションでは、配管熱

損失を以下の式に従い算出した．地域冷暖房の一次側熱源システムの計算では建物熱負荷に配管熱損失を加え計算する．

一般に，長さ dx の配管中で dQ の熱損失があった場合，次の熱収支式(4.11)が成立する．

$$cG \frac{dT}{dx} = \pi DK (T_{out} - T) \quad (4.11)$$

- c : 熱媒の比熱 [kJ/(kg・k)] ←4.2 kJ/(kg・K)
- G : 質量流量 [kg/s]
- T : 管内熱媒温度 [°C]
- T_{out} : 洞道温度 [°C] ←30°C
- D : 管内径 [m]
- K : 熱貫流率 [kW/(m²・k)]

熱貫流率 K は以下の式(4.12)によって求められる．

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{a_i r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_g} + \frac{1}{a_g r_2} \right) \times 1000} \quad (4.12)$$

- r_1 : 管内側半径 [m]
- r_2 : 断熱材外側半径 [m]
- a_i : 管内面側表面熱伝達率 [W/(m²・K)]
- a_g : 管断熱材側表面熱伝達率 [W/(m²・K)]
- λ_g : 断熱材熱伝導率 [W/(m²・K)]

断熱材側表面熱伝達率 a_g は，温度差 5°C の自然対流熱伝達率，流速約 0.25m/s の強制対流熱伝達率に相当する $a_g = 2.3$ W/(m²・K) を使用する．管内面側表面熱伝達率 a_i は，管内乱流熱伝達の実験式であるディタス・ベルターの式(4.13)を用いて算出する．

$$\frac{a_i \cdot 2r_1}{\lambda} = 0.023 \left(\frac{v \cdot d}{\nu} \right)^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4} \quad (4.13)$$

- λ : 熱媒の熱伝導率 [W/(m・K)] 冷水←0.59 W/(m・K)
蒸気←0.032 W/(m・K)

ν	: 熱媒の動粘度 [m ² /s]	冷水 ← 1.33 × 10 ⁻⁶ m ² /s 蒸気 ← 3.24 × 10 ⁻⁶ m ² /s
v	: 熱媒の流速 [m/s]	

ここで、管内を流れる質量流量 G の流体が dT だけ温度降下したとすると、式(4.11)を管長 x について積分することで、以下の配管内平均流体温度 T の関数式(4.14)が得られる。これを式(4.15)に代入し、搬送動力を加えたものを冷水配管における配管熱損失量 Q_{loss} とする。

$$T = T_{out} - e^{-\frac{\pi DK}{cG}L} (T_{out} - T_{st}) \quad (4.14)$$

$$Q = cG\Delta T \quad (4.15)$$

$$Q_{loss} = \left(cG(T_{st} - T_{out}) \left(1 - e^{-\frac{\pi DK}{cG}L} \right) + PUMP \right) \times \frac{60 \times 60}{1000} \quad (4.16)$$

T	: 配管内熱媒平均温度 [°C]
T_{st}	: 配管入口熱媒温度 [m]
T_{out}	: 洞道温度 [°C] ← 30°C
Q_{loss}	: 配管熱損失量 [MJ/h]
$PUMP$: 搬送動力 [kW]

蒸気配管の場合、トラップ直後の再蒸発等、機器の損失から約 10% 程度の熱損失が生じる。また配管から保温表面からの熱損失は、冷水配管の場合に比べ、蒸気配管では約 3% 多くなる。従って、蒸気配管の熱損失を式(4.17)のように仮定する。

$$Q_{loss,s} = Q_{loss} \times 1.03 + Q_{ll} \times 0.1 \quad (4.17)$$

$Q_{loss,s}$: 蒸気配管熱損失量 [MJ/h]
Q_{ll}	: 供給熱量 [MJ/h]

(冷水配管との変更点)

・ 搬送距離 $L_w = 2l$ (温水配管) \Rightarrow $L_s = l$ (蒸気配管)

・流量 $G_w = \frac{1000 \times Q}{4.2 \times \Delta T \times 3600}$ (温水配管) $\Rightarrow G_s = \frac{Q}{Q_{steam}} \times \frac{1000}{3600}$ (蒸気配管)

G_s : 蒸気質量流量 [kg/s]

Q_{steam} : 単位蒸気量あたりの潜熱 [MJ/t] ←2033.3 [MJ/t]

4.3.3 二次側空調システム

二次側の計算対象は、受け入れ設備から空調側、個別熱源セントラルシステムでは、空調用冷水温水配管の行きヘッドと還りヘッドまでの空調側のみとする。想定する二次側システムを図 4.7 に示す。全空気方式の単一ダクト変風量方式とし、空調システムはエアハンドリングユニット (AHU) と変風量ユニット (VAV ユニット) を組み合わせる。

図 4.8 に空調断面イメージを示す。インテリアゾーンのみ外気を取り入れ、同量の排気を行う。外気導入量は熱負荷計算時の設計量を使用する。VAV ゾーニングをインテリア系統は 50 m²程度、ペリメーター系統はスパン単位ごとに処理する。VAV ゾーニングの一例を図 4.9 に示す。

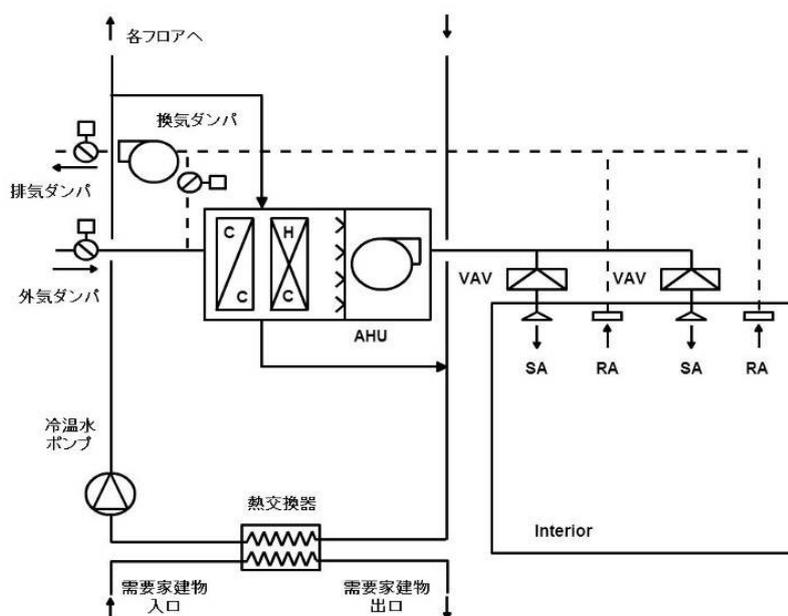


図 4.7 二次側空調システム(地域冷暖房)

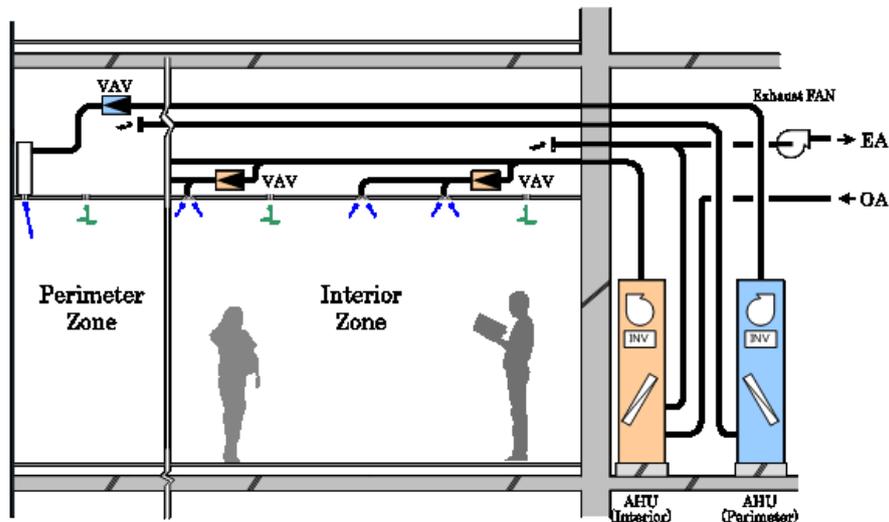


図 4.8 空調断面イメージ

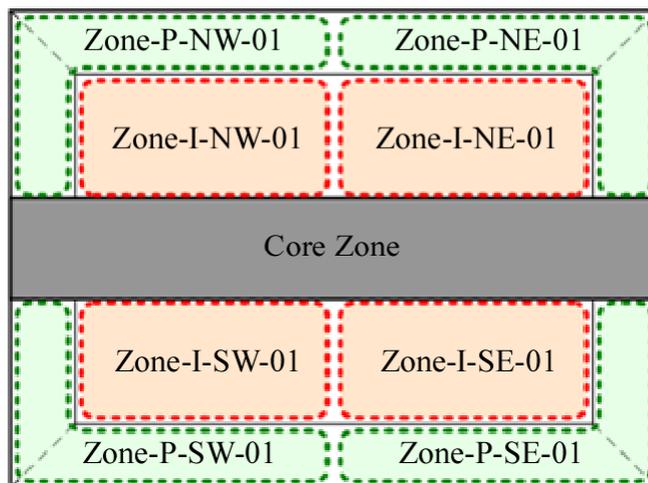


図 4.9 空調ゾーニング

各機器はゾーン毎の最大熱負荷量により選定する。空気風量は冷房顕熱負荷を基準とし、コイル吹出し空気温度を 12℃に設定して式(4.18)で求める。暖房吹出し温度は冬期設定温度になるよう冷房空調風量を基に算出する。

二次側の冷温水量は循環温度差を 7℃に固定して(4.5)の式を用いて算出する。

$$V_s = \frac{3600Q_s(t_R - t_s)}{\gamma} \tag{4.18}$$

- V_s : 給気風量 [m³/h]
 Q_s : 顕熱負荷 [kW]
 t_R : 室内温度 [°C]
 t_s : 給気温度 [°C]
 γ : 湿り空気の比重量 [kg/m³] ←1.2 kg/m³

(1) AHU ユニット

エアハンドリングユニットの消費エネルギーは以下の式を用いて算出した。またインバーター特性は図 4.4 のものを使用する。

$$E_{AHU} = E_{AHUrated} \times INV(LF_{AHU}) \quad (4.19)$$

- E_{AHU} : AHU の消費電力 [kW]
 $E_{AHUrated}$: AHU の定格消費電力 [kW]
 INV : インバーター特性式
 LF_{AHU} : AHU の負荷率 [-]

$$LF_{AHU} = \frac{V_{sm}}{V_{AHUrated}} \quad (4.20)$$

- LF_{AHU} : AHU の負荷率 [-]
 V_{sm} : 給気風量 (混合空気) [m³/h]
 $V_{AHUrated}$: AHU の定格風量 [m³/h]

$$V_{sm} = \frac{3600Q_s(t_{Rm} - t_c)}{\gamma} \quad (4.21)$$

- V_{sm} : 給気風量 (混合空気) [m³/h]
 Q_s : 顕熱負荷 [kW]
 t_{Rm} : 混合空気温度 [°C]
 t_c : コイル吹出し温度 [°C]
 γ : 湿り空気の比重量 [kg/m³]

$$t_{Rm} = t_{ca} + \frac{V_e}{V'} \times (t_{Rset} - t_{ca}) \quad (4.22)$$

- t_{Rm} : 混合空気温度 [°C]
 t_{ca} : 熱交換後の温度 [°C]
 V_e : 排気量 [m³/h]
 V' : 全熱交換前の予想風量 [m³/h]
 t_{Rset} : 設定室温 [°C]

$$t_{ca} = t_{odb} - \eta_{hex} \times (t_{odb} - t_{Rset}) \quad (4.23)$$

- t_{ca} : 熱交換後の温度 [°C]
 t_{odb} : 外気乾球温度 [°C]
 η_{hex} : 全熱交換器の熱交換効率 [-]
 t_{Rset} : 設定室温 [°C]

$$V' = \frac{(3600 \times Q \times (t_{Rset} - t_c))}{\gamma} \quad (4.24)$$

- V' : 全熱交換前の予想風量 [m³/h]
 Q : 全熱負荷 [kW]
 t_{Rset} : 設定室温 [°C]
 t_c : コイル吹出し温度 [°C]
 γ : 湿り空気の比重量 [kg/m³]

暖房時の加湿運転についての計算方法を以下に示す。ペリメーター系統を対象に示すが、インテリア系統においては冷房時と同様、混合気を考慮する。

$$w_1 = 0.33 \times V_c \times \Delta h \quad (4.25)$$

- w_1 : 加湿量 [m³/h]
 V_c : コイル吹出し量 [m³/h]
 Δh : 加湿前後のエンタルピ差 [kJ/kg(DA)]

$$V_c = \frac{1.293 \times 3600 \times Q_s \times (t_c - t_{Rset})}{(1 + 0.00367 \times t_c) \times \gamma} \quad (4.26)$$

- V_c : コイル吹出し量 [m³/h]

Q_s : 顕熱負荷 [kW]
 t_c : コイル吹出し温度 [°C]
 t_{Rset} : 設定室温 [°C]
 γ : 湿り空気の比重量 [kg/m³] ←1.2 kg/m³

$$\Delta h = \frac{(2501 + 1.806 \times t_c) \times 0.83 Q_l}{(3600 \times Q_s (t_c - t_{Rset}) / \gamma) \times 1000} \quad (4.27)$$

Δh : 加湿前後のエンタルピ差 [kJ/kg(DA)]
 t_c : コイル吹出し温度 [°C]
 Q_l : 潜熱負荷 [kW]
 Q_s : 顕熱負荷 [kW]
 t_{Rset} : 設定室温 [°C]
 γ : 湿り空気の比重量 [kg/m³] ←1.2 kg/m³

(2) VAV ユニット

VAV ユニット (変風量ユニット) の消費電力はカタログ値⁵⁰⁾から求める。

$$E_{VAV} = E_{VAVrated} \times n \quad (4.28)$$

E_{VAV} : VAV ユニットの消費電力 [kW]
 $E_{VAVrated}$: VAV ユニットの定格消費電力 [kW]
 n : ゾーンにおける VAV ユニットの台数 [-]

(3) 排気ファン

排気ファンの消費電力は以下の式で求める。インバーター特性は図 4.4 に従う。

$$E_{EF} = E_{EFrated} \times INV(V_e / V_{EFrated}) \quad (4.29)$$

E_{EF} : 排気ファンの消費電力 [kW]
 INV : インバーター特性式
 V_{EF} : 排気量 [m³/h]
 $V_{EFrated}$: 排気ファン定格風量 [m³/h]

(4) 全熱交換器

全熱交換器は常に定格で運転するものとする。

$$E_{HEX} = E_{HEXrated} \quad (4.30)$$

E_{HEX} : 全熱交換器の消費電力 [kW]

$E_{HEXrated}$: 全熱交換器の定格消費量 [kW]

4.3.4 その他の計算条件等

(1) 気象データ

本研究では、東京の気象条件でシミュレーションを行った。外気条件について、4.4 で実在する地域冷暖房を対象とする場合は、エネルギー消費量の実績データの該当年度である 2009 年度の乾球温度および相対湿度データを気象庁 Web ページ⁵¹⁾よりダウンロードした。その際、エネルギー使用量等の実績データは年度であるため、2009 年 4 月～2010 年 3 月の気象データを並べ替え、2010 年 1 月 1 日から 3 月 31 日の次に 2009 年 4 月 1 日～2009 年 12 月 31 日としてシミュレーションに使用した。

第 6 章で想定する街区を対象とする場合は、気象格差を除くために AMEDAS データの 1981 年～1995 年までの 15 年の平均値を用いた。

なお、湿球温度および絶対湿度は湿り空気状態方程式から算出した。以下に空気状態方程式について述べる⁵²⁾。

湿り空気の特性を計算する式を以下に示す。記号は以下の通りである。

t	: 気温[°C]
t_d	: 露点温度[°C]
t_w	: 湿球温度[°C]
h	: 比エンタルピ[kcal/kgDA],
f	: 水蒸気分圧[mmHg]
f_s	: 飽和水蒸気分圧[mmHg]
rh	: 相対湿度[%],
x	: 絶対湿度[kg/kgDA]
x_s	: 飽和絶対湿度[kg/kgDA]

飽和水蒸気量を求めるため、Wexler-Hyland の式を用いる。 $T_{ad}=t+273.15$ [K]とすると、

$$f_s = \exp\{-5800.2206 / T_{ab} + 1.3914493 - 0.048640239T_{ab} + 0.41764768 \times 10^{-4} T_{ab}^2 - 0.14452093 \times 10^{-7} T_{ab}^3 + 6.5459673 \ln(T_{ab})\} / 100 \quad (4.31)$$

この式を用いて、任意の気温の飽和水蒸気量を求めることができる。上の(1)式は kPa 単位なので、以下 mmHg 単位に変換して用いている。

比エンタルピは、気温と絶対湿度から次式を用いて求める。

$$h = 0.24t + (0.431t + 597.3)x \quad (4.32)$$

また、各種湿度は以下の式を用いて求める。

絶対湿度

$$x = 0.622 \frac{f}{760 - f} \quad (4.33)$$

相対湿度

$$rh = 100 \frac{f}{f_x} \quad (4.34)$$

露点温度

$$t_d \cong -77.199 + 13.198Y - 0.63772Y^2 + 0.071098Y^3 \quad (4.35)$$

ここで

$$Y = \ln \left(\frac{f}{760} \times 101.325 \times 1000 \right) \quad (4.36)$$

湿球温度の計算式

空気の比エンタルピを h 、飽和空気の比エンタルピを h' とすると、以下の熱収支式が成り立つ。

$$h' = h + (x' - x)t_w \quad (4.37)$$

上式から t_w を計算する際は、解析的に求めるのは困難なので、数値解法によって求める。気温 t と絶対湿度 x が既知の場合は、次の二分法により求める。これは2つの値 $t1$ と $t2$

($t1 > t2$) の範囲内に t_w があるとして、この範囲を次第に狭めていく方法 (挟み撃ち法) である。

- ① $t1 = t$ (気温), $t2 =$ 露点温度 t_d とする。
- ② (4.36)式を変形した関数,

$$err = h - h' + (x' - x)t_w \quad (4.38)$$

を求める。 t_w が真値のときは $err = 0$ となる。空気が飽和状態のときは $t_w = t$ となる。 t と x から h を求め、 $t_w = t1$ として h' と x' を求め、(4.37)式から求めた err を $err1$ とする。

- ③ $t1$ と $t2$ の平均値 t_{ww} を求め、 $t_w = t_{ww}$ として h' と x' とを求め、(4.37)式から求めた err を $errw$ とする。
- ④ $err1$ と $errw$ とが異符号ならば、 $t_{ww} < t_w < t1$, 同符号ならば $t2 < t_w < t_{ww}$ の範囲にあることが分かる。前者では $t_{ww} \rightarrow t2$, 後者では $t_{ww} \rightarrow t1$ と置き換える。

⑤ 上記②～④の手順を， $errw$ が 10^{-5} 以下になるまで，100回以内で反復する．

⑥ t_{ww} を t_w とする．

以上より，上記の各式を組み合わせて，湿り空気の任意の変数2つから他全てを求めることができる．

なお，上記のうち，水蒸気分圧は $101.325/760 \div 0.1333224$ を乗じて[kPa]となる．比エンタルピは 4.18605 を乗じて[kJ/kgDA]となる．

湿球温度は，シミュレーションでターボ冷凍機，吸収冷温水機および排熱投入型吸収式冷凍機の冷却塔の冷却水温度の計算に用い，絶対湿度は，加湿量の計算，すなわち中央熱源方式における二次側空調システムの暖房運転時の加湿負荷の計算に用いる．

以上のように求めた気象条件を，図 4.10 に 2009 年度を，図 4.11 に第 6 章で使用する平均化気象データを示す．

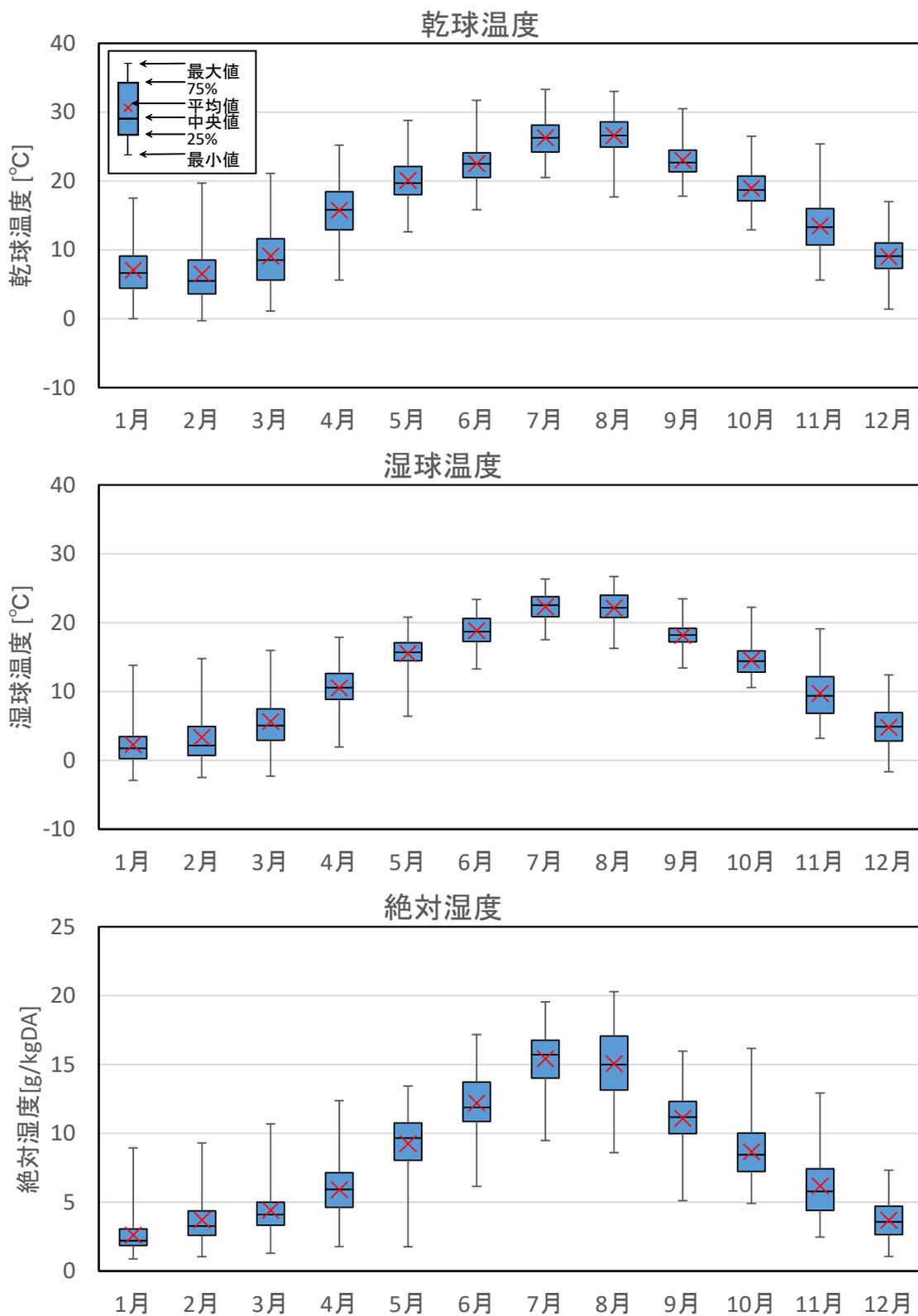


図 4.10 2009 年度の気象データ

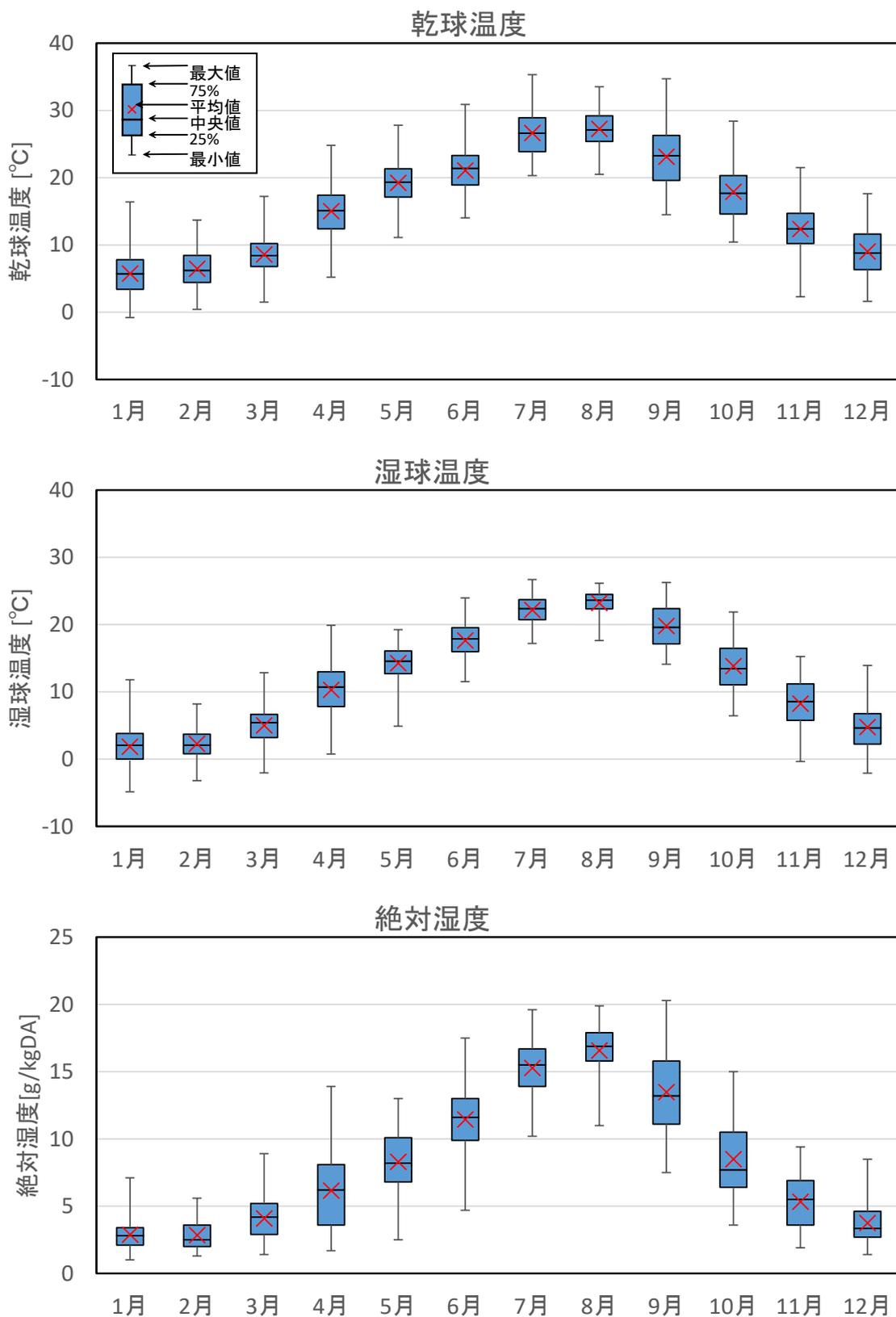


図 4.11 平均化気象データ

(2) 建物熱負荷

本シミュレーションでは、動的空調熱負荷計算プログラムを使用して熱負荷を計算し、3.4 で作成した標準負荷データで補正した。使用したプログラムは、日本建築設備協会により公開されている HASP/ACLD/8501（以下 HASP）¹⁸⁾である。

HASP は建物データ（建物の立地条件、各室の建築設計データ等）や各地の標準気象データ等を入力データとし、建物の内部発熱および建物外からの貫流・日射量・すきま風等を考慮して、時刻ごとに建物各フロアの空調負荷を計算することが可能である。二次側システムをシミュレーションする場合はフロアを東西南北、および機械室や廊下等空調を行わないコアゾーンの5ゾーンに分け顕熱および潜熱を計算した。また、一次側システムのシミュレーションをする場合は建物全体の熱負荷および地域冷暖房システムにおける熱損失量に基づき計算を行った。HASP では気象条件として1時間毎の気象データを人工的に処理した年間の気象条件を使用する。以下に示す諸量を1時間毎に入力する。

- ・ 乾球温度[°C]
- ・ 絶対湿度[g/kgDA]
- ・ 法線面直達日射量[MJ/(m²・h)]
- ・ 水平面天空日射量[MJ/(m²・h)]
- ・ 夜間放射量[MJ/(m²・h)]
- ・ 風向[16 方位]
- ・ 風速[m/s]

4.4 評価ツールの精度検証

プログラムの精度検証のため、実在の地域冷暖房プラント（以下、検証用実プラント）を計算対象として計算精度の検証を行った。実際の地域冷暖房プラントから需要家に販売した年間の時刻別販売熱量を計算における地域冷暖房プラントの供給先の熱負荷として与え、熱源プラントから供給建物までの地域導管における熱損失および圧力損失を考慮してプラントにおけるエネルギー消費量について実測データとシミュレーション結果を比較する。

4.4.1 検証用地域冷暖房の概要

検証用に対象とした地域冷暖房の供給エリアの外観を写真 4.1 に、地域冷暖房エリアの概要を図 4.12 に、需要家の概要を表 4.3 に示す。需要家 A の地下にある熱源プラントにおいて冷水・蒸気が製造され 4 件の需要家に対して熱供給されている。



写真 4.1 供給エリア外観

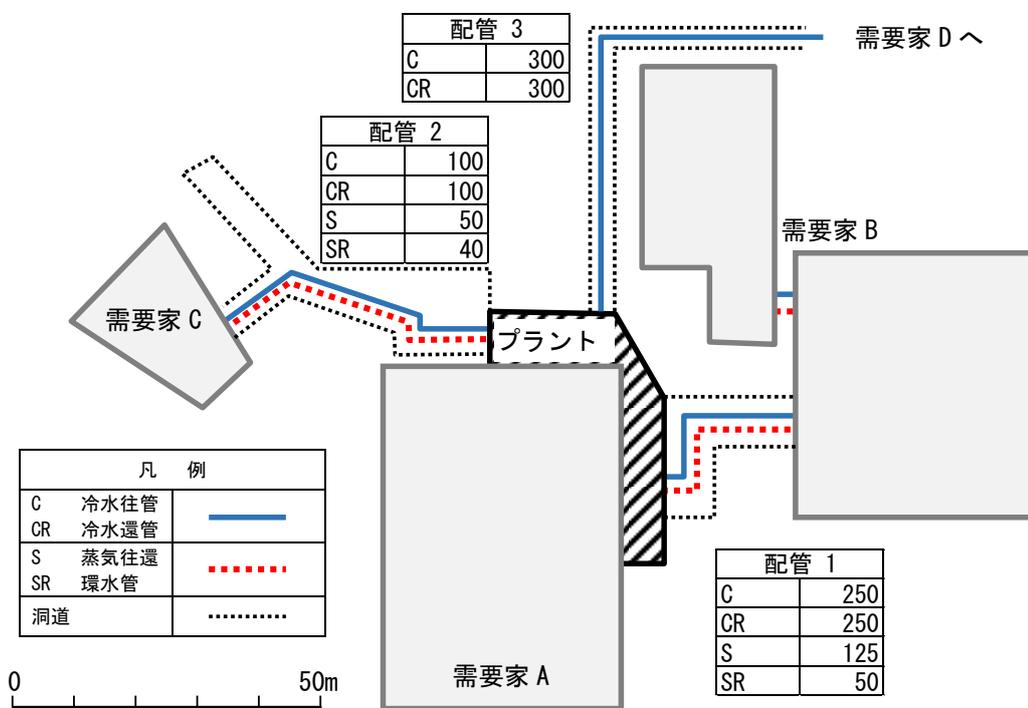


図 4.12 検証用実地域冷暖房概要

表 4.3 に需要家の概要を，図 4.13～図 4.16 に需要家 A～D の熱需要を示す．需要家 C は小規模建物のため熱需要が少なく，需要家 D は冷房需要のみである．需要家 A は二次側空調の再熱のため夏季にも蒸気需要が発生している．需要家 C は建物熱需要は少ないが，冬季の蒸気負荷が夏期の冷水負荷に比べて大きい。

表 4.3 需要家概要

需要家	A	B	C	D
用途	事務所・ 店舗・住宅	事務所	事務所	大空間 (冷房のみ)
延床面積[m ²]	62,531	17,651	3,613	(27,233)

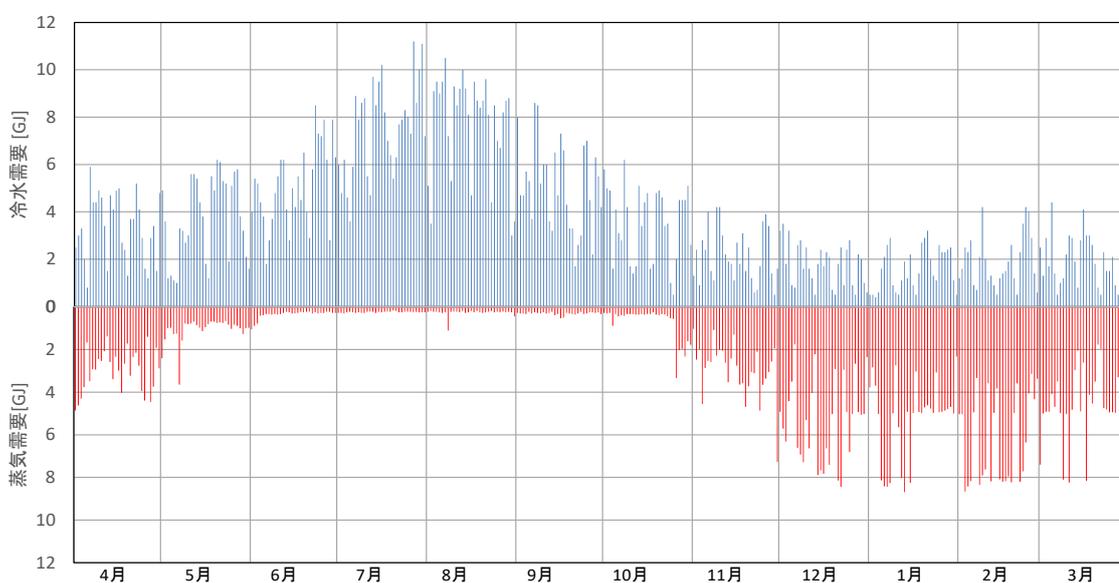


図 4.13 需要家 A の熱需要

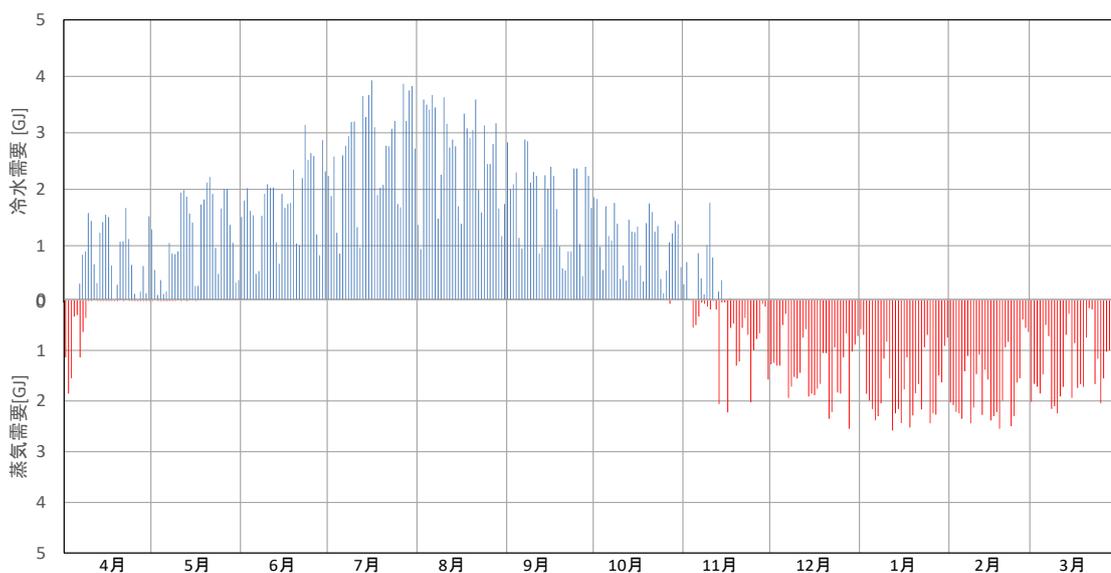


図 4.14 需要家 B の熱需要

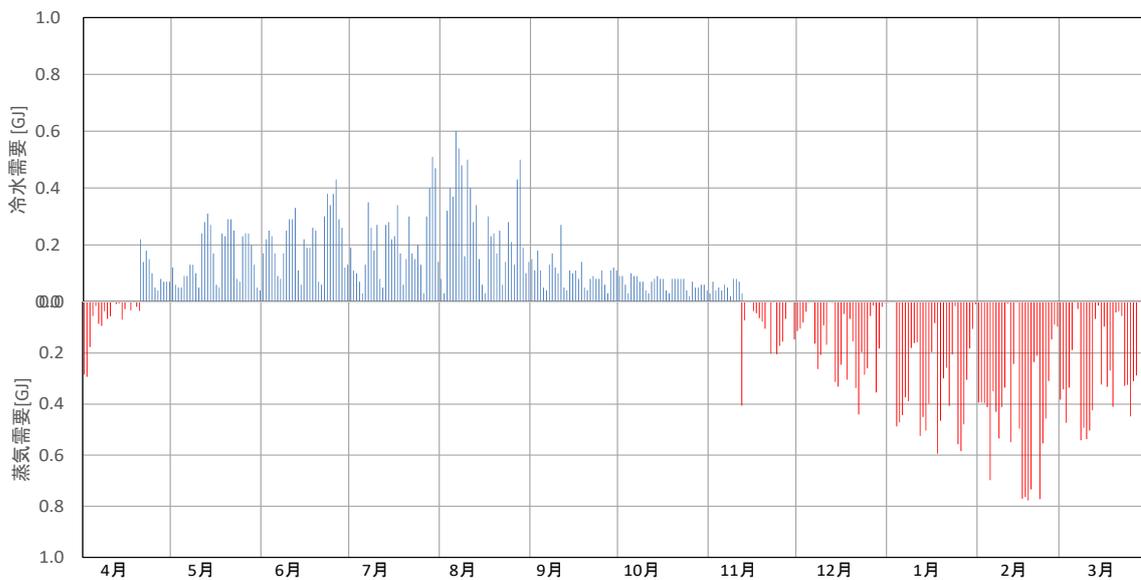


図 4.15 需要家 C の熱需要

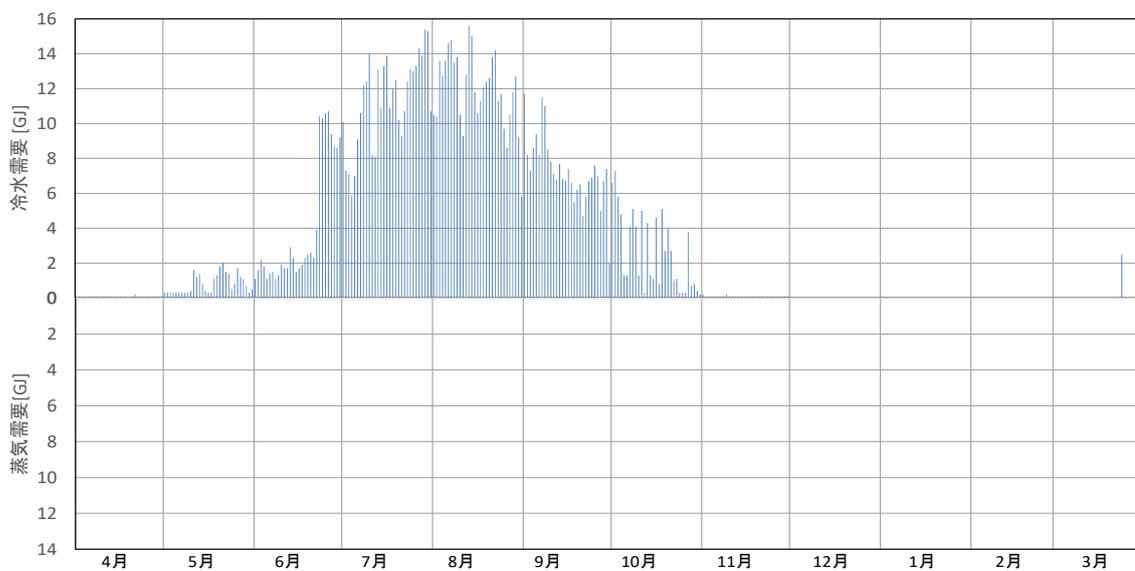


図 4.16 需要家 D の熱需要

本プラントでは、冷水(往復 2 管)、蒸気、還水の 4 管式で供給しており、常時冷熱・温熱の同時取り出しが可能である。表 4.4 に冷水および蒸気の供給条件を示す。

表 4.4 供給熱条件

	行き温度	帰り温度
冷水	7℃	13℃
蒸気	175℃	60℃

また、熱源プラントから需要家 B までの配管を配管 A、需要家 C までを配管 B、需要家 D までを配管 C として、これらを熱損失量および圧力損失の計算対象とする。冷水配管および蒸気配管の構造を表 4.5 および表 4.6 に示す。需要家 D は冷房需要のみなので、蒸気配管・還水配管は存在しない。

表 4.5 冷水配管の構造

	内径	厚さ	配管長	断熱材	断熱材厚さ	熱伝導率
配管 A	248.8mm	9.3mm	129.6m	硬質ウレタンフォーム	50.0mm	0.026W/m·K
配管 B	102.3mm	6.0mm	139.4m	硬質ウレタンフォーム	50.0mm	0.026W/m·K
配管 C	297.9mm	10.3mm	322.0m	硬質ウレタンフォーム	100.0mm	0.026W/m·K

表 4.6 蒸気配管の構造

	内径	厚さ	配管長	断熱材	断熱材厚さ	熱伝導率
配管 A	126.6mm	6.6mm	64.8m	ケイ酸カルシウム	125.0mm	0.026W/m·K
配管 B	52.7mm	3.9mm	69.7m	ケイ酸カルシウム	100.0mm	0.026W/m·K

一次側熱源システムを表 4.7 に、システムフローを図 4.17 に示す。基本的に実在するプラントで公表されている熱源システムと同一である。

表 4.7 検証プラント熱源システム概要

	項目	合計容量	設置数
温熱源	蒸気ボイラ	16,790kW	5
	ボイラ給水ポンプ	26 kW	5
冷熱源	電動ターボ	2,110kW (600RT)	1
	二重効用吸収式	13,200kW (3,750RT)	3
	冷却塔	43.1GJ/h	4
	冷水循環ポンプ	207kW	4
	冷却水循環ポンプ	270kW	4

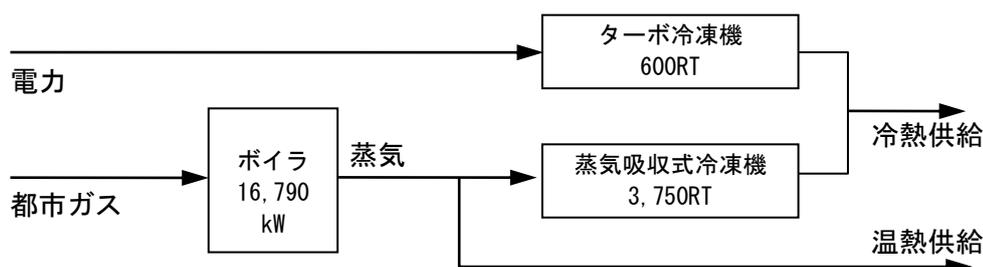


図 4.17 検証用プラントのシステムフロー

4.4.2 計算条件

気象条件は、実績値である負荷条件と同一の 2009 年度の東京のデータ⁵¹⁾を用い、シミュレーションにおける熱源システムの運転方法は以下の通りとした。

- ・ 冷房負荷、暖房負荷が発生しない場合、それぞれに関連する機器の運転は停止する。
- ・ 熱負荷が熱源機器の運転下限負荷率を下回る場合、COP 一定の間欠運転を行う。
- ・ 冷房負荷、暖房負荷が大きく、複数台の熱源機器を同時運転する場合、各台均等に負荷を負担して連続運転する。
- ・ 冷凍機の稼働は要求冷水流量ベース、冷房負荷量ベースの両者を考慮している。以上 2 つの運転ロジックからそれぞれ稼働させる機器を決定し、そのうち稼働機器容量の合計が大きい運転を採用する。
- ・ 要求冷水流量ベースでは、稼働する機器は要求冷水流量と最低バイパス流量から決定される。最低バイパス流量は、地域冷暖房システムでは冷凍機の設計流量値の 20% とした。
- ・ 冷房負荷量ベースでは、稼働する機器は冷房負荷量と動作隙間の大きさによって決定される。動作隙間とは冷凍機の増減段時のタイミングを決めるパラメータで、急激な熱負荷変動に対応できるように設定されている。冷凍機はある負荷率 (=1.0・動作隙間) を超えないように制御されており、実態分析結果より動作隙間の大きさは個別熱源システムでは平均 0.3、地域冷暖房では一般的にそれより小さく平均 0.1 と設定した⁵³⁾。
- ・ 一次側の冷温水ポンプ、冷却水ポンプ・温水ポンプは定流量運転を行う。

4.4.3 計算結果の検証

図 4.18 に冬季および夏季の時刻別計算値と実績値の比較を、図 4.19 に負荷率と総エネルギー消費量の関係を示す。暖房時は計算値と実績値が概ね良い一致を示しているが、冷房時は各熱源機の負荷が高くなる領域でややエネルギー消費量を少なく算出する傾向がみられる。図 4.18 および図 4.19 を見ると、熱源機を増段してターボ冷凍機が稼働するとエネルギー消費量の計算値が実測値よりも少なくなっている様子がわかる。本計算では、熱源機の台数制御において増段後に稼働熱源機の負荷率が等しくなるよう制御しているため、ターボ冷凍機の高負荷側、特に負荷率が 0.8 を超える領域でエネルギー消費量を過小評価している様子がうかがえる。原因として、実際の熱源機では経年劣化等の影響により高負荷側でのエネルギー消費量が増加していたことが考えられる。計算値のエネルギー消費量 30GJ 以上の領域では、熱源機 3 台で稼働しているため負荷率は 0.8 程度までとなっており誤差は大きくない。

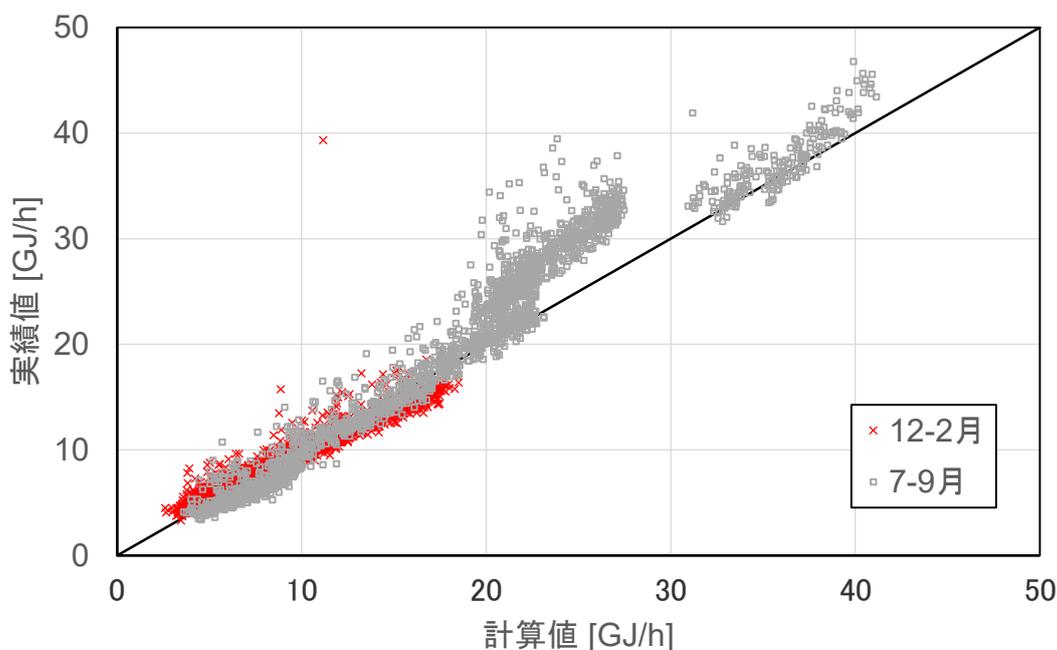


図 4.18 冬季および夏季の時刻別計算値と実績値の比較

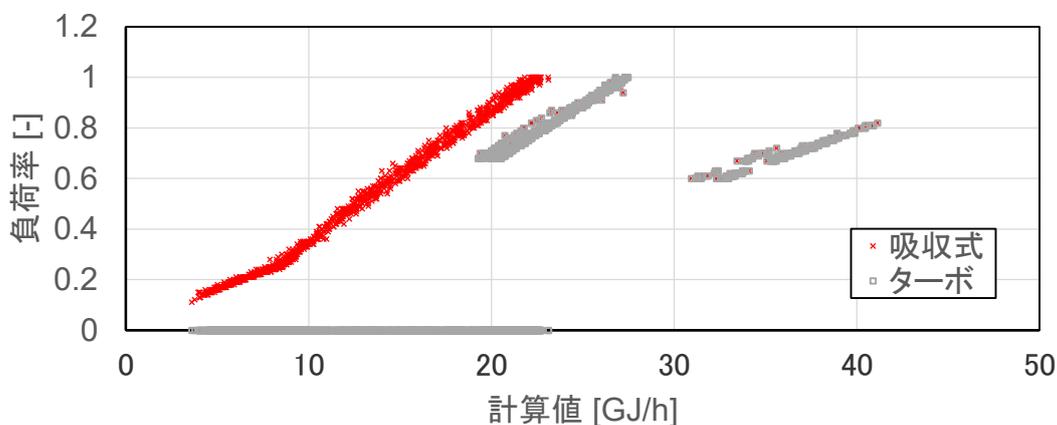


図 4.19 各熱源機の負荷率と総一次エネルギー消費量計算値の関係

図 4.3 に示した熱源機の性能曲線は、カタログや技術資料から得たものであるが、より正確な計算のためには劣化等を考慮した特性式の補正も必要と思われる。本論文では、計算手法の確立およびシミュレーションツールの開発を主目的とするため、図 4.3 に示した特性式をそのまま使用した。

1 年間分である 8,760 データの誤差の絶対値の平均は 14.0%、標準偏差は 12.6%である。1 時間ごとの計算では、立ち上がり等の急激な変化の際に誤差が出やすいことを考慮すれば、誤差は概ね妥当な範囲内である。

図 4.20 に計算結果と実績値の月別エネルギー消費量を示す。月別の一次エネルギー消費量でも、夏季にエネルギー消費量を少なく見積もる傾向があるが、7、8月以外は概ね良い一致を示している。上述の通り、ターボ冷凍機の劣化が原因と考えられる高負荷側での誤差のため、7、8月は、計算値の方がエネルギー消費量を少なく見積もっている。

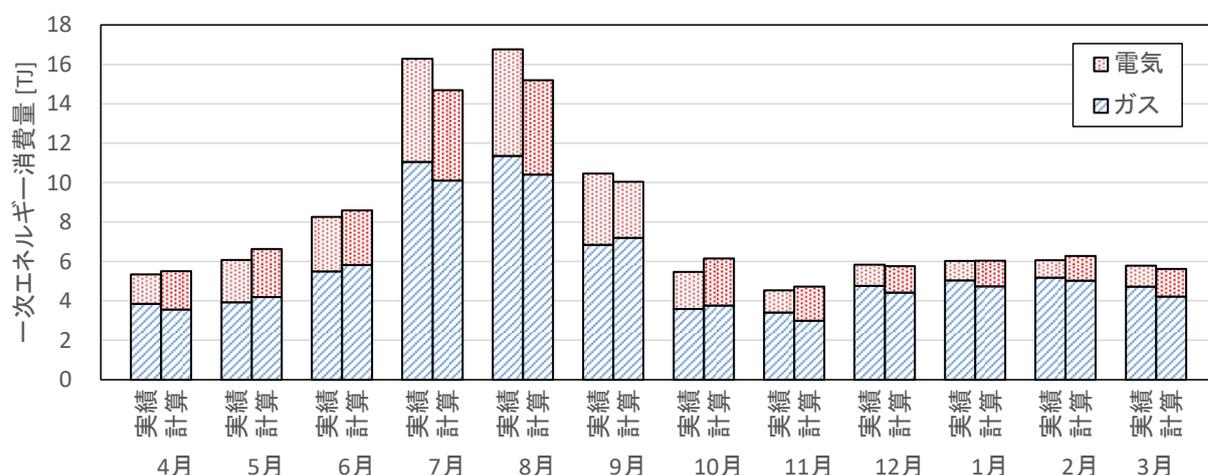


図 4.20 月別一次エネルギー消費量計算結果と実績値の比較

表 4.8 に、年間のエネルギー使用量の計算結果と熱供給事業便覧⁵⁴⁾に公表されている実績値を示す。エネルギー別では実績値と計算値に若干の差異があるが、一次エネルギー換算での誤差は -1.8%であり、本計算手法による熱源システムの計算精度は、実用上で問題がないことを確認した。なお、この誤差要因は熱源機の経年劣化や実際の熱源機運転順位等との相違によるものと考えられる。

表 4.8 計算結果と実績値の比較

	エネルギー消費量		一次エネルギー [MJ]		
	計算	H21 実績	計算	実績	誤差
ガス [千 m ³]	1,476	1,538	66,430	69,210	-4.0%
電気 [MWh]	2,888	2,778	28,185	27,113	4.0%
合計			94,614	96,323	-1.8%

4.5 要約

本章では、複数建物にエネルギーを供給する地域冷暖房システムを対象とし、性能評価を行うシミュレーションツールを開発した。本シミュレーションツールは、一次側熱源システムと二次側空調システムを同時に解くことが特徴であり、スマートエネルギーネットワークにおいて二次側運転条件も含めた統合制御を行う場合のシミュレーションツールとしての活用が期待される。

4.2 では供給側のエネルギー消費削減対策として、地域冷暖房やスマートエネルギーネットワークについて概説した。4.3 で地域冷暖房システムや CGS 導入について評価可能なシミュレーションモデルについて述べ、4.4 で実際の地域冷暖房システムの販売熱量データを、開発したツールの熱負荷として代入して一次側システムのシミュレーション精度の検証を行った。その結果、本ツールは一次エネルギー消費量 2%以下の誤差で、実用上十分な精度でシミュレートできていることを確認した。

地域冷暖房プラントや建築物の熱源設備等においては、熱源システムの製品ラインナップ等により規模と性能が不連続に変化するため、単純な相似則は成り立ち難い。したがって、個々の状況を考慮してオーダーメイドで検討していく必要がある。本件はそのような検討の際に有効に活用できるツールになると考える。

本章で開発したツールを用いて、第6章にて CGS 導入による高効率化の検討や、スマートエネルギーネットワーク構築（地域冷暖房プラント間の連携）および将来のエネルギーシステムについて検討する。

第5章 建築物における先進的エネルギー消費量削減の取組み

5.1 序論

本章では、建築物単体における先進的なエネルギー消費量削減の取組みについて、空調システムを中心に述べる。5.2 で建築物単体の省エネ手法や ZEB（ネット・ゼロ・エネルギービルディング）の概念を述べた後に、先進的な取り組み技術について紹介する。5.3 で二次側空調システムでの取り組みとして、天井放射冷暖房システムを導入した場合の快適性の向上と一次エネルギー消費量の削減について、被験者実験と数値シミュレーションにより検証する。5.4 では、熱源システムによる省エネ事例として、アースポート（東京ガス港北 NT ビル）における ZEB 化の取組事例について述べる。これら最新の取り組みにおける一次エネルギー消費削減量は、6.6 で将来的なエネルギーシステムシミュレーションを実施する際の基礎データとする。

5.2 需要側建築物における省エネルギー技術

建築物における省エネ手法には、「負荷低減」と「エネルギー効率化」の大きく二つに分けられる。前者は主として建築物における取組であり、後者は設備側による取組といえる。図 5.1 は ZEB の概念として紹介された図 4) であるが、負荷低減およびエネルギー効率化の様々な技術が示されている。図 5.1 を含め、以下にそれぞれの手法を概説する。

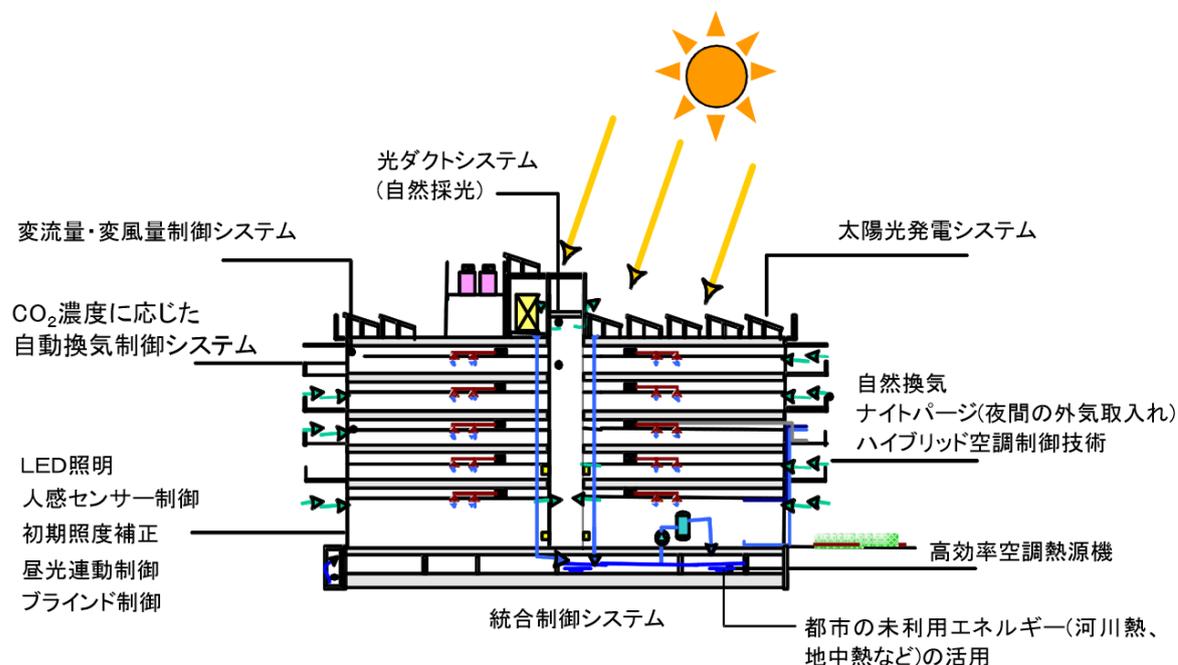


図 5.1 ZEB の概念

(ZEB の実現と展開に関する研究会. "ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の実現と展開について～2030 年での ZEB 達成に向けて～"より)

5.2.1 パッシブ的手法

(1) 自然採光

- ・ **天窗, ルーフトップ**: 建築物の屋根に採光や通風の目的で設置される. 十分な採光と同時に, 直射日光の遮蔽を工夫する必要がある
- ・ **ライトシェルフ**: 南側の窓面の最上部ではなく中間に庇を設置し, 直射日光を遮りつつ欄間から反射光を天井に向けて採り入れ, 日射制御と昼光利用を両立させる. より室内奥まで採り入れるために, 窓側を高く天井面を傾斜させるケースが多い
- ・ **光ダクト**: 内面が鏡状になっているダクトで太陽光を室内奥や地下等まで採り入れる技術

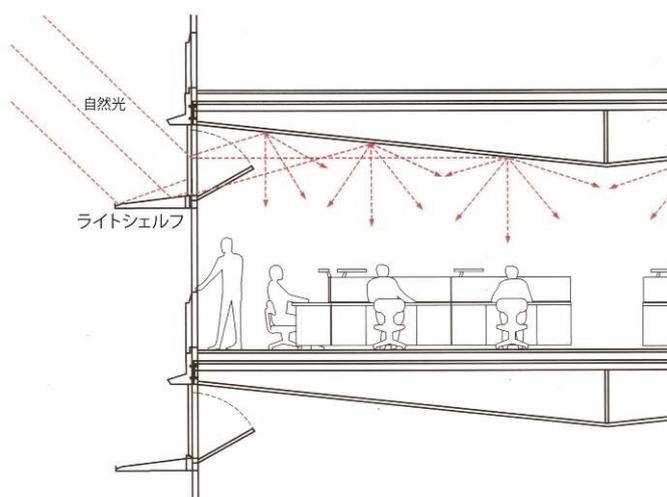


図 5.2 ライトシェルフ

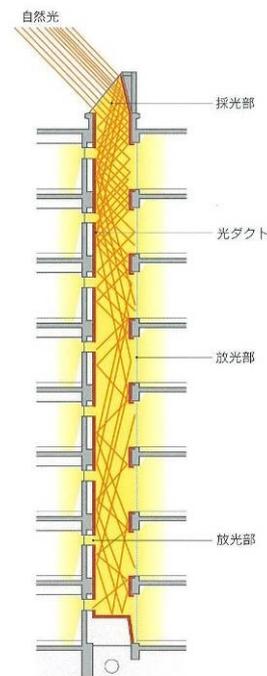


図 5.3 光ダクト

(2) 自然通風, 自然換気

- ・ **自然換気**: 縦型ダクトや吹き抜け等, 空間の上下温度差を利用して建物内部に空気の流動を起し, 中間期の冷涼な外気を取り込む技術. 窓の開閉等を在室者に委ねることにより, 在



図 5.4 吹き抜けを利用した自然換気を採用した例

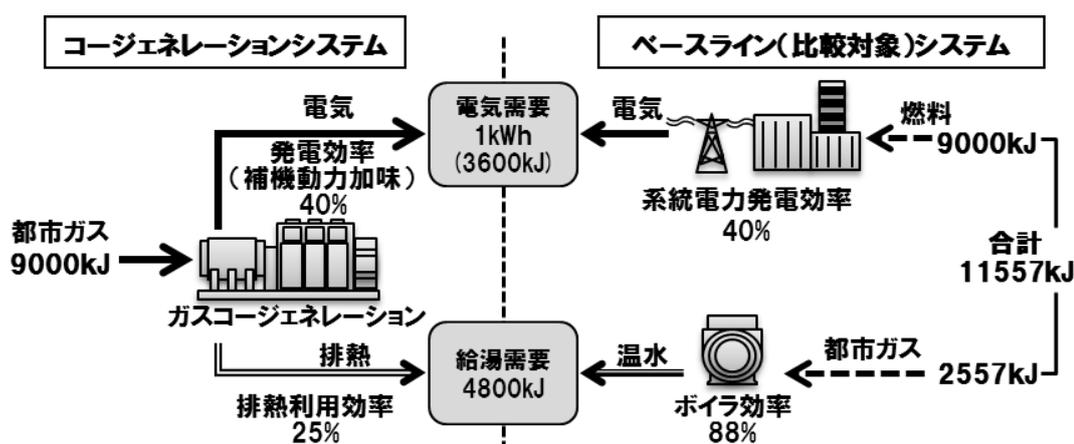
室者の省エネ意識の醸成を図る場合もある

(3) 断熱強化

- ・ 構造体の外側を断熱する外断熱と内断熱がある。窓面からの入放熱が大きいため、窓面における断熱も重要であり、二重ガラス等のほかシート貼付による方法もある

5.2.2 運用による手法, その他

- ・ ナイトパージ：外気温度の低い夜間に外気を取り入れ、躯体や居室に蓄積された熱を冷却することにより翌日の負荷を低減する
- ・ 外気冷房：中間期や冬季の外気温が室温より低い場合に、外気導入量を多くし、場合によっては冷凍機を停止して冷却塔の冷却効果により冷房し省エネを図る
- ・ 外気量の低減：室内 CO₂濃度を一定値以下に保つ最低限の外気量に制御することにより、外気負荷を削減する
- ・ フリークーリング：中間期や冬季において、冷凍機を使用せずに冷却塔を用いて冷水を製造するシステム
- ・ 高効率熱源の採用：近年個別分散システムや個別熱源システムの熱源機の性能向上には目覚ましいものがあり、最新の高効率機器にリプレースによっても省エネルギー効果が期待できる
- ・ CGS の導入：CGS 導入によるエネルギー消費削減の例を図 5.5¹³⁾に示す。発電の際に発生する排熱を利用することにより省エネルギーとなる
- ・ 自然エネルギー導入：ソーラークーリングシステムや、地中熱利用等の自然エネルギーを利用することにより、エネルギー消費量を削減できる



$$\text{省エネルギー率} = (11557 - 9000) / 11557 \times 100 = 22.1\%$$

(LHV基準)

図 5.5 コージェネレーションシステムの省エネ性¹³⁾

5.3 二次側空調システムによる省エネ手法：天井放射冷暖房

空調システムでエネルギー消費量削減を検討する際には、省エネ・省CO₂であることのほかに、居住者の快適性を維持することが必須である。東日本大震災に続く電力需給ひっ迫の際に各地で散見された「我慢の省エネ」的な対応では、一過性のものとなり、継続的な効果を発揮できない可能性が高い。ここでは、快適性と省エネ性の両立を可能とする二次側空調システムとして、天井放射冷暖房による省エネ手法について検討する。天井放射冷暖房では、顕熱の一部を放射により処理するために循環空気量を低減させることが可能となり省エネルギーが期待される。

以下にシミュレーションによる省エネルギー性の確認と被験者実験による快適性の評価結果について述べる。

5.3.1 数値シミュレーションによるエネルギー消費量

(1) 計算モデル

天井放射冷暖房方式のエネルギー消費量を比較するため、東京の鉄筋コンクリート6階建てオフィスビル(延床面積5,184 m²)の3~5階を対象として数値シミュレーションによるケーススタディを行った。計算対象の基準階平面図を図5.6に示す。図中の網掛け部分を空調対象エリアとし(空調面積1,764 m²)、空調対象エリア天井面の70%に放射パネルが設置される状態を想定した。室内温熱環境を代表させるために、図5.6中に示した室内環境設定点の高さ600mmにおいて放射環境およびPMV(Predicted Mean Vote)⁵⁾を計算した。熱負荷計算に関連する主な計算条件としては、在室者一人当たりの床面積を7 m²、照明やOA機器等による単位床面積当たりの発生熱を37.5 W/m²とした。

図5.7に5階部分に想定した4通りの空調システムを示す。case 1は従来型の全空気式空調システム、case 2は除湿再熱方式で湿度制御を行う全空気式空調システム、case 3は従来型の空調方式に天井放射パネルを組み合わせたケースである。コスト的な現実性を考慮して、天井放射パネルは3~5階の5階部分だけに設置することとした。case 2と4では、過冷却除湿された空気の再熱およびデシカントローターの再生のため、冷房時にも温熱が必要となり、ボイラを設置している。すべてのケースにおいて3階と4階はcase 1で想定した従来型の全空気式空調としている。図5.7中には室内の湿度条件も示している。冷房時に放射パネル表面での結露を避けるために、空調稼働時間中は常に室内露点温度+2°C以上のパネル表面温度を維持する設定とした。すべてのケースにおいて、外気導入量は8.2 m³/h m²(換気回数3.0回/h)である。冷温水の熱源として、2台の吸収冷温水機を想定した。

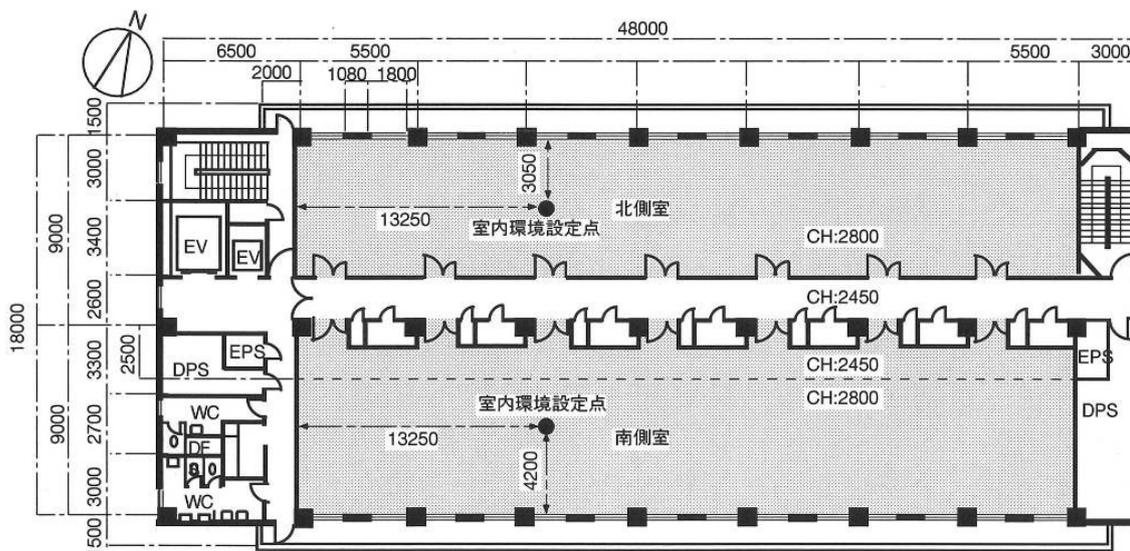


図 5.6 計算対象建築物基準階の平面図

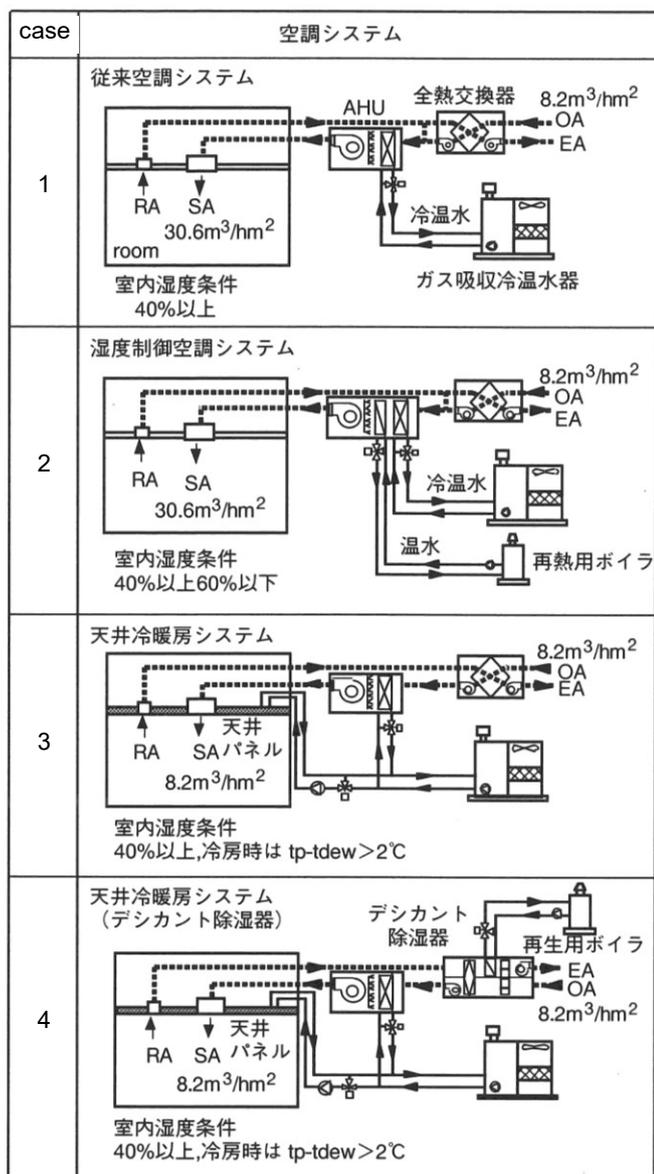


図 5.7 検討ケース

(2) 計算手順

熱負荷計算の際には、天井放射パネルからの放射の影響を考慮するため、三次元放射解析⁵⁶⁾を行った。外気温湿度や日射等は東京の標準気象データ各月代表日の24時間値を用い、それに加えて冷房および暖房の設計用最大気象条件についても計算を行った。各月代表日12日と最大気象条件2日の14日分について計算を行った。

図5.8に計算のフローチャートを、熱負荷計算部分については右側に詳細に示す。

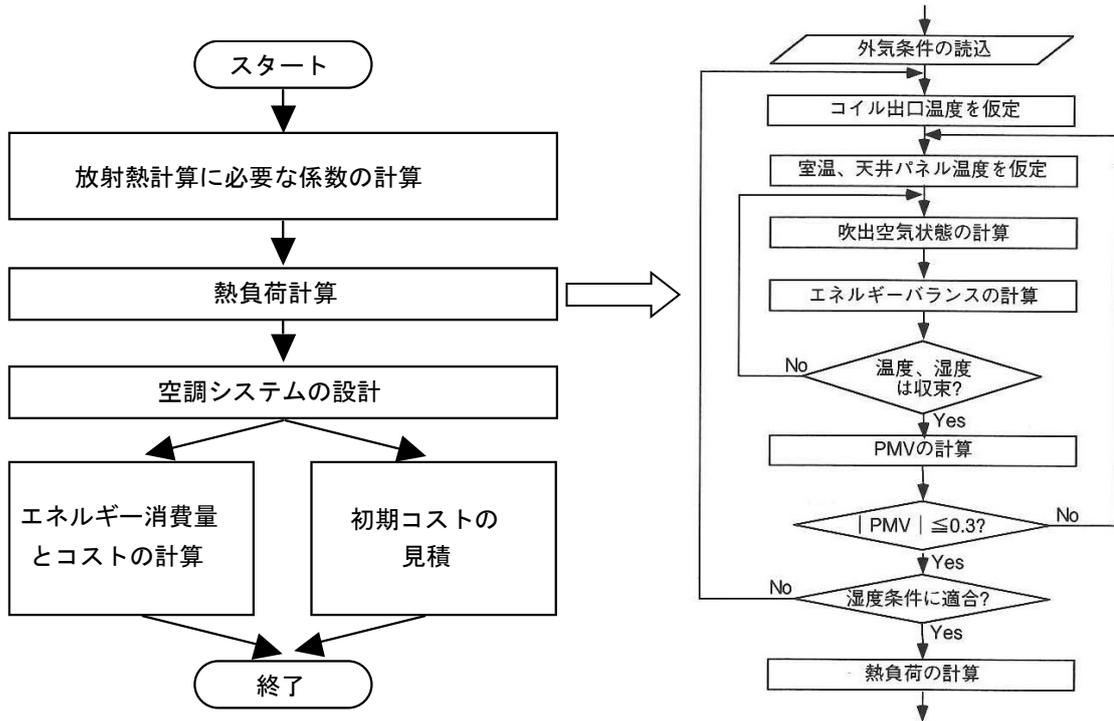


図 5.8 計算フローチャート

放射解析のため、壁面や天井面等の室内各表面をメッシュ分割し、各表面同志の直接交換面積および全交換面積を最初に求め、次に各表面における放射を含むエネルギーバランス式を解く。メッシュ分割された*i*面における内側の対流熱伝達率を h_b 、外側の総合熱伝達率を h_{oi} 、壁面の厚さを l_b 、熱伝導率を k_b 、また単位面積当たりの熱発生量を q_i とし、室内空気温度を一様として T_f で代表すると、*i*面におけるエネルギーバランス式は以下ようになる。

$$\sum_{j=1}^n c_{ji} \sigma T_j^4 - A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4 + A_i h_i (T_f - T_i) + A_i q_i = Q_i \quad (5.1)$$

ここで、

$$Q_i = \frac{A_i (T_i - T_{oi})}{\frac{l_i}{k_i} + \frac{1}{h_{oi}}} \quad (5.2)$$

である。 T_{oi} は面の外側の空気温度である。また、空気温度については、

$$\sum_{j=1}^n A_j h_j (T_j - T_f) + C_p V (T_e - T_f) + Q_f = 0 \quad (5.3)$$

である。ただし、 T_e は室内への吹出し空気温度、 V は給気量、 C_p は単位体積当たりの低圧比熱、 Q_f は室内における発生熱量である。

式(5.1) と類似の式が分割面の数だけ n 個成立するが、非線形連立方程式であるため、Newton-Raphson 法と Gauss-Seidel 法を併用して解く。このようにしてすべての温度を求めることができ、式(5.3)に代入することにより各分割面における伝熱量が計算できる。それらの室全体についての総和と室内発生熱の和が室内の顕熱負荷となる。

エネルギーバランスを計算する際には、室内中央高さ 600 mm に想定した 1 辺 100mm で表面が黒体である立方体における放射温度を計算し、PMV が ± 0.3 未満となるように空調システムを稼働させることとする。その際、放射温度の計算にあたっては、各方向からの放射の影響が椅座姿勢の人体に対する値に近くなるように、立方体により求められた面放射温度を面の向きによって次式のように加重平均して平均放射温度 MRT を求めた。

$$MRT = 0.102 * (PRT_{up} + PRT_{down}) + 0.199 * (PRT_{left} + PRT_{right} + PRT_{front} + PRT_{back}) \quad (5.4)$$

各壁面の表面温度、室内顕熱負荷を求め、室内での水分収支から室内の水分量(絶対湿度)を求める。冷却除湿される場合のコイル出口空気の相対湿度は 95% と仮定した。この計算を吹出し空気側と室内空気側との間で繰り返し行い、定常状態における吹出しおよび室内の空気状態を求める。

PMV 計算の際には温湿度および放射温度はシミュレーションの計算値を用い、その他のパラメータは、風速 0.1 m/s、代謝率 1.1 MET、着衣量は夏季(6~9月)0.5 clo、冬季(1~3, 12月)1.0 clo、中間期は 0.75 clo として計算した。PMV を ± 0.3 以内に保つよう室内への給気温湿度条件と天井パネル表面温度を計算することにより、室内熱負荷が求められる。デシカント除湿器を用いた場合は、デシカントローター性能曲線より再生空気温度 55°C の場合のデシカント除湿器出口の空気状態を求めた。

以上の計算を各月代表日および設計用最大気象条件日の時刻毎に行った。熱源機のガス消費量は、各時刻の空調負荷を基に熱源機の運転台数、部分負荷率を求め、熱源機のサイクルシミュレーション⁵⁷⁾により、部分負荷運転時の一次エネルギー消費量を計算した。電力消費量は空調システムで消費されたエネルギーのみとし、熱源機および空調機の運転台数から一次エネルギー消費量を計算した。各月代表日の一次エネルギー消費量に各月の運転日数を乗じることにより年間消費量を算出した。

(3) 計算結果

本研究を実施した1994年当時のオフィスビルにおいては、旧型のOA機器や照明器具を使用していたため室内発生熱が非常に大きく、年間を通してオフィス稼働時間のほとんどが冷房需要であったが、計算結果も同様の結果を示している。

図5.9に各月の室温・放射温度・相対湿度および天井パネル温度の計算結果を示す。それぞれの値は空調稼働時間である8時から18時の平均値を示している。夏季において、全てのケースでPMVはほぼ同じ値であるが、天井放射パネルを稼働させているcase 3,4の室温は、全空気式のcase 1,2と比較して1.0℃～1.5℃程度高くなっており、天井パネルからの冷放射の効果を示している。同様に平均放射温度もcase 3,4の方がcase 1,2よりも低くなっている。湿度については、湿度制御を行わないcase 1では夏季に60%を超えており、特に冷房負荷の大きくない6月と10月では給気温度が比較的高いため冷却コイルでの除湿が不十分となり室内の相対湿度が高くなっている。冷房時においては、天井パネル表面温度は室内露点温度に応じて決定される(露点温度+2℃)。デシカント空調機を用いたcase 4では室内露点温度が低く保たれるため天井パネル温度も低くなり、理想的な放射環境を形成しているといえる。

図5.10に年間一次エネルギー消費量をcase 1との比で示す。天井パネルを併用したcase 3,4では空気搬送動力を20%程度削減することができ、全体でのエネルギー消費量を10%程度削減している。本計算では、case 2,4で夏季に必要な温熱をボイラから供給する想定で計算を行ったが、CGSの排熱を利用することにより一次エネルギー使用量はさらに削減されることが期待できる。

以上述べた通り、天井放射冷暖房システムを導入することにより、より望ましい室内環境を形成しつつエネルギー消費量を削減することが可能となる。このように、二次側空調システムの選択によりエネルギー消費が大きく異なるため、二次側システムの選択の際にはエネルギー消費量についても考慮することが必要である。

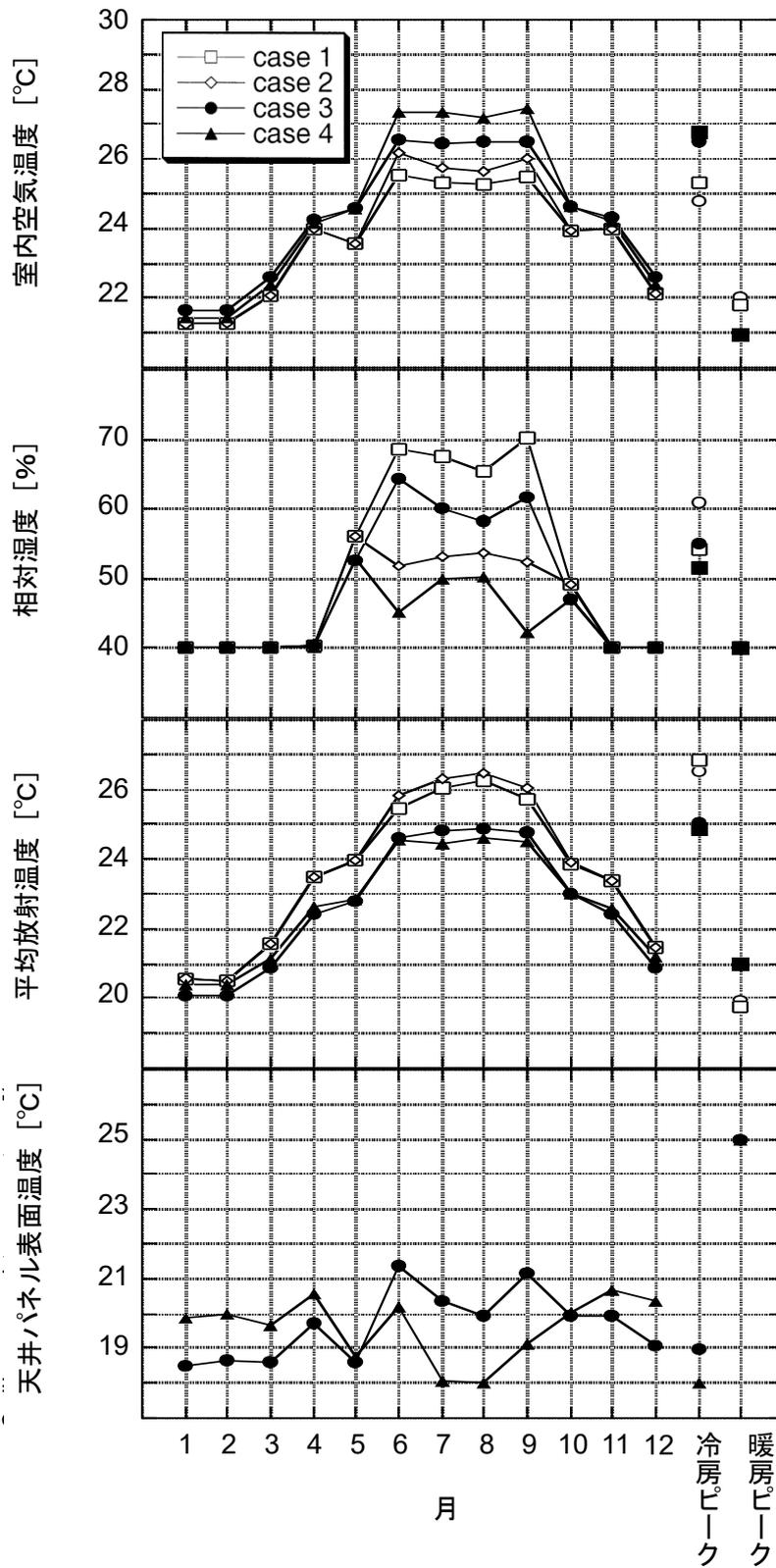


図 5.9 各空調システムを比較した5階部分の計算結果

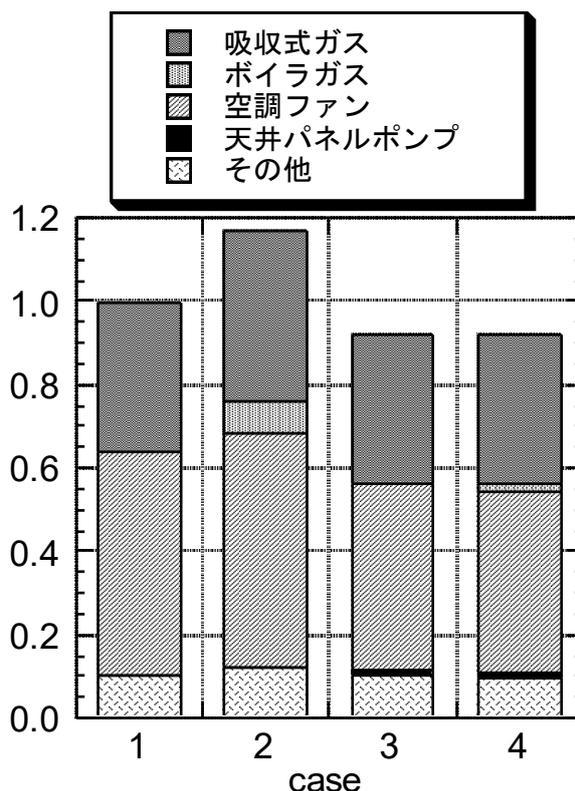


図 5.10 年間一時エネルギー消費量 case 1 との比

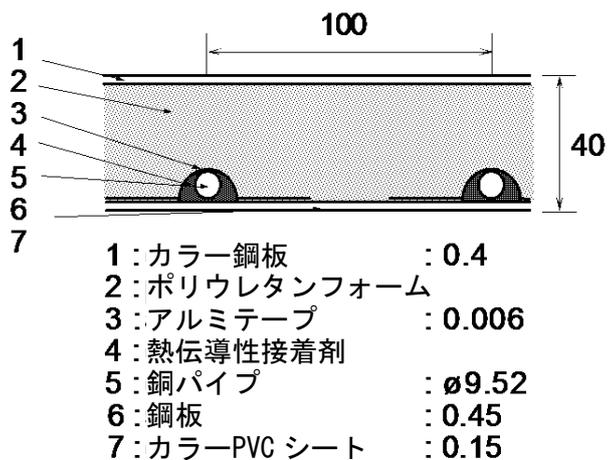
5.3.2 快適性の評価

(1) 実験システム

天井放射冷暖房システムの快適性を確認するために、東京都内の事務所ビルの会議室に実際に天井放射パネルを設置し、被験者実験を行った。会議室の床面積は約 33 m²、天井高は 2,700 mm で、窓および外壁面は北北西に面している。

図 5.11 に設置した天井パネルの断面図を、図 5.12 に天井冷暖房を設備した会議室の概略図を示す。当時は市販の天井パネルが存在しなかったため、室内間仕切壁用の金属製パーティションを用いて試作した。

パネル下面に銅パイプ敷設し、アルミテープで固定する。アルミテープは銅パイプの固定と熱伝導によりパネル表面に熱を伝える二つの役割を担っている。アルミテープとパネルの隙間には熱伝導性接着剤を充填することにより熱伝導性を向上させている。さらにパネル内の空間に発泡ウレタンを充填した。発泡ウレタンによりパネル裏面への放熱を防ぐとともに、銅パイプ・アルミテープとパネル下面の密着性を確保している。



単位 : [mm]

図 5.11 天井パネル断面図

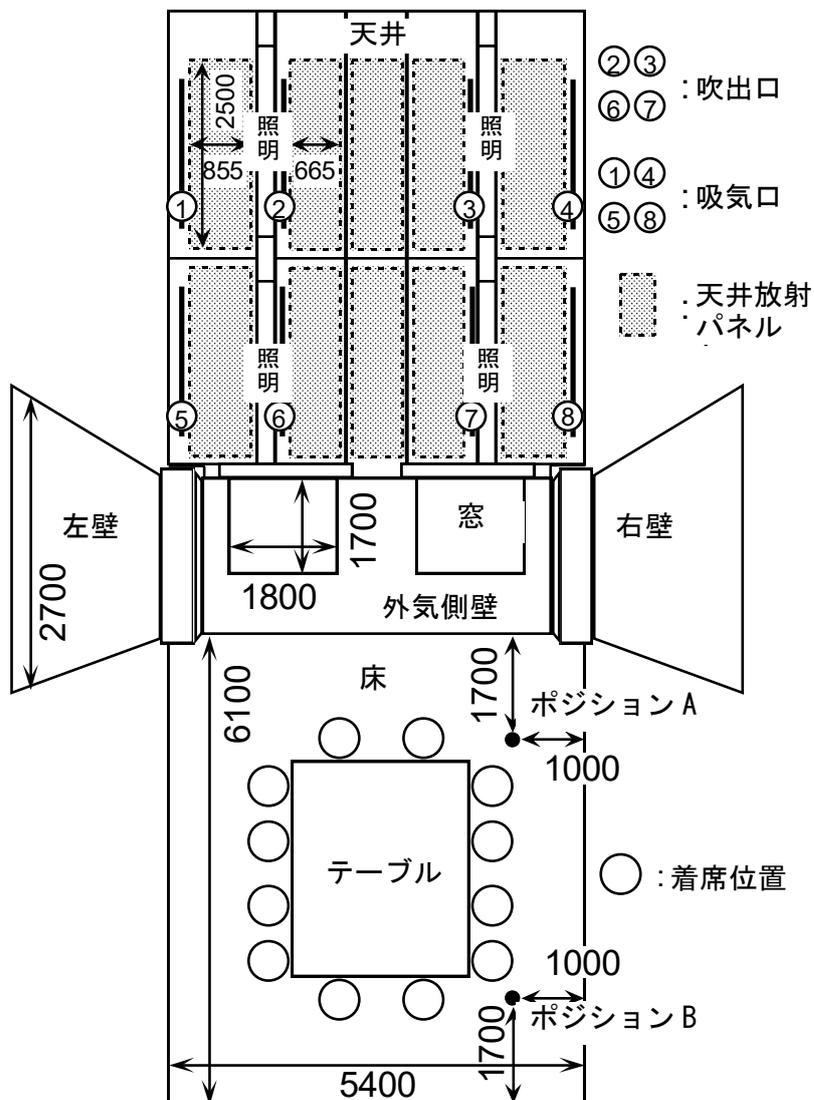


図 5.12 天井放射冷暖房を設備した会議室

(2) 被験者実験

被験者実験として、会議室を1時間以上利用した者に使用終了時にアンケートに回答させる方式(exp.1~5)と、実験を目的として被験者を2時間入室させて15分毎に快適性等を申告させる方式(exp.6,7)を別に行った。運転条件および被験者数を表5.1に示す。被験者には、調査協力への謝礼としてexp.1~5では図書券、exp.6,7では報酬を支払った。

表 5.1 運転条件および被験者数

	運転条件	平均室温[°C]	平均湿度[%]	被験者数[人]	性別
exp.1	天井冷房	24.0	61.2	36	男
exp.2	空気式・除湿冷房	23.9	60.2	15	男
exp.3	空気式・通常冷房	24.2	66.6	11	男
exp.4	天井暖房	21.9	33.4	66	男
exp.5	空気式・通常暖房	20.3	32.6	23	男
exp.6	天井冷房	25.7	61.2	74	女
exp.7	空気式・通常冷房	25.9	59.8	74	女

運転条件は、室内の代表点2点(ポジションAおよびポジションB)の床面からの高さ600mmにおいてPMVがexp.1~5では±0.5以内に、exp.6,7では±0.3となるように空調システムを運転した。

PMV算出の際に必要な平均放射温度(MRT)は以下のように求めた。室内の各壁面を図5.13のように分割し、ある分割面を*i*とする。放射温度を計算するために位置A、Bの高さ600mmに一辺100mmの表面が黒体で対流伝熱の影響を受けない立方体を想定してその各表面を*j*面とし、あらかじめ全ての*i*面と各*j*面との間の全交換面積 C_{ij} を算出しておく。各壁面の表面温度測定における測定値を*i*面付近の代表温度 T_i (図中の網掛け部分)として、式(5.5)により*j*面の放射温度 PRT_j を求める。求められた PRT_j を式(5.4)に代入して平均放射温度MRTを求めた。

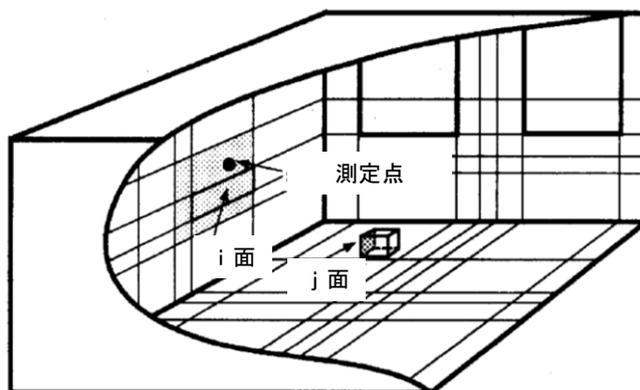


図 5.13 放射温度の計算

$$PRT_j = \left(\frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} T_i^4}{\varepsilon_j A_j} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.5)$$

- A_j : 立方体の一平面 j の面積 [m²]
 C_{ij} : i, j 面間の全交換面積 [m²]
 PRT_j : 立方体の j 面の面放射温度 [K]
 T_i : 分割面 i の表面温度 [K]
 ε_j : j 面の放射率 [-]

天井パネルを稼働させる際は、極端な環境を避けるため、天井放射パネルの表面温度を夏季は 18℃～22℃、冬季は 27℃～30℃で運転した。

exp.1 および 2 で空調機(AHU)による除湿再熱運転を行っているため、exp.3よりも湿度が低めとなっている。いずれのケースも、空調の運転条件は被験者には開示されていない。

(3) 快適性調査結果

会議室利用者を対象とした調査結果を図 5.14 に示す。天井冷房時は 80%近くの被験者が「快適」または「やや快適」の申告となった。温度・湿度とも同レベルである exp.2 と比較しても、快適側の申告が多いことは明らかである。

快適と言われている“頭寒足熱”の逆となり不快感が懸念された暖房時でも、天井暖房時の方が快適側の申告が多い結果となった。天井からの放射により床面温度が上昇する効果が表れたものと考えられる。

暖房時の ISO7730 推奨条件⁵⁸⁾について、天井暖房時(exp.4)と空気式暖房時(exp.5)の比較を表 5.2 に示す。天井暖房時の方がより快適側であることがわかる。

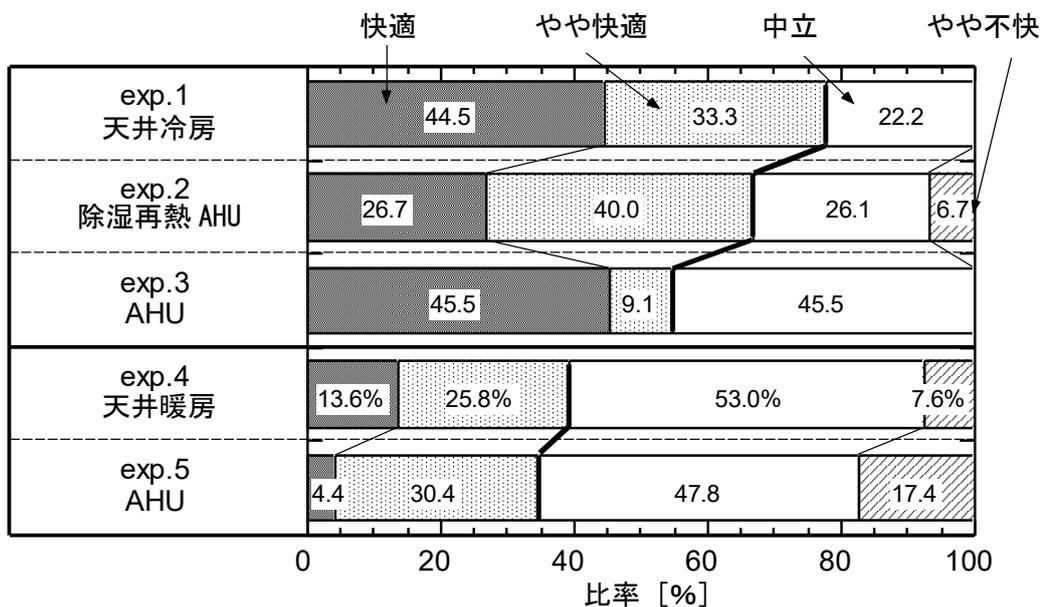


図 5.14 快適性調査結果

表 5.2 暖房時 ISO7730 推奨値との比較

要素	PMV		床上0.1m-1.1mの温度差		鉛直方向面放射温度差		床表面温度		作用温度	
推奨値	±0.5以下		3°C以下		5°C以下		19°C~26°C		20~24°C	
ポジション	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
exp. 4	-0.4	-0.4	0.9	0.3	3.3	3.9	21	22.2	22.4	22.2
exp. 5	-0.4	-0.4	1.8	2	1.5	1.9	20.5	21.2	21.9	22.1

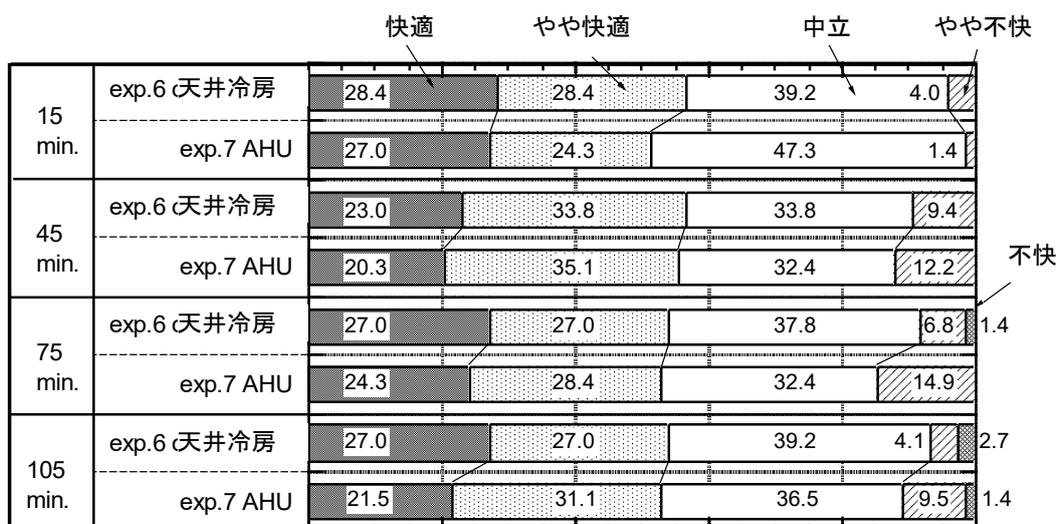


図 5.15 女性被験者を対象とした快適性調査結果

exp.6 および 7 では女性被験者を対象とし、15 分毎に快適性等を申告させた。その結果を図 5.15 に示す。実験中、被験者には読書、軽い会話等を許可した。各経過時間の申告とも、天井冷房時の方が「快適」「やや快適」の申告がわずかに多い結果となった。「快適」と申告した割合は、時間とともに exp.6 と exp.7 で差が開いていく傾向がうかがえる。一方、exp.7 では「やや不快」「不快」の申告割合が増加している。これには以下の理由が考えられる。図 5.16 に大腿部の温冷感申告の経時変化を示す。両実験開始時には温冷感に大きな違いがみられないが、exp.7 では 45 分経過時から大腿部に涼しい感覚を持ち始め、時間経過とともに徐々に増加している。一方天井冷房の exp.6 ではその傾向は大きくない。天井冷房と全空気式システムで形成される鉛直方向温度分布の違いによるものと推察される。

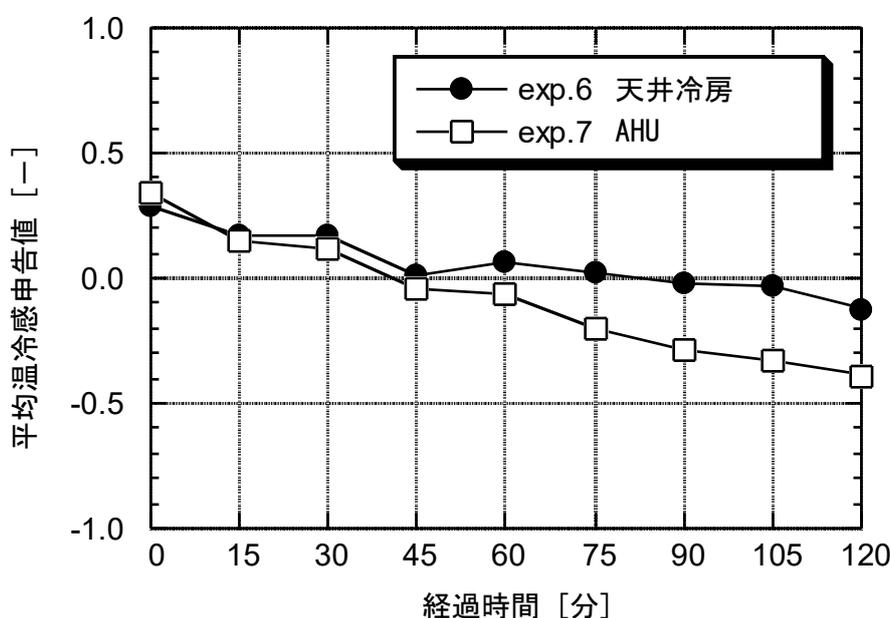


図 5.16 大腿部温冷感の平均申告値

(4) 作業効率

女性を対象とした被験者実験 exp.6,7 では、実験開始後 105 分経過時点で作業効率試験を行った。図 5.17 に示すような乱数が記載された用紙において、1 分間で特定の数字を行ごとにカウントし、その数を記入する作業を 1 分間の休憩をはさみ 3 回実施した。作業の精度(正解数)と達成度(作業行数)の平均値を図 5.18 に示す。試験結果は 98%の信頼性で t 検定を行い work 1 は有意な違いであるとの結果であり、精度・達成度とも天井冷房時の方が高い傾向が伺える。

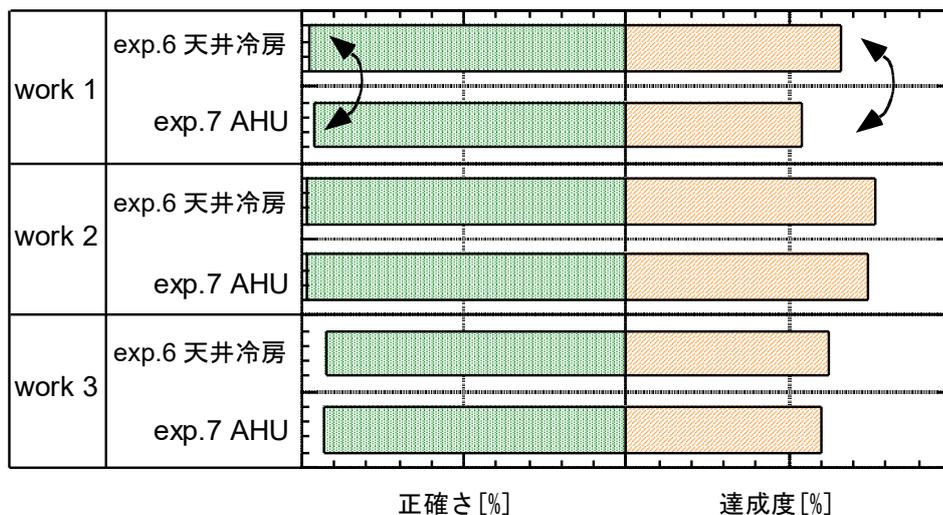
室内温熱環境と作業効率の定量化については更なる研究が必要であるが、天井冷房では従来式の冷房よりも執務者の作業効率が向上する可能性があることが示された。

作業課題(A-1)

下の数字の中から数字の"4"に斜線のマーク (/) をつけ、その数を数えて一行ごとに右側の欄に記入してください

例	68237/ 3 829706038558/ 3 67	4の数 <input checked="" type="checkbox"/>
課題		
	46022862814548966452994784927332304513151782264490	<input type="checkbox"/>
	91383674450784221803954152192341213731540642373200	<input type="checkbox"/>
	22265066884331324639522602134850912091490972378301	<input type="checkbox"/>
	19619663253326727458740435841971968466600928894511	<input type="checkbox"/>
	85634110068182290572879351930457580562417441933195	<input type="checkbox"/>
	98818110185692589972293204019148109712608735671551	<input type="checkbox"/>
	91866142994056961887536458296155459778281402707479	<input type="checkbox"/>
	92433677519517823723646150366260258382924878197738	<input type="checkbox"/>
	60808974932692426829813154551633098134552713814500	<input type="checkbox"/>
	75833512312835341673437086589803504415307839912406	<input type="checkbox"/>
	58236683178125601207403415396325345643236152249758	<input type="checkbox"/>
	15303598156234277759772239460788079840463348035612	<input type="checkbox"/>
	34988828768032613508380424099142970182071571550382	<input type="checkbox"/>
	73386199162948541878954695992576083487025311681700	<input type="checkbox"/>
	06320247002189956017068639858129360420265960385939	<input type="checkbox"/>

図 5.17 作業課題のイメージ



↻ : 有意差

図 5.18 作業効率試験の結果

5.3.3 天井放射冷暖房についてのまとめ

天井放射冷暖房と従来型全空気式冷暖房を、快適性を被験者実験で、エネルギー消費量を数値シミュレーションにより比較した。その結果、以下を確認した。

- ① 天井冷房の空調のためのエネルギー消費量は通常の全空気式空調に比較して 10%程度低くなる。CGS の導入し排熱を利用すること等により更なるエネルギー消費削減が期待される
- ② 被験者実験では、天井冷暖房の方が快適側の申告が多く、快適性は高い
- ③ 天井冷房により執務者の作業効率が向上する可能性がある

建築物単体における二次側設備での先進的な取り組みのひとつとして、天井放射冷暖房について述べた。次節ではソーラークーリングを含む熱源システムでの取組について述べる。

5.4 熱源システムの改修による省エネ手法：アースポート ZEB 化への検討

熱源システムによるエネルギー消費量削減手法の事例として、アースポート(東京ガス港北 NT ビル)における取組について述べる。

アースポートは、ライフサイクル省エネルギーオフィスを標榜して設計・建設され 1996 年に竣工した、中規模のオフィスビルである。設計時点よりライトシェルフをはじめとする自然採光や自然換気、CGS が導入されたトップレベルの省エネビルであるが、2030 年での ZEB 化を目指して熱源設備を中心に改修を行った。

建物概要を表 5.3 に、竣工当時の写真を写真 5.1 に、改修後の写真を写真 5.2 に示す。2030 年での ZEB 化に向けた第一ステップとして、再生可能エネルギー活用や照明用電力削減等により建物単体での徹底したエネルギー消費の削減を目指して 2010 年に改修を実施した。

表 5.3 建物概要

場所	神奈川県横浜市
竣工	1996 年 3 月
延床面積	5,645m ²
構造	SRC 造, RC 造, S 造, 木造
階数	地上 4 階・塔屋 1 階
用途	事務所, ショールーム



写真 5.1 竣工当時のアースポート(北西側より)



写真 5.2 改修後のアースポート(南西側より)

5.4.1 改修の概要

本建物は北側半分のアトリウムをショールームとして使用しており、南側はオフィスエリアである。アトリウムからの自然採光や南側窓面上部のライトシェルフ、外階段を縦ダクトとして活用した自然換気システム等、建築面での省エネルギー対策が随所に取り入れられている。アースポートに取り入れられている省エネルギー技術と、2010年の改修で導入された技術の概要を図5.19に示す。

今回の改修では、一般テナントビルと比較して一次エネルギーを4割程度削減することを目標として有効性を検証した。

ZEB化に向けた空調システムの高効率化には、再生可能エネルギーの利用が必須である。その中でも、太陽エネルギーを高効率に利用できる太陽熱は空調等の熱用途に有効であり、太陽熱を活用する熱利用機器や制御技術の開発は重要である。本件では、太陽熱に加えて、CGS およびGHPチラー排熱を、吸収冷温水機とデシカント空調機で活用する熱利用ネットワークを形成し、高効率な空調システムを構築することとした。熱源システムのフローを図5.20に示す。

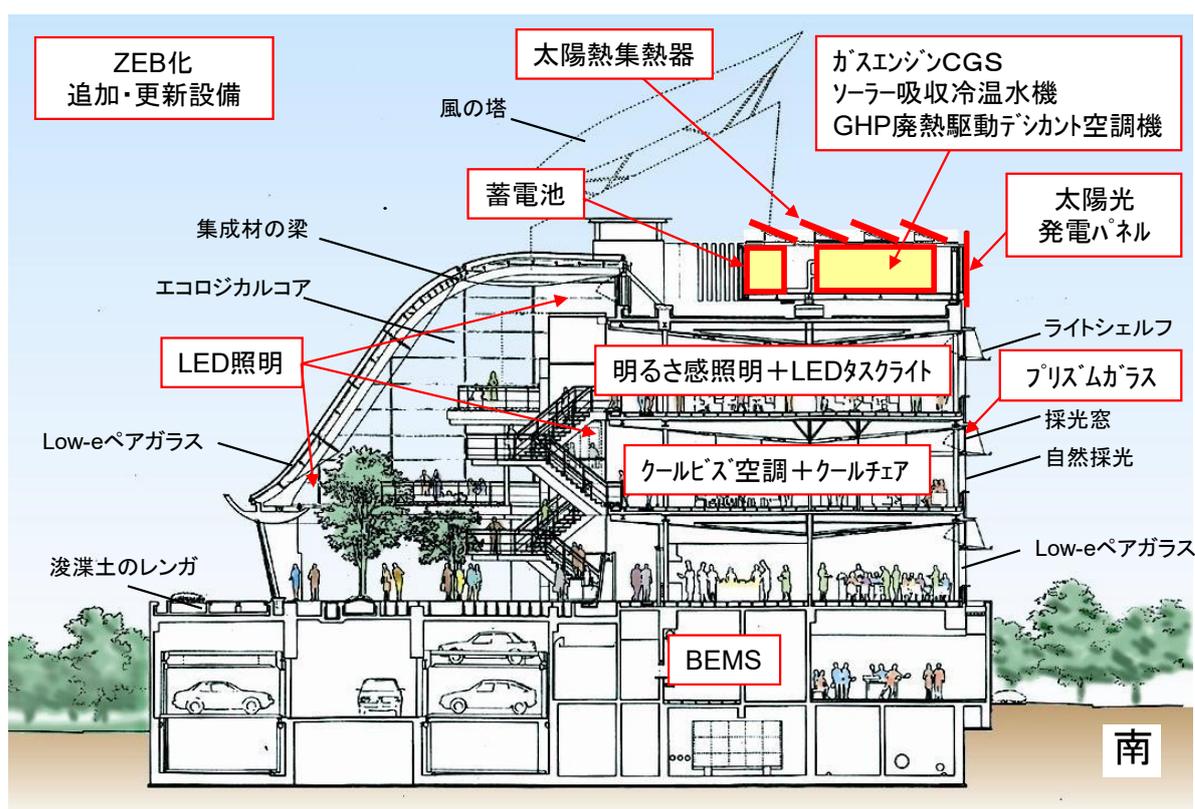


図 5.19 アースポートの省エネ技術と改修概要

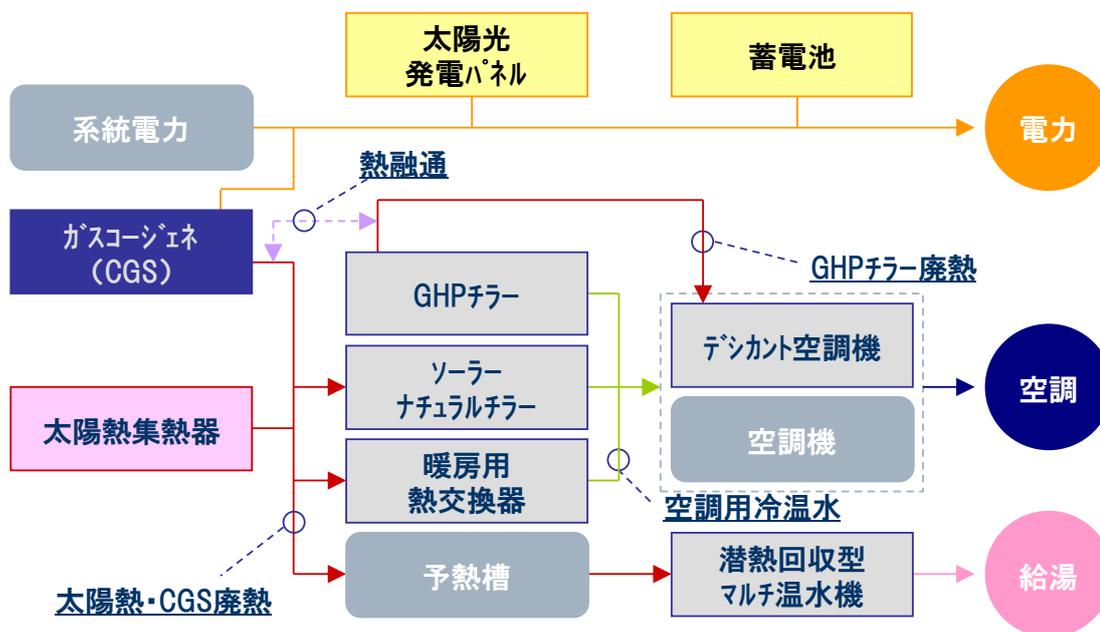


図 5.20 熱源システムフロー

屋上に定格熱出力約 100kW の太陽熱集熱器を設置し、天候等により集熱量が変動する太陽熱を最優先で利用しながら CGS の排熱で補完し、ソーラー吸収冷温水機（ソーラークーリング対応ガス吸収冷温水機）を用いて安定的に空調を行う。その際、温水の温度レベルに応じて、カスケード的に吸収冷温水機とデシカント空調機で利用することにより、最大限に熱を活用して高効率化を実現する。

太陽熱集熱パネルには、図 5.21 に示すように、高温の温水を取り出せる真空管式を採用した。層内を真空にした 2 層構造のガラス管の内部とガラス管周囲の反射板により、高効率な集熱が可能である。

二次側空調機にはデシカント空調機を採用して室内温度は比較的高く保ちつつ湿度コントロールを行い快適性と省エネ・省 CO₂ の両立を目指す。その際に、デシカントローター再生用熱源に GHP チラーの排熱を利用することにより、新たなエネルギーの使用なしに快適な空調を実現した。

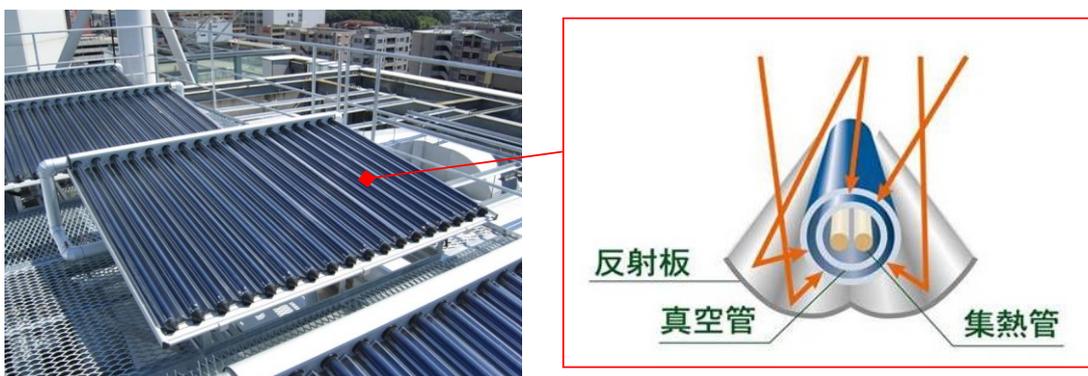


図 5.21 太陽熱集熱パネル

5.4.2 各設備の稼働状況

(1) 太陽熱利用空調

図 5.22 に冷房ピーク日の熱利用状況を示す。縦軸マイナス側が太陽熱集熱量および CGS 排熱の回収量を示し、プラス側が使用量である。日中は太陽熱の集熱量に応じてガス消費量が削減されている様子がわかる。日射のない時間帯は吸収式よりも COP の高い GHP チラーを優先運転している。

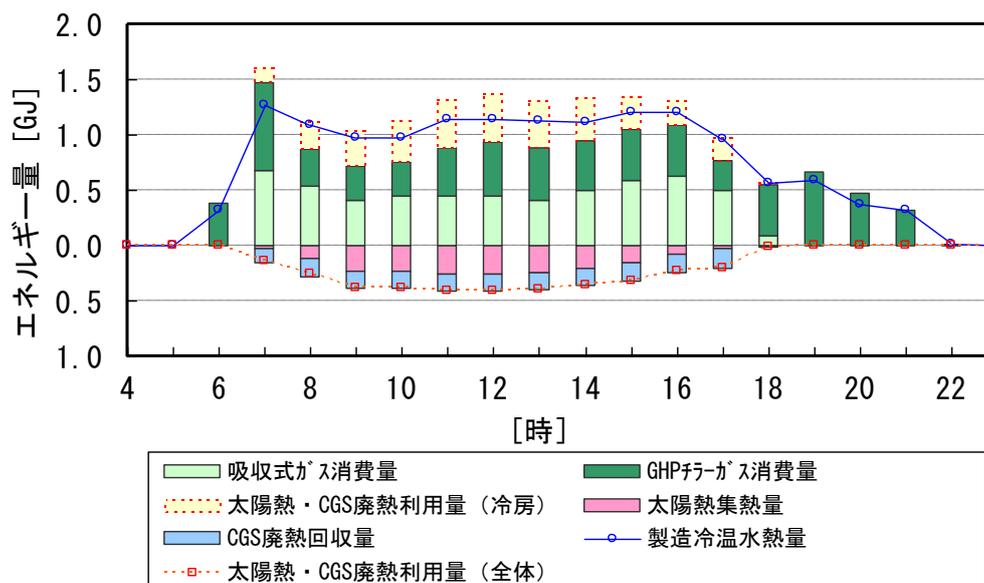


図 5.22 夏季ピーク日(2011.8.18)の熱利用状況

図 5.23 に中間期冷房日の熱利用状況を示す。午前中の比較的負荷率の低い時間帯は、太陽熱およびCGS 排熱だけで冷房運転をしていることがわかる。

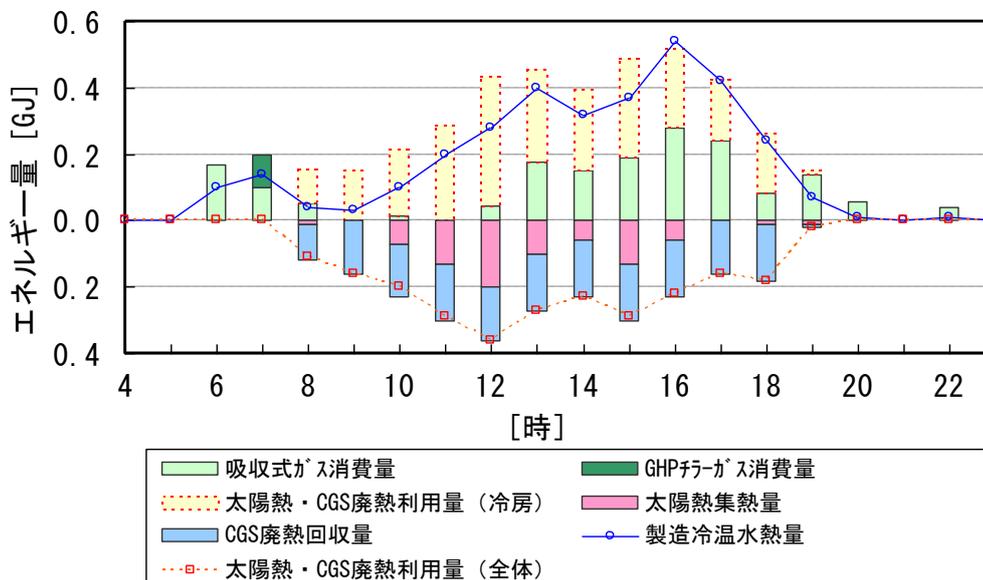


図 5.23 中間期冷房日(2010.10.18)の熱利用状況

図 5.24 に中間期暖房日の熱利用状況を示す。朝の立ち上がりを除いて、11 時頃から夕方までガスを消費せずに空調を行っていることがわかる。また、負荷のピークは朝 8 時台の立ち上がり時刻であるのに対し、太陽熱集熱のピークは 11 時前後であり、負荷と集熱のピーク時刻に差異がある。より高効率な運転のためには、蓄熱タンクや GHP チラーの併用等によりこのような差異の影響を減少させる工夫が必要となる

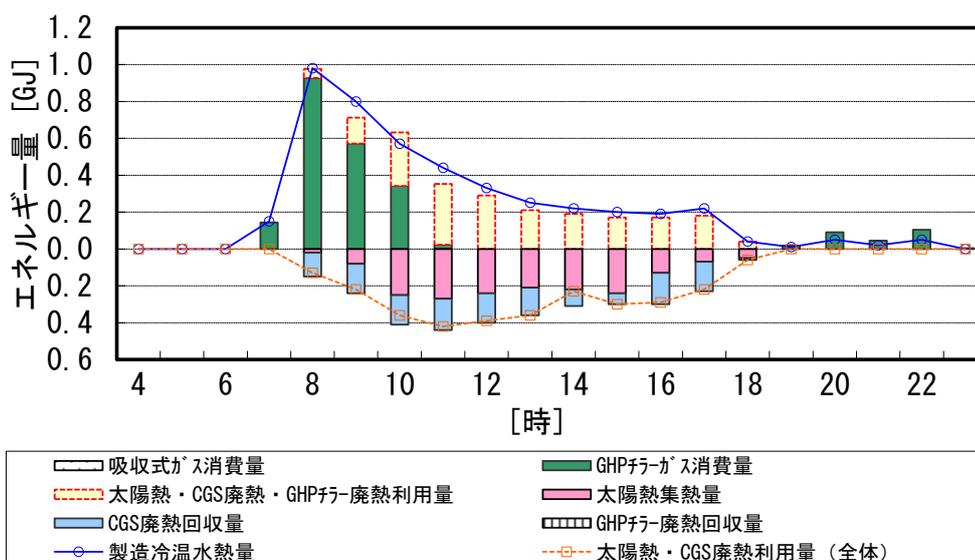


図 5.24 中間期暖房日(2011.3.30)の熱利用状況

図 5.26 に暖房ピーク日の熱利用状況を示す。暖房時の運転優先順位は順位 ①太陽熱・排熱利用 ②GHP チラー ③吸収式(ガス焚)の順であり、その通りに運転されている様子がわかる。また、ピーク日においても14時付近では太陽熱・排熱だけで暖房している。

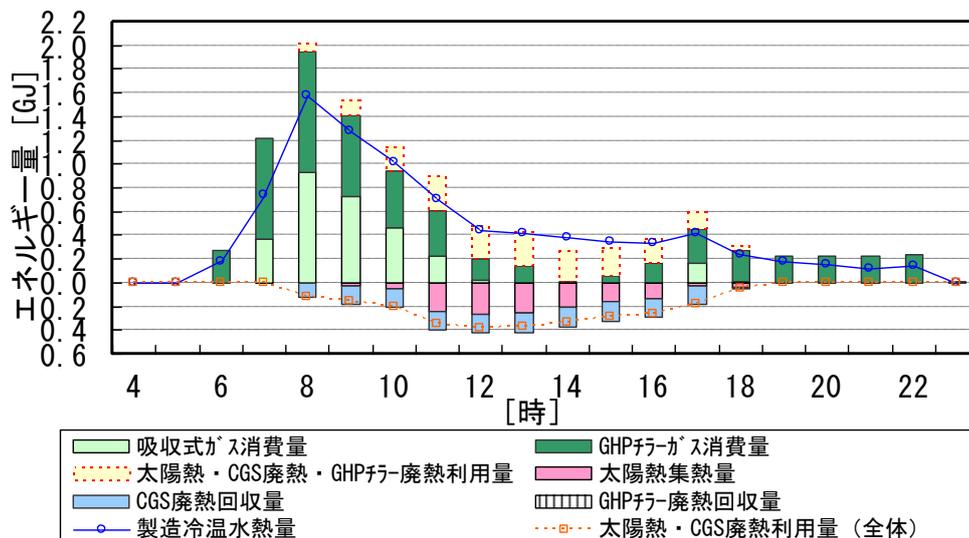


図 5.26 暖房ピーク日(2011.2.1)の熱利用状況

(2) 太陽熱集熱パネル

図 5.25 に太陽熱集熱器の集熱効率の一日平均値を示す。年間の平均値は 39.5%であるが、曇りで日射の少ないと思われる 10MJ/m²・日以下のデータを除いた平均集熱効率は 42.8%であった。太陽熱集熱器の定格性能は 50%以上であるが、実際の運転においては立ち上がり時に水温が低く熱利用ができない時間等が存在することを考慮すれば、概ね妥当な数値であると考えられる。

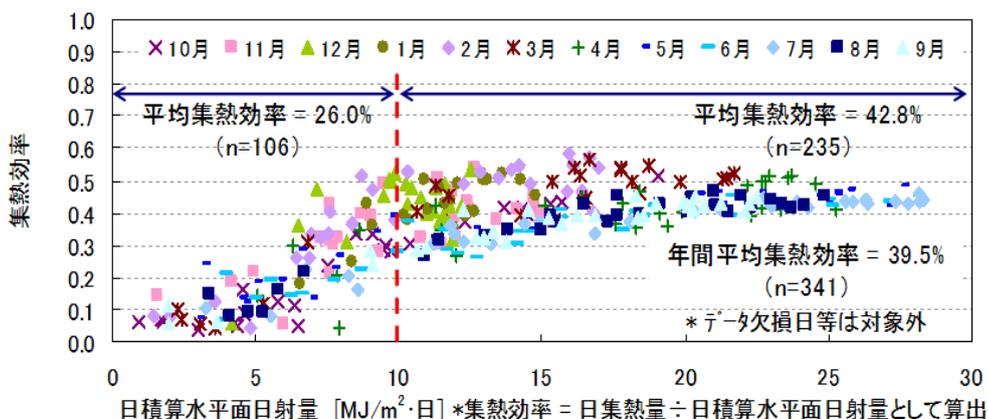


図 5.25 太陽熱集熱器の集熱効率

(3) 電力システム

図 5.27 に月毎の電力使用量と発電比率を示す。CGS は熱主運転（排熱利用先がなくなると停止）のため、中間期は停止時間が長くなり発電量は低下する。2011 年度の発電比率は、以下の通りであった。

発電比率 太陽光：3.1%，CGS：10.6%

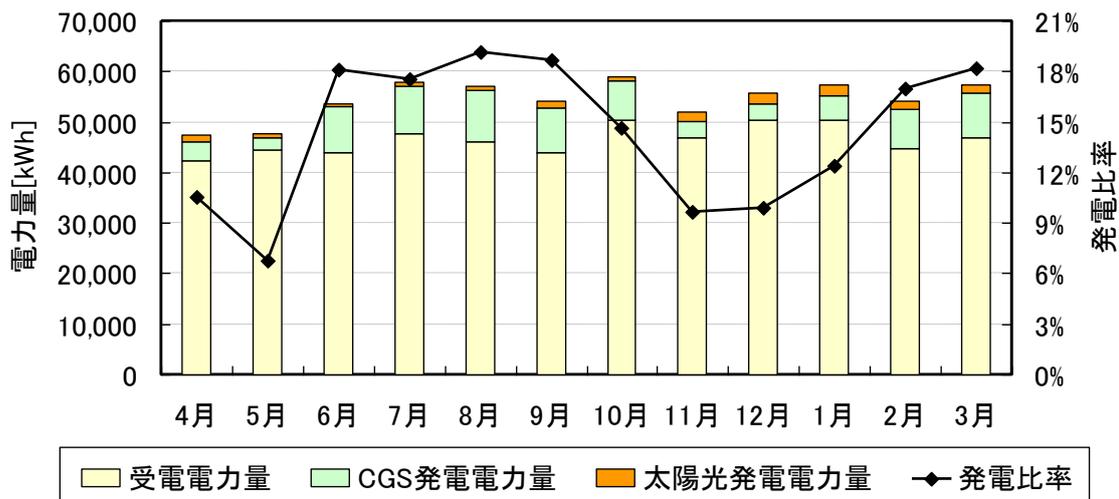


図 5.27 電力使用量と発電比率

(4) 太陽光発電

図 5.28 に各月の太陽光発電量を示す。アースポートにおいて太陽光発電パネルは壁面に設置されているため、太陽高度の低い冬季に発電量が多くなり、夏季に少なくなる傾向が見られた。平均総合発電効率は 9.5% であった。

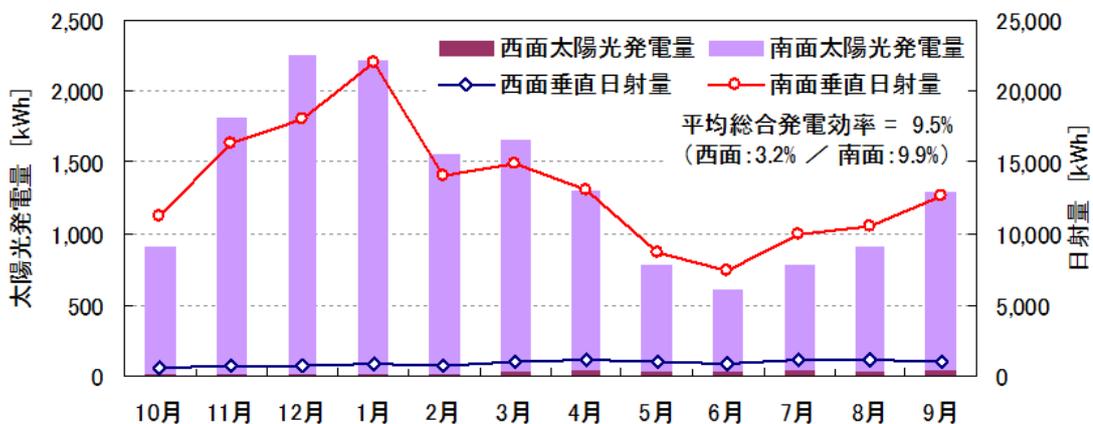


図 5.28 太陽光発電量

5.4.3 エネルギー消費量

2010年10月より通常運転を開始し、2012年度末までの一次エネルギー消費量を、ベースラインおよび改修前の2004年度とともに図5.29に示す。ベースラインは、「東京都地球温暖化対策計画書制度」で公表されているテナントビルの2005年度実績値を用いた。

2012年度の一次エネルギー消費量は、8,073MJ/m²となり、改修前から19%、ベースラインからは43%の削減となった。

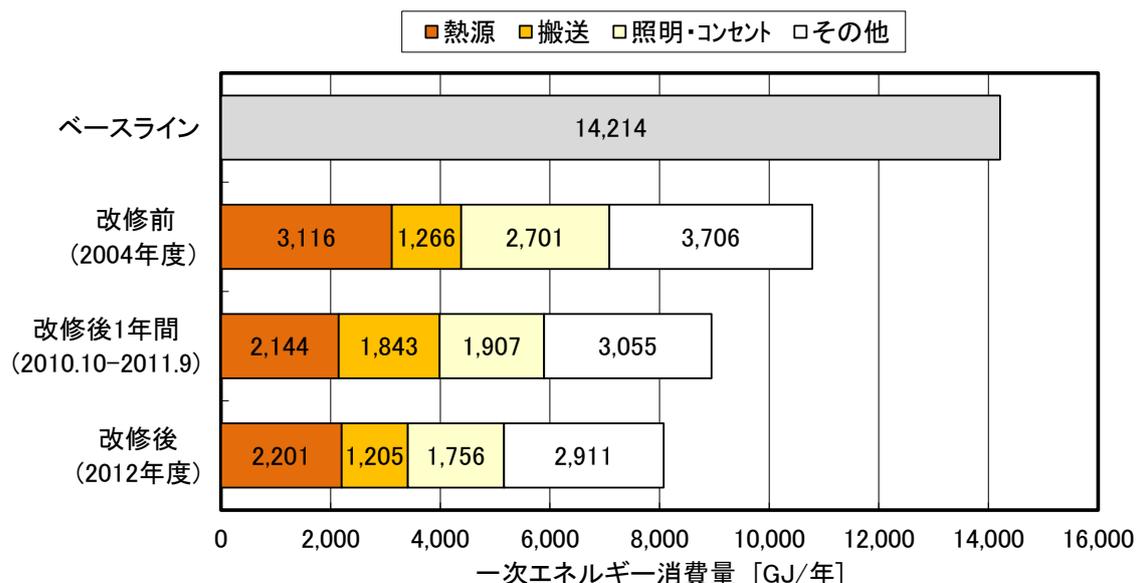


図 5.29 年間一次エネルギー消費量実績

図5.30に改修前の2009年および2011の床面積あたりのピーク電力負荷を、一般的なオフィスであるベースラインと併せて示す。本建物では、改修前においてもCGSおよびガス空調を導入していたため、一般オフィスと比べて39%程度ピーク電力が削減されていた。2011年度は、改修によりシステム全体がより高効率となった効果に加え、居住者の節電努力により、さらに35%近く削減し、一般ビルと比較すると60%のピーク削減となった。CGSおよびガス空調を用いることは、夏季のピーク電力削減・電力負荷平準化に大きく貢献することがわかる。

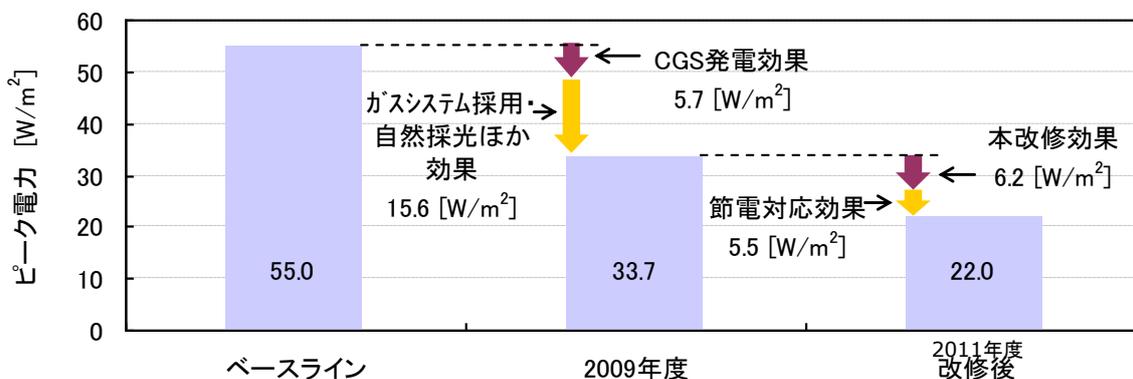


図 5.30 ピーク電力の削減

表 5.4 に 2012 年度実績データにおける削減効果集計表を示す。設計当初より省エネルギービルとして計画されたアースポートは、改修前の段階でベースラインと比べて一次エネルギー消費量が 24.1%少ないビルであった。今回の改修によりさらに 19.1%削減することができた。内訳としては、ソーラークーリングおよび CGS の採用による熱源システムと照明関係による削減がそれぞれ 7%程度、その他が 6%程度であった。

表 5.4 2012 年度実績データにおける削減効果集計表

省エネ項目		一次エネルギー削減効果		CO ₂ 排出量削減効果※1	
		削減量 GJ/年	削減率 %	削減量 t-CO ₂ /年	削減率 %
本事業の 省エネ 項目	(1)太陽熱とCGS・GHP排熱を最適利用した熱利用ネットワークによる高効率空調システム	971	6.8	52.6 (48.1)	8.7 (8.0)
	(2)自然採光を活用した次世代照明制御システム	945	6.7	66.8 (37.4)	11.1 (6.2)
	(3)太陽光発電と高効率CGSの電力統合制御	238	1.7	16.1 (9.9)	2.7 (1.6)
	(4)BEMSによるエネルギー管理強化および機器更新等	562	4.0	32.9 (18.4)	5.4 (3.0)
小計		2,716	19.1	168.4 (113.8)	27.9 (18.8)
導入済みの省エネ項目※2		3,425	24.1	150.4 (127.6)	24.9 (21.1)
合計		6,141	43.2	318.8 (241.4)	52.8 (40.0)
2012年度一次エネルギーおよびCO ₂ 原単位		1,430MJ/㎡年		51kg-CO ₂ /㎡年(64kg-CO ₂ /㎡年)	
ベースライン(一般的なテナントビル)		2,518MJ/㎡年		107kg-CO ₂ /㎡年	

※1 CO₂削減量および率の()内は、太陽光発電およびCGSの発電によるCO₂削減効果の算出に、全電源平均のCO₂原単位を用いた場合の数値
 ※2 アースポートの2004年度実績値(電力消費量673,740kWh、ガス消費量93,543Nm³、CGS発電量75,001kWh)、建物延床面積5,645㎡を用いて算出
 ※3 CO₂削減量算出時の換算係数 ガス:2.31kg-CO₂/Nm³、電気:0.69kg-CO₂/kWh

5.4.4 室内環境

建築物は居住者が室内で業務を行うためのものであるから、省エネや ZEB 化を目指したビルにおいても、室内環境が損なわれるようなことがあってはならない。今回改修した空調・照明関係が形成する室内環境を確認するために、室内温度・照度分布を測定した。対象室は、東西方向約 32m×南北方向 13.5m で、事務室として使用している。照度センサーによるアンビエント照明は机上面で 300lx、室温は 26°C に設定されて運転していた。

図 5.31 に夏季冷房時および冬季暖房時晴天日の床上 1.1m における温度分布を示す。室内の温度部分布が均一に近く、25°C~26°C程度となっており、概ね良好な温度分布と言える。

図 5.32 に夏季および冬季晴天日の机上面照度分布を示す。節電対策として自主的に机上面照度を 300lx 程度にしていたため、夏季は概ね 300lx 程度となっている。北東隅にアンビエントの照度が不足しているエリアが一部見られるが、このエリアには通常執務者が存在しないため、節電のために照明器具を間引したことによるものである。冬季は南側窓面からの自然採光が有効に行われていることがわかる。

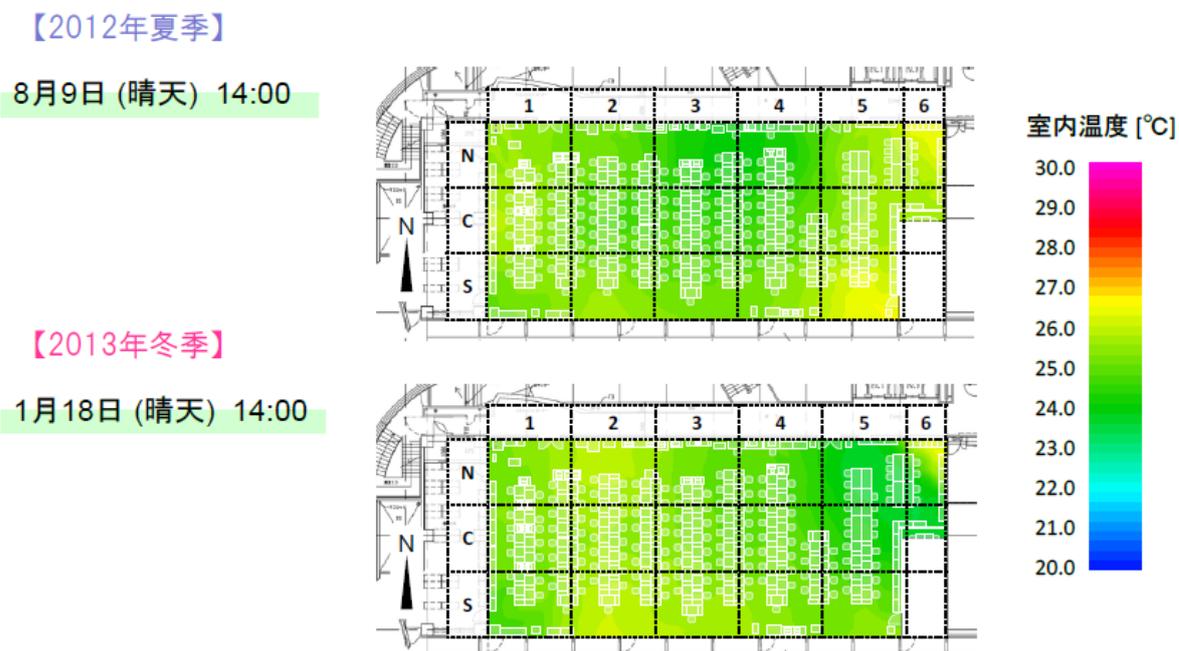


図 5.31 晴天日冷暖房時の室内温度分布

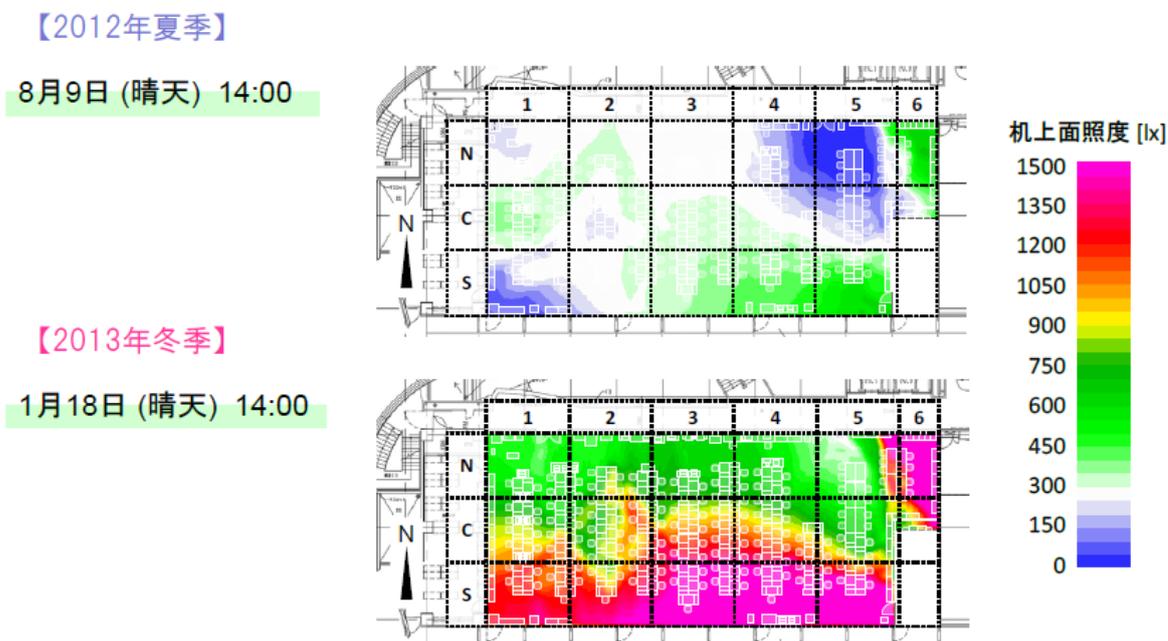


図 5.32 夏季および冬季晴天日の高さ 1,400 mm における机上面照度分布

図 5.33 に執務者に対して行った、「ZEB 改修前後で知的生産性がどの程度向上したか？」という質問の回答を示す。「変化なし(0%)」が大部分であるが、マイナス側に比べてプラス側の申告が多くなっている。室内環境と知的生産性の関係の定量化については更なる研究が必要であるが、この結果から、アースポートの ZEB 化改修は、執務者の知的生産性向上に貢献した可能性が高いことが伺える。

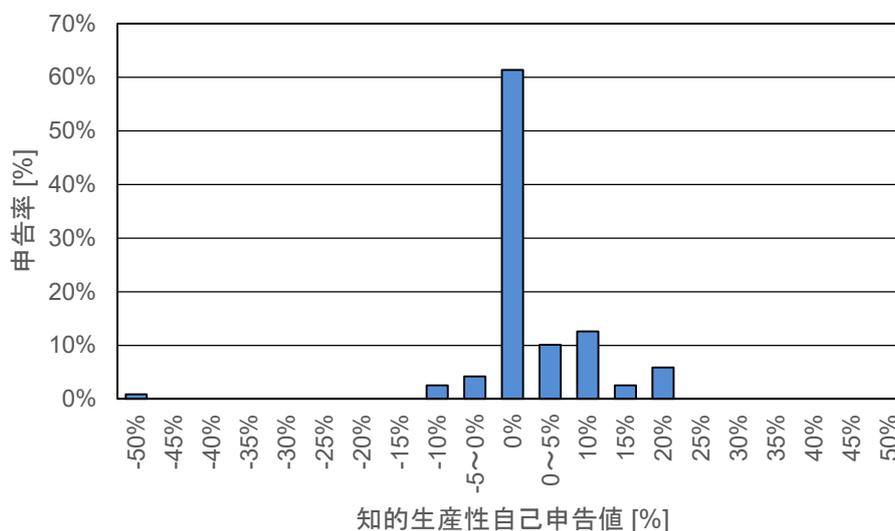


図 5.33 知的生産性向上の自己申告値

5.4.5 ZEB 化改修のまとめと今後の展開

本改修では、ZEB 化に向けた第一ステップとして、ベースラインから 43%、改修前から 19% の一次エネルギー削減を達成した。運転条件等の詳細な最適化により、更なる削減が可能である。本改修により有効性が実証された技術については、省エネ対策の進んでいない中小規模既存ビルへ展開することにより、これまで対策の進んでなかった中小規模業務用ビルの省エネルギー対策を進めることが可能になると考えられる。

次の段階として、更なる高効率機器の導入とともに、エネルギーの面的利用による削減を検討している。例えば日曜日が晴天であると、事務所エリアが非稼働日であるアースポートだけでは使用しきれないエネルギーが生じてしまうが、エネルギーを融通することにより近隣ビルで有効に利用できる。このようにアースポート単体でなく、エネルギーを融通するビル全体としてエネルギー消費を削減し ZEB 化を目指す場合について、6.2 で検討する。

5.5 要約

本章では、建物単体における先進的なエネルギー消費量削減の取組みについて述べた。

5.2 では建築物単体における省エネルギー手法について、建築的な手法と設備側の手法について述べ、ZEB の概念を概説した。5.3 では、空調二次側設備での取組として、快適性向上と省エネルギー化を達成するための手法の一つである、天井放射冷暖房システムを導入した場合について述べた。数値シミュレーションにより省エネルギー性を、被験者実験により快適性をそれぞれ検証した。天井放射冷暖房では、快適性を向上させつつ空調用エネルギーの10%以上の省エネが可能であり、熱源側でCGS 排熱等を用いることにより更なる省エネが可能であることを示した。

5.4 では、ソーラークーリング導入を含む熱源システムによる省エネ事例として、アースポートにおける ZEB 化の取組事例について述べた。アースポートの ZEB 化を目指した改修により、通常のビルと比べて43%、改修前から19%の一次エネルギー消費量削減が達成された。

これらの先進的な取り組みが普及した将来の街区におけるエネルギーシステムについて次章で検討する。

第6章 熱融通による次世代エネルギーシステムの評価

6.1 序論

本章では、これまでに述べてきた建物単体における省エネルギー技術と、負荷を集積させた地域冷暖房プラントによるエネルギー削減効果に加え、スマートエネルギーネットワークを構築した場合のエネルギー消費削減量を定量的に把握する。また、将来の都市・街区を想定した場合のエネルギーシステムについて考察する。

ZEB化を進展させるためには再生可能エネルギーの大量導入が必須であるが、狭隘な土地に比較的高層の建物が高密度に建設されることの多い日本の都市部における建築物において、オンサイトのみで大量の再生可能エネルギーを導入することは現実的でないケースが多い。そこで、近隣建物の屋上や駐車場屋根等を活用し、得られた再生可能エネルギーを融通することによるZEB化について、簡易計算手法により6.2で検討する。

地域冷暖房プラントの高効率化のためには、熱源機器の高効率化に加えて、発電時に生じる排熱も有効利用できるCGSの導入が効果的である。6.3では、第4章で開発したシミュレーションツールを用いて、3通りのCGS導入形態におけるエネルギー削減効果およびプラントにおけるエネルギー効率について述べる。

東京都内のような高度密集都市においては、地域冷暖房の供給街区が隣接していることも珍しくない。6.4では、近隣（配管延長片道2,000m程度）に地域冷暖房が存在する場合を想定し、第4章で開発したツールを用いて、プラント間熱融通を含むスマートエネルギーネットワークを構成した場合の効果を、エネルギー消費量削減効果に着目して定量的に評価する。具体的には、前述の4.4で想定した検証用実プラントの近隣に、同規模・同負荷のプラントがあるケースと、平均的な規模でより高効率なプラントがあるケースについて、それぞれと熱融通する場合のエネルギー消費削減効果をシミュレーションによって検討する。

一方、EU諸国におけるZEB規制や、日本における「ZEBロードマップ委員会」によるとりまとめ⁵⁾および省エネルギー施策の進展等を考慮すると、今後、街区におけるエネルギー消費量は減少していくことが予想される。一般に設備機器は15~20年程度で更新されるサイクルを想定しているが、再開発や政策的なZEB化の進展等により、都市・街区における熱負荷の減少がそれを上回るペースで進展する可能性がある。結果として熱負荷に対して過大な設備容量で非効率な運転となる懸念がある。6.6では、このような将来の街区で起きる可能性のある事象についてもシミュレーションで検討する。

6.7では、本論文で述べた建築と街区におけるエネルギー消費削減手法が普及した場合の我が国におけるエネルギー削減ポテンシャルを試算する。

6.2 再生可能エネルギー融通によるZEB化の検討

ZEB化のためには再生可能エネルギーの最大導入が必須であるが、地域的・制度的な制限等があり、建物単体における再生可能エネルギーの導入は限定的となるケースが多い。また、多くの

場合、再生可能エネルギーが最大に得られる季節・時間帯と建物需要のピークは一致しないため、取得した再生可能エネルギーを無駄なく使用する仕組みが必要となる。ここでは、近接する地域冷暖房により再生可能エネルギーの過不足分を補完することを想定した。以下に、近隣施設の屋上等を活用し、エネルギー融通により ZEB 化を試みるケースについて述べる。

検討モデルとして前章 5.4 で述べたアースポートと近隣施設を想定し、エネルギー融通により近隣建物の屋上および駐車場の屋根等も活用して再生可能エネルギーを最大限利用することにより ZEB 化を目指すケースについて、月毎の負荷バランスから融通量を計算する簡易手法によりフィジビリティスタディーを行った。

なお、本件は研究の事例としてアースポートおよび近隣施設を想定し、机上での検討を行ったものであり、現実の計画ではないことに注意が必要である。

6.2.1 検討対象施設

検討対象施設として想定したイメージを図 6.1 に、想定した建物概要を表 6.1 に示す。周辺施設の屋上に太陽熱集熱器または太陽光発電パネルを設置し、アースポートに増設した排熱投入型吸収冷温水機により冷温水を製造してアースポートおよび周辺施設に供給する。エネルギーの余剰および不足分は地域冷暖房から受入／販売するものとした。

<検討対象施設>

- ・ アースポート
- ・ 周辺施設(1) (商業施設 K)
- ・ 周辺施設(2) (商業施設 V)
- ・ 地域冷暖房メインプラントおよび地域冷暖房供給需要家



図 6.1 アースポートと周辺施設のイメージ

表 6.1 想定した周辺施設概要

	用途	階数	延床面積	屋上駐車場面積
アースポート	事務所・ショールーム	4階	5,645 m ²	-
商業施設 K	物販・飲食店舗	2階	6,952 m ²	4,136 m ²
商業施設 V	物販・飲食店舗	2階	983 m ²	1,855 m ²

6.2.2 エネルギー融通により建物単体で ZEB 化を目指すケース

商業施設 K の駐車場屋根に太陽光発電パネルを、商業施設 V の駐車場屋根に太陽熱集熱パネルを設置し、それぞれの自然エネルギー出力をアースポートに融通することにより ZEB 化の可能性を検討する。今回の検討では、CGS による発電量と排熱もオンサイトでのエネルギー製造量としてカウントすることとした。これは、CGS の燃料に再生可能エネルギーを用いた状態を想定していることになる。

(1) アースポートのエネルギー収支の想定

アースポートのエネルギー需要量および太陽熱集熱量は 2010 年度実績を用いた。

電力と熱の需要量それぞれから、アースポートに設置された太陽光発電量、CGS 発電量、太陽熱集熱量および CGS 排熱を減じ、不足分を融通により受け入れると想定した。

太陽熱集熱器・CGS・太陽光発電パネルについては、以下のように想定した。

太陽熱集熱器 : 2010 年度実績

CGS : 7 時～20 時の 13 時間定格運転とし日・祝日も運転する

太陽光パネル : NEDO の標準気象・日射データ (MET-PV-3) における横浜地区の平均年鉛直面日射量データから、アースポートに設置された単面積当たりの月別時刻別日射量を抽出し、各月発電量を量方位の日射量と太陽光発電パネルを設置している外壁面積の積により按分し、時刻別展開した

想定したエネルギー融通のイメージを図 6.2 に示す。

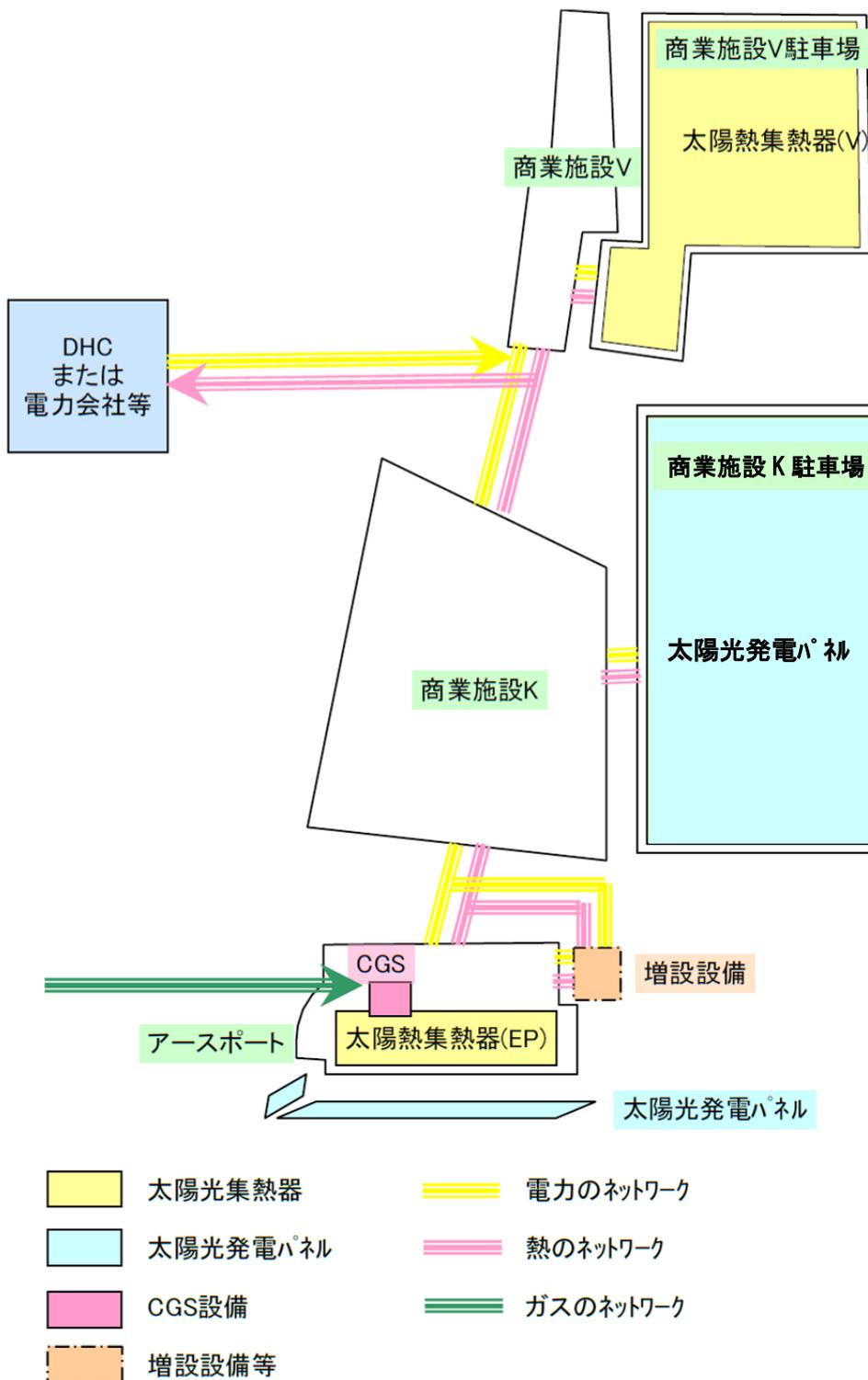


図 6.2 太陽光パネル・太陽熱集熱器等の設置と融通のイメージ

(2) 検討結果

検討結果を表 6.2 に示す。アースポートの ZEB 化のために不足する年間必要発電量 4,747GJ と年間必要集熱量 979GJ を融通するため、近隣施設屋上に以下を設置してアースポートに融通するものとし、設置される太陽光発電パネルおよび太陽熱集熱器は、アースポートに設置されているものと同性能を想定した。商業施設 K および V の駐車場屋根上に設置が必要なパネル面積は以下の通りである（カッコ内は屋根面積に対する設置面積の割合）。

商業施設 K の駐車場屋上 : パネル本体面積 3,274 m²の太陽光発電パネル(79%)
 商業施設 V の駐車場屋上 : パネル本体面積 1,064 m²の太陽熱集熱器(57%)

表 6.2 融通によるアースポートの ZEB 化検討結果

GJ		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計	
需要	電力	電力	466	485	532	515	524	584	657	644	580	565	471	501	6524
	熱	冷房用エネルギー	0	0	0	0	72	152	289	269	189	34	0	0	1005
		暖房用エネルギー	232	259	179	65	0	0	0	0	0	0	64	179	978
		給湯用エネルギー	12	7	14	11	13	14	13	16	14	13	21	19	167
	エネルギー需要合計		710	751	725	591	609	750	959	929	783	612	556	699	8674
製造	電力	太陽光発電量	19	15	13	11	11	8	9	11	10	12	14	17	150
		CGS発電量[GJ]	138	129	138	133	138	133	138	138	133	138	133	138	1627
	熱	太陽熱集熱	43	42	42	37	28	20	24	28	20	25	28	39	376
		CGS排熱	75	70	75	72	60	58	60	60	58	60	72	75	795
	エネルギー製造合計		275	256	268	253	237	219	231	237	221	235	247	269	2948
不足	ZEB化必要発電量		309	341	381	371	375	443	510	495	437	415	324	346	4747
	ZEB化必要集熱量		126	154	76	-33	-3	88	218	197	125	-38	-15	84	979
融通	商業施設K太陽光発電		369	377	421	441	438	373	445	514	362	356	313	337	4747
	商業施設V太陽熱		112	108	109	96	72	51	63	74	53	66	73	102	979

アースポートにおけるエネルギー収支を図 6.3 に示す。グラフのプラス側をアースポートの「需要エネルギー」、マイナス側を「製造エネルギー」（再生可能エネルギー）と表現している。ZEB を達成するためには、年間の総和でプラス側とマイナス側で概ね等しくならなければならない。表 6.2 を見ると、ZEB 達成に必要な電力および熱の製造量を融通により調達し、アースポートにおいては ZEB が達成されていることがわかる。

なお、上記の計算は月毎の収支によるものであるが、時間別には過不足が生じている。ここでは、余剰分のエネルギーは、地域冷暖房に供給(売却)することとし、不足分は地域冷暖房および電力会社から受入(購入)することを想定した。

以上により、商業施設 K と V の駐車場屋根に太陽光発電パネル・太陽熱集熱器を設置し、全量をアースポートに供給することによりアースポートの ZEB 化が可能になる可能性が示された。

以降の検討では、商業施設 K および V を含めた街区全体として ZEB を達成する可能性を検討する。

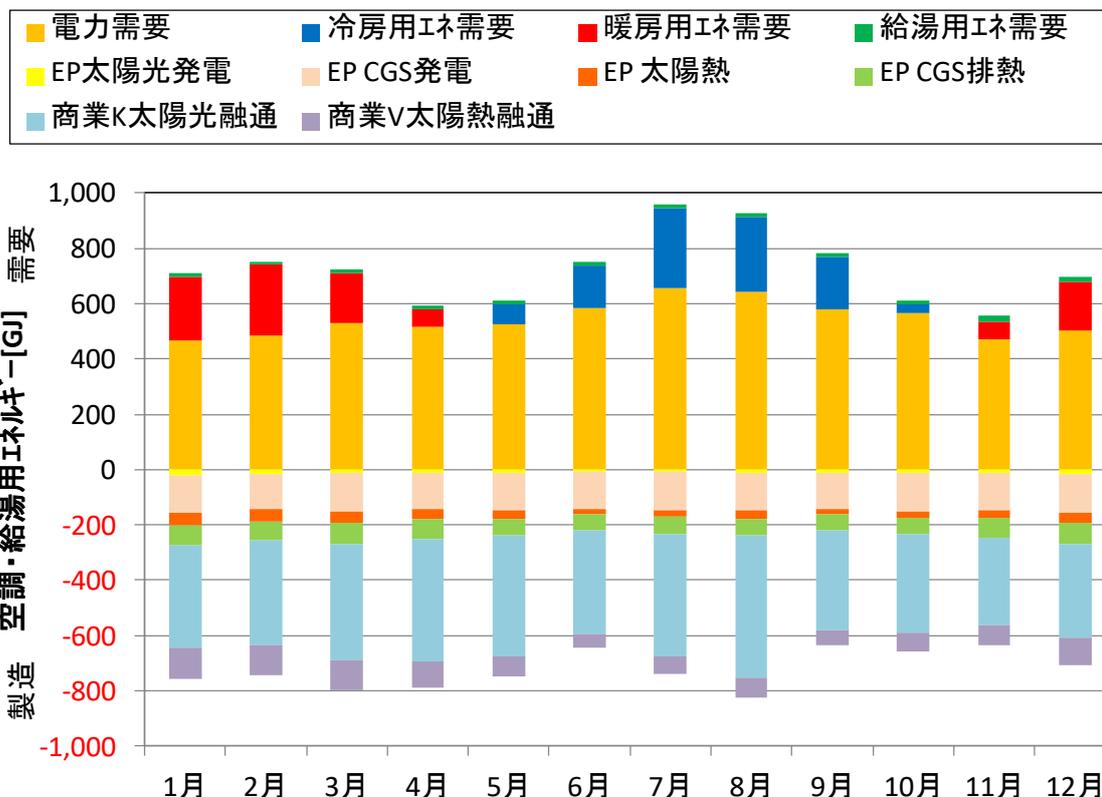


図 6.3 アースポートにおけるエネルギー収支

6.2.3 街区全体での ZEB 化の可能性

前節では近隣施設駐車場の屋根に設置した太陽光発電パネル・太陽熱集熱器からの出力をアースポートに導入することでアースポートを ZEB 化することを検討したが、本節では商業施設 K および商業施設 V を含むエリア全体での ZEB 化の可能性を検討する。

(1) 電力・空調・給湯用エネルギー需要の想定

アースポートの負荷は 2010 年度実績を用いた。商業施設については、空気調和・衛生工学会データ²⁰⁾の店舗におけるエネルギー消費原単位に延床面積を乗じて求めた。ただし、電力については空衛学会データ掲載時点(1994年)から照明負荷が半減したと想定して、同データの電力負荷×0.8を年間の電力負荷とした^{*1}。また、商業施設における給湯負荷は考慮しないこととした。各月代表日の時刻別負荷データは、空気調和・衛生工学会の月別・時刻別データより展開して求めた。

*1 (一財)省エネルギーセンターの「商業施設の省エネルギー」⁵⁹⁾より、空調・給湯・厨房熱源を除く用途別エネルギー消費割合(電力消費によるもの:全体の74%)のうち、照明用エネルギーが全体の28.9%であり、これが半減していることを想定したので、 $1 - (0.289 \times 0.5) / 0.74 \approx 0.805$ より、年間電力負荷に0.8を乗じた

(2) 太陽熱集熱器・CGS・太陽光発電パネルの想定

アースポート

太陽熱集熱器 : アースポートの 2010 年度実績より求めた

CGS : 7 時～20 時の 13 時間定格運転とし日・祝日も運転することとした

太陽光パネル : NEDO の標準気象・日射データ (MET-PV-3) における横浜地区の平均年鉛直面日射量データから、アースポートに設置された単面積当たりの月別時刻別日射量を抽出し、各月発電量を量方位の日射量と太陽光発電パネルを設置している外壁面積の積により按分し、時刻別に展開した

商業施設

太陽熱集熱器 : 住宅地図より商業施設 K の駐車場の屋上面積および商業施設 V の屋上面積を求め、屋上面積の 95% に太陽熱集熱器を設置すると想定した。集熱器はアースポートと同性能とし、アースポートの設置面積当たりの出力に、それぞれの施設の太陽熱集熱器設置面積を乗じた。

負荷に対して余剰分のエネルギーは、地域冷暖房に供給(売却)することとし、不足分は地域冷暖房および電力会社から受入(購入)することとする。

(3) 対象施設での一次エネルギー需要と再生可能エネルギー生産量

対象施設全体でのエネルギー収支を図 6.4 および表 6.3 に示す。検討対象施設のエネルギー需要は年間 27,194GJ に対して、太陽光発電・太陽熱集熱による製造量は 5,778GJ であり、その負担割合は 21%程度である。

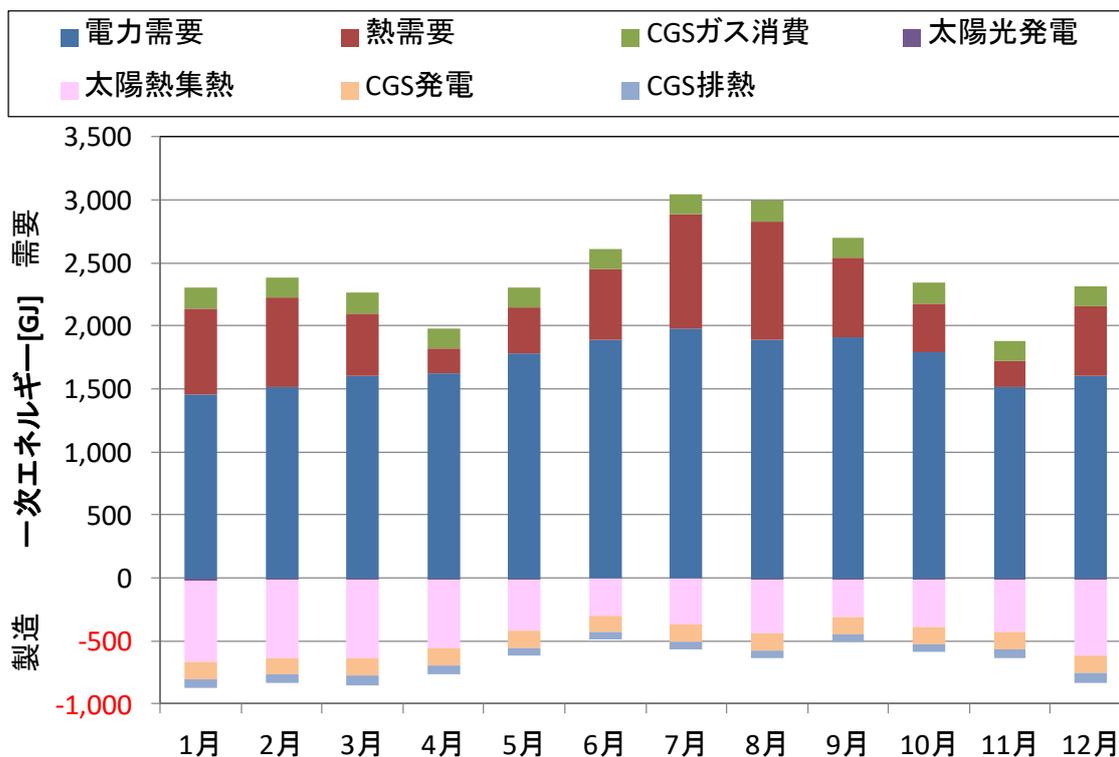


図 6.4 検討施設全体の一次エネルギー需要と生産量

表 6.3 検討施設全体の一次エネルギー需要と生産量

GJ		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
(A)	全施設需要量(想定一次エネルギー)	2,139	2,226	2,098	1,824	2,143	2,453	2,885	2,831	2,541	2,180	1,719	2,155	27,194
	電力	1,461	1,514	1,606	1,621	1,778	1,890	1,976	1,891	1,907	1,789	1,520	1,607	20,560
	熱	678	712	492	203	365	563	909	940	634	391	199	548	6,634
	CGSガス消費量	165	154	165	160	165	160	165	165	160	165	160	165	1,949
全施設合計エネルギー消費量		2,304	2,380	2,263	1,984	2,308	2,613	3,050	2,996	2,701	2,345	1,879	2,320	29,143
(B)	太陽光発電量	19	15	13	11	11	8	9	11	10	12	14	17	150
	太陽熱出力	645	622	627	548	412	291	361	423	303	376	418	602	5,628
	太陽エネルギー合計	664	637	640	559	423	299	370	434	313	388	432	619	5,778
太陽エネルギー利用率(B)/(A)		31.0%	28.6%	30.5%	30.6%	19.7%	12.2%	12.8%	15.3%	12.3%	17.8%	25.1%	28.7%	21.2%
(B')	CGS発電量	138	129	138	133	138	133	138	138	133	138	133	138	1,627
	CGS排熱量	75	70	75	72	60	58	60	60	58	60	72	75	795
太陽光発電+太陽熱+CGS発電+CGS排熱		877	836	853	764	621	490	568	632	504	586	637	832	8,200

太陽熱出力およびCGS排熱出力は、排熱利用機器COPを考慮して、5~10月は排熱COP=0.8、11月~4月は排熱COP=1.0とした

検討対象施設と、余剰・不足エネルギーの受入・供給を行う地域冷暖房について、年間収支でのエネルギーの流れを図 6.5 に示す。

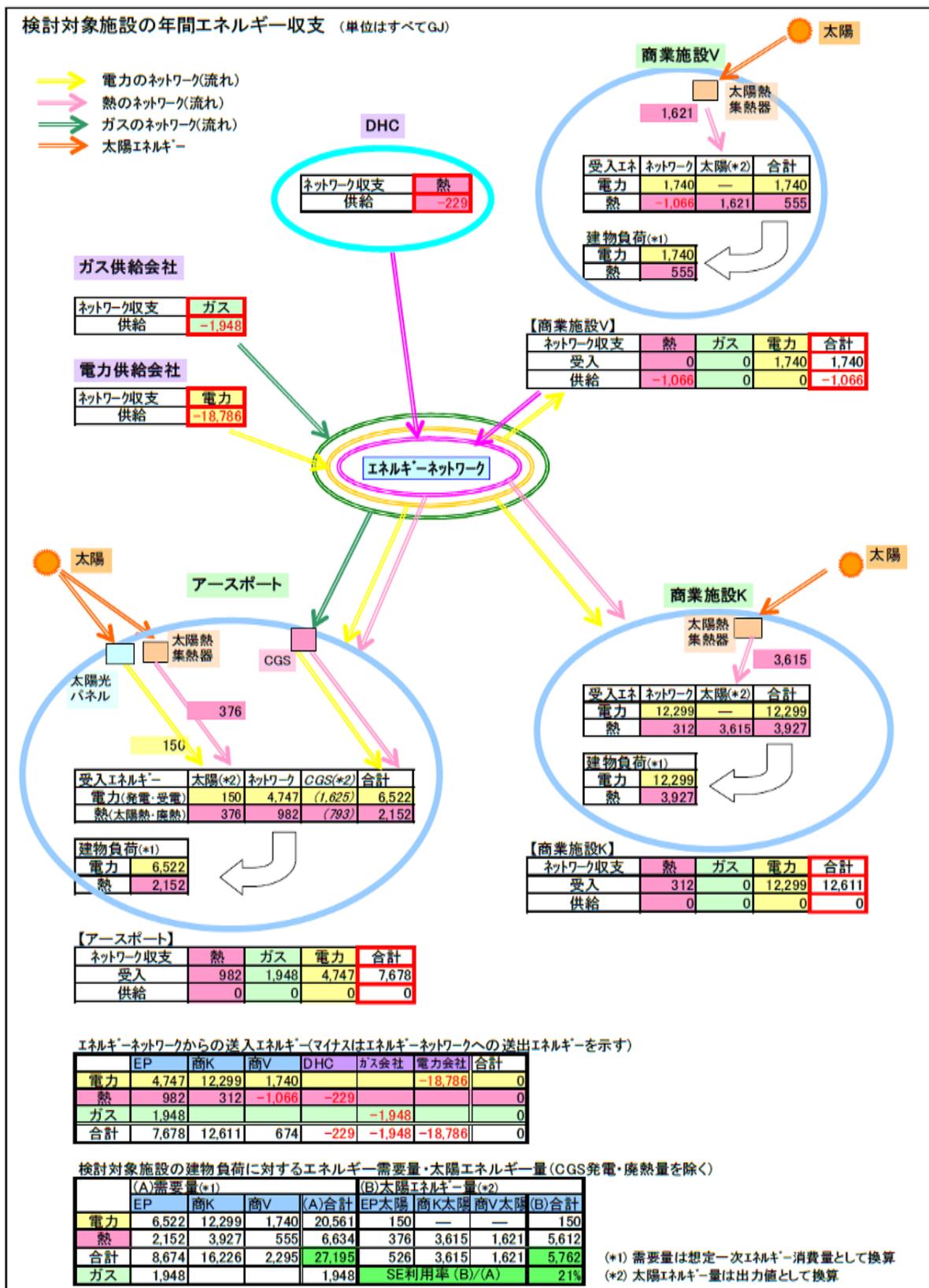


図 6.5 検討エリアにおけるエネルギーネットワークフロー (年間収支[GJ])

6.2.4 再生可能エネルギー設備増設による ZEB 化の可能性

本節では、不足する電力・熱需要を賄い、ZEB を達成するために必要な再生可能エネルギー設備増設について検討する。不足電力需要については太陽光発電パネルを、熱需要に対しては太陽熱集熱器を増設すると想定する。

増設する太陽熱集熱器・太陽光発電パネルとその出力については以下のように想定した。

太陽熱集熱器：アースポートに設置された太陽熱集熱器と同性能とし、設置面積当たりの各月時刻別出力に集熱器設置面積を積算した。

太陽光発電パネル：結晶系太陽光発電パネルを、真南向き・傾斜角 30 度に設置するものとし、NEDO の標準気象・日射データにおける横浜地区平均年日射量データから、外気温度・パワーコンディショナー変換効率等によるロスを考慮して発電パネル単位面積当たりの予測発電量を求めた。

図 6.6 および表 6.4 に、太陽熱集熱器と太陽光発電パネルを増設した場合の需要量と生産量を示す。

熱の不足分を補完するためには 1,022GJ の太陽エネルギーによる熱が必要であり、それを補うためにはアースポートと同性能の集熱器であれば約 1,100 m² の設置面積が必要となる。

また、電力不足分を補完するためには、太陽光発電にて 20,413GJ の発電量が必要となり、これは概ね 14,000 m² 程度のパネル本体面積となる。

アースポートは省エネルギー建築としてエネルギー需要削減に努めたビルであるが、今回はエネルギー融通先である商業施設に一般のエネルギー需要を想定したため、街区全体として ZEB 達成のためには非現実的な面積の太陽光発電パネルが必要となった。ZEB 化のためには、総合効率の高い大型 CGS の導入とともに建物側でのエネルギー需要削減が必要である。

本節では近隣建物とエネルギー需要を合算して ZEB 化を検討したが、6.2.2 で検討したように、近隣からの屋根貸のような何らかの合理的な形で再生可能エネルギーを受け入れる形態とするならば、アースポート単体における ZEB 化は理論的に可能である。ただし、実際に近隣施設の屋根に太陽熱集熱器等を設置するには、費用負担や省エネ法をはじめとする法規制との関係等の課題があり、エネルギー融通による ZEB 化達成はその仕組みづくりも必要である。

以上、建物間のエネルギー融通を活用した再生可能エネルギーの最大利用と ZEB 化について簡易計算手法により検討した。次節では、地域冷暖房プラントのエネルギー融通について数値シミュレーションにより検討する。

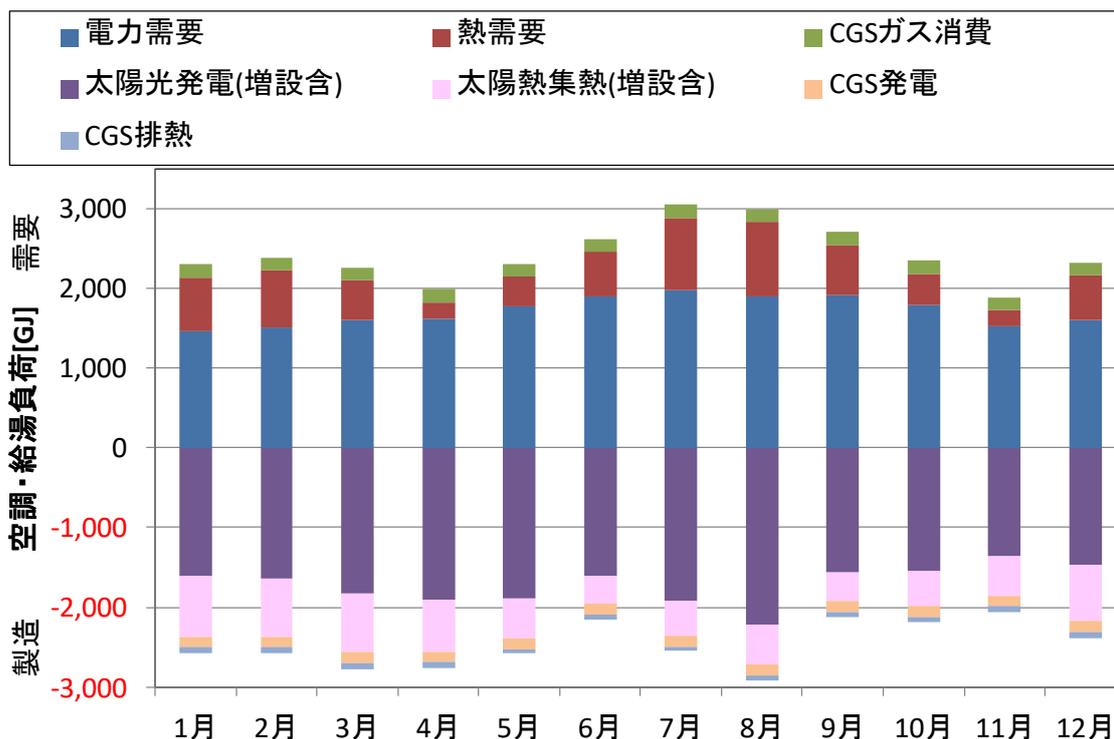


図 6.6 太陽光発電パネル・集熱器を増設した場合の需要量と生産量

表 6.4 太陽光発電パネル・集熱器を増設した場合の需要量と生産量

GJ		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
(A)	全施設需要量(想定一次エネルギー)	2,139	2,226	2,098	1,824	2,143	2,453	2,885	2,831	2,541	2,180	1,719	2,155	27,194
	電力	1,461	1,514	1,606	1,621	1,778	1,890	1,976	1,891	1,907	1,789	1,520	1,607	20,560
	熱	678	712	492	203	365	563	909	940	634	391	199	548	6,634
	CGSガス消費量	165	154	165	160	165	160	165	165	160	165	160	165	1,949
	全施設合計エネルギー消費量	2,304	2,380	2,263	1,984	2,308	2,613	3,050	2,996	2,701	2,345	1,879	2,320	29,143
(B)	太陽光発電量	19	15	13	11	11	8	9	11	10	12	14	17	150
	太陽熱出力	645	622	627	548	412	291	361	423	303	376	418	602	5,628
	太陽エネルギー合計	664	637	640	559	423	299	370	434	313	388	432	619	5,778
太陽エネルギー利用率(B)/(A)		31%	29%	31%	31%	20%	12%	13%	15%	12%	18%	25%	29%	21%
(B')	CGS発電量	138	129	138	133	138	133	138	138	133	138	133	138	1,627
	CGS排熱量	75	70	75	72	60	58	60	60	58	60	72	75	795
太陽光発電+太陽熱+CGS発電+CGS排熱		877	836	853	764	621	490	568	632	504	586	637	832	8,200
(C)	増設太陽光発電	1,849kW(設置容量)		14,080㎡(パネル本体面積)										
	太陽光発電量	1,585	1,622	1,811	1,898	1,884	1,605	1,915	2,209	1,556	1,532	1,348	1,448	20,413
	増設太陽熱集熱器	1,111㎡(設置容量)												
(B)	太陽熱出力	117	113	114	100	75	53	66	77	55	69	76	107	1,022
+	太陽エネルギー合計収支(B)+(C)	2,366	2,372	2,565	2,557	2,382	1,957	2,351	2,720	1,924	1,989	1,856	2,174	27,213
	太陽光発電量	1,604	1,637	1,824	1,909	1,895	1,613	1,924	2,220	1,566	1,544	1,362	1,465	20,563
(C)	太陽熱出力	762	735	741	648	487	344	427	500	358	445	494	709	6,650
太陽エネルギー利用率((B)+(C))/(A)		111%	107%	122%	140%	111%	80%	81%	96%	76%	91%	108%	101%	100%
増設含太陽エネルギー+CGS発電・排熱		2,579	2,571	2,778	2,762	2,580	2,148	2,549	2,918	2,115	2,187	2,061	2,387	29,635
太陽熱出力およびCGS排熱量は、排熱利用機器COPを考慮して、5~10月は排熱COP=0.8、11月~4月は排熱COP=1.0とした														

6.3 地域冷暖房プラントの高効率化の検討

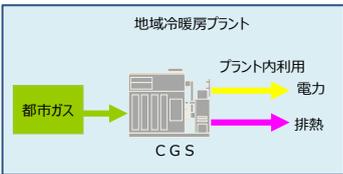
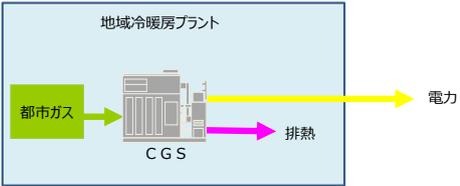
地域冷暖房システムのシミュレーションを行う場合は、熱源システムをはじめとする実際の設備機器それぞれの機器特性データを用いて検討する必要がある。実際の設備機器のラインナップは連続的でなく、性能も単純な定式化は困難なケースが多く、プラント全体で無次元化した一般解や相似則による方法を求めようとすると、現実との差が大きくなる可能性が高い。そのため、現実の機器や負荷状況に即した形でシミュレーションすることが求められる。そのような場合には、第4章で開発したツールが非常に有用となる。想定する実際の機器の性能や運転状況を入力することにより、エネルギー消費量を妥当な精度で求めることができ、機器容量・運転条件をはじめとする様々なパラメータの中から最適な条件を求めることができるためである。また、熱融通等のインフラ工事を伴う場合には、実際に施工してしまうと修正や変更は容易ではないため、シミュレーションにより事前に十分に検討することが必須である。

ここでは、4.4 で開発したシミュレーションツールを用いて、実在する地域冷暖房システムの高効率化について検証する。現状のシステムに CGS を導入し、併せて高効率な熱源を追加したケースについて、シミュレーションにより消費エネルギー量等を求め検討する。また、CGS で製造された電力・熱を供給される場合の一次エネルギー換算の方法について、CGS の省エネルギー性のひとつである、排熱利用を適切に評価可能な方法について検討する。

6.3.1 熱源システム構成

CGS の設置形態および CGS による電気・排熱の利用先ごとに以下に示す 3 通りのシステムについてエネルギー消費量を計算した。Case 1 は 4.4 で精度検証に用いたシステムであり、基準ケースとする。

表 6.5 検討ケース

ケース	概要
<p>Case 1 : CGS なし, 基準ケース</p>	<p>4.4 で検討したシステム</p>
<p>Case 2 : CGS 導入, プラント給電ケース</p> <p>CGS を導入するとともに, ターボ冷凍機を 1 台追加したシステム。CGS は 8 時~18 時の運転とするが, 発電負荷率 50%未満の場合は運転を停止する。系統への逆潮流は行わない。</p> <p>供給範囲: 需要家 A~D への熱供給</p>	
<p>Case 3 : CGS 導入, 逆潮流ケース</p> <p>Case 2 と同一のシステムであるが, CGS 運転を 8 時~22 時とし, 排熱利用の温熱負荷が 50%以上ある限り運転を継続し, 余剰電力は系統へ逆潮流する。</p> <p>供給範囲: 需要家 A~D への熱供給および余剰電力を系統へ逆潮流</p>	
<p>Case 4 : ビルに CGS 導入, 排熱融通ケース</p> <p>需要家 A に CGS を導入し, ビルへ電力を供給するとともに排熱をプラントに融通する。CGS 運転を 8 時~22 時とし, 発電負荷率 50%未満の場合は運転を停止する。系統への逆潮流は行わない。CGS の設置台数を以下の 2 通りとする。</p> <p>Case 4-① : CGS 1 台</p> <p>Case 4-② : CGS 3 台</p> <p>供給範囲: 需要家 A~D への熱供給および需要家 A への電力供給</p>	

Case2~4のシステム構成を表6.6に、システムフローを図6.7および図6.8に示す。全てのケースにおいて、CGSの導入に加えて高効率熱源機の導入も行っている。Case3に示すような余剰電力分を系統に逆潮流するケースは現時点では多くないが、電力市場・ネガワット市場の開設により今後増加する可能性が期待される。

Case4では、CGSを設置したビルに大きな電力需要があるため、大型の、より高効率なCGSを設置して更なる省エネルギー・高効率化が可能であるが、今回は比較のために他のケースと同じ性能のCGSを1台(Case4-①)もしくは3台(Case4-②)設置することとし、それ以外は他のケースと同一のシステムとした。

表 6.6 Case2~4の熱源システム構成

	仕様概要	合計容量	設置数
		コージェネレーション	370kW
温熱源	蒸気ボイラ	16,790kW	5
	ボイラ給水ポンプ	26kW	5
冷熱源	電動ターボ	3,520kW (1,000RT)	2
	ジェネリンク	4,224kW (1,200RT)	1
	二重効用吸収式	5,632kW (1,600RT)	3
	冷却塔	43.1GJ/h	4
	冷水循環ポンプ	207kW	4
	冷却水循環ポンプ	270kW	4

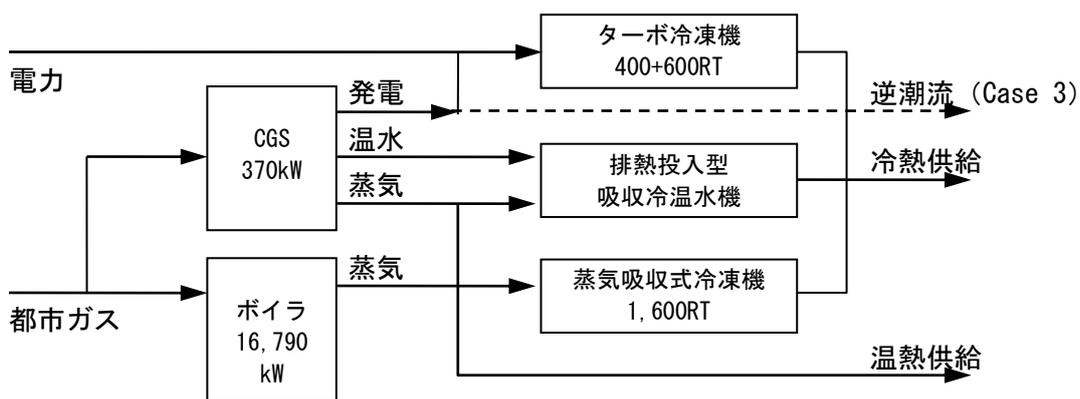


図 6.7 Case 2,3のシステムフロー

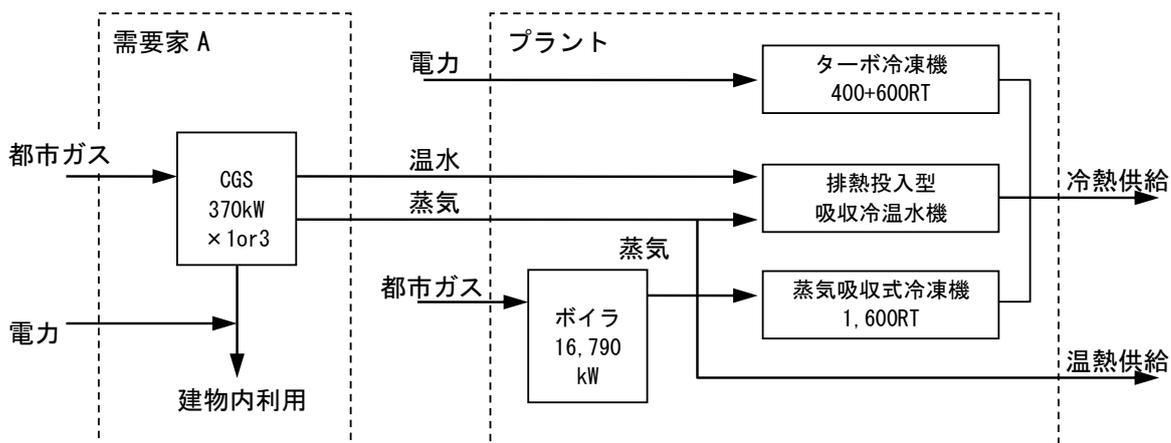


図 6.8 Case 4-①, ②のシステムフロー

6.3.2 計算条件

(1) 需要家 A の電力負荷

シミュレーションを行うにあたり、Case 4-①および②では需要家 A の電力負荷の入力が必要となるため、第3章で作成した事務所ビルの標準負荷を使用した。作成した標準電力負荷は、各月の平日・土曜日・日祝日代表日における24時間分のデータであることから、第4章の計算ケースと比較するために2009年度の暦に合わせて月代表日データを365日の24時間データに展開した。各月代表日の単位床面積当たりの電力負荷を図6.9に示す。事務所ビルである需要家 A の電力負荷は年間を通じて概ね同様である。

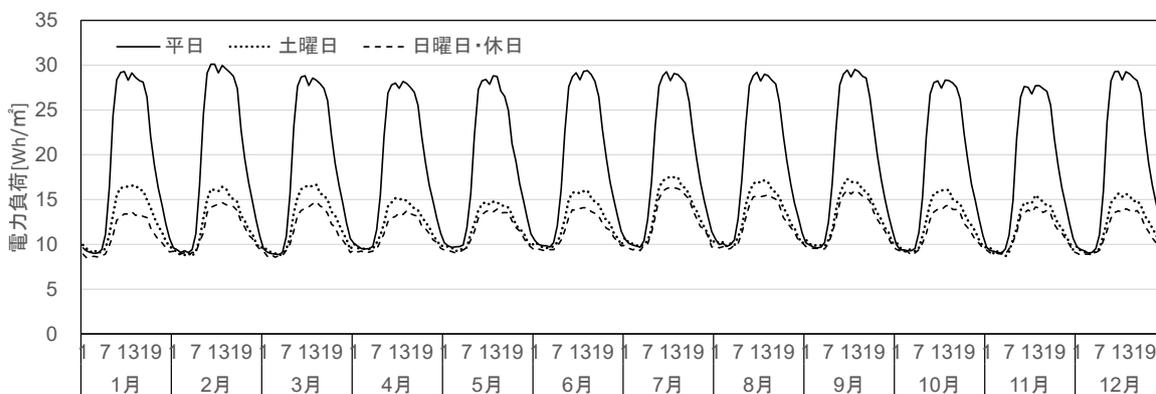


図 6.9 需要家 A の月代表日単位床面積当たりの電力負荷

(2) 計算条件

計算に際して、計算条件は以下の通りとした。

- ・ 各設備機器の冷房時の運転順位は表 6.7 の通りとした。
- ・ 実運用の状況を考慮し、CGS の稼働スケジュール時間帯においては、負荷減少等の理由により CGS 運転を停止しても、稼働時の運転順位で運転することとした。
- ・ 運転順位上位から、需要が定格を超えると次の機器と負荷を均等に分割するものとした。

- ・ CGS はスケジュール運転 (Case2 : 8時-18時, Case3,4 : 8時-22時) とするが, 発電負荷率・排熱負荷率のどちらかが 50%未満の場合は運転を停止する。
- ・ Case3 は排熱利用量に応じた運転を行い, 余剰電力分は逆潮流する。他のケースでは逆潮流は行わない。
- ・ その他の計算条件は, 4.4.2 と同様とした。

表 6.7 運転順位

CGS 稼働時	① 排熱投入型 吸収冷温水機	② ターボ冷凍機	③ 蒸気吸収式冷凍機
CGS 非稼働時	① ターボ冷凍機	② 排熱投入型 吸収冷温水機	③ 蒸気吸収式冷凍機

6.3.3 計算結果

(1) CGS 運転状況

各計算ケースにおける, 夏期, 中間期, 冬期における平日および土曜日の発電量, 電力負荷および受電量の関係を図 6.10~図 6.13 に示す。夏期平日は, 電力負荷が最大値である 7月30日とした。

Case 2,3 の電力負荷はプラントの負荷であり, Case 4-①②は需要家 A の建物の負荷である。

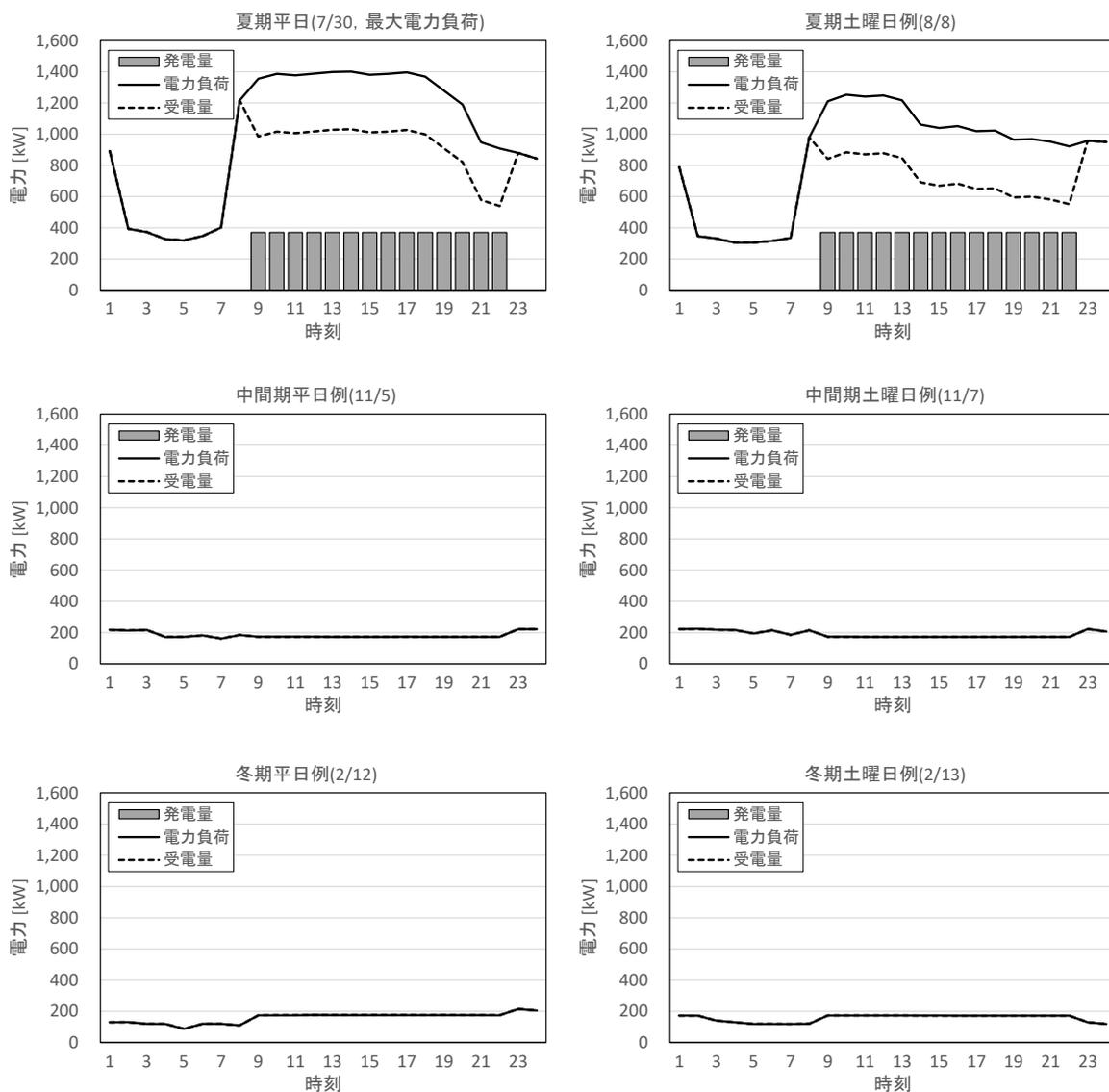


図 6.10 Case 2 : 夏期, 中間期, 冬季における 1 日の電力の状況

Case 2 では、冬期はボイラもしくは CGS 排熱で温熱負荷を賄うため、暖房期における電力負荷は非常に低く、夏期以外は電力負荷が大きくないため CGS が稼働していない。夏期においては稼働スケジュール時間において定格運転である。

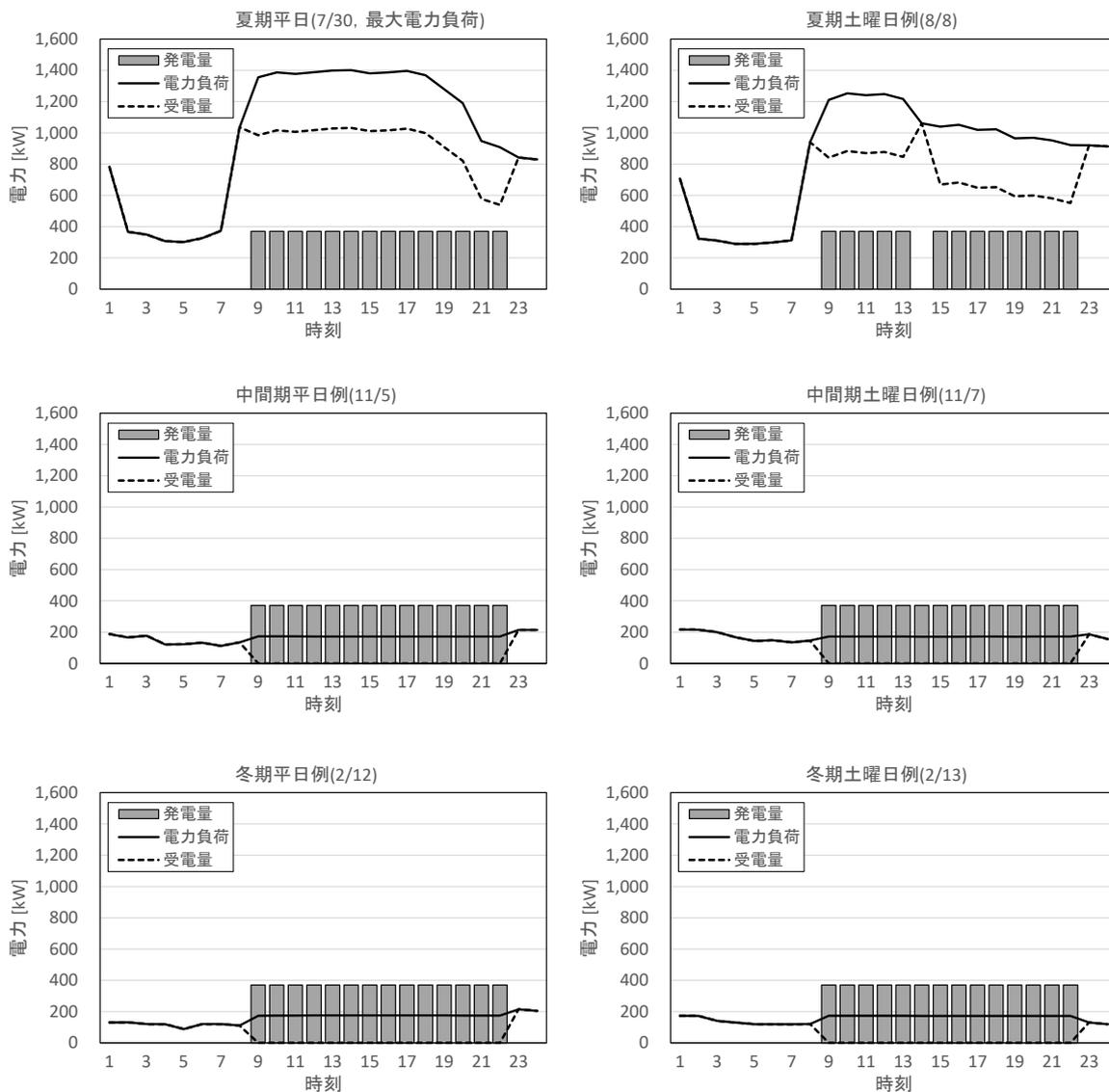


図 6.11 Case 3 : 夏期, 中間期, 冬季における 1 日の電力の状況

Case 3 では、余剰電力分を逆潮流するため、CGS は年間を通してほぼ定格運転である。本計算では、最低受電量を設定していないため、中間期・冬季における CGS 運転中の受電量はゼロである。本プラントは、冬期は CGS 排熱とボイラにより蒸気および温水を供給するシステムであることから、電力負荷はポンプ等がメインとなり、稼働時間中はほぼ一定の値となる。

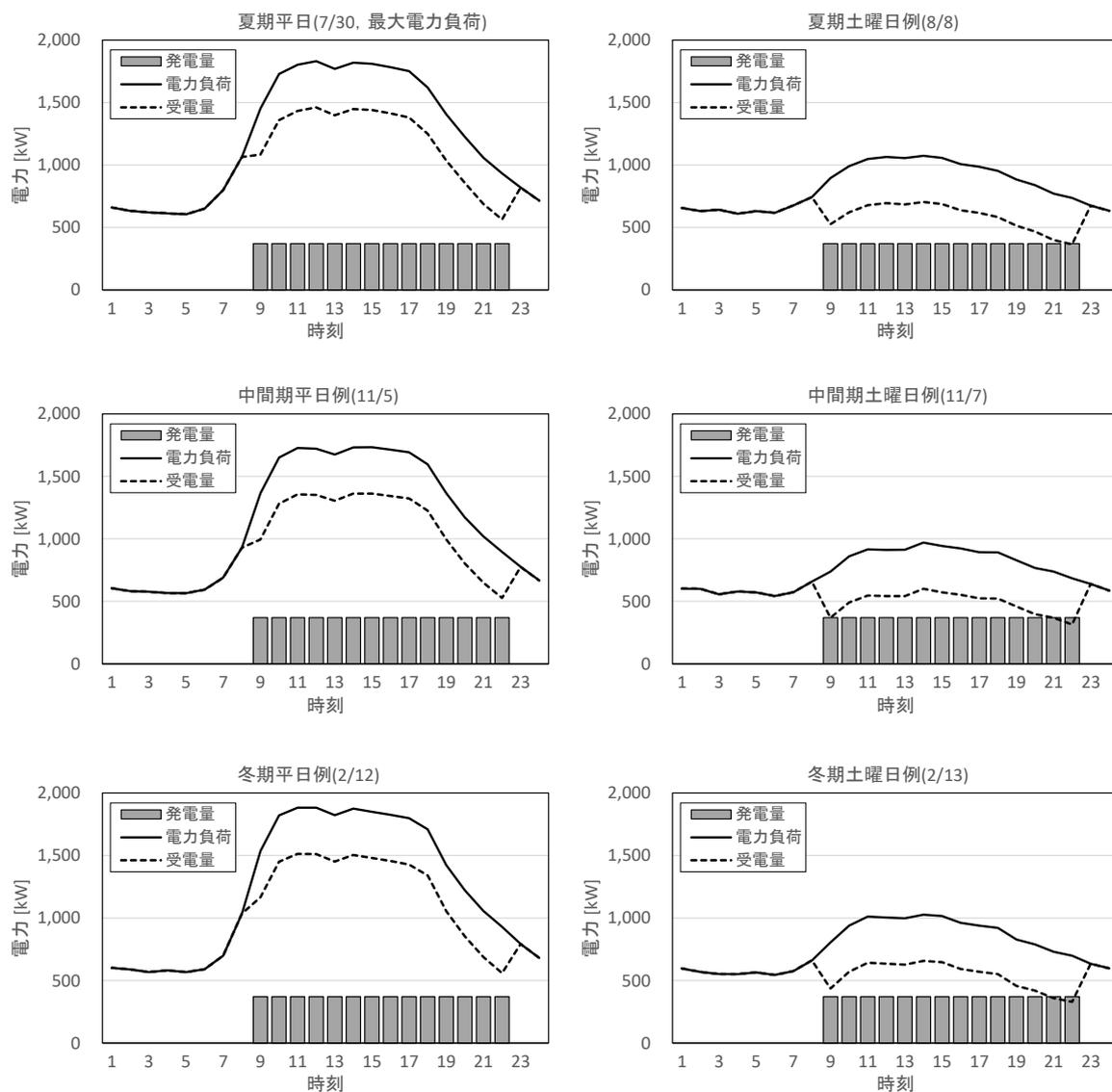


図 6.12 Case 4-① : 夏期, 中間期, 冬季における 1 日の電力の状況

Case 4-①では, CGS は需要家 A の建物に設置され, 発電電力は建物に供給されるため, 図では需要家 A の建物における電力状況を示している. 建物 A の電力負荷は平日と土曜日で大きな違いが現れている. 建物の電力負荷に比べて CGS の発電出力が小さいため, 土曜日においても発電量は電力負荷を超えることはなく, 定格運転である.

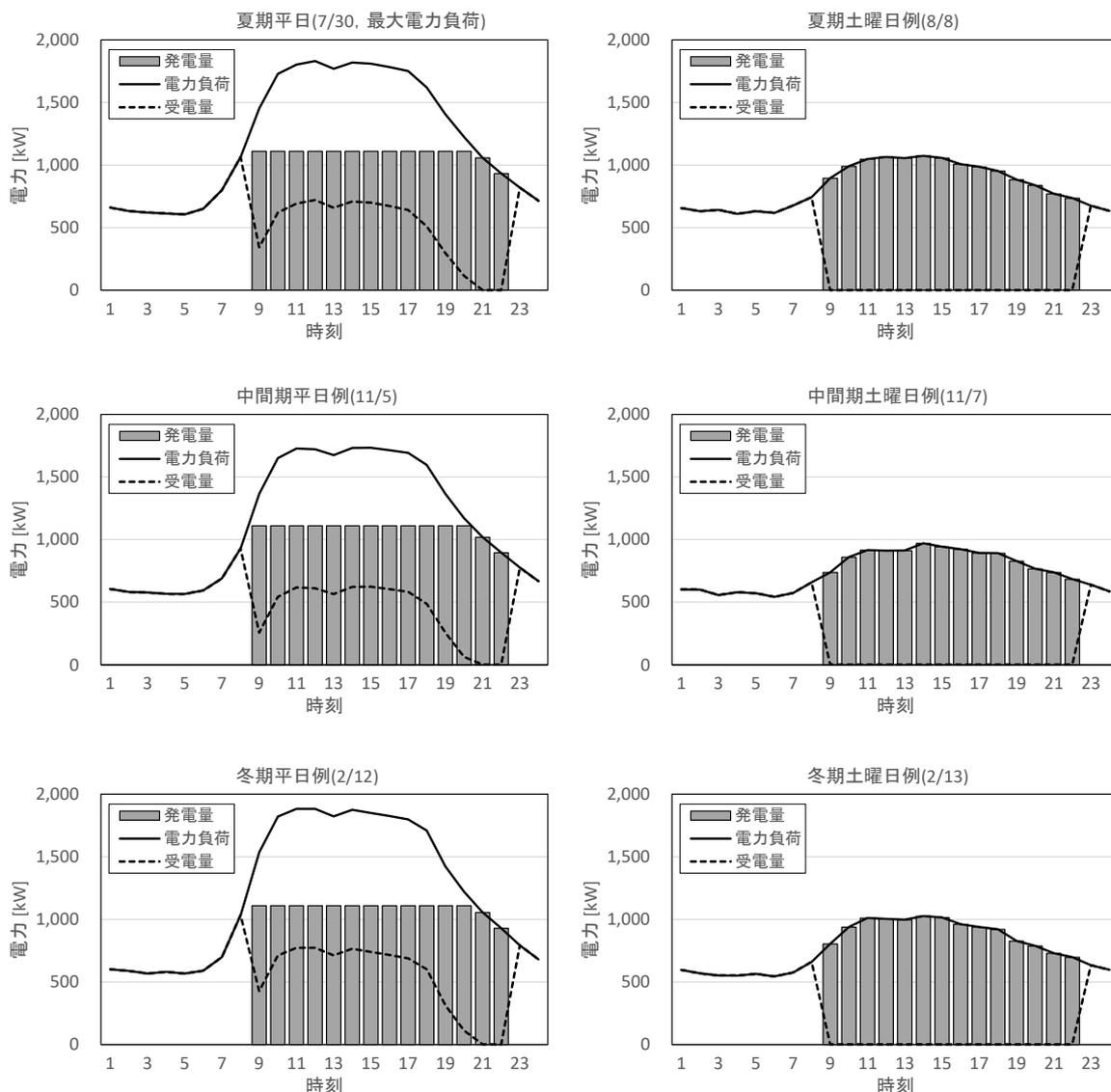


図 6.13 Case 4-②：夏期，中間期，冬季における 1 日の電力の状況

Case 4-②では，3 台の CGS により建物の電力負荷に見合った発電出力となる．土曜日および平日の夜間時間帯では，負荷に合わせて発電量を制御していることがわかる．

(2) エネルギー消費特性

表 6.5 に示した通り，それぞれの計算ケースにおいて供給範囲が異なるため，エネルギー消費について比較する際には，それぞれの計算ケースで評価する範囲を合致させるか，個別に評価する必要がある．ここでは，まず供給範囲の一致する Case 1～3 のエネルギー消費量について検討する．

図 6.14 に Case 1～3 での各機器における各月の一次エネルギー消費量（補機分を含む）を示す．発電量をマイナス側に示しているが，実際の購入電力量は一次エネルギー消費量から発電量

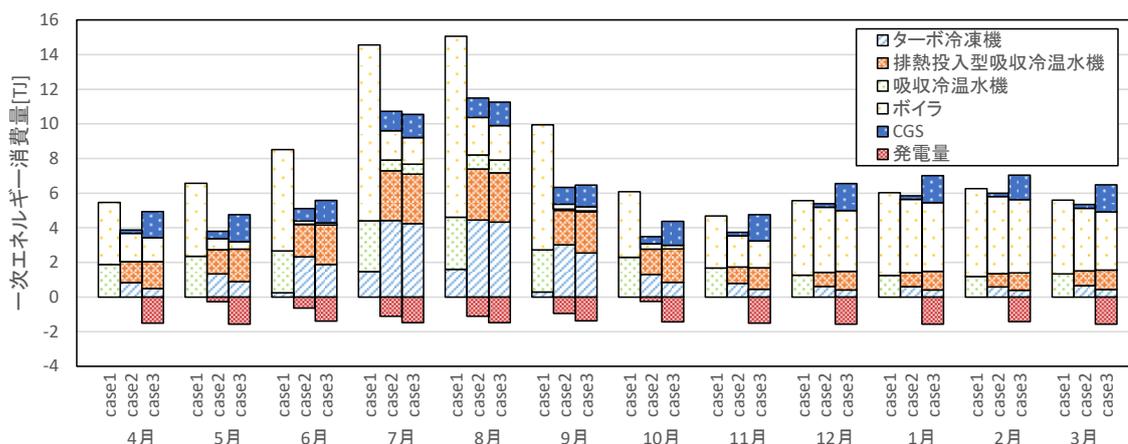


図 6.14 各機器の一次エネルギー消費量(補機を含む)

を一次エネルギー換算した値を差し引いた値となる。図で示している値は、冷却塔やポンプ等の補機によるエネルギー消費量を含んでいる。例えば「吸収冷温水機」には、熱源機で使用したガス量・電力量、二次側循環ポンプおよび冷却水ポンプ電力量、冷却塔電力量が含まれている。

Case 1 と比較して、Case 2,3 では夏季のボイラ駆動による蒸気吸収冷温水機の稼働が少なくなり、その分を CGS 排熱と発電によるターボ冷凍機が稼働するため、一次エネルギー消費量が大幅に削減されている。Case 2 では、電力および排熱の需要に応じた CGS 運転となるが、中間期から冬季ではプラント内での電力負荷が大きくないため、十分に稼働しているとは言い難い状況である。一方、Case 3 では CGS はほぼスケジュール通りに稼働し、余剰電力を系統に逆潮流している。CGS の稼働時間に応じて排熱を利用する排熱投入型吸収冷温水機の使用時間が伸び、ターボ冷凍機の稼働が減少している。

年間の一次エネルギー消費量および CO₂ 排出量を表 6.8 に示す。先述の通り、供給範囲を合致させるために、全てのケースにおいて地域冷暖房プラントおよび需要家 A の電力を供給範囲として表を作成した。また、Case 3 においては、系統へ逆潮流した電力量に 9.76MJ/kWh を乗じて一次エネルギー換算した値を全体の一次エネルギー消費量から差し引いている。

CO₂ の算出に当たっては、式(6.1)に示すように、プラントにおける全電力使用量に 2009 年度の電力調整後 CO₂ 排出原単位 0.324kg-CO₂/kWh⁶⁰⁾ を乗じた値から、系統電力削減分として CGS 発電量にマージナル係数 0.69 kg-CO₂/kWh を乗じた値を差し引いている。

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 排出量} &= (\text{購入電力量} + \text{CGS 発電量}) \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位(全電力平均)} \\ &\quad - \text{CGS 発電量} \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位(マージナル係数)} + \text{ガス使用量} \times \text{CO}_2 \text{ 排出原単位} \end{aligned} \quad (6.1)$$

CGS が発電することにより系統から購入する電力量は削減されるが、その際、削減される電力は需要変動に対応するための火力発電所により発電される電力であるため、削減分の計算には火力発電所の排出原単位であるマージナル係数を使用する必要がある。

表 6.8 年間一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量（範囲はプラントと需要家 A の電力使用量）

		CGS台数	購入電力 [MWh]		発電量 [MWh]	逆潮流 [MWh]	ガス [千m ³]	一次エネルギー		CO ₂ 排出量	
			昼間	夜間				[GJ]	削減率	[GJ]	削減率
Case 1	プラント	0	2,035	849	-	0	1,473	184,716	-	7,170	-
	需要家A	0	7,123	2,073	-	0	0				
Case 2	プラント	1	1,741	822	447	0	928	156,993	15.0%	5,552	22.6%
	需要家A	0	7,123	2,073	-	0	0				
Case 3	プラント	1	895	762	1,834	707	1,149	151,077	18.2%	4,304	40.0%
	需要家A	0	7,123	2,073	-	0	0				
Case4-①	プラント	0	2,057	762	-	0	775	152,236	17.6%	4,591	36.0%
	需要家A	1	5,233	2,073	1,891	0	409				
Case4-②	プラント	0	2,054	762	-	0	618	144,927	21.5%	2,502	65.1%
	需要家A	3	1,933	2,073	5,191	0	1,134				

Case 2 では、需要家 A の電力使用量と合計した一次エネルギー消費量は 15%削減となっている。

Case 3 は、プラントの熱需要に合わせて CGS を運転し、余剰電力分を系統に逆潮流、逆潮流電力分に 9.76MJ/kWh を乗じて一次エネルギー消費量から差し引くため、一次エネルギー消費量は大きく削減され、需要家 A の電力と合わせると 18.2%の削減となる。

Case 4-①は、構成する機器は Case 2 と同一であるが、CGS を需要家 A に設置し、需要家 A に電力供給しつつ排熱をプラントに供給するため、CGS の稼働率が向上し、Case 2 よりも一次エネルギー削減量が大きくなり、削減率は 17.6%である。Case 4-②では CGS 台数が増えることによりその効果が大きくなり、21.5%の削減率である。本計算では、比較のために同一性能の CGS を複数台用いる想定としたが、実際に CGS を選択する際にはより高効率な大型の CGS を選択すると考えられ、削減量は更に増加するものと考えられる。

CGS 導入による CO₂ 排出量の削減効果は非常に大きく、Case 2 で 22.6%、Case 4-②では 65% を超える削減量である。

6.3.4 プラントの評価手法

(1) CGS の熱融通を含むシステムの評価方法

前節 6.3.3(2)では、比較のため、需要家 A の電力消費量も含めて一次エネルギー消費量を算出し各ケースでエネルギー供給範囲を合致させて比較したが、本節ではプラント単体の評価を行う手法について検証する。

プラントにおけるエネルギー効率を評価する際には、プラントで製造した熱量を、プラントにおけるエネルギー消費量(購入量)を一次エネルギー換算した値で除する必要があるが、Case4-①、②ではプラント外に設置された CGS の排熱を購入しているため、購入熱の一次エネルギー換算のために、CGS から供給される排熱分のエネルギー使用量を算出する必要がある。

CGS のエネルギー使用量を電力分と排熱分に配分する方法については、空気調和・衛生工学会

の地域冷暖房計画技術検討小委員会の報告⁶¹⁾および村上ら⁶²⁾により、図 6.15 に示すような4通りの方法が提示されている。なお、文献⁶¹⁾⁶²⁾では代替ボイラの効率に0.8を用いているが、本研究では、省エネ法の定期報告書記入要領⁶³⁾で示されている値($1/1.36 \approx 73.5\%$)を用いる。

以下に4通りの配分方法について述べる。100の入力に対して、電気30.0、熱35.0の出力となるCGSを想定する場合、入力の配分は以下に示す①～④が考えられる。

① 配分法 A1：CGS 出力基準按分法

CGS が出力した有効発電量(二次エネルギー換算)と有効排熱回収量の比率を基準に、CGS 入力一次エネルギー量を按分する方法である。つまり CGS の有効発電効率と有効排熱回収率の比率で配分することになる。

この方法は、省エネルギー効果に対する電力利用と排熱利用の寄与率が各出力量の大きさに相応するという考え方であるが、電気と熱の価値を等価としており、電気利用と排熱利用の省エネルギー効果の反映という点で矛盾(排熱利用が省エネルギーとならない)が生じ、適切ではない。

② 配分法 A2：代替発電・排熱システム入力基準按分法

CGS の代替システムとして、発電電力は代替発電所(例：商用電力)を、回収排熱はボイラを設定する。そして、有効発電量と有効排熱回収量をそれら代替システムで出力する場合の入力一次エネルギー量を算出した後、両者の比率を基準に、CGS 入力一次エネルギー量を按分する方法である。

この方法は、省エネルギー効果に対する電力利用と排熱利用の寄与率取得価値(代替システムへの各入力量の大きさ)に相応するという考え方である。

③ 配分法 B1：代替発電システム入力差引法

CGS が出力した有効発電量を代替発電所(例：商用電力)で代替した場合の一次エネルギー量を“発電相当分”とし、CGS 入力一次エネルギー量から、それを差し引いたものを“排熱相当分”とする配分法である。ただし、CGS の有効発電効率が代替発電所の受電端効率を超える場合は、差し引きがマイナスの値となる。この場合は、CGS 入力一次エネルギー量のすべてが“発電相当分”となり、“排熱相当分”はゼロとなる。

この方法は、CGS 全体を発電主体のシステムと捉え、排熱を発電に付随して得られるエネルギーとしてとらえている。そのため、発電部分に省エネルギー効果は発生せず、排熱部分で省エネ効果がもたらされることとなる。省エネルギー法においても、系統電力の一次エネルギー換算係数は一定であることから、省エネルギー法に合致する考え方である。地域冷暖房プラントが原則として熱供給のエネルギー効率で評価されることを考慮すると、地域冷暖房プラントの評価としては本手法が適切である。

④ 配分法 B2：代替排熱システム入力差引法

CGS の有効排熱回収量(排熱利用量)をボイラで代替した場合の一次エネルギー量を“排熱相当分”とし、CGS 入力一次エネルギー量から、それを差し引いたものを“発電相当分”とする配分法である。

この方法は、CGS 全体を熱生産主体のシステムと捉え、電力を熱生産に付随して得られるエネルギーとしてとらえていることになるが、現実としてそのようなシステムは想定し難く、合理的な方法とは言えない。

なお、ここでは100の入力に対して電気30.0、熱35.0の出力を想定したが、実際の評価においては電気・熱の実際の出力(実績値)を用いることになる。

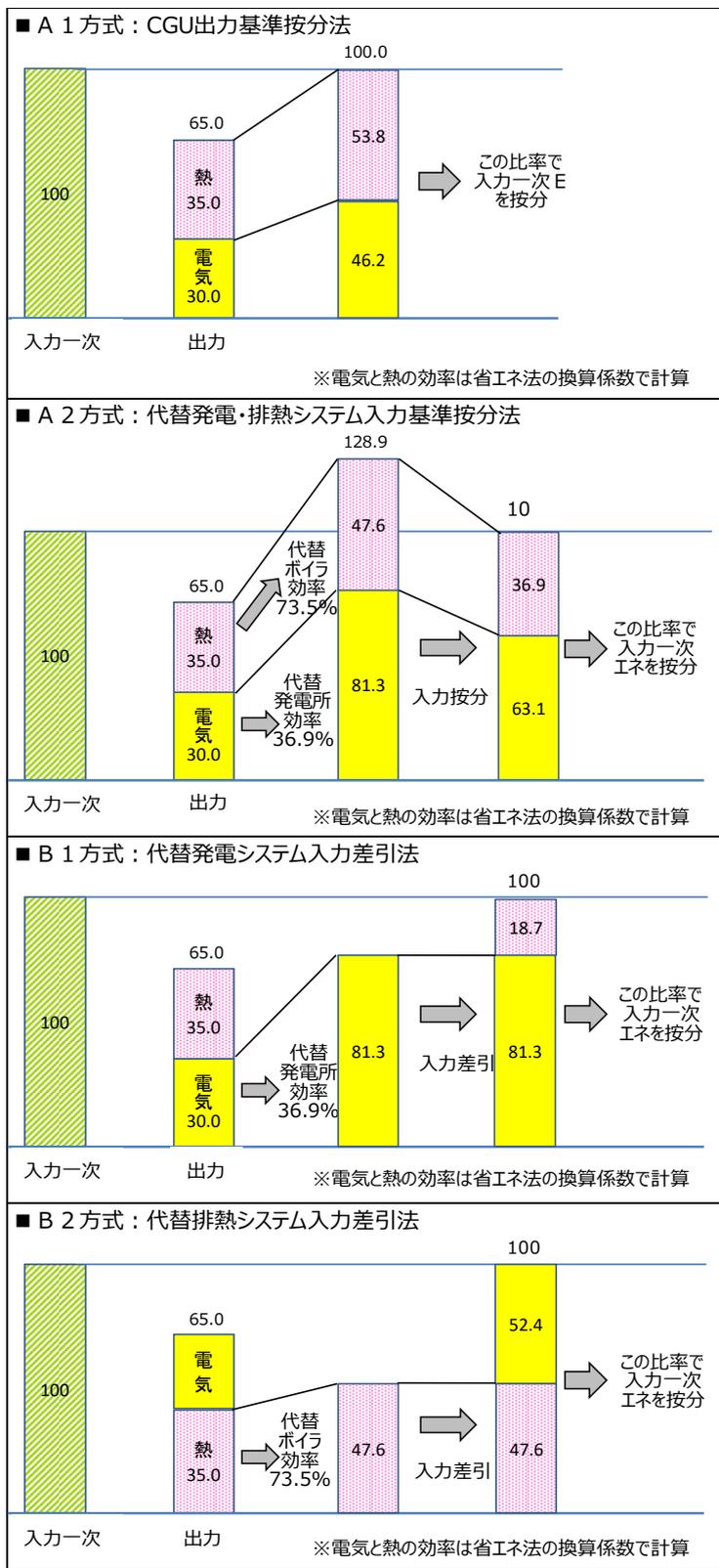


図 6.15 CGS 入力を排熱用と発電用に配分する方法

ここでは、図 6.15 に示した方法から、実際に適用されることが想定される「A2：代替発電・排熱システム入力基準按分法」と「B1：代替発電システム入力差引法」について検討する。

CGS におけるエネルギー消費量を、A2 法と B1 法を用いて発電分と排熱分に配分し、それぞれの入力値と出力値から一次エネルギー換算係数を求めた結果を表 6.9 に示す。

表 6.9 配分法による入力配分値と換算係数

	一次エネルギー消費量 [GJ]	発電量 [MWh]	排熱利用量 [GJ]	代替入力値 [GJ]		入力配分値				換算係数			
				発電分	排熱分	A2:按分法[GJ]		B1:差引法[GJ]		A2:按分法		B1:差引法	
						発電分	排熱分	発電分	排熱分	発電分	排熱分	発電分	排熱分
Case 4-①	18,387	1,891	1,473	18,453	2,004	16,586	1,801	18,453	0	8.77	1.22	9.76	0.00
Case 4-②	51,042	5,191	3,832	50,660	5,212	46,280	4,761	50,660	382	8.92	1.24	9.76	0.10

先に述べた通り、A2 方式(代替発電・排熱システム基準按分法)は入力値を電力・熱の一次エネルギー出力に比例配分し、B1 方式(代替発電システム入力差引法)は入力を発電に配分した残りを排熱分とする方法である。

A2 方式(代替発電・排熱システム基準按分法)による電気と熱の配分から計算した発電効率はそれぞれ Case 4-①が 41.0%、Case 4-②が 40.4%となり、計算に用いた CGS の定格発電効率よりも高く評価されており、換算係数はそれぞれ 8.77MJ/kWh、8.92MJ/kWh となる。この方式では、CGS による省エネ効果を発電分と排熱分に按分していることがわかる。一方で省エネ法では、系統に接続された発電装置による電力は 9.76MJ/kWh で一次エネルギー換算されることになっており、省エネ法と矛盾している。そのため、省エネ法に準じて評価すると発電部分の省エネ効果が無視される形となり、結果として CGS 導入による効果が正しく評価されないことになる。

B1 方式(代替発電システム入力差引法)では電力の換算係数は代替発電所(=系統)と同じ 9.76MJ/kWh となり、CGS の省エネ性は排熱分で評価される。実際にも、CGS の省エネ効果は、発電の際に発生した排熱を利用することによりもたらされるものであり、その効果を正しく評価できているのは B1 (代替発電システム入力差引法) であるといえる。

現行の省エネルギー法においては、建物・プラント外との電気のやり取りは基本的に固定された一次エネルギー換算係数を用いることが定められており、省エネルギー分は熱で評価するため、B1 法であれば省エネ法に矛盾しない。また、経済産業省資源エネルギー庁の工場等判断基準検討小委員会において「未利用熱活用制度」⁶⁴⁾が提案され、未利用熱であるガスエンジン排熱を供給された側はエネルギー消費原単位計算において未利用熱分を差し引くことができ、平成 29 年度の省エネ法定期報告より未利用熱を融通する場合はゼロカウントできることになるが、代替発電システム入力差引法は CGS の省エネ分を排熱利用で評価する点においてこの政策とも一致する。

Case 4-①では、電力需要に対して発電量が少なく、熱需要も稼働時間中は安定して存在するため、CGS は概ね定格運転となり、発電効率は系統電力よりも高くなる。したがって、B1 (代替発電システム入力差引法) では、発電のために全てのエネルギーが使われたことになり、排熱分の入力値はゼロとなる。

(2) 計算事例によるプラント評価

プラントにおけるエネルギー消費量およびエネルギー効率を求めた結果を表 6.10 に示す。プラント効率とは、東京都によるエネルギー効率の定義⁶⁵⁾に従い、販売した熱量 (55,656GJ) を、プラントにおける一次エネルギー消費量で除算した値とした。

先述の通り、地域冷暖房プラントは、熱供給のエネルギー効率で評価されるべきであり、B1法 (代替発電システム入力差引法) による評価が適切と考えられる。B1法を用いる場合、本プラントのエネルギー効率は、基準である Case 1 の 0.59 から、CGS 導入等により Case 2 の 0.83 となり、余剰電力を系統に逆潮流する Case 3 では 0.92、需要家 A に CGS を設置し、排熱を融通する Case 4-①で 0.89、CGS 台数を増加させた Case 4-②で 1.00 まで向上する。

一次エネルギー消費の削減割合は、Case 2 が 29.3%、Case 4-②では 41.0%となる。

表 6.10 CGS 入力配分法の違いによるプラント評価

	プラント 電気・ガス分	A2 代替発電・排熱システム入力基準按分				B1 代替発電システム入力差引法			
		融通量	合計	削減率	プラント 効率	融通量	合計	削減率	プラント 効率
		[GJ]	[GJ]	[%]	[-]	[GJ]	[GJ]	[%]	[-]
Case 1	94,460	-	94,460	-	0.59	-	94,460	-	0.59
Case 2	66,737	-	66,737	29.3%	0.83	-	66,737	29.3%	0.83
Case 3	67,717	-6,895	60,821	35.6%	0.92	-6,895	60,821	35.6%	0.92
Case 4-①	62,444	1,827	64,271	32.0%	0.87	0	62,444	33.9%	0.89
Case 4-②	55,380	4,752	60,132	36.3%	0.93	382	55,761	41.0%	1.00

6.4 プラント間で熱融通するスマートエネルギーネットワーク

6.4.1 想定街区

本節では、4.4の検証用実プラントをプラント B とし、プラント B に熱融通するプラント A の熱源容量と効率をパラメータとして表 6.11 に示す 3 通りのシミュレーションを行った。融通のイメージを図 6.16 に示す。

表 6.11 熱融通の計算ケースにおけるプラントAの想定

	供給街区	熱源プラント	負荷
Case X	プラントBと同一	プラントBと同一 (4.4節 Case 1)	プラントBと同一
Case Y	プラントBと同一	CGS導入 (6.3節 Case 2)	プラントBと同一
Case Z	想定街区 (平均規模)	高効率	想定街区の負荷

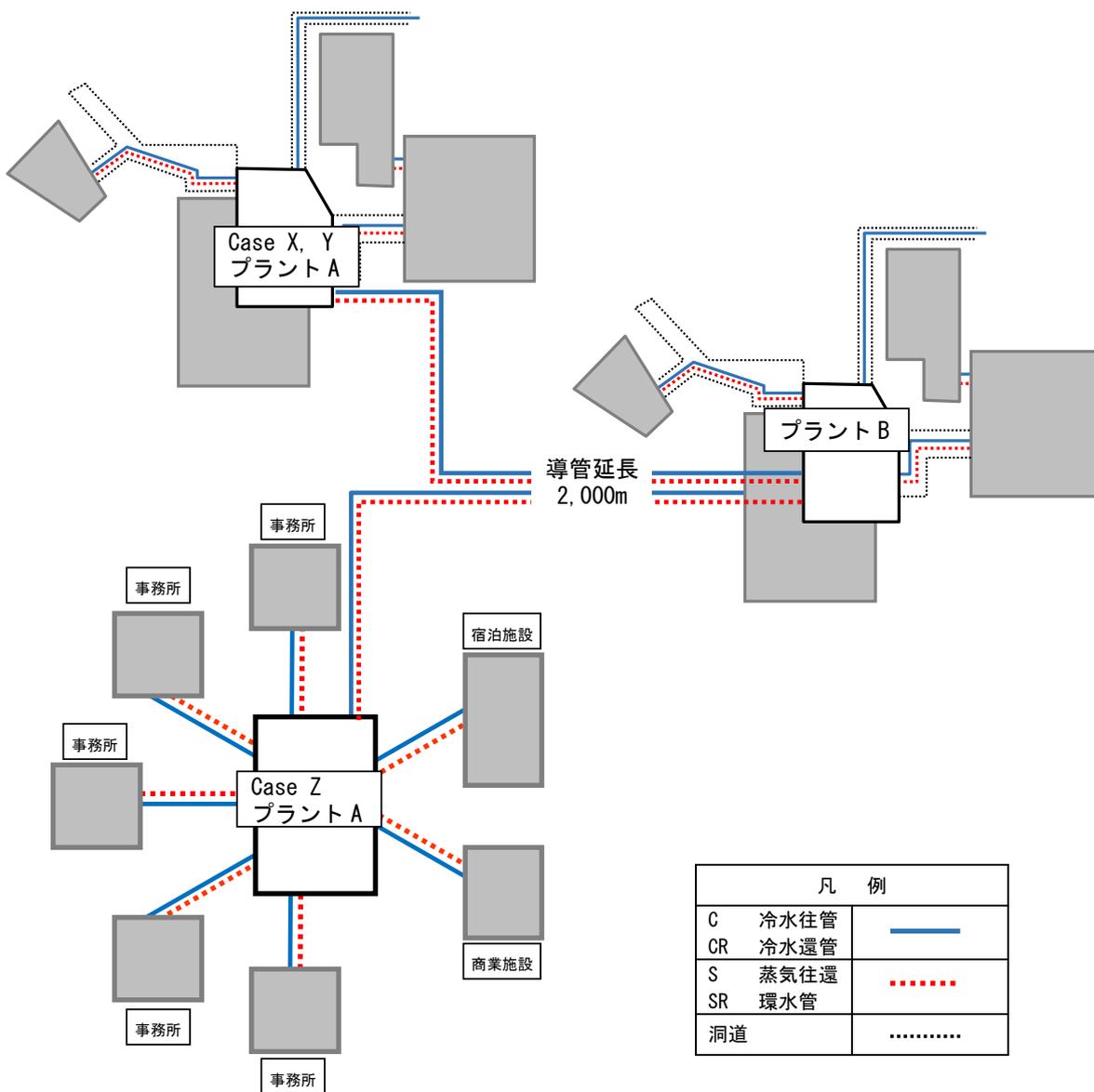


図 6.16 融通のイメージ

(1) プラント B と同一規模の街区 (Case X, Y)

街区規模および負荷は 5.4 と同様とし、プラントの熱源システムは 4.4 で想定した Case 1 (現状モデル) または 6.3 で想定した Case 2 (CGS 導入・高効率) のシステムとする。同規模の熱源容量を有する各プラントの性能により、熱融通の効果に与える影響を検討した。

(2) 地域冷暖の平均的規模の街区 (Case Z)

地域冷暖房の平均的な街区として、DECC データにおける吸収式冷凍機を用いた地域冷暖房冷 125 件の平均熱源機容量 25.5MW (図 6.17) および供給対象の用途別延床面積から、建物用途を事務所 (148,373 m²)、宿泊施設 (38,195 m²)、商業施設 (24,974 m²) とする供給延床面積 211,542 m²の街区を想定した。各用途の建物は、DECC データにおいて地域冷暖房から熱供給を受けている実存の建物から参照して床面積をはじめとする街区モデルを作成した。想定した各建物用途モデルの概要を表 6.12 に、年間の熱需要を図 6.18 および図 6.19 に示す。プラント A の供給対象街区の年間熱需要は、HASP¹⁸⁾により求めた建物用途ごとの時刻別年間熱負荷データを、3.4.6 で DECC データから求めた負荷データで補正したものを用いている。プラント A の供給対象負荷は、プラント B の供給対象負荷に対して冷熱で 2.1 倍、温熱は 3.1 倍程度である。想定プラント A の熱源システムを表 6.13 に示す。

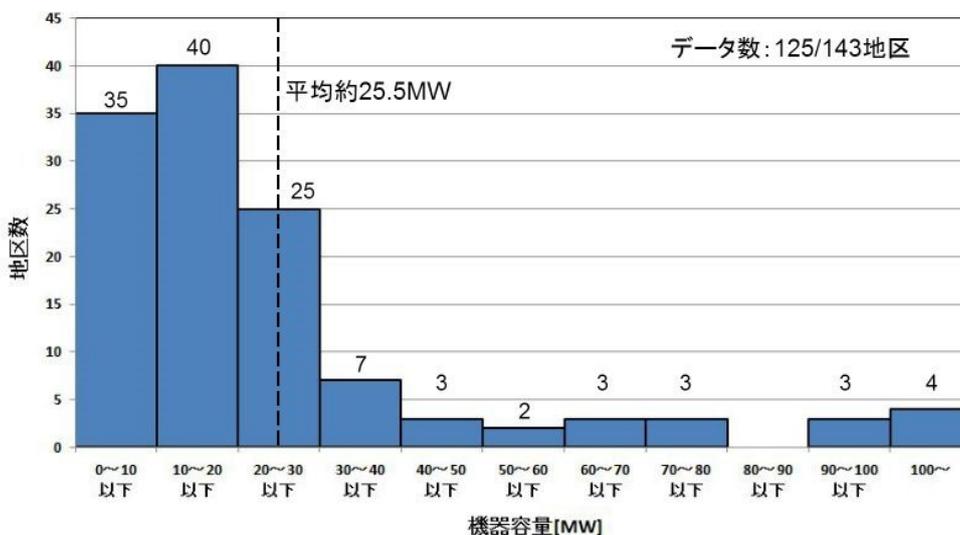


図 6.17 地域冷暖房の冷熱源機器容量 (2002 年 3 月時点)

表 6.12 Case Z における想定街区の建物概要

	事務所	宿泊施設	商業施設
階数	地上 25 階	地上 27 階	地上 9 階
用途	事務所	宿泊施設	商業施設
延床面積 [m ²]	30,375	32,400	50,400
基準階面積 [m ²]	1,215	1,200	5,600
基準階空調面積 [m ²]	942	906	4,000
棟数	5	1	1
合計延床面積 [m ²]	148,373	38,195	24,974

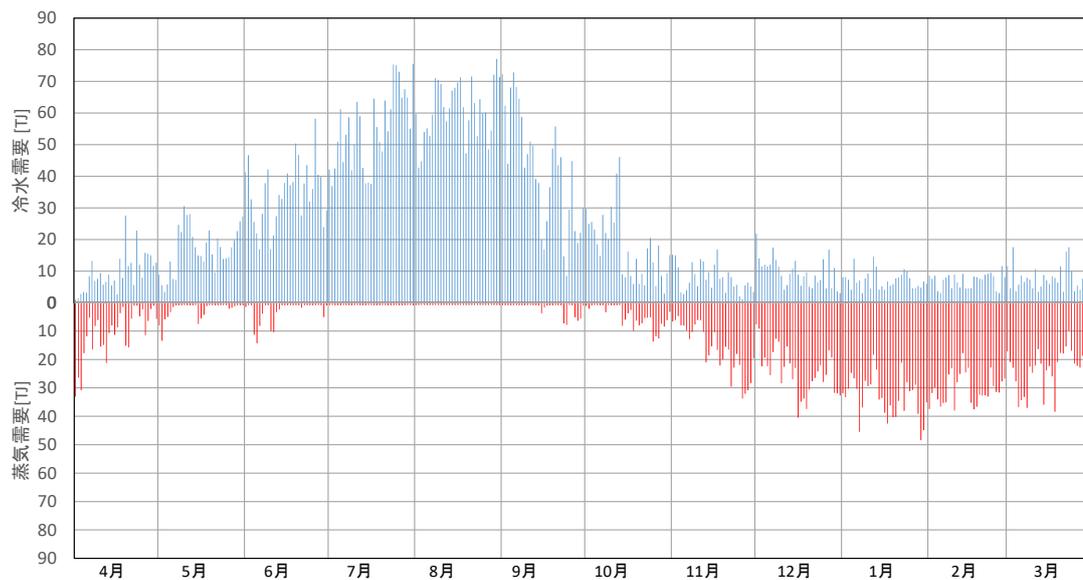


図 6.18 Case Z における想定街区 A の熱需要

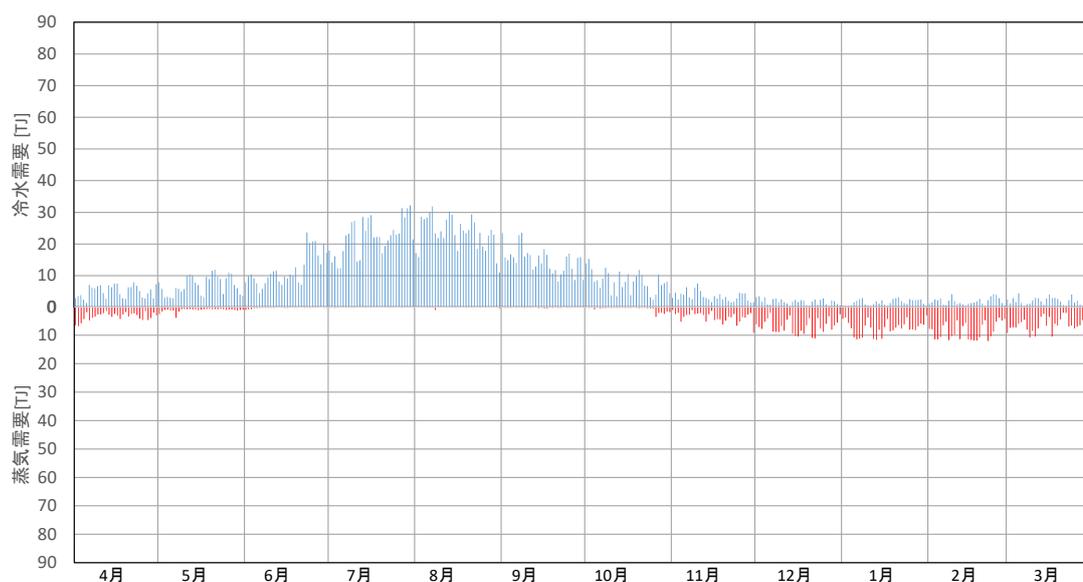


図 6.19 Case X,Y における街区 A および Case Z における街区 B の熱需要

表 6.13 想定プラントの熱源システム

	仕様概要	合計容量	設置数
	温熱源	コージェネレーション	4000kW
蒸気ボイラ		3761kW	6
ボイラ給水ポンプ		26kW	6
冷熱源	電動ターボ	10,971kW	3
	排熱投入型吸収冷温水機	14,628kW	4
	冷却塔	144GJ/h	7
	冷水循環ポンプ	500kW	7
	冷却水循環ポンプ	600kW	7

6.4.2 計算条件

(1) 想定する融通形態

地域冷暖房地域冷暖房間を連携し熱融通を想定する場合、以下をはじめとする多様なケースが考えられる。

- ① 熱媒融通：プラント間で、冷温水・蒸気等の熱媒を融通するケース
- ② 排熱融通：CGSを含むプラントから、排熱を融通するケース
- ③ 熱源集中：片方のプラントに熱源を集中し、一つの地域冷暖房とするケース

本研究では、比較的採用が多いと思われる、プラント間を冷水および蒸気・還水配管で接続し、熱媒を融通する①のケースを想定した。

熱融通の運用方法も様々な想定が可能であるが、本研究ではプラント A をメイン熱源システムとして、ピーク期・時間帯以外の熱源容量に余裕が生じる時間帯にはプラント A からプラント B に熱供給を行う。A 街区および B 街区の負荷合計がプラント A の容量を超える場合は熱融通を中止し、プラント B は独自熱源で運転することとした。これは、AB 間の熱融通を最大にする制御を行っていることになる。

上記は最も簡易な熱融通の運用形態の部類であるが、実プラントにおいても、運転オペレータの習熟度や熱の売買契約等の問題から、初期のスマートエネルギーネットワークにおいてはこのような比較的簡易な運用形態が多くなることが予想される。

(2) その他の計算条件

プラント AB 間の熱融通ポンプは、熱融通を実施している時間のみ 150kW の定格運転とし、電力消費量はプラント A に加算する。融通計算以外は、基本的に前述の 6.3.2 で述べた計算条件で計算を行った。

気象条件は、4.3.4 で述べた通り、AMEDAS データの 1981 年~1995 年までの 15 年の平均値を用いた。

6.5 スマートエネルギーネットワークの効果

6.5.1 一次エネルギー消費量合計値の評価

前節表 6.11 で示した各シミュレーション条件における月毎のプラント B の負荷処理状況を図 6.20 に示す。Case X および Case Y では、夏季を除いてほぼ融通だけで負荷に対応していることがわかる。今回の計算では負荷に対してプラント A の熱源容量に余裕がある限り融通するという融通量最大の制御を行う計算としているが、更なる最適化のためには融通ポンプによる消費エネルギーと比較しながら最適制御を行う計算を取り入れる必要がある。

Case Z における夏季平日(8月18日)のプラント A および B の熱負荷処理状況を図 6.21 に示す。プラント A の熱源容量の範囲内においてプラント B への熱融通が行われている。融通によりプラント B では夜間等の低負荷運転がなくなり、日中の比較的高負荷な運転のみとなる。

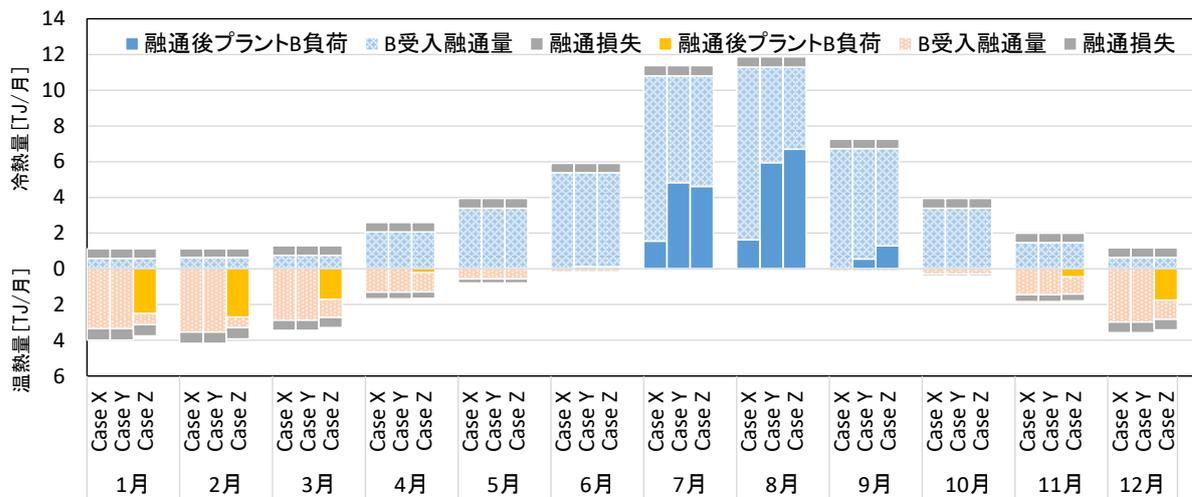


図 6.20 プラント B の月別熱負荷処理状況の計算結果

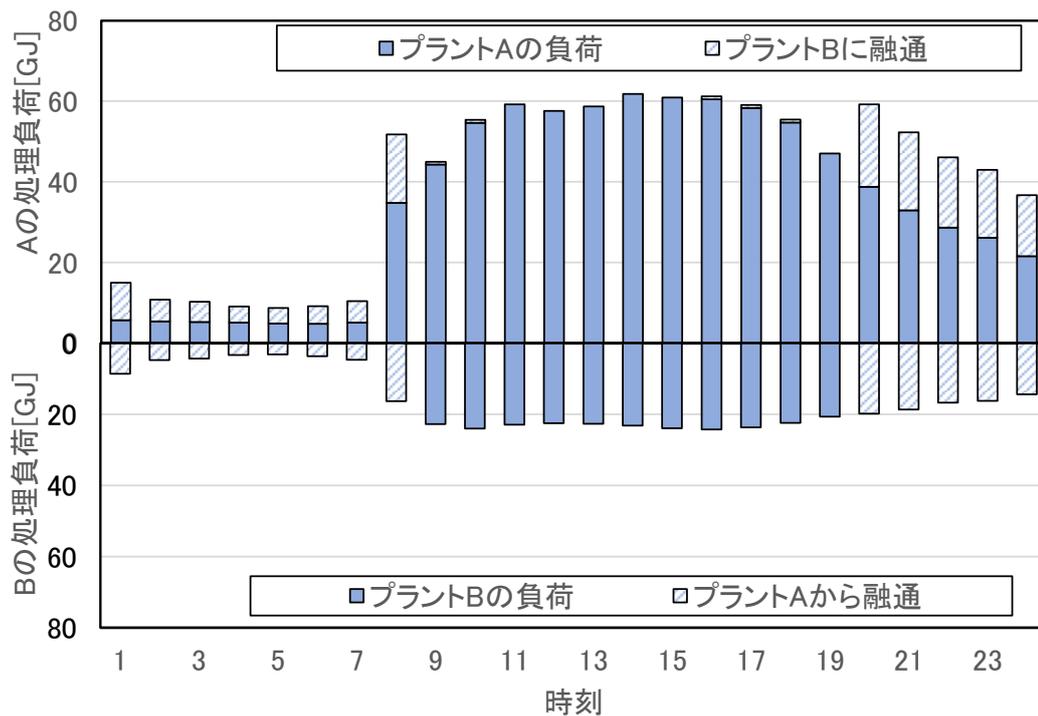


図 6.21 夏季平日（8月18日）の時刻別熱融通状況の計算結果

Case Z のプラント A におけるターボ冷凍機および排熱投入型吸収冷温水機の月別平均 COP 定格比を図 6.22 に示す。ターボ冷凍機では、負荷率が低い領域で COP 低下が著しいが、本ケースでは熱融通により特に中間期の負荷率が上昇し低負荷運転が減少したために平均 COP が大幅に向上している様子が見て取れる。また、プラント A の熱源機負荷率が上昇することにより、プラント内の電力需要も増大し、結果として CGS の運転時間が 2 台の合計で 412 時間増加し、排熱利用量が 12%増加したこともエネルギー消費量削減の要因である。

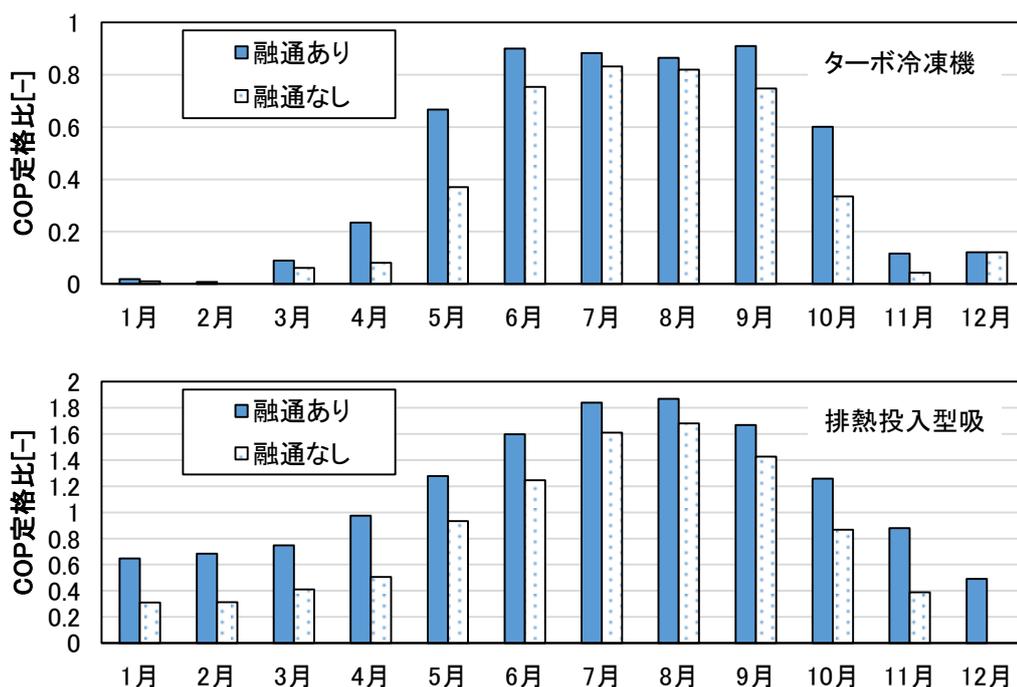


図 6.22 融通の有無による月平均 COP 定格比

表 6.14 に Case Z における熱源機器ごとの一次エネルギー消費量を、融通ありとなしの場合について示す。融通時は高効率なプラント A からプラント B に熱融通され、プラント B では吸収式とボイラの稼働が減少しており、結果としてプラント B の総合効率の向上が認められる。

表 6.14 Case Z における各熱源機器の一次エネルギー消費量 [GJ/年]

	プラントA							プラントB				
	ターボ	排熱投入型吸収冷温水機	ボイラ	CGS	補機類	融通ポンプ	その他	ターボ	吸収式	ボイラ	補機類	その他
融通なし	1,551	44,095	58,305	30,346	3,250	0	16,973	208	9,018	66,290	2,619	16,305
融通あり	2,196	59,959	69,128	41,152	4,201	11,932	20,479	127	1,863	20,778	355	2,489

表 6.15 に、熱融通の有無による一次エネルギー消費量の削減効果を、プラント A,B の一次エネルギー消費量の合計値で示す。

二つの街区・熱源が同一の場合の Case X では、熱融通による負荷集積効果により熱源機の部分負荷運転が減少するメリットよりも、融通によるロスと融通ポンプのエネルギー消費が上回り、エネルギー増加となっている。

プラント A がプラント B よりも高効率な場合では、プラント AB 合計の一次エネルギー使用量は Case Y では 9.2%、Case Z では 5.8%の削減となっている。上述の通り、熱融通により中間期や夜間等の極端な低負荷運転が減少し平均 COP が向上し CGS の運転も増加したこと、およびプラント B の負荷を高効率なプラントからの融通で賄ったことでエネルギー消費が削減されたものである。また、本想定では、Case Y のプラント設備余裕率が高いことから融通量が増加し、結果として Case Z よりも削減量が増大する。

表 6.15 融通計算の結果

	融通	プラントA		プラントB		合計			削減率
		電気 [MWh]	ガス [千m ³]	電気 [MWh]	電気 [MWh]	ガス [千m ³]	電気 [MWh]	一次エネルギー [GJ]	
Case X	なし	2,888	1,476	2,888	1,476	5,777	2,952	189,208	-2.0%
	あり	5,536	3,003	122	55	5,680	3,058	193,054	
Case Y	なし	2,563	930	2,888	1,476	5,451	2,406	161,483	9.2%
	あり	4,456	1,609	1,203	422	5,659	2,031	146,637	
Case Z	なし	2,231	2,950	2,888	1,476	5,119	4,426	249,124	5.8%
	あり	3,979	3,783	495	462	4,474	4,245	234,685	

6.5.2 熱融通による評価

プラント B 単体での一次エネルギー削減量を算出する場合は、プラント B で消費したエネルギー、すなわちガス・電気に加えて、プラント A から供給された冷水および蒸気を一次エネルギー換算する必要があるが、プラント B に供給された蒸気の一部は CGS 排熱と考えられる。6.3.4 に示した通り、CGS 排熱が供給される場合の一次エネルギー換算にはいくつかの手法が提唱されているが、CGS 排熱によるエネルギー消費量の削減効果が適切に評価され、適切と考えられる「B1：代替発電システム入力差引法」⁶⁾を用いて評価する。本手法では、CGS の発電量を代替発電所（商用電力系統）で代替した場合の一次エネルギー量を「電力相当分」として CGS への入力一次エネルギー量から差し引き、残りの入力分を「排熱相当分」とする配分法である。代替発電システム入力差引法においては、本件のように系統よりも CGS の発電効率が高い場合においては、CGS 排熱は一次エネルギー換算係数をゼロとみなすことができる。

表 6.16 に Case Z における融通後のプラント B における一次エネルギー消費量の計算を示す。プラント A 全体では 198,266GJ の一次エネルギー消費に対して 201,265GJ の熱製造であり、換算係数は 0.985 となる。プラント B に供給された排熱蒸気の換算係数をゼロとみなすと、プラント B での一次エネルギー消費量は 64,221GJ であり、プラント A との熱融通によるエネルギー消費量削減効果は 32.1%となる。

表 6.16 Case ZにおけるプラントBの一次エネルギー消費量

	使用量	換算係数	一次エネルギー
冷熱	34,490[GJ]	0.985	33,976
蒸気	4,694[GJ]	0.985	4,624
排熱蒸気	1,986[GJ]	0.000	0
ガス	462[千m ³]	45.00	20,790
電気	495[MWh]	9.76	4,831
合計[GJ]			64,221

6.6 将来的な街区におけるエネルギーシミュレーション

6.6.1 エネルギー負荷減少と ZEB 化の進展

地球環境問題の深刻化による、建物所有者・使用者双方における省エネルギー意識の高まりや、建築物省エネ法⁶⁶⁾をはじめとする建築物のエネルギー消費抑制に向けた政策、また ZEB 化進展に向けた世界的な潮流等より、建物のエネルギー消費量は今後減少していくものと考えられる。また、再開発によりある街区全体に ZEB 化建物が新築される等、エリアのエネルギー消費が劇減することもあり得る。

一般に、熱源機等のエネルギー設備は 15 年～20 年を目安に更新される設計であるが、上記のような理由から設備機器容量と需要側熱負荷のアンバランスな状態になる可能性が想定される。ここでは、このように街区の熱需要が減少した場合の影響を、シミュレーションにより検討する。

6.6.2 将来の需要想定

(1) 2035 年頃の需要想定

「エネルギー基本計画」(2014 年 4 月閣議決定)⁶⁷⁾においては「建築物については、2020 年までに新築公共建築物等で、2030 年までに新築建築物の平均で ZEB を実現することを目指す」とする政策目標が設定されていることから、2035 年頃に新築される建築物が ZEB である状況を想定する。

ZEB の原則はオンサイトの再生可能エネルギー製造量とエネルギー消費量が等しくなる状態であるため、ここでは ZEB の建物は現状の一次エネルギー消費量から 90%削減されることを想定した。

(2) 2025 年頃の需要想定

ZEB 化に至る途中段階(2025 年頃)として、第 5 章で検討した建物単体による先進的技術導入、本章 6.3 で検討した地域冷暖房プラントの高効率化および 6.5 で検討したスマートエネルギーネットワークの普及によるエネルギー消費量削減を考慮する。その際、建物熱源での削減と地域冷暖房による削減は同時には成立しないため、ここでは地域冷暖房への接続率を半分程度と考えた。

隣接する 2 か所の地域冷暖房に接続される街区を考え、50%の建物の二次側で 10%の削減をす

る場合、建物全体のエネルギー消費の4割が空調とすれば街区全体として2%の削減となる。2か所の地域冷暖房の片方で高効率化が図られれば全体で18.5%、スマートエネルギーネットワーク化により10%削減が図られるとすると、街区全体での削減率は26.7%となり、負荷の削減率はエネルギー消費の削減割合と概ね等しいとして表6.17に示す負荷の削減率を想定した。

表 6.17 将来の熱需要削減率の想定

	根拠	削減対象	削減割合	普及率	減少率	想定削減率
2025年頃	第5章	建物単体	二次側で空調の10% (熱源で建物全体の43%削減)	50%	2%	25%
	6.2	地域冷暖房	41%削減	50%	21%	
	6.4	スマートエネルギーネットワーク	該当地域冷暖房プラントの10%削減	100%	10%	
2035年頃	エネ基本計画	新築建築物	ZEB(一次エネルギー消費量90%削減)	50%	45%	50%

6.6.3 負荷減少時のシミュレーション

一般に、負荷とエネルギー消費量の間には高い相関があるが、「比例」にはならない。熱源や搬送設備等には稼働する下限値があり、負荷がある値以下になってもエネルギー消費量は減少しなくなるのが大きな理由のひとつである。特に、熱融通を行う場合は、融通ロスやポンプ等の影響により、負荷の減少がエネルギー消費削減に直接的な関係にならない可能性があるため、本研究で開発したようなシミュレーションツールによる検討が必須となる。

計算ケースは、6.4.1で計算した、Case Y (プラントBと同負荷の高効率プラントとの融通) および Case Z (平均的街区を想定した高効率プラント) とした。各計算ケースにおいて、負荷が減少した際に熱融通をする場合としない場合について、エネルギー消費量を算出した結果を表6.18に示す。2025年頃を想定した負荷75%では熱融通の有無による一次エネルギー削減率には差がないが、2035年頃を想定した負荷50%ではCase Zにおいて熱融通ケースの方がエネルギー消費削減率が大きくなっている。Case ZではプラントAとBのエネルギー効率の差が大きく、負荷が減少してプラントAからの供給が大半を占めるようになった際によりその効果が表れたものと考えられる。また、一般的に熱融通を行う場合の方が熱源機器の台数制御等の選択肢が多く、より効率の高い運転状況を維持できると考えられ、スマートエネルギーネットワークを構築すれば将来的な負荷の変化により適切に対応可能である。

表 6.18 負荷減少による削減率

Case Y	融通	プラントA		プラントB		合計		一次エネルギー	負荷減少による削減率	融通による削減率
		電気MWh	ガス千m ³	電気MWh	ガス千m ³	電気MWh	ガス千m ³			
負荷100%	なし	2,563	930	2,888	1,476	5,451	2,406	161,483	/	9.2%
	あり	4,456	1,609	1,203	422	5,659	2,031	146,637		
負荷75%	なし	2,229	702	2,527	1,170	4,756	1,873	130,690	19.1%	8.9%
	あり	4,100	1,277	917	280	5,018	1,558	119,062	18.8%	
負荷50%	なし	1,899	502	2,230	851	4,129	1,353	101,190	37.3%	8.8%
	あり	3,869	998	445	117	4,314	1,115	92,280	37.1%	

Case Z	融通	プラントA		プラントB		合計		一次エネルギー	負荷減少による削減率	融通による削減率
		電気MWh	ガス千m ³	電気MWh	ガス千m ³	電気MWh	ガス千m ³			
負荷100%	なし	2,231	2,950	2,888	1,476	5,119	4,426	249,124	/	5.8%
	あり	3,979	3,783	495	462	4,474	4,245	234,685		
負荷75%	なし	2,194	2,324	2,527	1,170	4,722	3,494	203,324	28.4%	5.6%
	あり	3,936	3,183	111	205	4,047	3,388	191,947	29.1%	
負荷50%	なし	1,674	2,157	2,230	851	3,904	3,008	173,442	46.9%	11.9%
	あり	3,892	2,485	1	65	3,893	2,550	152,755	55.9%	

6.7 エネルギー消費削減技術が普及した場合の効果

本論文で述べたエネルギー消費削減技術が、全国の非住宅建築物や東京都内の地域冷暖房に普及した場合の削減効果を考える。

すべての非住宅建物の1割において、第5章で検討した、二次側で10%、熱源で19%のエネルギー消費量削減が実現すれば、日本全体で2.1百万klの削減となる。これは業務用分野のエネルギー消費の約3%に相当し、民生家庭用部門や運輸部門と同程度のエネルギー消費削減の進度となるであろう。

また、東京都内の地域冷暖房プラントの3割で適切なスマートエネルギーネットワーク化がなされ、本研究成果のようにエネルギー消費量が10%削減されるとすれば、東京都の地域冷暖房の平均エネルギー効率⁶⁵⁾は、5%程度向上する。東京都においては地域冷暖房の平均効率に目標値を設けているが、熱源機械室の設置場所等の制限により目標に達しないケースがあるが、このような技術の適用により、現状プラント設備を活かしつつ将来的な大規模改修まで比較的高効率なエネルギー供給が可能になると考えられる。

6.8 要約

本章では、エネルギーを融通してZEB化や街区全体での省エネルギーを実現するケースを示した。

6.2では、簡易計算手法を用いて近隣との再生可能エネルギー融通によるZEB化の可能性を検討した。近隣ビルの屋根を活用して再生可能エネルギー設備を設置することにより、アースポート単体ではZEB化が十分に可能となることを示した。一方で、エネルギー融通を行う街区全体でのZEB化のためには、単に太陽光発電パネル・太陽熱集熱器を設置するだけでは莫大な面積が必要となるため、個々の建物のエネルギー需要削減に向けた施策と仕組みの検討が必要である。一般に再生可能エネルギーと建物のエネルギー需要は季節的・時間的に一致しないため、熱融通

等によりピークの不一致を解消する方法が効果的である。

次に、第4章で開発した評価ツールをスマートエネルギーネットワークの導入検討に適用し、想定した計算ケースにおける一次エネルギー消費の削減量を定量的に把握した。

6.3では精度検証を行った実プラントを対象に、更なる高効率化のためにCGSの導入を含む改修シミュレーションを行い、高効率化について定量的に求めた。その結果、本研究で想定したシステムにおいてプラント単体で評価する場合、一次エネルギー消費量を最大41%程度削減でき、総合エネルギー効率は1.00まで向上する可能性を示した。その際、CGSからの排熱を導入したプラントを評価するために、CGSにおけるエネルギー消費を発電分と排熱分に配分する方法を示し、シミュレーション結果をA2法（代替発電・排熱システム入力基準按分法）とB1法（代替発電システム入力差引法）を用いてプラントのエネルギー効率を算出した。配分法の違いにより、プラントのエネルギー効率に最大7ポイントの差異が現れる。地域冷暖房プラントは、熱供給のエネルギー効率で評価されるべきであり、CGSの省エネルギー効果を排熱利用分で評価し、現行の省エネ法の考え方とも一致するB1法による評価が適切であることを示した。

6.4では、計算対象を想定し、計算条件・計算方法について述べた。4.4で精度検証に用いた街区・プラントを想定し、熱融通する対象を、同一負荷、同一プラント（Case X）と同一負荷、高効率プラントの場合（Case Y）、および標準的な規模で高効率プラントの場合（Case Z）の3通りのケースを想定した。

6.4.2で計算条件について述べ、6.5で計算結果を示した。性能の異なる地域冷暖房間の熱融通により、高性能なプラントからの供給増加、低負荷運転回避等の効果があり、両プラントとも稼働効率向上が期待できる。効率向上は、融通による配管ロスとの差分となるため、事前にシミュレーションによる検討が必須である。本件で計算した、高効率な地域冷暖房プラントと配管延長片道2kmの熱融通を行うケースにおいては、両プラント合計の一次エネルギー消費量削減はCase Yで9.2%、Case Zで5.8%となった。一方、Case Xでは融通によるエネルギー消費削減分が融通ポンプによる消費エネルギー量以下となり、結果として増エネルギーとなった。

6.6では、将来的に熱負荷が減少した場合についてシミュレーションで検討した。その結果、熱融通を行う場合の方が負荷減少により適切に対応可能であることが示された。

6.7では、本論文で検討したエネルギー消費削減手法が普及することを想定すれば、大きな削減ポテンシャルを有することを確認した。仮にすべての非住宅建物の1割で第5章に述べたように二次側で10%、熱源で19%のエネルギー消費量削減が実現すれば、2.1百万kℓの削減となり、業務用エネルギー消費の約3%に相当する。また、東京都内の地域冷暖房プラントの3割で適切なスマートエネルギーネットワーク化がなされ、本研究成果同様にエネルギー消費量が15%削減されるとすれば、東京都の地域冷暖房の平均効率は、5%程度向上する。

今後はケーススタディーを蓄積して更なる精度の検証・向上を進めるとともに、プラント間熱融通の際の連携制御による最適化や、再生可能エネルギー利用、蓄エネルギー技術等、次世代エネルギーシステムに含まれる様々な要素についてのモデル開発を進める予定である。

第7章 総括および結論

7.1 各章のまとめおよび総括

以下に各章の成果を総括して述べる。

第1章では、本研究の背景となる、建築・都市部門におけるエネルギー消費削減の必要性について概説し、本研究の目的および既往の研究について述べ、本研究の位置付けを明らかにした。また、本論文の構成を説明した。

本研究では、我が国の都市域における更なるエネルギー消費削減のための次世代エネルギーシステムとしてスマートエネルギーネットワークを提案し、その計画・設計および評価に必要な基礎データの整備と評価シミュレーションツールを開発する。そしてシミュレーションによる定量的な評価から、今後のスマートエネルギーネットワークシステム導入時における基本的な情報を提供することを目的とした。

第2章では、現状の空調システムの形態を示し、それぞれの特徴を整理するとともに、最新のDECCデータにより、建物用途ごとに空調システムおよび熱源エネルギー種別のエネルギー消費状況の特徴について分析した。共通する課題として、設計時の不確定要素等により負荷が過大に見積もられ過大な容量の機器が選定されるため、極端な部分負荷で運転されているケースが多いことを挙げた。そのような状況を避けるためには、計画・設計の際に需要と機器容量とのバランスを十分に検討する必要がある。そのためには時刻別の詳細データとエネルギーシミュレーションが可能なツールが必要であることを述べた。また、東日本大震災以降は建築物におけるエネルギー消費状況が大きく変化しているため、最新のデータによる分析が不可欠であることを明らかにした。

第3章では、省エネ施策を検討するためのエネルギーシミュレーションに必要な、エネルギー消費データベースについて検討した。事務用途の建物についてエネルギー消費状況をクラスター分析し、6通りに分類されたエネルギー消費変動データを作成した。

また、LCEMに内包される各種熱源機器の特性式を用いてエネルギー消費量から熱負荷データを算出する手法を開発し、求められた熱負荷が実用的に利用可能な精度であることを確認した。さらに開発した手法を50件の建物のBEMSデータに適用し、事務所・官公庁・商業施設・医療施設・宿泊施設・大学施設について、時刻別標準負荷データを作成した。負荷データ、エネルギー消費データとも、東日本大震災以降の最新データから作成しており、本研究のオリジナリティのひとつとなっている。作成した負荷データは、実際の建築物や地域冷暖房施設を計画・設計する際に活用されることが期待され、エネルギー消費変動データは街区等でのエネルギー融通を計画・検討する際に時刻別の融通量等を見積る際に有効である。本論文では、第6章で地域冷暖房プラント間の熱融通シミュレーションを行う際に電力負荷データを利用し、熱負荷についてはHASPから求めた想定街区の熱負荷を補正するために利用した。また、開発した熱負荷算出手法はエネルギー消費量からリアルタイムに負荷率が算出できることから、空調設備や地域冷暖房設備の運転管理においてきめ細かな分析が可能となり、様々な場面で活用されることが期待される。

第4章では、複数建物にエネルギーを供給する地域冷暖房システムを対象とし、性能評価を行

うシミュレーションツールを開発した。開発ツールを実際の地域冷暖房システムに適用して精度の検証を行い、実用的な精度が担保されていることを確認した。

第5章では、建築物単体におけるエネルギー消費削減の取組として、二次側システムによる取組と熱源システムによる取組について検討した。二次側での取組では、快適性向上と省エネルギー化を達成するための手法の一つとして、天井放射冷暖房システムを導入した場合について検討した。被験者実験により快適性を、数値シミュレーションにより省エネルギー性をそれぞれ検証した。天井放射冷暖房では、快適性を向上させつつ空調用エネルギーの10%以上の省エネが可能であり、熱源側にCGSの排熱等を用いることにより更なる省エネが可能であることを示した。

熱源システムによる省エネ事例として、ソーラークーリングの導入をはじめとするアースポートにおけるZEB化の取組事例について述べた。アースポートのZEB化を目指した改修により、通常のビルと比べて43%、改修前から19%の一次エネルギー消費量が削減されることを示した。

第6章ではエネルギー融通による様々な効果について検討した。

ZEB化を目指すためには、再生可能エネルギーの最大導入が必須であるが、第5章で検討したアースポートおよび近隣街区を想定し、月毎の熱負荷想定に基づく簡易計算により、再生可能エネルギーの融通によるZEB化の可能性を検討した。近隣建物の屋根を活用することにより、アースポート単体ではZEB化が十分に可能であることを示した。一方で、エネルギー融通を行う街区全体でのZEB化のためには、単に太陽光発電パネル・太陽熱集熱器を増設するだけでは莫大な面積が必要となるため、個々の建物のエネルギー需要削減に向けた取組みとそれを促進する施策が必要であることを明示した。

次に、第4章で開発したシミュレーションプログラムを用いて、CGS導入を含むプラントの高効率化に向けた改修シミュレーションを行い、改修による高効率化について定量的に求めた。その結果、想定したシステムにおいては、CGSの導入等により一次エネルギー消費量を41%程度削減でき、プラントのエネルギー効率は1.00まで向上する可能性を示した。その際、CGSを導入した地域冷暖房プラントを評価するために、CGSにおけるエネルギー消費を発電分と排熱分に配分する方法を示し、シミュレーション結果をA2法（代替発電・排熱システム入力基準按分法）とB1法（代替発電システム入力差引法）を用いてプラントのエネルギー効率を算出した。配分法の違いにより、プラントのエネルギー効率に最大7ポイントの差異が生じるが、地域冷暖房プラントは、熱供給のエネルギー効率で評価されるべきであり、省エネ法との矛盾が生じない点からも、排熱利用によるCGSのエネルギー削減効果を正しく評価できるB1法（代替発電システム入力差引法）が適切であることを示した。

次世代のエネルギーシステムとして期待されるスマートエネルギーネットワークの特性を把握するために、2つの街区の地域冷暖房間で熱融通を行った場合の一次エネルギー消費削減量を定量的に把握した。熱融通する対象を、同一負荷、同一プラントの場合、同一負荷、高効率プラントの場合、および地域冷暖房の標準的な規模で高効率プラントの場合の3通りのケースを想定した結果、性能の異なる地域冷暖房間の熱融通により、高性能なプラントの稼働増加、低負荷運転回避等の効果があり、両プラントとも稼働効率向上が期待できることが明らかとなった。効率向上は、融通による配管ロスとの差分となるため、事前にシミュレーションによる十分な検討が必要である。高効率な地域冷暖房プラントと配管延長片道2kmの熱融通を行う今回のケースにお

いては、両プラント合計の一次エネルギー消費量削減は5.8～9.2%である。

また、将来的な街区において熱負荷が減少した場合を想定し、シミュレーションで検討した。その結果、熱融通を行う場合の方が負荷減少に対してフレキシブルに対応可能であることを示した。

これらの結果を用いて、本論文で検討した手法が普及した場合のエネルギー消費削減効果を定量的に求めた。現在の建築および街区それぞれにエネルギー消費削減のポテンシャルがあり、本研究で述べた削減技術を適用すれば大きな削減効果を得られることが明らかになった。仮にすべての非住宅建物の1割で第5章に述べたように二次側で10%、熱源で19%のエネルギー消費量削減が実現すれば、2.1百万k_lの削減となり、業務用エネルギー消費の約3%に相当する。また、東京都内の地域冷暖房プラントの3割で適切なスマートエネルギーネットワーク化がなされ、本研究成果同様にエネルギー消費量が10%削減されるとすれば、東京都の地域冷暖房の平均効率は、5%程度向上することになる。

7.2 今後の課題

本論文では、現状の建築物におけるエネルギー消費の実態を分析し、現状の建築と都市における課題を抽出した。その課題解決策のひとつとして、次世代エネルギーシステムであるスマートエネルギーネットワークを提案し、その導入評価のために必要となるシミュレーションツールと、シミュレーションの際に必要な建築物の時刻別エネルギー消費量と電気・熱負荷について標準モデルを作成した。シミュレーションツールは複数の建物に熱供給をする場合の熱源プラントに適用可能であり、実プラントに適用して精度検証を行った後にスマートエネルギーネットワークの導入効果予測に適用した。また、建物二次側および熱源機側でのエネルギー消費削減手法を検討し、将来の街区において削減技術が普及拡大した際の影響についても検証した。

本研究、および本研究成果を普及させるための今後の課題としては以下があげられる。

- ・ スマートエネルギーネットワークにおいては、適切な設計に加えて、運用時の最適運転が重要となる。本評価ツールにおいても、複数プラントの統合制御による最適化や、デマンドレスポンス効果のシミュレーション機能等への対応が必要であり、今後の研究課題としたい
- ・ 実際のプラント間融通においては、プラント運用者や建物・プラントオーナー、需要家をはじめとして、行政を含む全ての関係者がメリットを認識し、協力することが重要である。本研究で開発したシミュレーションツールを活用し、スマートエネルギーネットワークのメリットを定量的に示すとともに関係者へのエネルギー消費削減に対する意識の醸成に努めていきたい
- ・ 建築・街区のエネルギー消費削減のためには、常に最新のエネルギー使用状況を把握して対策を施すことが必要である。そのためにはDECCのようなエネルギー消費実態を把握する活動を継続的に行うことが必要である

7.3 結論

建築および街区のエネルギー消費削減は喫緊の課題であり、速やかな対策が望まれる。一方でこれまでの設備機器の効率向上に依存した省エネルギー手法にはおのずと限界があるため、建築と街区における新たな省エネルギー手法としてスマートエネルギーネットワークを提案した。

スマートエネルギーネットワークの導入検討・評価を行うために必須である、建築物の負荷データおよびエネルギー消費量変動をの東日本大震災以降のデータから整備し、シミュレーションツールを開発した。開発したツールにより地域冷暖房間での熱融通を行うスマートエネルギーネットワークを構築した場合のエネルギー削減量を定量的に求め、その有効性を確認した。本論文で示した建築物単体でのエネルギー消費削減手法および街区におけるスマートエネルギーネットワークの構築により、我が国における業務用部門のエネルギー消費を削減できる可能性を示した。

スマートエネルギーネットワークの構築により、エネルギー消費量の削減とともに再生可能エネルギーの導入も比較的容易になる他、災害時等の BCP 対応も向上することが期待される。一方で、スマートエネルギーネットワークは適切に計画されないとその効果が現れない可能性も示した。本研究で作成した標準負荷データおよびシミュレーションツールを活用し、様々な状況を想定したシミュレーションを行い、設計条件や運転計画等を十分に検討しておくことが非常に重要となる。

エネルギーの使用に伴い発生する排熱は、エネルギー使用密度の高い都市部ほど深刻な状態にあり、何らかの対策が急務である。本研究で開発した負荷データおよびシミュレーションツールは、都市・街区における排熱量を定量的に求めることにも適用可能であり、排熱の質（潜熱・顕熱）を含む将来的な排熱の排出総量ガイドライン検討等、基本的な環境施策立案の際に有効なツールとなることも期待される。

スマートエネルギーネットワークをはじめとする新たなエネルギー消費削減手法の適用にあたっては、建築・設備関係者のみならず建物オーナー・テナントや近隣住民、また、熱融通配管の敷設の許認可に関連する行政等も含め、関係者全てがその目的と効果を理解して進めることが実現への必要条件となる。本研究で開発した評価ツールが適切な計画・設計のために活用されるのみならず、関係者の理解を深める一助となり、我が国におけるエネルギー消費削減に貢献することを願ってやまない。

記号

a_g	: 管断熱材側表面熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
a_i	: 管内面側表面熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
A_i	: 面 i の面積	[m ²]
c	: 熱媒の比熱	[kJ/(kg·K)]
C_{ij}	: (i, j) 面間の全交換面積	[m ²]
COP	: 部分負荷成績係数	[-]
COP_{rated}	: 定格成績係数	[-]
C_p	: 空気の定圧比熱	[kcal/m ² K]
c_w	: 水の比熱	[kJ/kg·K]
d	: 管の内径	[m]
D	: 管内径	[m]
E	: 消費電力	[kW]
$E_{(w,m,h,n)}$: m 月 w 日時刻 h におけるエネルギー消費量	[MJ/h]
E_{AHU}	: AHU の消費電力	[kW]
$E_{AHUrated}$: AHU の定格消費電力	[kW]
$E_{av(w,m,h)}$: m 月 w 日時刻 h における平均エネルギー消費量	[MJ/h]
E_{EF}	: 排気ファンの消費電力	[kW]
E_{HEX}	: 全熱交換器の消費電力	[kW]
$E_{HEXrated}$: 全熱交換器の定格消費量	[kW]
E_{rated}	: 定格消費電力	[kW]
E_{VAV}	: VAV ユニットの消費電力	[kW]
$E_{VAVrated}$: VAV ユニットの定格消費電力	[kW]
f	: 水蒸気分圧	[mmHg]
f_s	: 飽和水蒸気分圧	[mmHg]
G	: 質量流量	[kg/s]
G_s	: 蒸気質量流量	[kg/s]
h	: t_w に相当する空気のエンタルピ	[kJ/kg(DA)]
H	: ポンプの全揚程	[mAq]
h_d	: 配管の局部抵抗	[mAq]
h_i	: i 面における対流熱伝達率	[kW/m ² k]
h_m	: 機器類の圧力損失	[mAq]
h_{oi}	: 外面における総合熱伝達率	[kW/m ² k]
h_p	: 直管部分の圧力損失	[mAq]
h_s	: t_w に相当する飽和空気のエンタルピ	[kJ/kg(DA)]
H_s	: 実揚程 (静水頭)	[mAq]
INV	: インバーター特性式	[-]

k	: 熱伝導率	[kW/mk]
K	: 熱貫流率	[kW/(m ² ・k)]
l	: 菅の長さ	[m]
LF	: 負荷率	[-]
LF_{AHU}	: AHU の負荷率	[-]
l_i	: 壁面の厚さ	[m]
n	: ゾーンにおける VAV ユニットの台数	[-]
$n_{(w,m,h)}$: m 月 w 日時刻 h における建物数	[-]
NTU	: 移動単位数	[-]
$PUMP$: 搬送動力	[kW]
q	: 単位面積当たりの熱発生量	[kW/m ²]
Q	: 全熱負荷, または能力	[kW]
Q_f	: 室内発生熱量	[kW]
Q_{II}	: 供給熱量	[kW]
Q_l	: 潜熱負荷	[kW]
Q_{loss}	: 配管熱損失量	[MJ/h]
$Q_{loss,s}$: 蒸気配管熱損失量	[MJ/h]
q_p	: ポンプ流量	[L/min]
Q_{rated}	: 定格能力	[kW]
Q_s	: 顕熱負荷	[kW]
Q_{sl}	: 全熱負荷	[kW]
Q_{steam}	: 単位蒸気量あたりの潜熱	[MJ/t]
r_1	: 管内側半径	[m]
r_2	: 断熱材外側半径	[m]
Re	: レイノルズ数	[-]
rh	: 相対湿度	[%]
T	: 配管内熱媒平均温度	[°C]
t	: 気温	[°C]
t_c	: コイル吹出し温度	[°C]
t_{ca}	: 熱交換後の温度	[°C]
t_d	: 露点温度	[°C]
T_e	: 給気温度	[K]
T_f	: 室内空気温度	[K]
T_i	: 面 i の絶対温度	[K]
T_o	: 面の外側の温度	[K]
t_{odb}	: 外気乾球温度	[°C]
T_{out}	: 洞道温度	[°C]
t_R	: 室内温度	[°C]

t_{Rm}	: 混合空気温度	[°C]
t_{Rset}	: 設定室温	[°C]
t_s	: 給気温度	[°C]
t_w	: 湿球温度	[°C]
T_{st}	: 配管入口熱媒温度	[°C]
$T_{w,in}$: 冷却水入口温度	[°C]
$T_{w,out}$: 冷却水入口温度	[°C]
v	: 流速	[m/s]
V	: 給気量	[m ³ /h]
V'	: 全熱交換前の予想風量	[m ³ /h]
$V_{AHUrated}$: AHU の定格風量	[m ³ /h]
V_c	: コイル吹出し量	[m ³ /h]
V_e	: 排気量	[m ³ /h]
V_{EF}	: 排気量	[m ³ /h]
$V_{EFrated}$: 排気ファン定格風量	[m ³ /h]
V_s	: 給気風量	[m ³ /h]
V_{sm}	: 給気風量 (混合空気)	[m ³ /h]
w	: 平日, 土曜, 日祝日	[-]
w_1	: 加湿量	[m ³ /h]
x	: 絶対湿度	[kg/kgDA]
x_s	: 飽和絶対湿度	[kg/kgDA]
γ	: 湿り空気の比重量	[kg/m ³]
Δh	: 加湿前後のエンタルピー差	[kJ/kg(DA)]
ΔP	: 直管部分の圧力損失	[Pa]
ΔP_d	: 局部抵抗による圧力損失	[Pa]
Δt_w	: 循環温度差	[°C]
ε	: 管壁等価粗さ	[m]
ζ	: 局部抵抗係数	[-]
η_{hex}	: 全熱交換器の熱交換効率	[-]
λ	: 熱媒の熱伝導率	[W/(m·K)]
λ_g	: 断熱材熱伝導率	[W/(m·K)]
μ	: 管の摩擦係数	[-]
ν	: 動粘度	[m ² /s]
ρ	: 流体の密度	[kg/m ³]
σ	: Stefan-Boltzmann 定数, 4.88×10^{-8}	[kW/m ² K ⁻⁴]

参考文献

- 1) Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2014. ISBN978-1-107-05821-7.
- 2) 資源エネルギー庁. 省エネルギーに関する情勢及び取組の状況について,総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会 (第2回) - 配布資料, 2014
- 3) Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings -
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>, (参照 2015-05-02).
- 4) ZEBの実現と展開に関する研究会. "ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の実現と展開について～2030年でのZEB達成に向けて～". 2009,
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g91124d01j.pdf>, (参照 2015-05-04).
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課. ZEBロードマップ検討委員会 とりまとめ. 2015, <http://www.meti.go.jp/press/2015/12/20151217002/20151217002-1.pdf>, (参照 2015-12-23).
- 6) 丹羽英治. シンポジウム(東京)「ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の動向と定義」. 空気調和・衛生工学会, 2015
- 7) 工月良太, 村上周三, 伊香賀俊治, 山田航也, 川除隆広, 生田雄一, 小見山堤子. 自立分散型エネルギーシステムを含む公民連携型の地域エネルギー事業の構築に関する研究(第1報): 地域レベルのスマートエネルギーネットワークの事業をめぐる政策動向と研究の枠組み(地域エネルギー事業の構築,環境工学I,2014年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会・建築デザイン発表会). 学術講演梗概集. 2014, vol. 2014, p. 683–684. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009856604>, (参照 2015-05-10).
- 8) 村木茂. スマートエネルギーネットワークの推進による21世紀型の低炭素・エネルギー自立型都市へ (特集 オリンピックと環境) – (オリンピックを契機にした東京改造構想). 環境研究. 2014, no. 175, p. 26–37. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40020247917>, (参照 2015-05-10).
- 9) 岡本利之. 岩崎地区における天然ガスコージェネレーションを活用したスマートエネルギーネットワークの構築 (特集 まちづくりと一体となったエネルギー面的利用の新たな展開). 新都市. 2014, vol. 68, no. 7, p. 29–31. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40020175940>, (参照 2015-05-10).
- 10) 平岡雅哉, 弘本真一, 鈴木雄介, 伊香賀俊治, 藤崎浩太, 工月良太, 大海元嗣. スマートエネルギーネットワークの間接的便益(NEB)に関する研究: 第二報 間接的便益(NEB)評価の概要 (ノンエネルギーベネフィット,環境工学I,2014年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会・建築デザイン発表会). 学術講演梗概集. 2014, vol. 2014, p. 695–696.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009856610>, (参照 2015-05-10).

- 11) 三上敦史. NEW ENERGY特集 スマートエネルギーネットワークの先端を知る: 田町駅東口北地区. New energy. 2015, no. 187, p. 7-11. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40020348026>, (参照 2015-05-10).
- 12) "ECCJ 省エネルギーセンター / オフィスビルの省エネルギー / 1.オフィスビルのエネルギー消費の特徴 |". http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html, (参照 2015-05-10).
- 13) 空気調和・衛生工学会. 都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用. 空気調和・衛生工学会, 2015. ISBN4-87418-060-4.
- 14) "Energy Information Administration (EIA)- Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS)". <http://www.eia.gov/consumption/commercial/index.cfm>
- 15) "California Commercial End-Use Survey (CEUS)". <http://www.energy.ca.gov/ceus/>
- 16) "ODYSSEE Energy Efficiency Database for Europe | Data & Indicators | Odyssee Project". <http://www.odyssee-indicators.org/database/database.php>
- 17) 高口洋人, 井筒進平, 鷲谷聡之. 非住宅(民生業務部門)建築物の環境関連データベース(DECCE)の構築と解析(その1)基礎データベースの構築. 日本建築学会環境系論文集. 2012, vol. 77, no. 678, p. 699-705. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40019404832>, (参照 2014-01-03).
- 18) "HASP (動的熱負荷計算・空調システム計算プログラム) ダウンロード". HASP (動的熱負荷計算・空調システム計算プログラム) ダウンロード. <http://index.html>, (参照 2015-05-03).
- 19) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課. 建築設備設計基準 平成21年版. (社) 公共建築協会, 2009. <http://www.jctc.jp/publication/tosho/kentikusetubi-2>
- 20) 空気調和・衛生工学会. 都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価. 1994. ISBN-10: 4874180094.
- 21) 古川道信, 細野英之, 小山俊彦, 生田目早苗. 事務所ビルの建物負荷データの標準データ作成に関する検討. 学術講演会論文集. 2006, vol. 18, no. 3, p. 1829-1832. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009775034>, (参照 2015-05-09).
- 22) 細野英之, 町秀一, 盛野幸一, 生田目早苗. 業務用建物負荷データの標準データ作成に関する検討:(第2報) 空調負荷・温熱負荷のある建物用途における負荷モデルの検討. 学術講演会論文集. 2007, vol. 19, no. 1, p. 361-364. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009779770>, (参照 2015-05-09).
- 23) 町秀一, 盛野幸一, 細野英之, 生田目早苗. 業務用建物負荷データの標準データ作成に関する検討:(第3報) 空調負荷が中心の建物用途における負荷モデルの検討. 学術講演会論文集. 2007, vol. 19, no. 1, p. 365-368. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009779771>, (参照 2015-05-09).
- 24) エネルギー高度利用型地域熱要求システム研究会. エネルギー高度利用型地域熱要求システム研究会報告書. 資源エネルギー庁, 2003
- 25) 小此木時雄, 吉川貴美男, 田中良彦, 原哲, 大島昇, 岡村明彦, 八塩彰, 濱田和康, 五嶋亨. 建物のエネルギー消費実態調査に関する研究: 地域冷暖房方式と個別熱源方式の比較 (第二報) モデルシステムによるシミュレーション. 学術講演会論文集. 2000, vol. 12, no. 1, p. 305-308. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009750539>, (参照 2015-05-09).
- 26) 名古屋田知志, 下田吉之, 水野稔. 地域冷暖房の個別熱源システムに対する省エネルギー性の検証: コージェネレーションシステムを利用した吸収ボイラ方式システムのシミュレーショ

- ン評価. 空気調和・衛生工学会論文集. 2007, no. 118, p. 37-47.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007996666>, (参照 2015-05-09).
- 27) 名古屋知志, 下田吉之, 水野稔. 吸収ボイラ方式地域冷暖房における熱負荷集約効果に関する検討: 需要要素と熱源機器分割がエネルギー効率に与える影響. 空気調和・衛生工学会論文集. 2007, no. 124, p. 47-56. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110007996682>, (参照 2015-05-09).
- 28) 名古屋知志, 下田吉之, 水野稔. 地域冷暖房プラントにおける熱源機器の運転実態に関する分析: 熱源機運転の実態と期間成績係数の推定方法の検討. 空気調和・衛生工学会論文集. 2006, no. 112, p. 41-49. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110007996625>, (参照 2015-05-09).
- 29) 下田吉之, 柳邦治, 水野稔. 熱需要の変動を考慮した清掃工場廃熱活用熱電併給システムに関する研究. 空気調和・衛生工学会論文集. 2001, no. 80, p. 27-35.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007996107>, (参照 2015-05-09).
- 30) "官庁営繕: ライフサイクルエネルギーマネジメント (LC EM) - 国土交通省".
http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html, (参照 2015-04-23).
- 31) International Energy Agency - EBC_Annex_53_Main_Report.pdf.
http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Main_Report.pdf, (参照 2015-05-03).
- 32) C.K. Wilkins, R. Kosonen. Cool ceiling system: A European air-conditioning alternative. ASHRAE Journal. 1992, p. 41-45.
- 33) U. Busweiler. Air conditioning with a combination of radiant cooling, displacement ventilation and desiccant cooling. ASHRAE Trans. 1993, vol. 99, no. Part 2, p. 503-510.
- 34) M.F. Brunk. Cooling ceilings - an opportunity to reduce energy costs by way of radiant cooling. ASHRAE Trans. 1993, vol. 99, no. Part 2, p. 479-487.
- 35) Osamu Shibata. EARTHPORT: Tokyo Gas Kohoku New Town Building - An office building with life-cycle energy saving features -. 1999
- 36) 林立也, 丹羽英治, 松縄堅, 市川徹, 工月良太, 今成岳人. まちづくりのためのカーボン・エネルギーシミュレーションツール開発: (第3報)都市・地域を対象とした検討のためのSPREEM-UDの機能拡張. 学術講演会論文集. 2010, vol. 22, no. 1, p. 625-628.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009780355>, (参照 2015-11-07).
- 37) 市川徹, 工月良太, 今成岳人, 林立也, 丹羽英治, 松縄堅. まちづくりのためのカーボン・エネルギーシミュレーションツール開発: (第4報)モデル地区におけるスマートエネルギーネットワークの検討. 学術講演会論文集. 2010, vol. 22, no. 1, p. 629-632.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009780356>, (参照 2015-11-07).
- 38) "DECC-公開情報の構成に関する説明 | 一般社団法人 日本サステナブル建築協会 (JSBC)".
http://www.jsbc.or.jp/decc_download/outline.html, (参照 2015-04-30).
- 39) "DECC (非住宅建築物の環境関連データベース) | 一般社団法人 日本サステナブル建築協会 (JSBC)". http://www.jsbc.or.jp/decc_download/index.html, (参照 2015-05-09).
- 40) "気象庁 | 日本の年平均気温偏差 (°C)". http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an_jpn.html, (参照 2015-11-22).

- 41) 山田恭輔, 清水拓, 木口雅之, 野部達夫. 18事例におけるマルチパッケージ型空調機の実運用時性能評価. 学術講演会論文集. 2012, vol. 24, no. 2, p. 1867-1870.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009749467>, (参照 2015-05-09).
- 42) 野部達夫, 芳賀裕輔, 中村北斗. プローブ挿入法によるマルチパッケージ型空調機の運用時性能評価手法. 日本建築学会環境系論文集. 2011, vol. 76, no. 668, p. 927-933.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40019026452>, (参照 2015-05-09).
- 43) (一財)建築環境・省エネルギー機構. "省エネ計画書 | The BEST Program 【ザ・ベスト・プログラム】". <http://www.ibec.or.jp/best/eco/index.html>, (参照 2015-11-22).
- 44) 佐々木裕文. 東京ガス千住テクノステーションにおけるスマートエネルギーネットワーク実証. ボイラ研究. 2014, no. 385, p. 22-26. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40020123083>, (参照 2015-05-10).
- 45) 日立アプライアンス(株). 高効率排熱投入型蒸気焚ジェネリック[EXJシリーズ]. 2011
- 46) 亀谷茂樹. 都市熱環境負荷源としての空調システムの評価に関する研究. 大阪大学, 1998,
<http://ci.nii.ac.jp/naid/500000165165>, (参照 2015-12-23).
- 47) 荏原テクノサーブ(株). ポンプカタログ.
- 48) (株)日本サーモエナー. 小型貫流ボイラ技術資料. 2013
- 49) 天然ガスコージェネレーション機器データ〈2013〉. 東京, 日本工業出版, 2013.
ISBN978-4-8190-2508-9.
- 50) 荏原テクノサーブ(株). 送風機カタログ.
- 51) "気象庁過去の気象データ・ダウンロード". <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>,
(参照 2015-09-06).
- 52) "岩本研究室 Web Site". <http://www.arch.kanagawa-u.ac.jp/~iwamoto/labo/labo.html>, (参照
2015-10-30).
- 53) Johnson GA. Optimization techniques for a centrifugal chiller plant using a programmable controller. ASHRAE Trans. 1985, vol. 91(2), p. 835-847.
- 54) 一般社団法人 日本熱供給事業協会. 熱供給事業便覧. 平成22年版
- 55) P. O. Fanger. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, 1970. ISBN87-571-0341-0.
- 56) 大森敏明, 谷口博, 工藤一彦. 室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用. 空気調和・衛生工学会論文集. 1990, no. 42, p. 9-18. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110007995990>, (参照 2015-05-09).
- 57) N. Nishiyama. Modeling and control of a double-effect absorption refrigerating machine (part 1: Model analysis). 1987, 571-576p.
- 58) ISO-7730. Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Standard Organization, 1994
- 59) "ECCJ 省エネルギーセンター / 商業施設の省エネルギー".
http://www.eccj.or.jp/commercial_bldg/, (参照 2015-05-10).
- 60) "環境省_平成21年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について(お知らせ)". <https://www.env.go.jp/press/13319.html>, (参照 2015-10-04).
- 61) 空気調和・衛生工学会. 地域冷暖房計画検討小委員会報告書 第1篇 (WG1)コージェネレー

ションの効率の評価ガイドライン. 2007

- 62) 村上公哉, 川島尚子, 榎本裕一. コージェネレーション効率の評価法に関する研究:(第3報) コージェネレーションの発電電力と排熱の一次エネルギー換算方法とその適用が熱源システムの効率に与える影響. 学術講演会論文集. 2007, vol. 19, no. 2, p. 831-834.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009776449>, (参照 2016-06-05).
- 63) エネルギーの使用の合理化に関する法律第15条及び第19条の2に基づく定期報告書記入要領.
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/procedure/pdf/teiki_kinyuyouryou.pdf, (参照 2016-06-05).
- 64) 資源エネルギー庁. "未利用熱活用制度が平成29年度定期報告より始まります!". 平成28年4月,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/procedure/pdf/miriyou.pdf, (参照 2016-06-26).
- 65) 平成26年2月 - 地域冷暖房のエネルギー効率の推移について.pdf.
<http://www7.kankyo.metro.tokyo.jp/yukoriyou/doc/H24%E5%AE%9F%E7%B8%BE/%E5%9C%B0%E5%9F%9F%E5%86%B7%E6%9A%96%E6%88%BF%E3%81%AE%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E5%8A%B9%E7%8E%87%E3%81%AE%E6%8E%A8%E7%A7%BB%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6.pdf>, (参照 2015-11-02).
- 66) "建築: 改正省エネルギー法関連情報(住宅・建築物関係) - 国土交通省".
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_tk4_000005.html, (参照 2015-12-13).
- 67) "エネルギー基本計画". <http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf>, (参照 2015-12-13).

謝辞

本論文は、筆者が東京ガス株式会社の研究開発部門在籍時、およびエネルギー企画部において業務や社外研究委員会等への参加を通して実施した研究の成果をまとめたものである。

本論文の作成にあたり、東京海洋大学 亀谷茂樹教授には、学位取得の機会をご提供いただいたのみならず、研究の進め方や論文投稿をはじめとしてあらゆる面で多大なるご指導・ご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝致します。

東京海洋大学 戸田勝善准教授および上野公彦准教授には、学内副査として本論文を査読いただき、貴重なご意見を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

工学院大学 野部達夫教授には、学外副査として本論文を査読いただき、数々の貴重なご示唆を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

東京海洋大学 藤田稔彦特任教授と早稲田大学 田辺新一教授には、貴重なお時間を割いて本論文を査読いただき、大変有益なご示唆を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、野部教授と田辺教授には、「アースポート研究会」「平沼ビル省エネ・快適・知的生産性研究会」「立川研究会」等を通して、本研究にも通じる建築物のエネルギー消費や快適性に関連する数々の貴重なアドバイスを頂戴いたしました。ここに重ねて御礼申し上げます。

建築環境・省エネルギー機構 村上周三理事長を委員長とする、非住宅建築物の環境関連データベース委員会の諸氏には、最新の DECC データ提供や本研究への適用に際して非常に有用なアドバイスを頂きました。特に国土舘大学 原英嗣准教授と早稲田大学 高口洋人教授には DECC に関する論文投稿および海外発表に際して数々の貴重なアドバイスを頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

元東京ガス技術研究所の大森敏明氏には、研究の初期段階において貴重なご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。

東京海洋大学亀谷研究室元修士学生の秋田祐吾氏、加藤徹氏、長坂明子氏、研究員の穂積典子氏、元秘書の青木玲子氏には、DECC のデータ分析やシミュレーション関係のデータ整理、また資料準備等に並々ならぬご協力を頂きました。ここに改めて御礼申し上げます。

本研究の遂行や論文作成にあたり、ご理解とご支援、そして叱咤激励を賜りました東京ガス株式会社の関係諸氏に感謝の意を表します。

最後に、本論文に取り組み始めてから 4 年近くの長期にわたり協力してくれた家族に、心より感謝したいと思います。