Osaka University Knowledge Archive

Title	大学施設におけるエネルギー消費の実態とその低減に関する研究
Author(s)	大橋, 巧
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/52202
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

博士学位論文

大学施設におけるエネルギー消費の実態と
その低減に関する研究

大　橋　　巧

２０１４年１２月

大阪大学大学院工学研究科

目　次

第 1 章：緒論 1
1.1　序論 1
1.2　大学施設の省エネルギー化・低炭素化に関する取組みや研究状況 2
1.3　大阪大学の概要 4
1.4　論文の目的 5
1.5　論文の構成 7
参考文献 10
第 2 章：大規模総合大学施設のエネルギー消費実態と巨視的分析 12
2.1　序論 12
2.2　大阪大学のエネルギー消費推移 12
2.3　エネルギー消費の特性による施設の分類 14
2.4　平成 23 年度の節電対策による効果 15
2.5　大阪大学のエネルギー消費に関する巨視的分析 17
2.5.1　一次エネルギー消費量 17
2.5.2　電力消費 18
2.6　まとめ 29
参考文献 31
第 3 章：理科系研究室のエネルギー消費実測と運用改善によるエネルギー削減効果試算 32
3.1　序論 32
3.2　理科系研究室におけるエネルギー消費の実測調査 32
3.2.1　調査対象施設のエネルギー消費特性 32
3.2.2　実測調査概要 35
3.2.3　生物科学系研究室の実測結果 36
3.2.4　情報科学系研究室の実測結果 41
3.3　運用段階の省エネルギー手法の定量評価 43
3.3.1　シミュレーションの再現性評価（節電対策後期間での検証） 43
3.3.2　節電対策前期間の推計 45
3.3.3　各種省エネルギー手法の定量評価 46
3.3.4　空調機器能力の適正化による削減効果試算 49
3.4　まとめ 50
参考文献 51
第 4 章：理科系施設のエネルギー消費内訳の推計と分析 52
4.1　序論 52
4.2　建物規模でのエネルギー消費内訳の推計と分析 52

4.2.1　研究対象施設の概要とエネルギー消費実態 52
4.2.2　保有機器調査 55
4.2.3　エネルギー消費内訳の推計 57
4.2.4　エネルギー削減効果の定量化 66
4.3　キャンパス規模でのエネルギー消費内訳の推計と分析 68
4.3.1　研究対象施設の概要とエネルギー消費実態 68
4.3.2　空調設備の設置状況調査 70
4.3.3　エネルギー消費内訳の推計 71
4.3.4　感度分析 75
4.3.5　機器更新によるエネルギー削減ポテンシャル 77
4.3.6　効果的な機器更新方法 78
4.4　実験機器・備品類の設置状況調査 79
4.5　まとめ 80
参考文献 82
第 5 章：病院施設熱源のエネルギー性能評価 83
5.1　序論 83
5.2　建物・設備概要と熱源機器性能 84
5.2.1　建物・設備概要 84
5.2.2　エネルギー消費特性と熱源機器の性能 87
5.3　シミュレーションモデルの概要と再現性検証 92
5.3.1　シミュレーションモデルの概要 92
5.3.2　シミュレーションモデルの再現性検証 92
5.4　運用時のフォルト分析とシミュレーションモデルを用いたエネルギー効率の定量化 94
5.4.1　運用時のフォルト分析 94
5.4.2　シミュレーションを用いたエネルギー効率改善の定量化 98
5.5　まとめ 101
参考文献 102
第 6 章：総括 103
6.1　総括ならびに結論 103
6.2　論文の課題と発展 105
参考文献 107
謝　辞 108

第１章：緒論

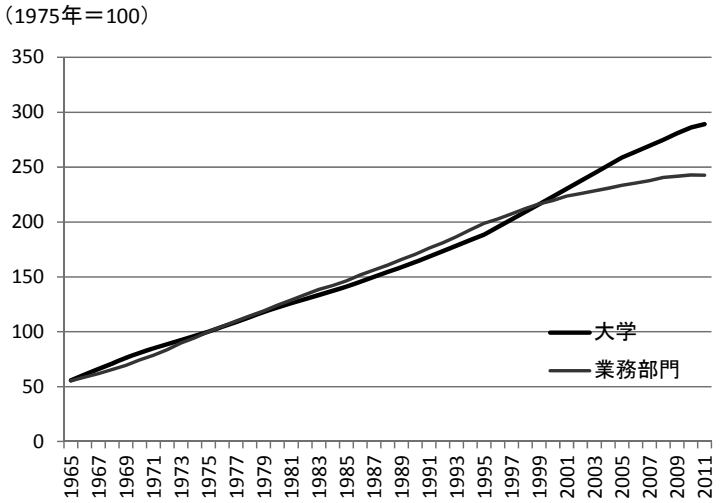
1.1　序論

本研究は、主要 3 キャンパスで敷地面積約 158 万㎡を保有し、様々な教育・研究活動が行われている大規模総合大学「大阪大学」を対象として、エネルギー消費実態を明らかにしその低減に役立つ知見や技法を得ることを目的としている。

大学は持続可能な低炭素化社会実現に向け、教育・研究活動を通じて社会貢献することが求められている。同時に社会の一翼を担う立場として、社会的責務を果たすうえでも大学施設の運営に関わるエネルギー消費量や温室効果ガス排出量を削減することは不可避な状況にある。

平成 24 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書）[1.1)]によると、2011 年度時点の我が国のエネルギー消費動向をエネルギー部門別にみると、オイルショック当時の 1973 年度比で、産業部門がほぼ横ばい（0.9 倍）で推移する一方、民生（家庭部門、業務部門）・運輸部門はほぼ倍増（民生部門：2.4 倍（家庭部門：2.1 倍、業務部門 2.8 倍）、運輸部門 1.9 倍）している。大学施設が属している民生部門の全エネルギー消費に対するシェアは、1973 年度の 18.1%に対し、2011 年度には 33.8%と大幅に増加しており、他部門と比較しても一層の対策が求められている。

また、業務部門全体の床面積は、1975 年度に対し 2011 年度で 2.4 倍 [1.1)]となっており、先述の業務部門のエネルギー消費量の増加の主な要因の一つに、延床面積の増が考えられる。大学施設においても国内の延床面積は年々増加しており、文部科学統計要覧 [1.2)]によると 1975 年 23,705,000 ㎡に対し、2011 年では 68,580,000 ㎡と約 2.9 倍もの増加を示しており、図-1.1 に示すように業務部門全体の増加率より高く、エネルギー需要も伸びているものと推察される。



† 大学は文部科学統計要覧[1.2)]をもとに作成
業務部門はエネルギーに関する年次報告（エネルギー白書）[1.1)]をもとに作成

図-1.1　日本国内の延床面積の推移

こうした状況の中、民生部門のエネルギー起源 CO_2 の排出を削減するための法改正も進んでおり、大規模な建築物の省エネ措置が著しく不十分である場合の命令の導入や、中小規模の建築物についての省エネ措置の届出等の義務付けを柱とする「エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する法律」（平成 20 年法律第 47 号）が 2008 年 5 月に成立している。

また、2011 年（平成 23 年）3 月に発生した東日本大震災以降、エネルギーを取り巻く状況は大きく変化している。震災後、関東圏では広範囲で計画停電が実施され、冷房需要が増大するその年の夏期には、東京電力と東北電力管内の大口需要家を対象に電気事業法に基づき使用最大電力 15%削減を課す電力使用制限令が発令され、関西電力管内においても 10%以上の節電が求められることとなった。引き続き平成 23 年度冬期においては、前年同月の使用最大電力に対し、関西電力管内：10%以上、九州電力管内：5%以上の節電目標が掲げられ、翌平成 24 年夏期においても、平成 22 年の使用最大電力に対し 15%以上（当初値）の数値目標が掲げられた関西電力管内を始め、全国各地で使用最大電力抑制の取り組みがなされた。以降今日に至るまで、エネルギー消費量や温室効果ガス排出量の削減に加え、使用最大電力の抑制も大きな課題となっており、電力需要の平準化を推進する法改正「エネルギーの使用の合理化に関する法律の一部を改正する等の法律案」（平成 25 年 5 月 24 日可決･成立、平成 25 年 5 月 31 日法律第 25 号公布）も進められている。

温室効果ガスの削減を目的とする自治体の条例も全国各地にあり、東京都では「都民の健康と安全を確保する環境に関する条例（環境確保条例）」を平成 20 年 7 月に改正し、原油換算で年間 1500 kl 以上のエネルギーを使用する大規模事業所に対し、日本で初めての温室効果ガス総量削減義務と排出量取引制度(キャップ&トレードプログラム)を導入するなど、求められる水準が厳しくなりつつある。

このように、大学施設のエネルギーを取り巻く環境は重要度を増しつつあるが、大学は社会の実験の場として率先してこれらの問題解決に向け努力し、その成果を積極的に還元する役割も求められているものと考える。

大学施設は、文科系学部、理科系学部、研究施設、附属病院等、多様な施設の集合体でありエネルギー消費構造も複雑である。このような施設群において、適切な問題解決策を検討するには、個々の建物のエネルギー消費実態やその特性を把握することが極めて重要となる。本研究では、調査、実測、シミュレーション等によりこれらの実態を明らかにし、他大学のみならず、他の業務部門の分析やエネルギー削減の検討にも発展・応用できる知見を得ることを目指している。

1.2　大学施設の省エネルギー化・低炭素化に関する取組みや研究状況

昨今、大学施設の省エネルギー化・低炭素化に関する議論は、国際的には International Sustainable Campus Network（ISCN）、国内ではサステイナブルキャンパス推進協議会（CAS-Net JAPAN）などを筆頭に、国内外問わず活発に行われている。

個別の大学の取組としては、主に下記のものが挙げられる。

1)　東京大学 [1,3]：2008 年に発足した TSCP 室を中心とした総長の強いイニシアチィブによる全学

的な体制で、TSCP-2012、TSCP-2017、TSCP-2030 という中長期の目標を掲げ、低炭素キャンパス実現に向けた各種の取り組みがなされている。また設備の高効率化を目的として、継続的に更新費用を確保するため、各部局の光熱水費の 4%分を徴収する TSCP 促進費制度を導入するなど、着実な省エネルギー改修が進められている。

2) 京都大学[1.4]：ハードウエア改修で床面積当たり毎年 1%、研究室での環境配慮行動で毎年 1%、合計毎年 2%のエネルギー消費量・CO_2 排出量削減を目指している。この目標の達成に向けて平成 20 年度から「京都大学環境賦課金制度」を導入し、この費用を ESCO 事業に活用して費用対効果の高い省エネルギー改修を行うなどの活動が行われている。

3) 名古屋大学[1.5]：2004 年に発足した「名大エネルギーマネジメント研究・検討会」を中心に、大学のエネルギーマネジメントに関する調査・研究を行い、毎年成果報告会を実施するなど活発な活動が継続されている。管理一体型 ESCO 事業、地下水浄化サービス事業による水道料金削減分を省エネルギー活動に利用する取組、省エネルギー技術を数多く採用した ES 総合館の建設、省エネパトロール・出前講義など各種の取組が進められている。

4) 北海道大学[1.6]：「省エネ設計の徹底」、「学内における３R の徹底」「北の森林プロジェクト」などを中心に、全学的な環境負荷低減を目指すさまざまな具体的な施策が実行されている。大学全体としてゼロエミッションになることを最終的な目標とし、二酸化炭素の排出量については、2030 年までの長期目標として 2005 年度比で 35%削減することとしている。これらの目標を達成するために、「サステイナブルキャンパス構築のためのアクションプラン 2012」を策定している。

5) 三重大学[1.7]：キャンパスから排出される CO_2 を平成 26 年 3 月までに平成 22 年度比で 24%減らすことを目標とした三重大学スマートキャンパス（MIESC）実証事業（経済産業省補助事業「次世代エネルギー技術実証事業」）、各個人の環境活動をポイント化し、獲得ポイントに応じて表彰や物品との交換や割引などを実施する MIEU ポイントなど、特色のある取組が進められている。

大学施設のエネルギー消費解析に関する研究報告としては、建物用途別や部局別に一次エネルギー消費量を調査した事例[1.8][1.9]、大学内の二つの建物の時刻別電力量を分析した事例[1.10]、外気温度や学生数などの変動要素がエネルギー消費量に与える影響を分析した事例[1.11]、保有機器調査結果や季節変動要素の分析により用途別電力消費量を推計した事例[1.12]、月別電力消費量をもとに非空調用エネルギー量を推定した事例[1.13]、空調機器の成績係数を用いて冷暖房需要を推定した事例[1.14]、キャンパスの省エネルギー化・低炭素化シナリオを示した事例[1.15][1.16]などの既往研究があり、問題解決に向け様々な知見が見出されつつある。

しかしながら、これまでの既往研究では下記に列挙する課題や新たな問題もあり、これらの解決や研究の更なる発展が望まれるところである。

・大学施設のエネルギー消費構造の分析において用いられるデータは、限られた施設での実測データや年別・月別・日別の実測データが主であり、大学施設全体を対象とし、かつ建物単位で時刻

別実測データなどを用いて分析した事例は見当たらず、総合的かつ詳細に消費構造を明らかにする上では、より緻密な分析が望まれる。

・先述のように東日本大震災以降、我が国のエネルギーを取り巻く状況は大きく変化しており、エネルギー消費量や温室効果ガス排出量の削減に加え、夏期および冬期のピーク時の電力使用抑制が重要な課題となっている。一方で節電対策下においても施設利用者の満足度や快適性、知的生産性の維持は欠くことができず、大学施設においても効果的なエネルギー消費量削減および電力ピークカットを実行するため、各種の省エネルギー手法がもたらす効果の定量的な把握が求められいる。

・建物の省エネルギー対策を検討する上で、用途別エネルギー需要の把握は欠かせない。既存施設を対象としてこれらの内訳を把握するため、先述のとおり様々な推計手法[1.12)~1.14)]が提案されている。しかしながら、従来の推計法では非空調用途のエネルギー需要は月変動がないことを前提としたものが一般的で、長期休暇期間など月によって需要が変動する大学施設では大きな誤差が生じる可能性がある。

・中央熱源方式の空調システムが採用された施設において、熱源の性能検証や運用上のフォルトの改善を行うことは、エネルギー使用の合理化を図る上で有効な手段となる。しかしながら既存施設の運用時や改修時の検証事例は多くみられないのが現状で、経年劣化した熱源設備のエネルギー性能を検証した例も少ない。この要因としては、古い設備では計測箇所が十分でないために、実態把握や検証自体が容易に行えないことが一因として挙げられ、これらの解決が課題と言える。

1.3　大阪大学の概要

研究対象とする大阪大学は、1931 年創立の国立大学であり、学部としての、文学部、人間科学部、外国語学部、法学部、経済学部、理学部、医学部、歯学部、薬学部、工学部、基礎工学部や大学院の施設を保有する。また、2 つの附属病院（医学部附属病院、歯学部附属病院）や 4 つの附属図書館（総合図書館、生命科学図書館、理工学図書館、外国学図書館）、5 つの附置研究所（微生物研究所、産業科学研究所、蛋白質研究所、社会経済研究所、接合科学研究所）、さらに全国共同利用施設として、核物理研究センター、サイバーメディアセンター、レーザーエネルギー学研究センターなど多様な施設を有する大規模総合大学である。大阪大学の概要を表-1.1 に示す。

表-1.1　大阪大学の概要[1.17)]

敷地面積		1,652,349 ㎡
延床面積		1,037,318 ㎡
構成員数	学部生	15,563 人
	大学院生	7,999 人
	専門学校生	39 人
	教職員	6,155 人
	合計	29,756 人

† 平成25年5月1日現在
敷地面積、延床面積は主要3キャンパス以外も含む総計
教職員数は委託・非常勤を除く

表-1.2 には平成 21 年度の大阪府の温室効果ガス大量排出事業者[1.18)]の一覧を示す。上位は工場、上下水道施設やごみ焼却施設を有する自治体などにより占められているが、大阪大学は 28 番目に位置付けられており、業務部門の分析を行う上で利用価値は高い。

表-1.2　大阪府下温室効果ガス大量排出事業者（平成 21 年度）[1.18)]

順位	事業名	排出量(t-CO_2)	順位	事業名	排出量(t-CO_2)
1	三井化学株式会社	1,669,523	21	新関西製鐵株式会社	115,820
2	東燃ゼネラル石油㈱　堺工場	1,221,419	22	新日本製鐵㈱　建材事業部堺製鉄所	113,527
3	大阪市	1,141,140	23	東大阪都市清掃施設組合	108,229
4	JX日鉱日石エネルギー㈱	870,942	24	共英製鋼株式会社	100,455
5	コスモ石油株式会社	636,317	25	岸和田製鋼㈱	98,066
6	大阪府	603,730	26	セントラル硝子株式会社	97,952
7	宇部興産株式会社　堺工場	371,875	27	東洋製罐株式会社　茨木工場	96,569
8	株式会社中山製鋼所	363,269	**28**	**国立大学法人　大阪大学**	**94,216**
9	日新製鋼株式会社	220,658	29	株式会社　クボタ	82,227
10	関西電力株式会社	211,541	30	王子板紙株式会社　大阪工場	80,617
11	堺市	193,665	31	吹田市	78,950
12	ダイキン工業株式会社	188,561	32	大阪ガス株式会社	75,265
13	株式会社　ダイカン	171,736	33	茨木市	73,432
14	西日本電信電話株式会社	158,880	34	福山製紙株式会社	70,595
15	大阪製鐵株式会社	150,262	35	ダイハツ工業株式会社	66,356
16	パナソニック株式会社	139,593	36	武田薬品工業株式会社	66,205
17	不二製油株式会社	136,803	37	株式会社　栗本鐵工所	65,396
18	日本酢ビ・ポバール株式会社	129,465	38	株式会社　ハイドロエッジ	64,885
19	住友金属工業㈱　交通産機品カンパニー	121,855	39	日本生命保険相互会社	61,251
20	合同製鐵株式会社　大阪製鉄所	118,618	40	中山鋼業株式会社	60,917

1.4　論文の目的

大学は、社会の変革を担う人材の育成、知的基盤の形成やイノベーション創出などを通して今後も果たすべき役割が拡大するものと考えられるが、このような教育・研究活動の拡大・発展と、施設運営に関わるエネルギー消費量の低減や環境負荷低減を両立することは困難である。しかしながら上記のような背景から、大学施設においてもエネルギー消費の削減は責務と言える。

様々な施設が混在する大学施設においては、エネルギー消費の実態を体系的に捉え、それぞれ異なる消費特性を理解し、的確な省エネルギー戦略を立案することが重要となる。先述のとおり、大学施設に関するエネルギー消費構造の分析の事例は多いが、その分析に用いる根拠は年別・月別・日別の実測データが主であり、大学施設全体を対象とし、かつ建物単位での時刻別実測データなどを用いて総合的に分析した既往研究は見当たらない状況にあり、更なる詳細な分析が望まれる。また、省エネルギー対策の検討を行う上では用途別エネルギー需要の把握が欠かせないが、大学施設のみならず、一般に既存建物の多くは電力量計や熱量計など計測器の設置が十分ではない。

大阪大学では平成 23 年 6 月中旬より、主要 3 キャンパス（吹田・豊中・箕面）、延床面積約 93 万㎡の建物群において、主要建物ごと（計 246 箇所）に 30 分単位で電力消費量を計測・集約し、学内構成員向けポータルサイトにてリアルタイムに情報を閲覧できるシステム（以下、電力可視化

システム）を導入している。図-1.2 に電力可視化システムの閲覧画面を示す。

本研究では、幅広い分野の建物が集約している大阪大学を対象として、はじめに大学内の施設をエネルギー消費特性により文科系、理科系、大規模施設の 3 カテゴリーに分類して体系化するとともに、電力可視化システムの時刻別実測データを活用した詳細な分析により、これまでの既往研究では得られなかったエネルギー消費実態の把握を行う。

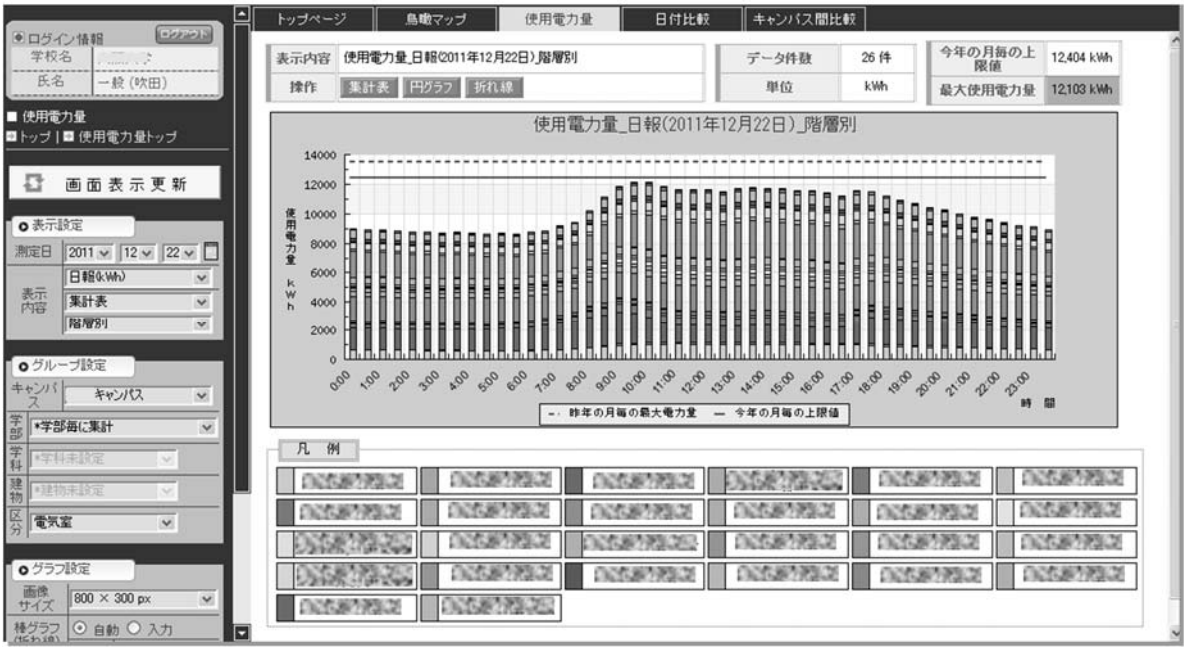


図-1.2　電力可視化システムの閲覧画面例

次に一次エネルギー消費量原単位が比較的高く、大阪大学の一次エネルギー消費量の過半を占める理科系施設を対象に、特定の研究室での系統回路単位での電力量実測により詳細な消費実態を明らかにする。ここで、東日本大震災以降の社会情勢を踏まえ、エネルギー消費量削減および電力ピークカットの両面において、どのような運用改善手法が効果的であるかを探るため、先に系統回路単位での実測を行った研究室を対象とし、各種の省エネルギー手法がもたらす低減効果を、シミュレーションツールを用いることで定量的に評価する。

研究室規模では計測器の追加設置により上記のような詳細分析が可能となるが、既存の建物規模、キャンパス規模での用途別エネルギー需要の把握は、計測器設置のコスト面での制約により現実的には困難である。そこで一般的に入手可能な情報で把握可能な情報に加え、シミュレーションを活用することで、建物規模、キャンパス規模でのエネルギー消費内訳を推計する手法の提案を行う。ここで、従来の推計法では一般に非空調用途のエネルギー需要は月変動がないことを前提としており、長期休暇期間など月によって需要が変動する大学施設では大きな誤差が生じることとなるが、本提案手法ではこの問題を解決し、推計精度を向上させることを目指した。さらに得られた内訳推計結果を用いて感度分析を行うことで、エネルギー消費構造の顕在化を試みた。また、建築設備の

高効率化による削減ポテンシャルの把握、実験機器・備品類の設置状況調査の分析等によりエネルギー消費量の低減に役立つ知見を得ることを目指した。

大規模施設では実験系や医療系のエネルギー消費が非常に大きいと推察され、これらの機器の省エネルギー化が大きな課題であるが、一方で大半の施設において中央熱源方式の空調システムが採用されている。いずれの施設でも熱源設備は設置後 20～30 年程度経過し、最新の技術に照らし合わせると大きな無駄を抱えながら運用されている可能性があり、熱源設備の改修に合わせて性能の検証を行うことは、エネルギー使用の合理化を行う上で非常に有効な手段となる。これまで古い施設では、電力量計、ガス量計、熱量計等の計測箇所が十分でないため実態把握が困難で、改善策を検討するための礎となる検証作業が容易ではなかった。そこで本研究では平成 5 年竣工、平成 24 年度に主に熱源設備の改修を目的とした ESCO 事業の公募が実施された医学部附属病院の熱源設備を対象とし、計測器の設置が十分でない中、シミュレーションを利用することでこの問題の解決を図った。これを踏まえ、熱源設備の最適化に寄与するデータの取得を目的として、運用フォルトの検証や、改修による省エネルギー効果の定量的評価、更なる改善の可能性を探るための感度分析等を行った。

本研究は、以上の分析や評価を行うことで、大学施設の省エネルギー化・低炭素化に有益となる知見を得ることを目的としている。総合大学である大阪大学は主要 3 キャンパスで敷地面積約 158 万㎡を保有する一つの都市であり、本研究で得られる知見や分析技法は、他大学のみならず他の業務部門の分析やエネルギー削減の検討にも発展・応用されることを期待している。

1.5　論文の構成

本研究の全体の構成を図-1.3 および以下に示す。

第 1 章：緒論

大学施設が属する業務部門の国内エネルギー消費動向と、法的な観点も含めた大学施設のエネルギー消費に関わる昨今の状況を確認するとともに、これまでの知見と解決されるべき課題を述べる。これらを踏まえ、本研究の目的を示す。

第 2 章：大規模総合大学施設のエネルギー消費実態と巨視的分析

大学施設のエネルギー消費を分析し、その特性の違いから学内施設を、カテゴリーⅠ：文科系、カテゴリーⅡ：理科系、カテゴリーⅢ：大規模施設の 3 つのカテゴリーに分類する。電力可視化システムの実測データを用いた気温感応度分析や簡易的な電力消費内訳推計により、大学施設のエネルギー消費実態を巨視的に捉える。

第 3 章：理科系研究室のエネルギー消費実測と運用改善によるエネルギー削減効果試算

第 3 章および第 4 章は、一次エネルギー消費量原単位が比較的高く、大阪大学の一次エネルギー消費量の過半を占める理科系の施設を分析対象とする。第 3 章では、特定の研究室での系統回路単位での電力量実測により詳細なエネルギー消費実態を明らかにする。実測結果を踏まえ、シミュレーションツールを用いることで、年間電力消費量削減／夏期ピーク電力削減／冬期ピーク電力削減の各目的において、各種運用改善対策がもたらす効果を定量的に評価する。

第 4 章：理科系施設のエネルギー消費内訳の推計と分析

本章は、広く理科系施設のエネルギー消費構造を明らかにすることを目的とする。設備に関わる情報として、一般的に入手可能もしくは最小限の費用で把握可能な情報、具体的には、内訳を推計するエリアの保有機器のデータベース、エリア全体の時刻別電力消費量および月別ガス使用量のみが把握できる条件において、シミュレーションソフトを利用することで、建物規模でのエネルギー消費内訳の推計手法を提案する。また、実際の理科系 2 施設にこの推計手法を適用してエネルギー消費内訳を推計するとともに、各種運用改善がもたらす効果の定量化を行う。

さらに、キャンパス規模での内訳の推計を行うため、簡易化した推計手法を提案し、約 10 万㎡分の理科系施設のエネルギー消費内訳を推計する。また、建物条件や使用状況の変化がもたらす感度分析や、改修による削減ポテンシャルの把握、効果的な機器更新方法の提案を行う。

これまでの分析結果から、理科系施設では 24 時間稼働する実験機器等の対策が重要と考えられるが、全学を対象に実施した実験機器・備品類の設置状況調査結果を踏まえ今後の課題を示す。

第 5 章：病院施設熱源のエネルギー性能評価

大規模施設の熱源設備に関わる省エネルギー性を評価するため、大規模施設の一次エネルギー消費量の 57%を占める医学部附属病院を対象に評価を行う。医学部附属病院では平成 24 年度に主に熱源設備の改修を目的とした ESCO 事業の公募が行われているが、本研究では医学部附属病院の熱源設備を対象とし、計測器の設置が十分でない中、シミュレーションを利用することで改修前の運用フォルトを明らかにし、改修後の省エネルギー効果を定量的に評価するとともに、更なる改善の可能性を探るため各種の感度分析を行った。

第 6 章：総括

各章で得られた知見をまとめ、大学施設におけるエネルギー消費の実態とその低減方法についての総括を行う。

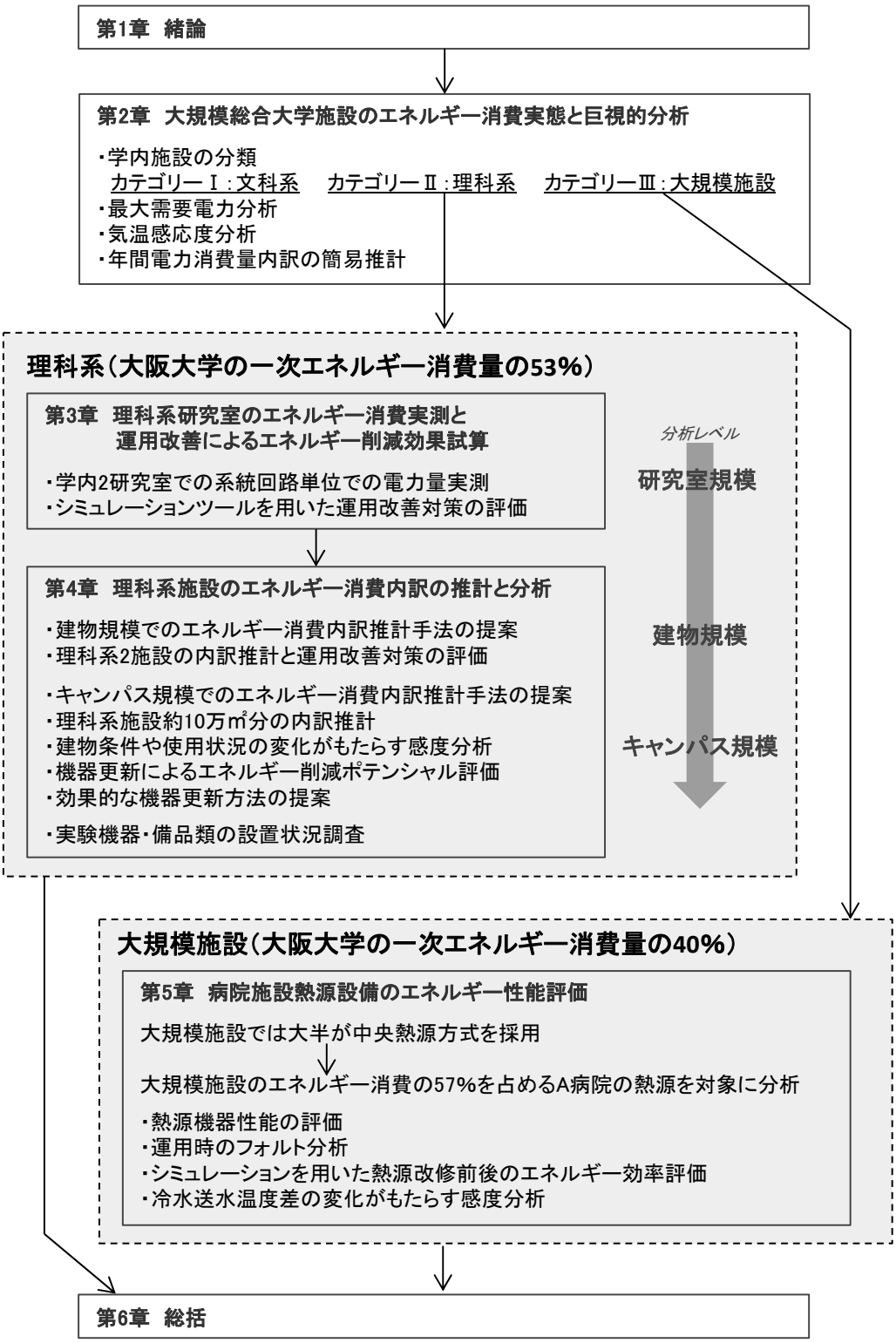


図-1.3　本論文の全体構成

参考文献

1.1） 経済産業省資源エネルギー庁:平成 24 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書), http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2013/index.htm，入手 2014-03-17

1.2） 文部科学省：文部科学統計要覧（平成 25 年版), http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/002/002b/1337986.htm，入手 2014-03-17

1.3） 東京大学 TSCP 室：http://www.tscp.u-tokyo.ac.jp/index.html，入手 2014-04-02

1.4） 京都大学：http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/profile/environment/saveenergy，入手 2014-04-02

1.5） 名古屋大学施設管理部：http://web-honbu.jimu.nagoya-u.ac.jp/fmd/5skannrika/index5f.html，入手 2014-04-02

1.6） 北海道大学サステイナブルキャンパス推進本部：http://www.osc.hokudai.ac.jp/，入手 2014-04-02

1.7） 三重大学国際環境教育研究センター：http://www.gecer.mie-u.ac.jp/，入手 2014-04-02

1.8） 河野匡志,柳原隆司,花木啓祐,磯部雅彦,坂本雄三:国立大学施設における環境負荷低減手法に関する研究　東京大学における CO_2 排出量削減に向けた実効ある対策の計画と実践の事例, 日本建築学会環境系論文集，Vol.76，No.666，pp.727-734，2011.8

1.9） 李演生,赤司泰義,渡辺俊行,福田健一,江島伊佐朗:省エネルギー手法による空調用エネルギー消費原単位の削減効果と PAL･CEC/AC 評価　大学キャンパスの環境・省エネルギー計画に関する研究，日本建築学会環境系論文集，No.564，pp.55-62，2003.2

1.10） Yuan Su, Hiroto Takaguchi, Fulin Wang:EVALUATION ON ENERGY CONSUMPTION CHARACTERISTICS AND EFFECT OF ENERGY CONSERVATION MEASURES IN UNIVERSITY CUMPUS BUILDINGS IN NORTHERN CHINA，日本建築学会環境系論文集，Vol.77，No.677，pp.605-614，2012.7

1.11） 永峯章,高草木明,成實悠樹,吉野大輔：東洋大学の 4 箇所のキャンパスにおけるエネルギー消費量に関する調査研究，日本建築学会環境系論文集，Vol.75，No.653，pp.661-668，2010.7

1.12） 迫田一昭,河野匡志,花木啓祐,野城智也,磯部雅彦:大学キャンパスにおける二酸化炭素削減策の立案・実行-東京大学サステイナブルキャンパスプロジェクト-，エネルギー・資源学会技術報告，Vol.30，No.4，pp.240-243，2009.7

1.13） 宋城基：多様な空調システムが混在する大学キャンパスのエネルギー消費実態調査研究，空気調和・衛生工学会論文集，No.156，pp.1-9，2010.3

1.14） 三瀬農士,佐藤春樹：慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおける電力および冷暖房需要の推定，日本建築学会環境系論文集，No.609，pp.55-62，2006.11

1.15） Azucena Escobedob, Sonia Briceñoa, Héctor Juáreza, Daniel Castilloa, Mireya Imazc, and Claudia Sheinbauma: Energy consumption and GHG emission scenarios of a university campus in Mexico, Energy for Sustainable Development ,2013.12

1.16） Won-Hwa Hong, Ju-Young Kim, Choun-Mi Lee and Gyu-Yeob Jeon: Energy consumption and the power saving potential of a university in korea: using a field survey, Journal of

Asian Architecture and Building Engineering, JAABE, Vol. 10, No. 2, pp. 445-452, 2011.11

1.17） 大阪大学広報・社学連携オフィス：大阪大学プロフィール 2013，2013.6

1.18） 大阪府：大阪府温暖化防止条例実績報告書, http://www.epcc.pref.osaka.jp/ondanka/jourei/h21_2/indextyu.html，入手 2011-10-7

第 2 章:大規模総合大学施設のエネルギー消費実態と巨視的分析

2.1　序論

本章では大規模総合大学のエネルギー消費特性を巨視的に把握することを目的に、多様な施設から成る大阪大学の実測データを活用し各種分析を行う。大学の施設群をその特性の違いから、カテゴリーⅠ：文科系、カテゴリーⅡ：理科系、カテゴリーⅢ：大規模施設の 3 つのカテゴリーに分類し、電力可視化システムの実測データを用いた最大需要電力分析、気温感応度分析や簡易的な電力消費内訳推計を行う。

2.2　大阪大学のエネルギー消費推移

大阪大学主要 3 キャンパスの一次エネルギー消費量と延床面積の推移を図-2.1 に、主要 3 キャンパス全体の一次エネルギー消費量原単位の推移を図-2.2 に、キャンパスごとの一次エネルギー消費量原単位の推移を図-2.3 に、構成員一人当たりの一次エネルギー消費量の推移を図-2.4 に示す。なお、本論文における一次エネルギー消費量は電力と都市ガスの合計値を示しており、一次エネルギー換算係数は、電力：9.76[MJ/kWh]、都市ガス：45[MJ/Nm3]を利用している。また、学内で使用する石油系エネルギー（灯油、軽油、重油、ガソリン）は、全体の 0.1%に満たない（平成 22 年度実績）ため省略している。図-2.1、図-2.2 で平成 19 年度に大きな変化がみられるが、これは実験施設がなくエネルギー消費密度が低い大阪外国語大学が箕面キャンパスとして大阪大学と統合した影響によるものである。

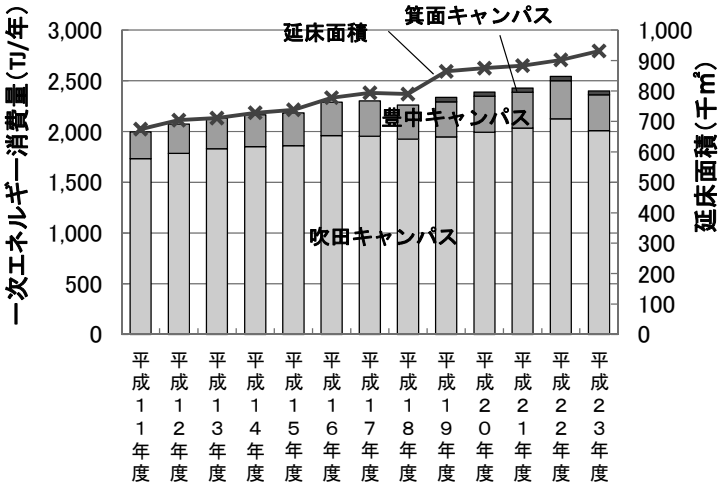


図-2.1　大阪大学の一次エネルギー消費量と延床面積の推移

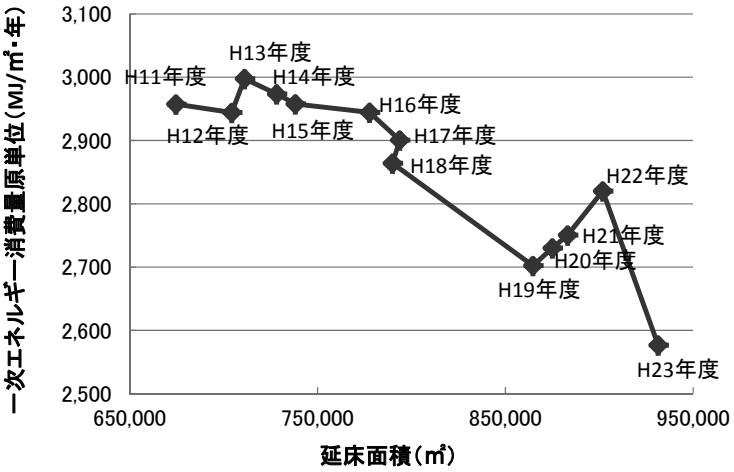


図-2.2　大阪大学の一次エネルギー消費量原単位の推移

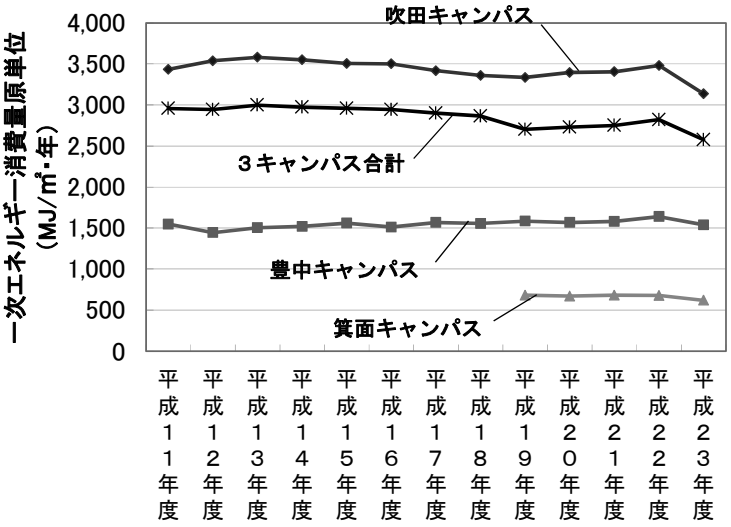


図-2.3　各キャンパスの一次エネルギー消費量原単位の推移

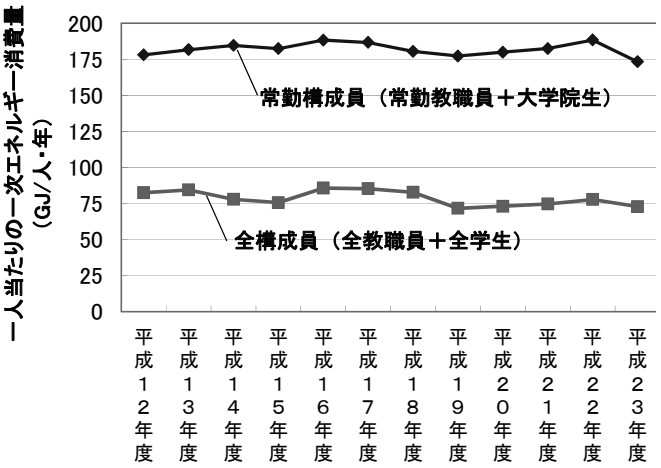


図-2.4　一人当たりの一次エネルギー消費量の推移

附属病院、理科系部局、理科系研究施設等が集約する吹田キャンパスは、平成 23 年度実績で大学全体の一次エネルギー消費量のうち約 84%を占め、文科系の部局が過半を占める豊中キャンパスに比べ、一次エネルギー消費量原単位は倍以上の値となっている。大学全体では延床面積の増に伴い、一次エネルギー消費量は増加傾向にあるが、単位面積当たりの原単位では、平成 19 年度と平成 23 年度を除くとほぼ横ばい状態と言える。詳細は後述するが、平成 23 年度は東日本大震災の影響により全学的な節電対策を行った年であり、大きなエネルギー削減効果が現れている。なお、構成員一人当たりのエネルギー消費量については顕著な増減は見られない。

2.3　エネルギー消費の特性による施設の分類

大学には多様な施設が混在しており、エネルギーの消費実態も異なる。図-2.5 には、平成 23 年度の大阪大学における各部局の延床面積と一次エネルギー消費量の関係を示す。

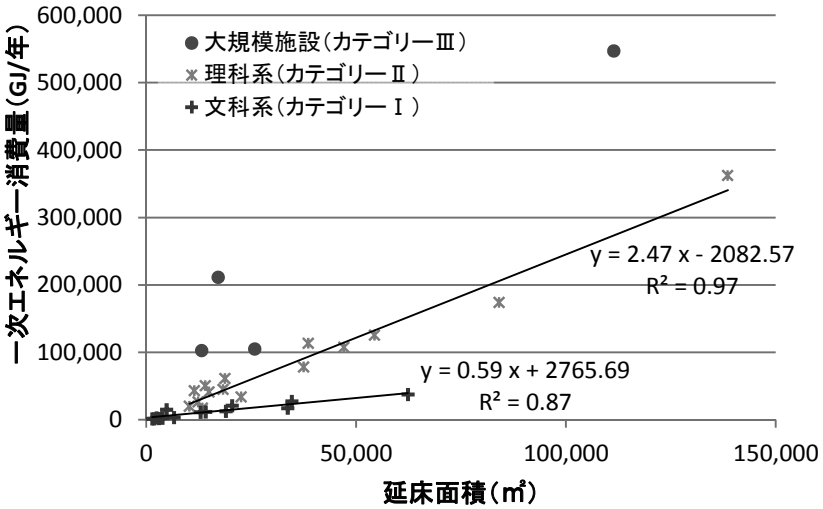


図-2.5　各部局の延床面積と一次エネルギー消費量

表-2.1　カテゴリー分類

カテゴリー	建物分類	部局名称
カテゴリーⅠ（文科系）	文科系・文科系研究施設	文科系学部・研究科（文学・人間科学・外国語学・法学・経済学）、言語文科研究科、社会経済研究所等
	本部・福利施設・共同施設	本部事務機構、保健センター、福利会館、総合学術博物館等
カテゴリーⅡ（理科系）	理学系	理学部、理学研究科
	医学系	医学部、医学研究科
	歯学系	歯学部、歯学研究科、歯学部附属病院
	薬学系	薬学部、薬学研究科
	工学系	工学部、工学研究科
	基礎工学系	基礎工学部、基礎工学研究科
	情報科学系	情報科学研究科
	生命機能系	生命機能研究科
	理科系研究施設	微生物研究所、産業科学研究所、蛋白質研究所、接合科学研究所、免疫フロンティア研究センター、理科系研究センター等
カテゴリーⅢ（大規模施設）	医学部附属病院	医学部附属病院
	全国共同利用施設	核物理研究センター、サイバーメディアセンター、レーザーエネルギー学研究センター

ここで文科系の施設、理科系の施設、大規模施設（医学部附属病院、全国共同利用施設）ではエネルギー消費密度に顕著な差違を読み取ることができる。そこで本研究ではエネルギー消費密度の違いにより文科系：カテゴリーⅠ、理科系：カテゴリーⅡ、大規模施設：カテゴリーⅢと定義し、分析を行うものとする。なお、大規模施設は大半が中央熱源プラントを保有する施設となっている。各カテゴリーに含まれる建物分類および部局名を表-2.1 に示す。

一次エネルギー消費量原単位の平均値は、カテゴリーⅠ：765MJ/㎡・年、カテゴリーⅡ：2,413 MJ/㎡・年、カテゴリーⅢ：5,738 MJ/㎡・年となっており、理科系は文科系の 3 倍以上、大規模施設は理科系施設の 2 倍以上の値を示し、大きな差違があることが分かる。

2.4　平成 23 年度の節電対策による効果

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の影響による節電活動により、図-2.2 に示すとおり平成 23 年度の一次エネルギー消費量原単位は前年度比-8.5%と大きな削減が達成された。本節ではこの特徴的な削減について検証する。大阪大学では監督官庁および関西電力の要請を受け、夏季（7～9 月）：最大需要電力・前年比 15%削減、冬季（12 月～3 月）：最大需要電力・前年同月比 10%削減という数値目標を掲げた全学的な節電活動を実施した。具体的な対策としては、切迫な対応が必要であったため設備改修工事などのハード的対策はごく僅かで、空調設定温度の緩和、照明の間引き、実験のスケジュール変更、自家発電機の活用等、使用抑制が主な対策であったが、電力可視化システムを活用することなどで、結果として吹田・箕面キャンパスは全日目標を達成するなど大きな節電効果が得られている。

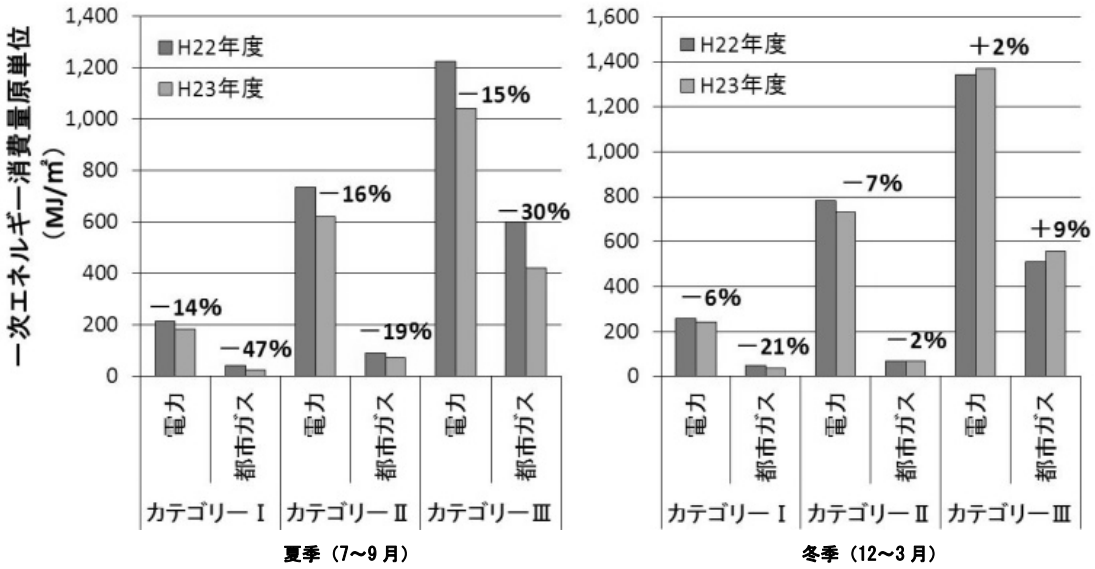


図-2.6　平成 23 年度の一次エネルギー消費量原単位の削減実績

今回の対策は、社会的要請に添って最大需要電力を低減させることが主目的であったが、都市ガスを含めた一次エネルギー消費量原単位の削減にも繋がっている。図-2.6 に前年度との比較をカテゴリー別に示す。電力はカテゴリー間の差は小さく、夏季は 14～16%削減、冬季は 6～7%削減という結果であった。なお、カテゴリーⅢは一部の研究施設において夏季の実験量を減らし、逆に冬季の実験量を増やしたことが影響している。都市ガスについては、削減率は一律ではなくカテゴリー間での使用用途の差が影響しているものと考えられる。

図-2.7 には月別の一次エネルギー消費量原単位の推移（前年度比較）を示す。都市ガスは、7～9、12～3 月の節電期間以外は前年度との差が小さいが、電力については、夏季の節電期間後も一定の削減量があり、照明の間引きや各種設定調整などによる削減効果が継続していることを示唆する。

図-2.8 には、平成 23 年度の一次エネルギー消費量原単位の対前年度比率を示す。大学全体では約 9%の削減であるが、全ての建物分類で減少しており、その差違は比較的小さいことが確認できる。

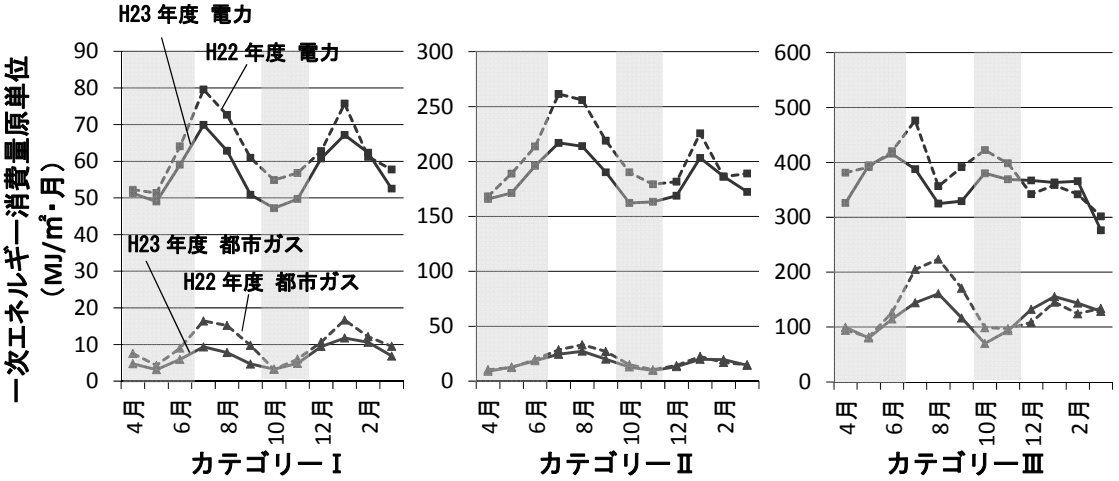


図-2.7　平成 23 年度の月別一次エネルギー消費量原単位（前年度比較）

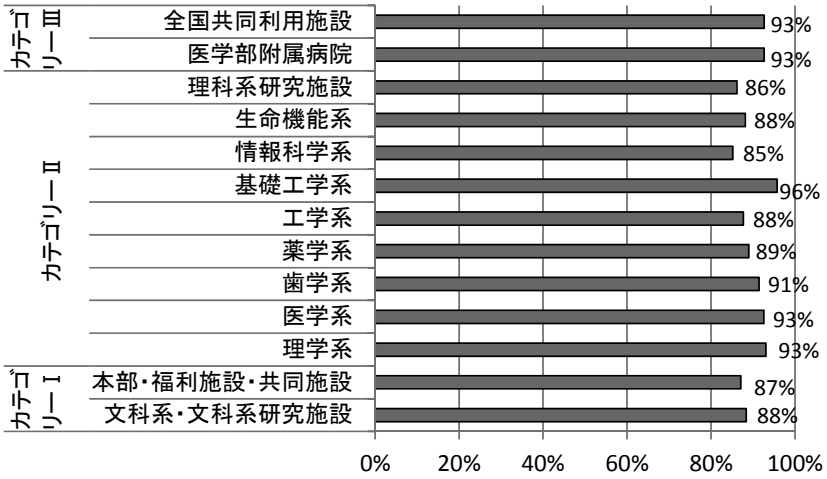


図-2.8　平成 23 年度一次エネルギー消費量原単位の対前年度比率

2.5　大阪大学のエネルギー消費に関する巨視的分析

本節では電力可視化システムの計測を開始した平成 23 年度以降のデータを用い、大阪大学のエネルギー消費特性に関して分析を行う。東日本大震災の影響による節電対策を行った年のデータをもとにしていることに留意する必要があるが、図-2.8 で示した通り建物分類間での削減率の差は比較的小さく、消費特性の比較分析においては有効であると考える。

2.5.1　一次エネルギー消費量

平成 23 年度のカテゴリー別の延床面積の割合を図-2.9 に、年間一次エネルギー消費量の割合を図-2.10 に示す。延床面積の割合はカテゴリーⅠ：24%、カテゴリーⅡ：58%、カテゴリーⅢ：18%に対し、一次エネルギー消費量の割合はカテゴリーⅠ：７%、カテゴリーⅡ：53%、カテゴリーⅢ：40%となっており、大学全体の省エネルギーを検討する上では、カテゴリーⅡ、Ⅲの理科系、大規模施設の影響が非常に大きいことが分かる。

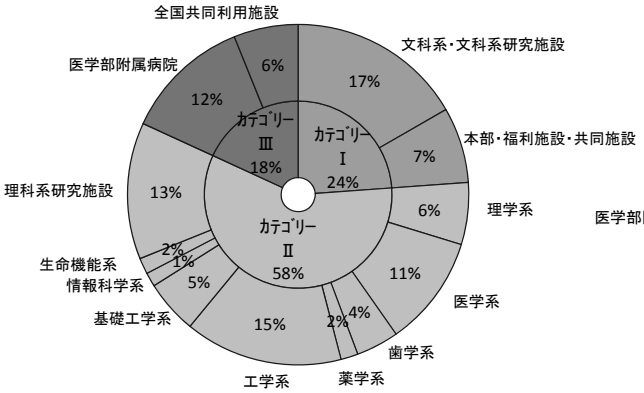


図-2.9　延床面積の割合

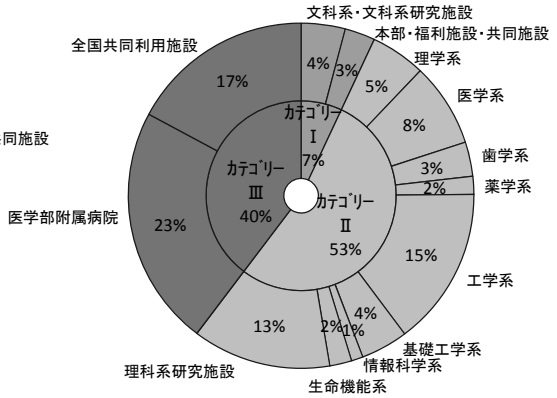


図-2.10　年間一次エネルギー消費量の割合

図-2.11 には建物分類ごとの一次エネルギー消費量原単位を示す。加速器装置、大型計算機、高出力レーザー等を利用する全国共同利用施設はエネルギー消費密度が極めて高く、カテゴリーⅡでは生命機能系を除き 2,000～2,700 MJ/㎡・年程度、文科系・文科系研究施設は 649 MJ/㎡・年と、用途によって特徴的な差がある。なお、カテゴリーⅡの内、生命機能系や理科系研究施設の中でも試料保存用のフリーザーを多く保有する施設は 3,000MJ/㎡・年を超えるものが多く、24 時間稼働機器の影響が大きいものと考えられる。大阪大学全体の平均値は 2,619 MJ/㎡・年であるが、文献値[2.1)]では、病院（一般）：3,060MJ/㎡・年、大学（医学系）3,550 MJ/㎡・年、大学（医学系除く）：1,300 MJ/㎡・年を示しており、特に、大阪府災害拠点病院に指定され、三次救急医療機関として 24 時間体制で高度医療を行う本学の医学部附属病院は、文献値に比べて高い傾向が確認できる。

図-2.12 には構成員一人当たりの一次エネルギー消費量を示す。理科系研究施設や全国共同利用施設は一人当たりの消費量が多く、逆に文科系・文科系研究施設は学部生を含む全構成員当たりでは非常に小さな値を示すことが分かる。なお、医学部附属病院、及び歯学部附属病院を含む歯学系は

患者数を考慮していないため参考値とする。

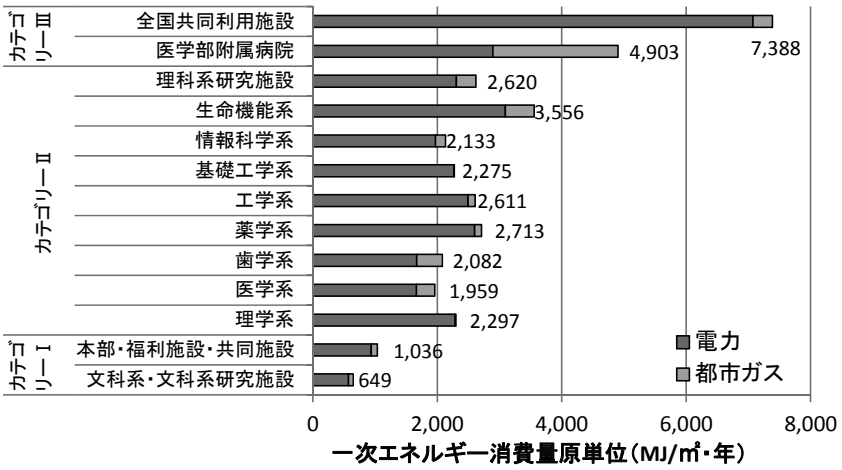


図-2.11　建物分類ごとの一次エネルギー消費量原単位

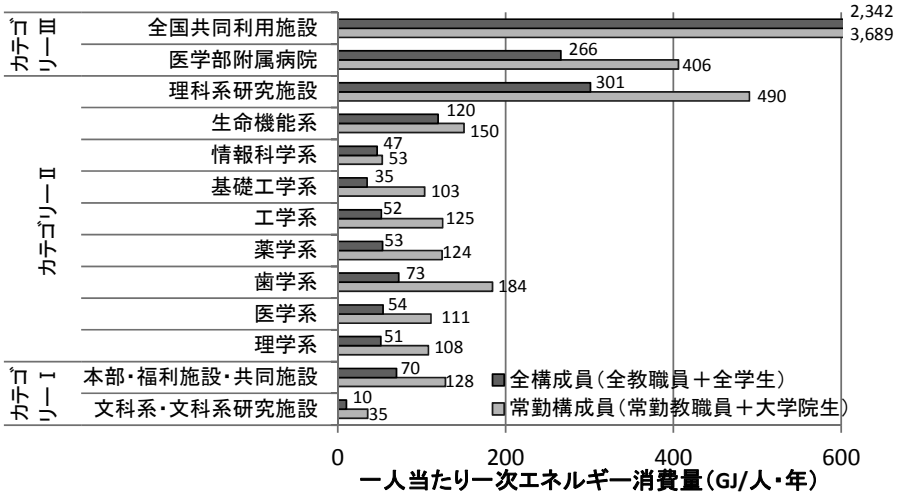


図-2.12　建物分類ごと一人当たりの一次エネルギー消費量

2.5.2　電力消費

本項では、平成 23 年度実績において大阪大学の一次エネルギー消費量の約 85%を占める電力消費について述べる。なお、分析には電力可視化システムのデータを用いるが、本システムは平成 23 年 6 月中旬に供用を開始しているため、分析には平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月の 1 年間の実測データを用いている。

2.5.2(1)　需要率

図-2.13 に平成 23 年度夏季におけるフィーダーごとの変圧器容量と需要率の関係を示す。省エネルギーを目的に無負荷損を抑えるためには、適切な変圧器容量の設定が望ましいが、相対的に変圧

器容量が小さいカテゴリーⅠでは、需要率をやや高く保てる傾向にあることが分かる。特に理科系施設では、将来の電源増設対応目的以外にも、計画時における安全率の過大な設定が影響しているものと推察され、容量の適正化が課題と言える。

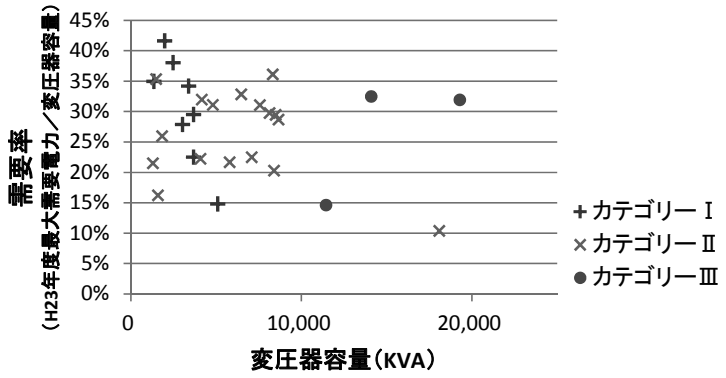


図-2.13　フィーダーごとの変圧器容量と需要率の関係

2.5.2(2)　時刻別電力消費

電力消費特性を詳細に把握するため、電力可視化システムで得られる時刻別電力消費データを用い

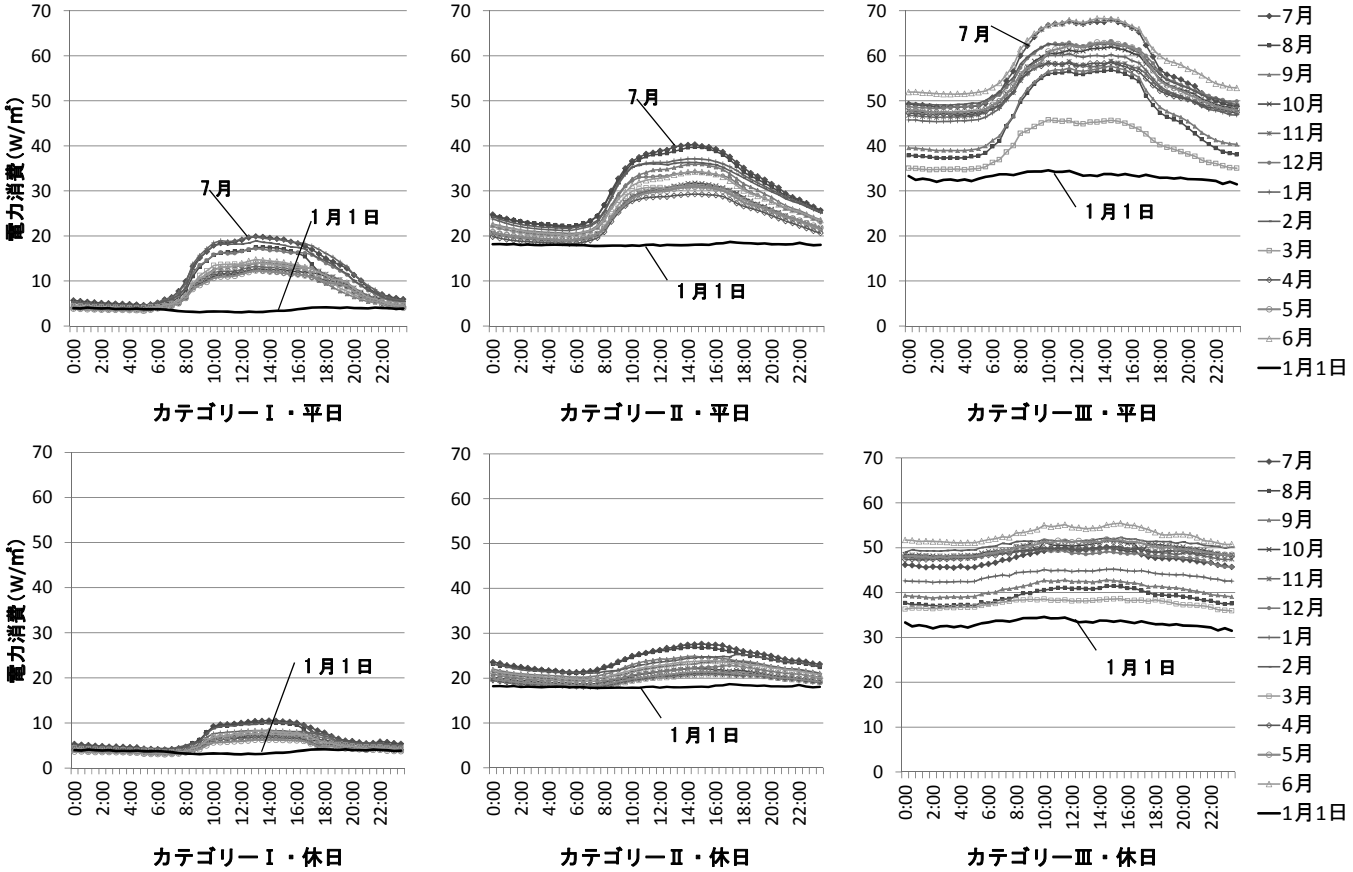


図-2.14　カテゴリーごとの電力日負荷曲線（上段：平日、下段：休日）

て分析を行った。

図-2.14 に、カテゴリーごとの各月の平均値および 1 月 1 日の電力日負荷曲線を平日・休日別に示す。なお、本章における休日とは土・日・祝日および年末年始を示す。カテゴリー間では時刻別消費電力の最小値（ベース電力）に大きな差違があることが分かる。ベース電力は平日と休日の比較において差は小さい。また 1 月 1 日は年間で活動量が最も少ない日であると考えられるが、一日を通してほぼ一定量の消費があることから、年間を通して昼夜問わず人の活動に関わらず発生する電力消費が、終日一定量存在することが推察できる。

図-2.15 においては、より詳細に建物分類間の負荷特性の差違を確認するため、大阪大学全体の実績において、電力量・最大需要電力量とも最大を記録した 7 月を抽出し、月平均の電力日負荷曲線を建物分類ごとに示した。ベース電力分を除く日中の変動分をみると、建物分類間の差は比較的小さいことが分かる。また、医学部附属病院や歯学部附属病院を抱える歯学系は他施設と比べて立ち上がり時刻が早いなどの特徴も読み取ることができる。

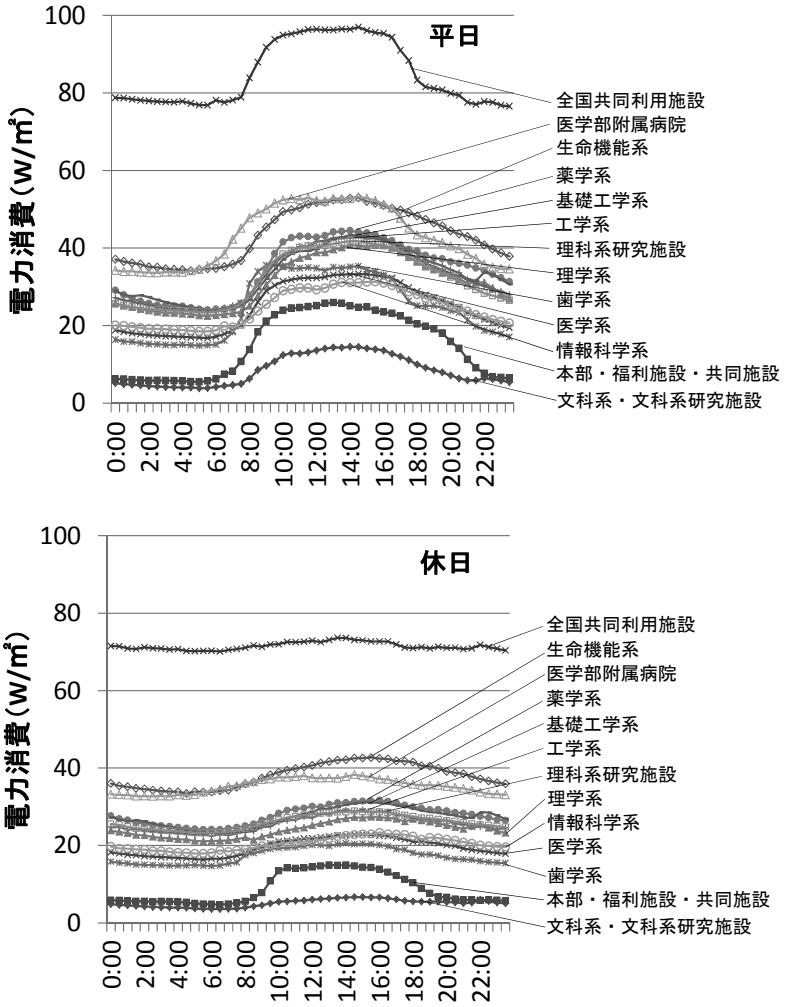


図-2.15　ピーク月（7 月）おける建物分類ごとの電力日負荷曲線（上段：平日、下段：休日）

次式（2.1）（2.2）により与えられる、夜間の最小電力消費率：R_{Ni}と休日ピーク時の電力消費率：R_{Ho}の７月における関係を図-2.16 に示す。ここで、平日の最小電力を P_{Ws} [W/㎡]、平日・休日の最大電力をそれぞれ P_{Wm}・P_{Hm} [W/㎡]とする。

夜間の最小電力消費率､休日ピーク時の電力消費率ともカテゴリーⅢ＞カテゴリーⅡ＞カテゴリーⅠの順に高くなっており、夜間の電力消費率が高いと休日の電力消費率も高くなる傾向が把握できる。

$$R_{Ni}=P_{Ws}／P_{Wm} \qquad ・・・・・(2.1)$$

$$R_{Ho}=P_{Hm}／P_{Wm} \qquad ・・・・・(2.2)$$

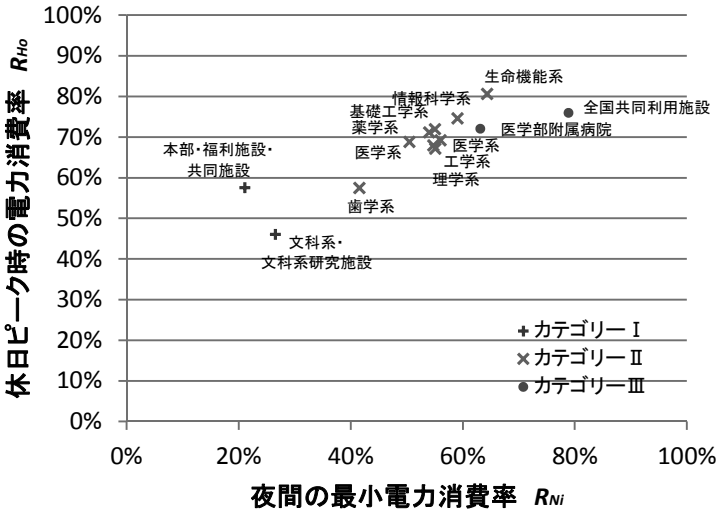


図-2.16　ピーク月（7 月）おける夜間の最小電力消費率と休日ピーク時の電力消費率の関係

2.5.2(3)　最大需要電力

一般に電力平準化や基本料金低減のためには最大需要電力の抑制が必要となるが､東日本大震災以降、社会的要請として以前にも増して重要な意味合いを持つ。ここで、電力消費をその日負荷曲線の特性によって、

・「①ベース分」：人の活動に関係しない電力消費

・「②活動分」：人の活動に伴って必要となる空調以外の電力消費

・「③非 24H 空調」：人の活動に伴って必要となる空調用電力消費

と分類し、図-2.17、図-2.18 において、カテゴリーⅠ・Ⅱのピーク月（７月平均）ピーク時の電力消費の内訳を推計した。なお､カテゴリーⅢは実験稼働の有無により電力量が大きく変動するため、ここでは推計を省略している。

「①ベース分」は 2.5.2(2)で得られた知見に沿い、休日のベース電力の値とする。図-2.14 における需要の変動は気温変化に伴う空調用消費電力の変動の影響が大きいと考えられるため、「活動分」

は平日の需要が最も少ない月（以降、非空調月）を参照（カテゴリーⅠ：5 月、カテゴリーⅡ：4 月）し、当該月の平日ピーク電力から休日ベース電力の値を減じたものとする。7 月のピーク電力から先に求めた「①ベース分」と「②活動分」を差し引いた値を「③非 24H 空調」とした。

結果、カテゴリーⅠでは「②活動分」と「③非 24H 空調」で全体の 79%を占め、最大需要電力の抑制には、一般照明・OA 機器・一般空調等、人の活動に伴って必要となる用途の対策が効果的であるのに対し、カテゴリーⅡでは 53%が「①ベース分」であり、最大需要電力に対しても 24 時間稼働している機器の影響が大きいことを示唆する。

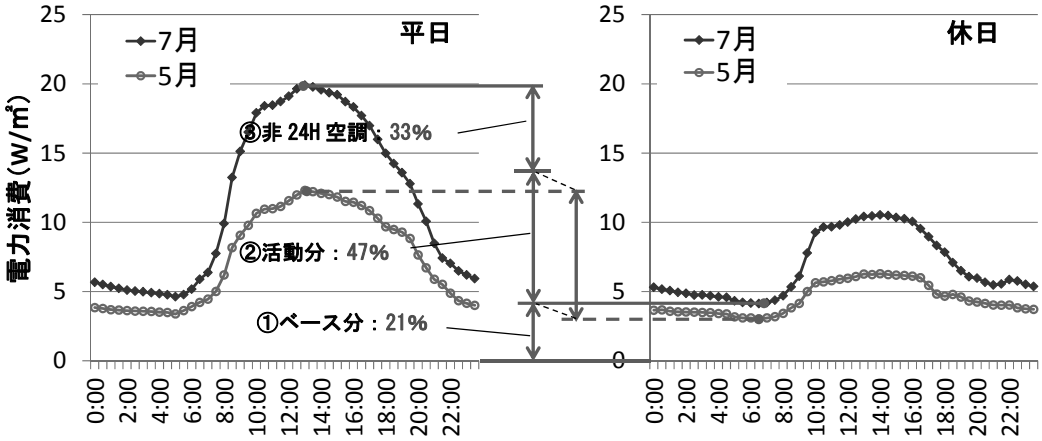


図-2.17　カテゴリーⅠのピーク時における電力内訳推計

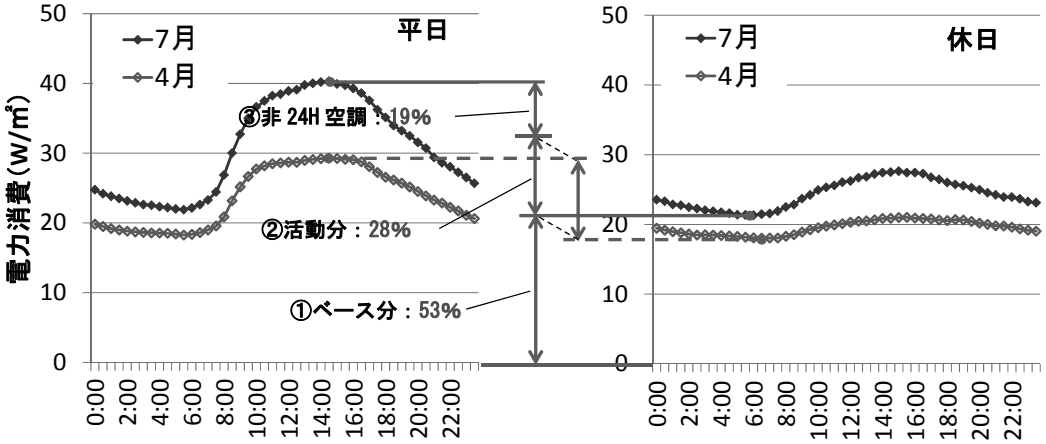


図-2.18　カテゴリーⅡのピーク時における電力内訳推計

図-2.19 では夏季（7～9 月）における大阪大学の日最大需要電力と日最高気温の関係を示す。日最高気温は気象庁発表[2.2)]の「大阪府豊中」のデータによる。分析にあたっては、土・日・祝日、夏季一斉休業（お盆）期間のデータは除いている。また、全国共同利用施設のうち、実験稼働の有無に

より電力量が大きく変動する核物理研究センターはデータから除いた。休講日は大学が運営するキャンパス間の学内連絡バスの運休日を参考に設定している。

最高気温の上昇に伴い、日最大需要電力も増加する傾向が読み取れる。また、講義を行う通常日において電力デマンドが発生しやすい。図から通常日においては最高気温が１℃上昇すると、約 1.1%最大需要電力が上昇することが分かった。

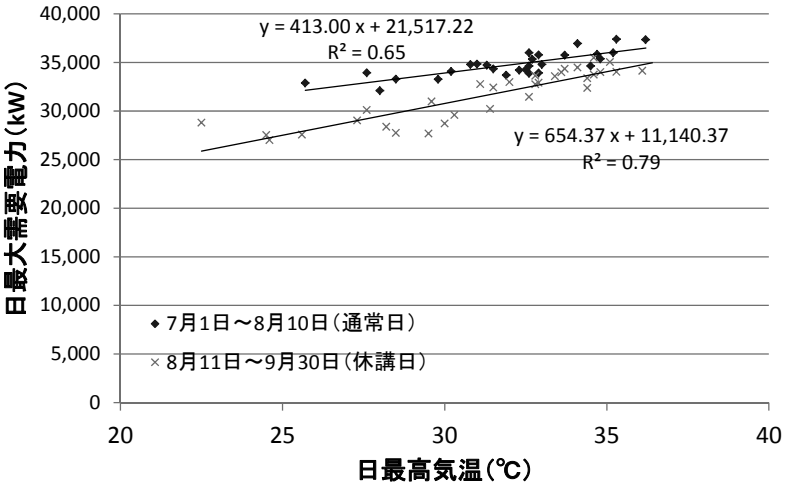


図-2.19　日最大需要電力と日最高気温の関係

2.5.2(4)　気温感応度分析

図-2.20 には建物分類ごとの日電力消費量と日平均気温の関係を示す。日平均気温は気象庁発表 [2.2)] の「大阪府豊中」のデータによる。2.5.2(3)と同様に、土・日・祝日、年末年始、夏季一斉休業（お盆）期間のデータは除いている。また、全国共同利用施設のうち、実験稼働の有無により電力量が大きく変動する核物理研究センターはデータから除いた。休講日は大学が運営するキャンパス間の学内連絡バスの運休日を参考に設定している。

学部を抱える建物用途は休講日に日電力消費量が低下する傾向が確認でき、特にカテゴリーＩに顕著である。また、日電力消費量が小さい建物分類ほど、相対として気温変動の影響を受けやすいことが分かる。さらに、カテゴリーＩにおいては、冷房期より暖房期において日電力消費量が多くなる傾向にあるが、これは内部発熱量の少なさが一因と考えられる。

図-2.20 内には通常日の近似曲線を示すが、本曲線における日電力消費量の最小ポイントは、空調需要が最も少なく、冷房／暖房需要の分岐点であると考えることができる。ここで、この分岐点における日平均気温（冷房／暖房需要の分岐温）と日消費電力量の関係を図-2.21 に示す。分岐温は建物分類によって最大 5℃程度の差（期間にして一ヶ月程度）があり、日電力消費量が多いほど分岐温が低いことが分かる。日電力消費量の多さは内部発熱量も多いことを意味し、外気温が低い時期でも冷房需要が必要となることを示唆する。

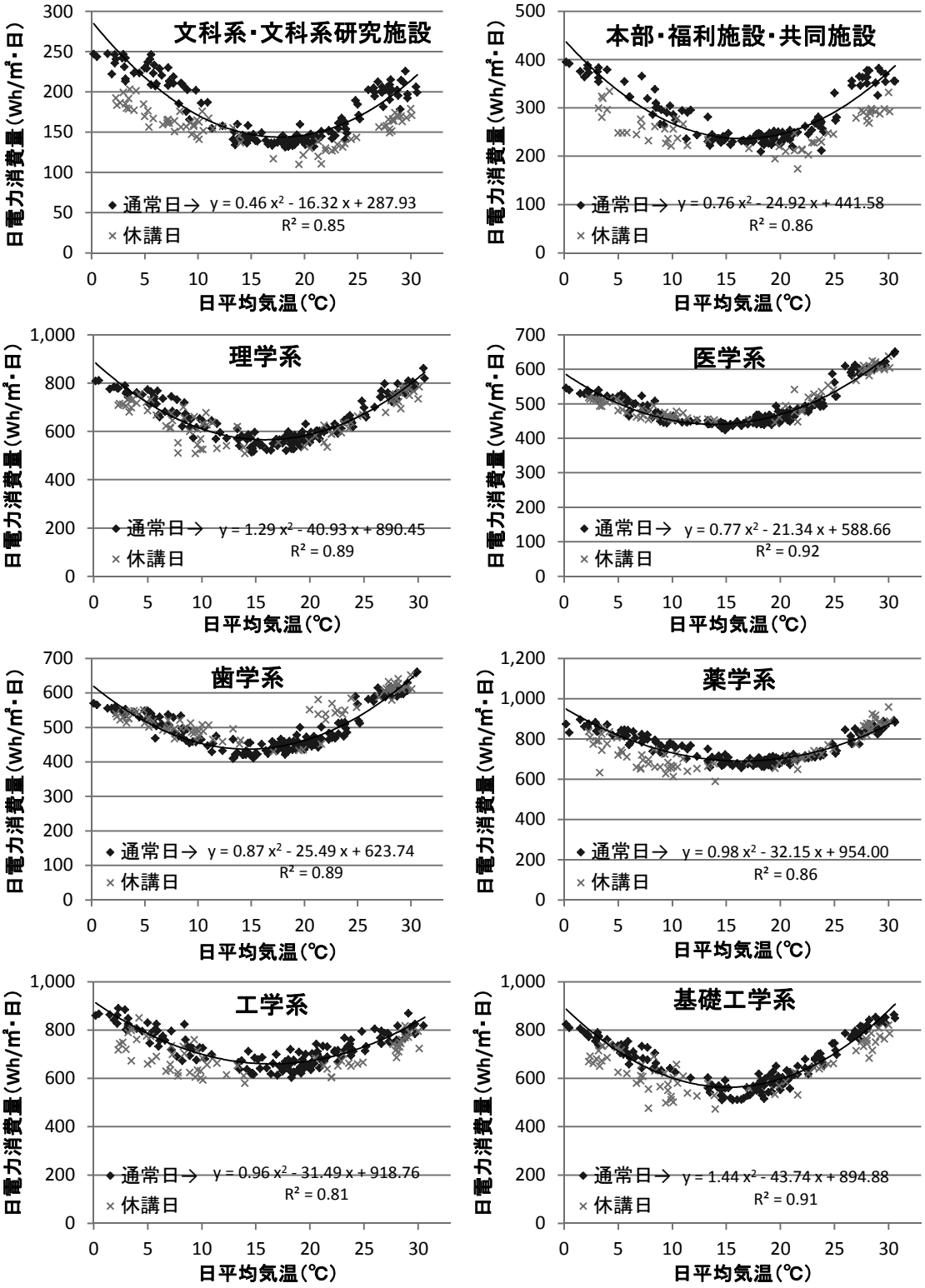


図-2.20(1)　日電力消費量と日平均気温の関係

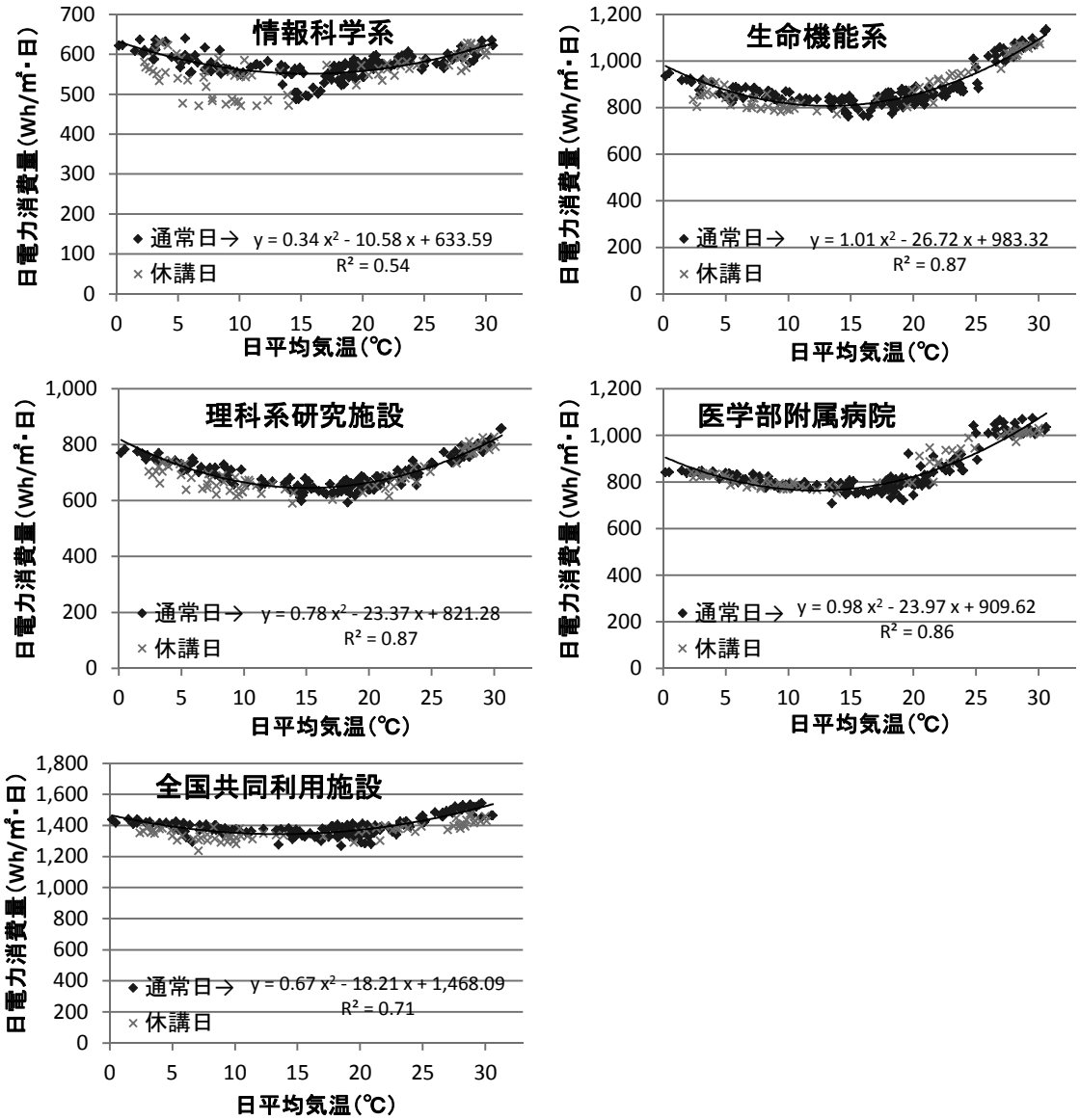


図-2.20(2)　日電力消費量と日平均気温の関係

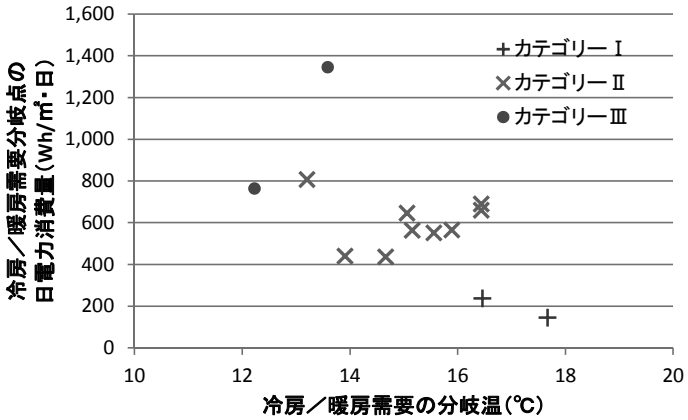


図-2.21　冷房／暖房需要分岐点の気温と日電力消費量の関係

2.5.2(5)　年間電力消費量の簡易内訳推計

用途別のエネルギー消費量を推計する既往研究は多いが [2.3)~2.6)]、時刻別の電力日負荷曲線を用いた事例は見当たらない。ここでは、電力可視化システムにより蓄積された実測データを用い、新たな視点で年間の電力消費量の内訳推計を行う。

分離する内訳は 2.5.2(3)にて示した「①ベース分」、「②活動分」、「③非 24H 空調」とする。なお、推計は表-2.1 で示した建物分類ごとに月別に行う。推計手法は 2.5.2(3)の考えに沿うものだが、図-2.22 に工学系の 7 月の例を挙げ、電力消費量の内訳推計の過程を示す。なお、全国共同利用施設については、エネルギー使用量が他施設に比べて多いことからさらに細分化し部局ごとに推計を行った。

・ステップ 1 :「①ベース分」の算定

人の活動に関係しない電力消費量は、各月の休日ベース電力量と推測できる。よって、7 月においては 7 月休日ベース電力量を「①ベース分」とする。

・ステップ 2 :「②活動分」の算定

月の違いにより電力需要が大きく変化するのは空調用途である。「②活動分」の算出においては、はじめに平日の需要が最も少ない月（非空調月）を特定（工学系の場合 4 月）し、当該月の平日・休日それぞれの日電力消費量から当該月の休日ベース電力量を差し引いた電力消費量を算出する。この電力消費量が平日・休日それぞれにおいて人の活動に伴って必要となる空調以外の電力消費量と考え、通年においてこの電力量が発生するものとし、この電力消費量に月の日数を乗じることで「②活動分」を算出する。なお、月により活動量も多少の変化があることは図-2.20 からも推察されるが、今回その影響は無視する。

・ステップ 3 :「③非 24H 空調」の算定

ステップ 1、2 で求めた「①ベース分」および「②活動分」を 7 月の全電力消費量から差し引き、残った電力消費量を「③非 24H 空調」とする。

以下、建物分類 X における n 月の電力消費量の内訳推計手法の定義式を(2.3)～(2.5)に示す。

$$E_base(n)_X = Pb_{av(H)}(n)_X \times 24[h] \times Dall(n) \quad \cdots (2.3)$$

$$\begin{aligned} E_activity(n)_X &= (E_{}_{Non\text{-}AC\text{-}mo(W)}_X - Eb_{}_{Non\text{-}AC\text{-}mo(H)}_X) \times Dw(n) \\ &\quad + (E_{}_{Non\text{-}AC\text{-}mo(H)}_X - Eb_{}_{Non\text{-}AC\text{-}mo(H)}_X) \times Dh(n) \end{aligned} \quad \cdots (2.4)$$

$$E_non\text{-}24hAC(n)_X = Eall(n)_X - E_base(n)_X - E_activity(n)_X \quad \cdots (2.5)$$

ここで、

$E_base(n)_X$	: 建物分類 X の n 月の「①ベース分」電力消費量	[MWh/月]
$E_activity(n)_X$	: 建物分類 X の n 月の「②活動分」電力消費量	[MWh/月]
$E_non\text{-}24hAC(n)_X$	: 建物分類 X の n 月の「③非 24H 空調」電力消費量	[MWh/月]
$Pb_{av(H)}(n)_X$	: 建物分類 X の n 月の休日ベース電力	[MW]

$E_{Non\text{-}AC\text{-}mo(W)}_X$	：建物分類 X の非空調月（平日）の日電力消費量	[MWh/日]
$E_{Non\text{-}AC\text{-}mo(H)}_X$	：建物分類 X の非空調月（休日）の日電力消費量	[MWh/日]
$Eb_{Non\text{-}AC\text{-}mo(H)}_X$	：建物分類 X の非空調月（休日）のベース電力量	[MWh/日]
$Eall(n)_X$	：建物分類 X の n 月の月電力消費量	[MWh/月]
$Dall(n)$	：n 月の総日数	[日]
$Dw(n)$	：n 月の平日数	[日]
$Dh(n)$	：n 月の休日数	[日]

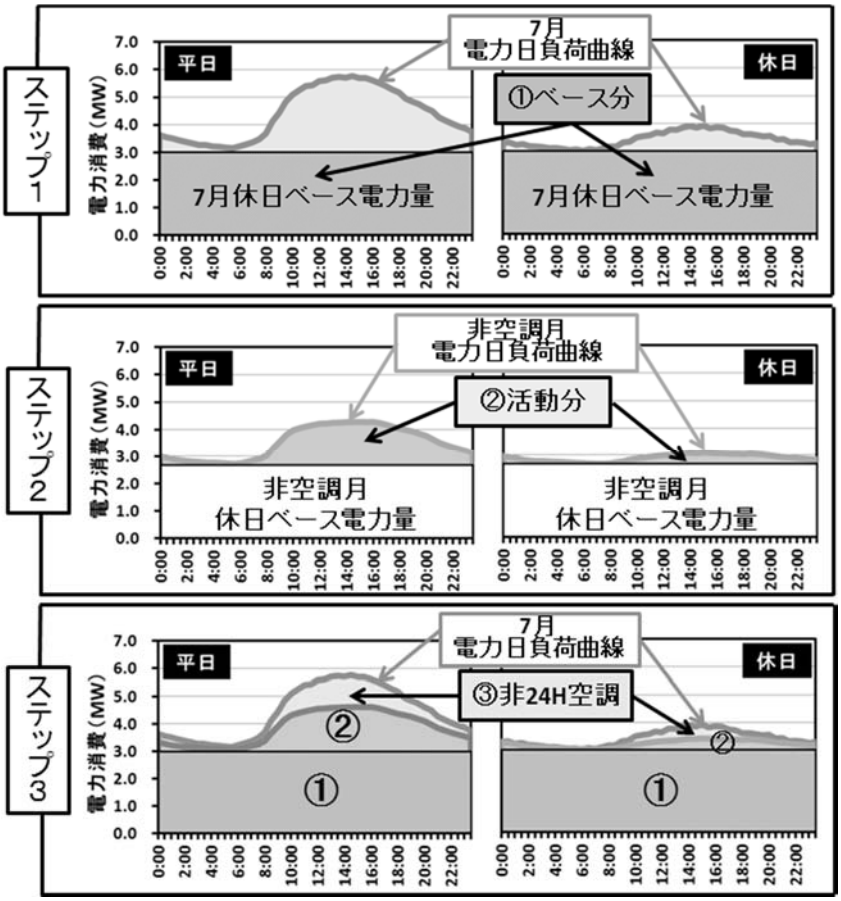


図-2.22　電力消費量の内訳推計の手法（工学系・７月の例）

なお､核物理研究センターの推計においては､実験稼働の有無により電力量が大きく変動しており、その影響を考慮するため､「①ベース分」を算出する際には休日ベース電力量だけでなく、平日ベース電力量も用いて平日・休日別に推計を行った。また非空調月については、カテゴリーⅡや医学部附属病院と同じ 4 月に設定した。

図-2.23 に大学全体での年間電力消費量の内訳推計結果を示す。①ベース分：79%､②活動分：16%､③非 24H 空調：５%となっており、人の活動に伴って必要となる電力消費量は 21%のみで、79%

もの電力量が人の活動に関係しない電力量であることが分かった。前述の通り、大阪大学においては一次エネルギー消費量の約 85%を電力が占めるが、大学施設の省エネルギー・低炭素化を検討する上では、電力のベース分の主な構成要素と推察される 24 時間稼働の実験機器、計算機類、フリーザー、医療機器及びそれらに付随する 24 時間空調等の対策が重要と考えられる。

図-2.24 には、カテゴリーごとに集計した月別の電力消費量原単位の内訳推計結果を示す。①ベース分の電力消費量はカテゴリーⅢ＞カテゴリーⅡ＞カテゴリーⅠの順に多く顕著な差があるが、②活動分、③非 24H 空調についてはカテゴリー間の差は比較的小さいことが確認できる。

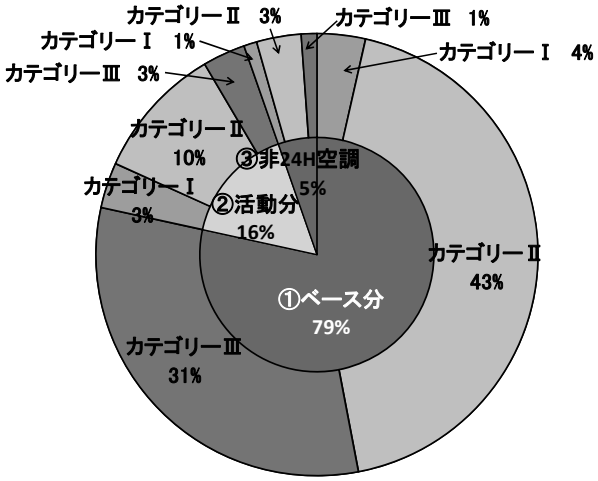


図-2.23　大阪大学における年間電力消費量の内訳推計結果

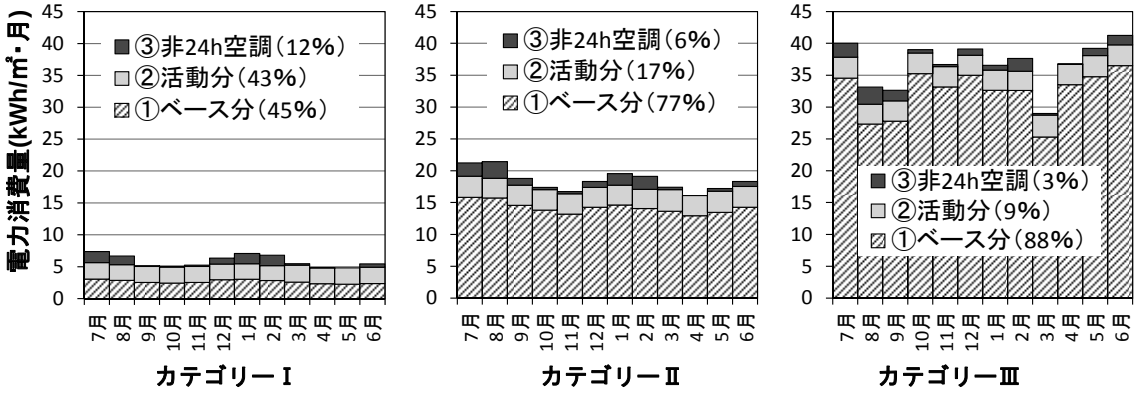


図-2.24　大阪大学における年間電力消費量の内訳推計結果

建物分類ごとの特徴を把握するため、図-2.25 には、①ベース分の電力消費量原単位と全電力消費量原単位の関係、図-2.26 には①ベース分以外の電力消費量原単位（②活動分＋③非 24H 空調）と全電力消費量原単位の関係を示す。①ベース分以外の電力消費量原単位は人の活動に伴って必要となる電力であるが、図-2.26 より、全電力消費量原単位の差に比べると建物分類間の差は小さいこと

が分かる。一方、図-2.25 より、①ベース分の電力消費量原単位が増加すると全電力消費量原単位も顕著に増加する傾向が確認でき、①ベース分の大きさが、年間の電力消費量に大きく影響していることが分かった。

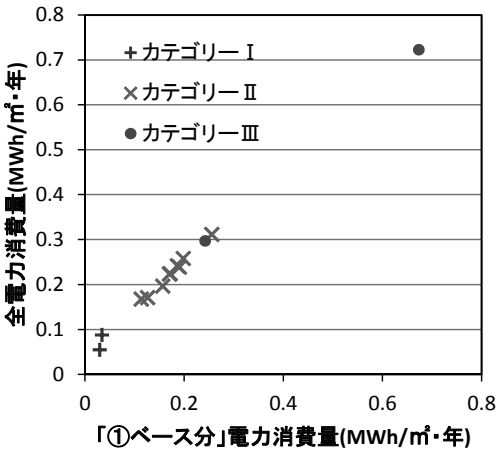


図-2.25　①ベース分の電力消費量原単位と全電力消費量原単位の関係

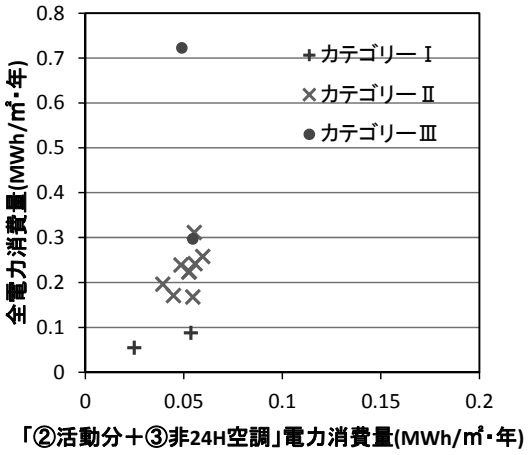


図-2.26　②活動分＋③非 24H 空調の電力消費量原単位と全電力消費量原単位の関係

2.6　まとめ

本章では、大規模総合大学施設のエネルギー消費特性を巨視的に分析することを目的に、文科系学部・研究科、理科系学部・研究科、大規模研究施設、附属病院等、多様な施設から成る大阪大学において、主要建物ごとの時刻別電力負荷曲線の実測データを活用し、各種解析を行った。得られた主な知見を以下に示す。

1）大学施設には多様な施設が混在しているが、文科系、理科系、大規模施設ではエネルギー消費密度に顕著な差違があり、大阪大学では理科系は文科系の 3 倍以上の年間一次エネルギー消費量原単位がある。また理科系は 2,000～2,700MJ/㎡・年程度だが、フリーザーを多く保有する施設は 3,000 MJ/㎡・年を超えるものが多く、24 時間稼働機器が影響しているものと推察される。

2）1 月 1 日は年間で活動量が最も少ない日であると考えられるが、実測の結果、一日を通してほぼ一定量の消費があることから、年間を通して昼夜問わず人の活動に関わらず発生する電力消費が終日一定量存在することが推察できる。

3）夏季最大需要電力のうち、文科系は人の活動に伴う電力消費が 79%を占めるため、一般照明、OA 機器、一般空調等の節電対策がピークカットに繋がるが、理科系については 53%が人の活動に関係しない電力消費であり、ピークカットの視点においても 24 時間稼働機器の影響が大きいと推察される。

4）大阪大学の夏季において、電力デマンドは講義が実施されている通常日に発生しやすく、日最高気温が 1 ℃上昇すると日最大需要電力は約 1.1%上昇する。

5）日電力消費量が小さい建物分類ほど、外気温の変動が相対として電力消費量に影響を与える。また、カテゴリーＩにおいては冷房期より暖房期の方が、日電力消費量が多くなる傾向がある。

6）年間を通じての冷房／暖房需要の分岐外気温度は建物分類により最大 5℃程度の差（期間にして一ヶ月程度）があり、電力消費量が多い施設ほど、外気温が低い時期でも冷房需要がある。

7）大阪大学の年間電力消費量のうち、79%が人の活動に関係しない電力量であり、24 時間稼働機器の影響が非常に大きいと考えられる。また、年間の電力消費量の大きさは、人の活動に伴って必要となる電力消費量よりも、人の活動に関係しない電力消費量により大きく左右される。

参考文献

2.1）財団法人省エネルギーセンター診断指導部：ビルの省エネルギーガイドブック 2011-2012,P.7,2012.1

2.2）気象庁： http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php，入手 2012-7-2

2.3） 迫田一昭,河野匡志,花木啓祐,野城智也,磯部雅彦：大学キャンパスにおける二酸化炭素削減策の立案・実行-東京大学サステイナブルキャンパスプロジェクト-，エネルギー・資源学会技術報告，Vol.30，No.4，pp.240-243，2009.7

2.4） 宋城基：多様な空調システムが混在する大学キャンパスのエネルギー消費実態調査研究，空気調和・衛生工学会論文集，No.156，pp.1-9，2010.3

2.5） 三瀬農士,佐藤春樹：慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおける電力および冷暖房需要の推定，日本建築学会環境系論文集，No.609，pp.55-62，2006.11

2.6） 陳超,渡辺俊行,龍有二,赤司泰義：各種業務施設の空調用エネルギー消費量に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.501，pp.61-68，1997.11

第３章:理科系研究室のエネルギー消費実測と運用改善によるエネルギー削減効果試算

3.1　序論

前章において、理科系施設（カテゴリーⅡ）は大阪大学の一次エネルギー消費量の 53%を占め、文科系施設に比べ３倍以上の一次エネルギー消費量原単位があることが示された。大学全体の省エネルギーを検討する上では、理科系研究施設の対策が非常に重要となる。

本章では理科系研究施設のエネルギー消費実態を詳細に把握するため､特定の研究室において系統回路単位で電力消費量を調査・分析した。さらに昨今の社会情勢も踏まえ、年間電力消費量削減／夏期ピーク電力削減／冬期ピーク電力削減という異なる視点から、研究室レベルで実施可能な運用段階の各種省エネルギー手法がどの程度の低減効果を得るかシミュレーションを用いて評価した。

3.2　理科系研究室におけるエネルギー消費の実測調査

3.2.1　調査対象施設のエネルギー消費特性

前章では一次エネルギー消費量原単位の違いにより、大阪大学の施設を文科系：カテゴリーⅠ、理科系：カテゴリーⅡ、大規模施設：カテゴリーⅢの 3 つに分類し分析を行った。本章ではカテゴリーⅡの中から、年間一次エネルギー消費量原単位がカテゴリーⅡ平均値に近い、生物科学系の A 棟（建物分類：理科系研究所)、および情報科学系の A 棟（建物分類：情報科学系）の各１研究室を詳細な実測調査対象とした。

はじめに調査対象とする施設のエネルギー特性を分析する。大阪大学の各施設および調査対象施設の一次エネルギー消費量原単位を図-3.1 に示す。

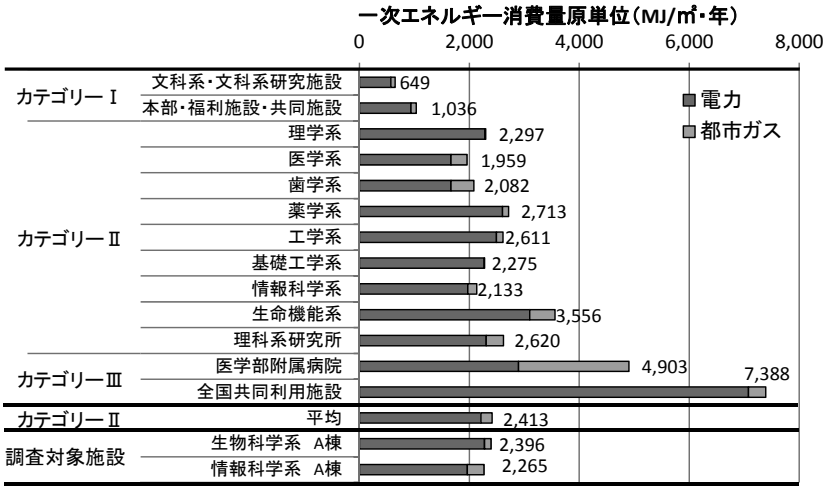


図-3.1　大阪大学の各施設および調査対象施設の年間一次エネルギー消費量原単位（平成 23 年度）

建物概要を表-3.1 に示す。生物科学系 A 棟はフリーザーやインキュベーター、情報科学系 A 棟は大型サーバ機器などの 24 時間稼働する機器を保有する特徴を持つ。

表-3.1　調査対象施設の概要

	生物科学系 A棟	情報科学系 A棟
延床面積	7,854㎡	6,599㎡
竣工	平成21年3月（全面改修(設備含む)）	平成20年12月（新築）
空調方式	電気式空冷ヒートポンプ パッケージ方式（以下EHP） （※一部ガス式）	ガス式空冷ヒートポンプ パッケージ方式（以下GHP） （※一部電気式）

図-3.2 では、エネルギー消費の大半を占める電力について、当該施設とカテゴリーⅡ平均との消費特性の差違を確認するため、大阪大学電力可視化システムの平成 23 年 7 月～翌年 6 月までのデータを用い、平日・休日の床面積当たりの電力日負荷曲線を比較した。なお、本章における休日とは、土・日・祝日および年末年始を示す。

ここで各時刻において、電力を各月の休日電力日負荷曲線の最小値（以下、ベース電力）と、ベース電力以外の日中変動する電力（以下、時刻変動電力）とに分離し、月ごとに積算した結果を図-3.3 に示す。生物科学系 A 棟は、ベース電力量がカテゴリーⅡに比べやや高い傾向を示すが、データに長時間稼働の共同利用の実験棟を始めとする付属施設分（1,866 ㎡）が含まれている影響が推察される。情報科学系 A 棟は、主空調方式がガス式であるため、ベース電力量、時刻変動電力量ともカテゴリーⅡに比べやや少ない傾向が確認できる。

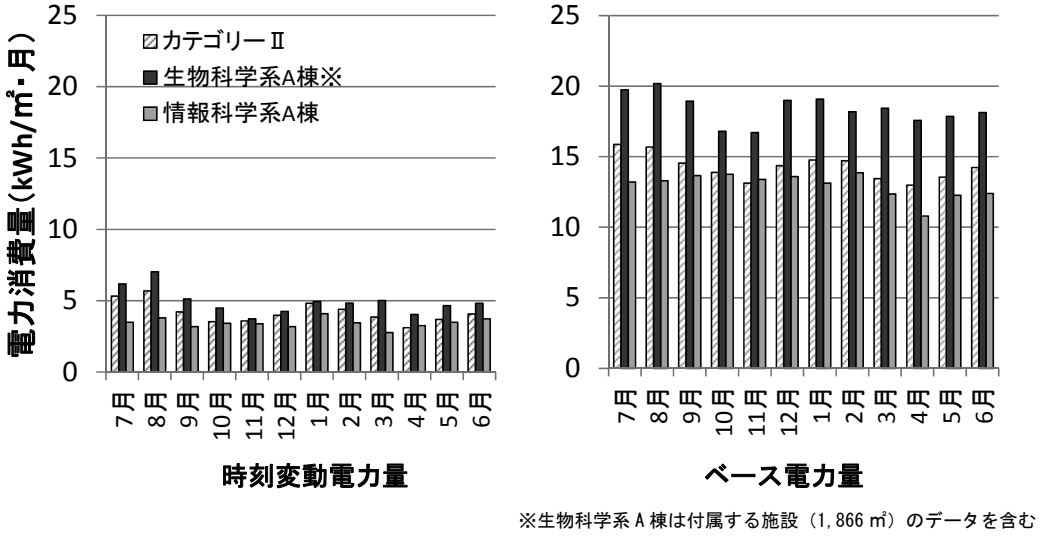
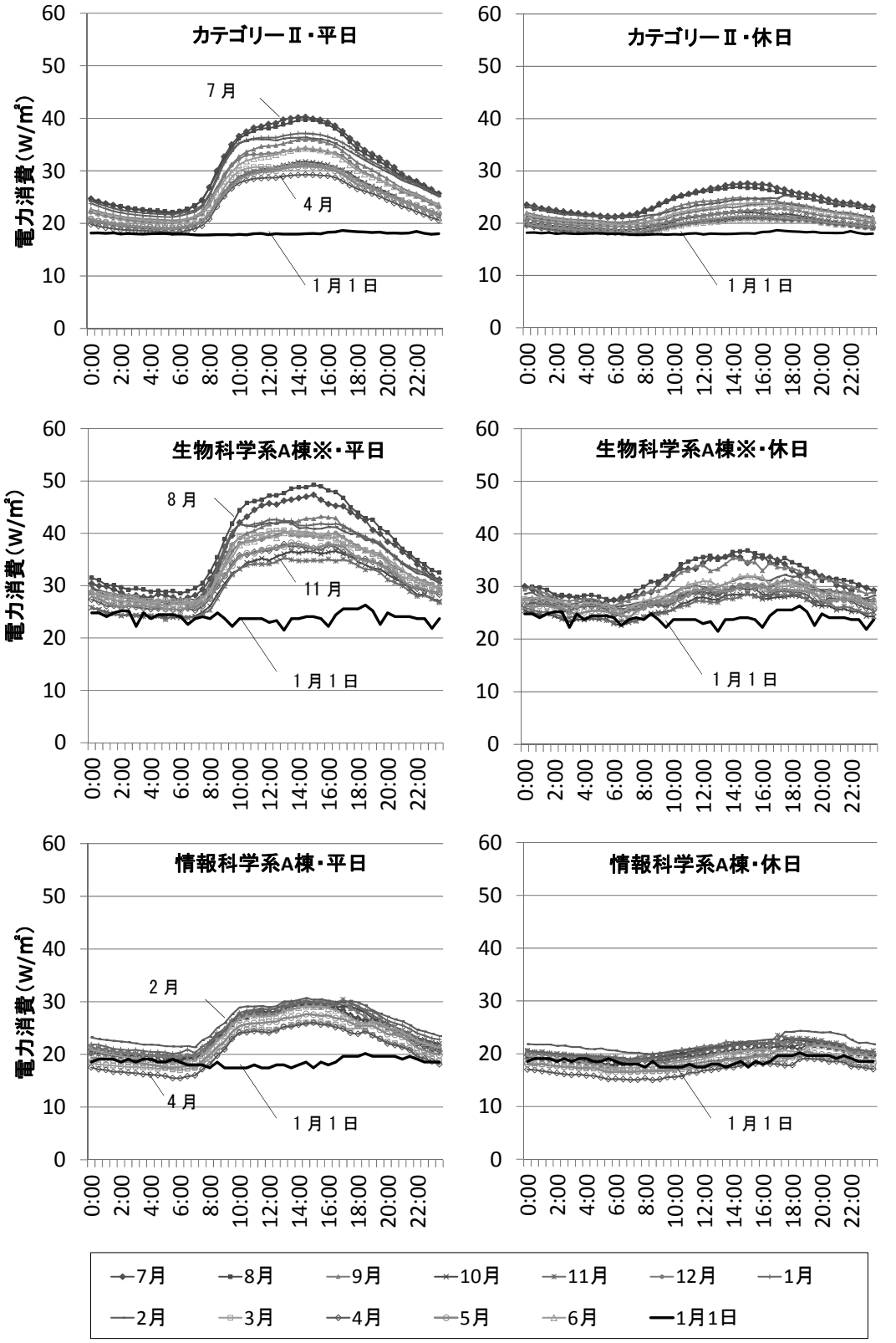


図-3.3　カテゴリーⅡと調査対象施設の月別電力消費量比較



※生物科学系Ａ棟は付属する施設（1,866 ㎡）のデータを含む

図-3.2　カテゴリーⅡと調査対象施設の電力日負荷曲線比較

3.2.2　実測調査概要

前項で述べた生物科学系 A 棟及び情報科学系 A 棟内の特定の研究室において平成 23 年 4 月より系統回路単位ごとの電力消費量の計測を行った。実測対象研究室の平面図を図-3.4 に、実測の概要を表-3.2 に示す。

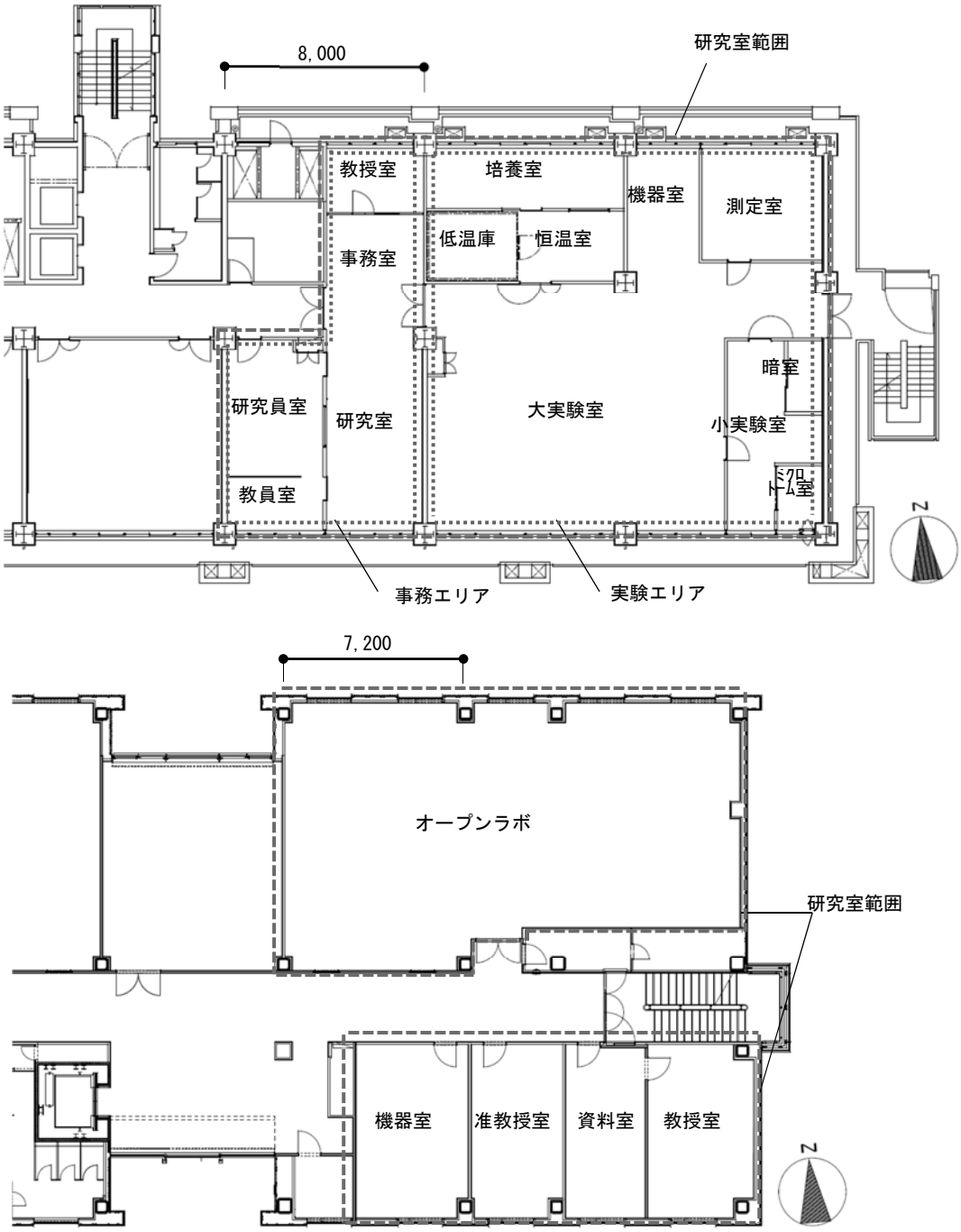


図-3.4　実測対象研究室平面図（上：生物科学系研究室、下：情報科学系研究室）

表-3.2　実測概要

	生物科学系研究室	情報科学系研究室
研究室床面積	343.2㎡	291.5㎡
計測回路数	108回路	32回路
計測範囲	【研究室内全用途（343.2㎡）】 ・照明 ・事務系コンセント ・実験系コンセント ・空調（EHP室外機＋室内機） ・換気 （全熱交換器、小型天井扇、 ドラフトチャンバー用排気ファン）	【オープンラボ（179.4㎡）】 ・事務系コンセント ・サーバ系コンセント 【機器室（31.0㎡）】 ・大型サーバ ・空調（EHP床置形室内機＋室外機、 EHP天井カセット形室外機）

生物科学系研究室は研究室内全エリアの電力量を計測しているが、情報科学系研究室では、主に学生がパソコンを利用して研究活動を行うオープンラボと大型サーバが設置されている機器室を対象に、表-3.2 に記載の用途について計測を実施した。なお、生物科学系研究室における事務系コンセント・実験系コンセントとは、それぞれ図-3.4 に示す事務エリア・実験エリアのコンセント負荷を表す。

3.2.3　生物科学系研究室の実測結果

3.2.3(1)　カテゴリーⅡとの年間一次エネルギー消費量比較

ここでは生物科学系研究室全体とカテゴリーⅡ平均の年間一次エネルギー消費量の差違を確認する。生物科学系研究室では平成 21 年の全面改修以降、研究室全体の電力消費量が建物側で計測されており、図-3.5 では平成 22 年度、平成 23 年度の値を比較した。なお、生物科学系研究室の実測は専有部のみで、廊下・便所等の共用部を計測対象としていないため、この影響を考慮した推計値も図内に示している。推計に当たっては、生物科学系研究室の共用部面積を（生物科学系研究室面積×生物科学系 A 棟共用部合計面積／生物科学系 A 棟専有部合計面積）として見込み、共用部は 293MJ/㎡・年（照明 10W/㎡ [3.1)]が年間 3,000 時間稼働するものとして算出）のエネルギー消費があるものと仮定し算出した。

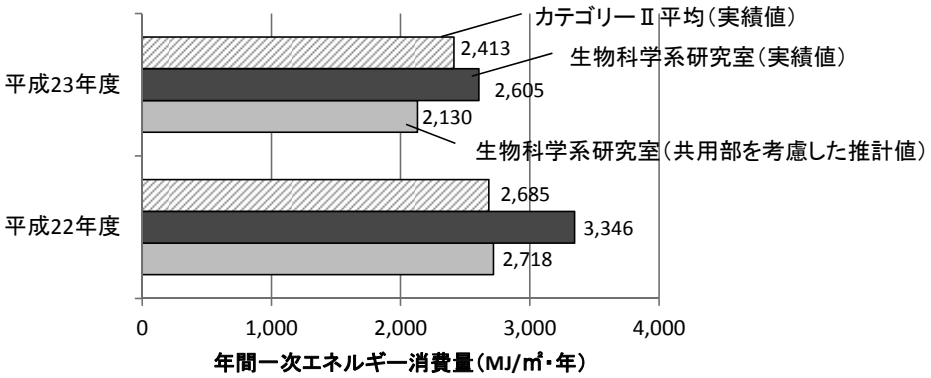


図-3.5　生物科学系研究室とカテゴリーⅡ平均の比較

東日本大震災の影響による節電対策が行われる前の平成 22 年度で比較すると、共用部を考慮した生物科学系研究室の推計値とカテゴリーⅡ平均は近い値を示している。また平成 23 年度において本研究室は、カテゴリーⅡ平均よりも大きな省エネルギー率を達成しているのが確認できる。

3.2.3(2)　実測結果

平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月までの 1 年間の実測結果を示す。なお、この期間は先述のとおり、全学的に節電対策を行った年であることに留意する必要がある。図-3.6 に年間の電力消費割合と月ごとの電力消費量、図-3.7 に月ごとの時刻別平均電力消費、図-3.8 には年間を通しての電力消費のデュレーションカーブを示す。

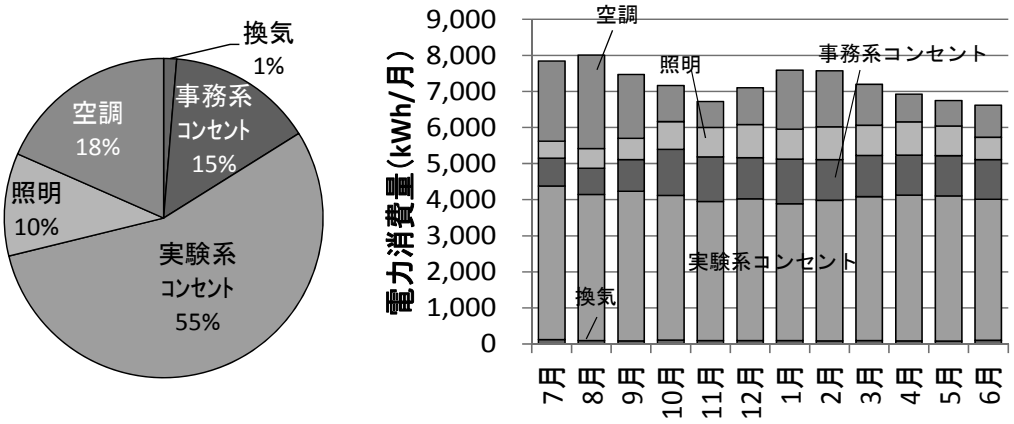


図-3.6　実測結果（左：年間電力消費割合、右：月ごとの電力消費量）

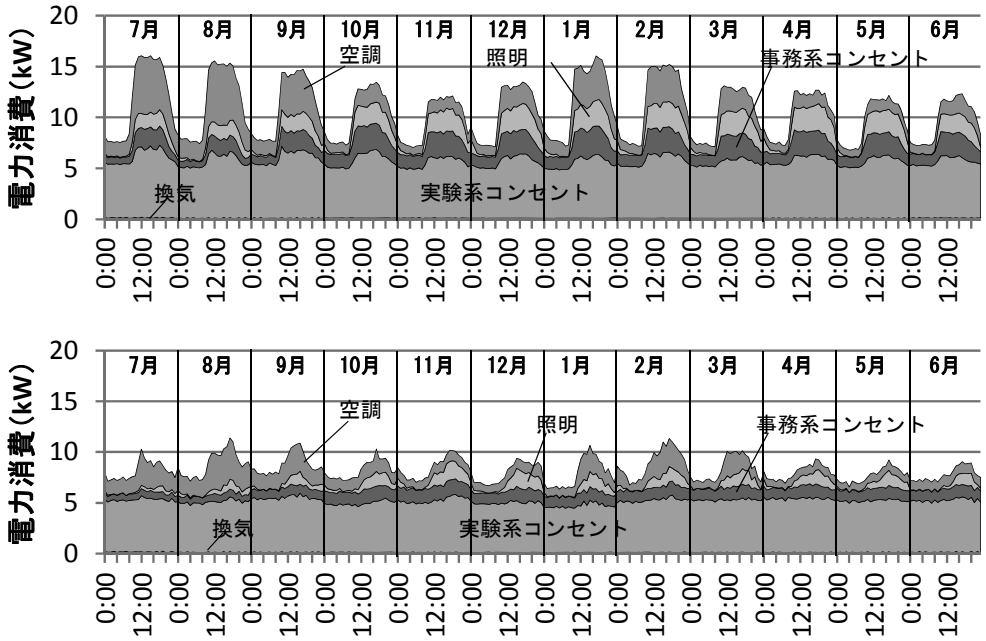


図-3.7　月ごとの時刻別平均電力消費（上：平日、下：休日）

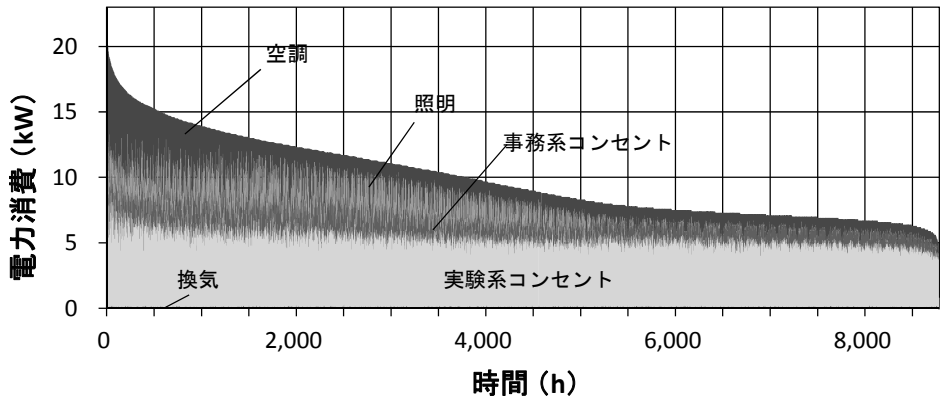


図-3.8　電力消費のデュレーションカーブ

実験系コンセントは季節・昼夜による変動幅が比較的小さく定常的に大きな電力消費がある傾向が確認でき、結果として年間電力消費量の 55%もの割合を占めることが分かった。同一回路に複数の実験機器が設置されている系統も存在するため正確な数値把握までは至らないが、接続機器のリストや実測結果、消費特性から 24 時間稼働のフリーザー類の影響が非常に大きいと推察する。

図-3.8 によると、年間での最大値は 22.6kW であり、最大値の 90%を超える時間は年間ではわずか 8 時間であることも確認できる。

図-3.9 では、用途ごとの各月平均時刻別電力消費を示す。ここで図内には本研究室代表者にヒアリングして得られた、年間を通した平均的な活動人員割合（全 14 名に対する割合）を併記している。なお全 14 名のうち 12 名が教職員・研究員であり、活動人員割合の時刻別パターンの月変化は小さいことをヒアリングにより確認している。また事務系コンセント、実験系コンセントについては各エリアの活動人員割合を示す。

実験系コンセント、換気の用途は季節間の変動は比較的小さいが、照明、空調、事務系コンセントについては季節間で電力消費に差がある。照明、事務系コンセントは 7～9 月の値が特に小さく、この期間は東日本大震災後の全学的な節電活動を行った期間で、本研究室においても照明の間引きや不使用機器のコンセントからの取り外し、パソコンの各種設定調整、使用抑制等が実施されており、これらの対策が影響しているものと考えられる。空調については、図-3.10 に空調の日電力消費量と日平均外気温との関係を示すが、外気温の変化とともに、空調用電力消費量に変動がみられ、季節変化は外気温による影響が大きいと推察できる。なお、日平均外気温は気象庁発表 [3.2)]の「大阪府豊中」のデータによる。

活動人員割合と電力消費との関係に着目すると、照明は日中と夜間の差が顕著で比較的連動性が高いが、コンセント負荷は人の活動がない夜間や休日においても一定の消費があり、特に実験系コンセントにおいてその値が大きい。空調については、一部に 24 時間運転する系統があるため夜間も電力消費が存在している。

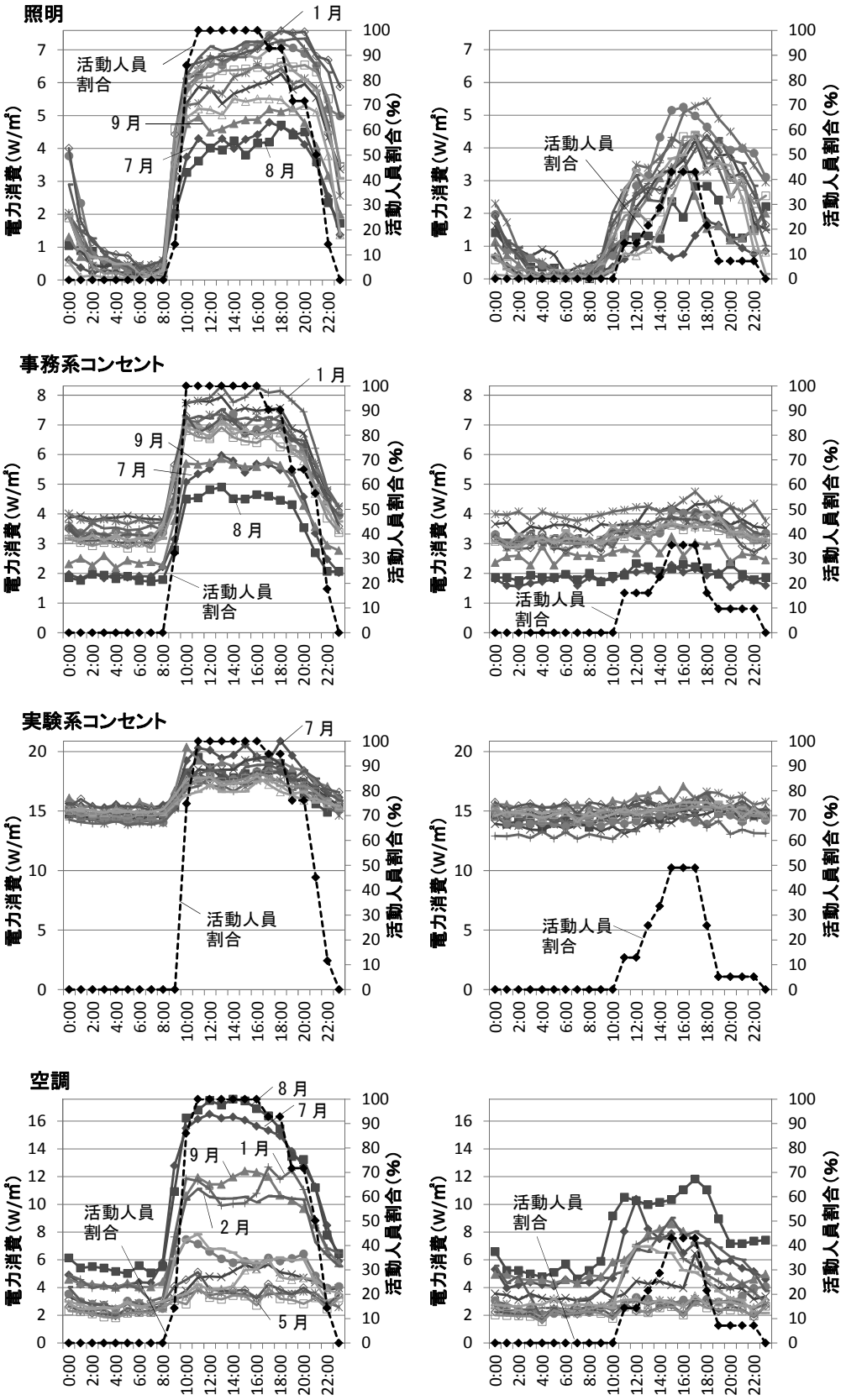


図-3.9(1)　用途ごとの月平均時刻別電力消費（左：平日、右：休日）

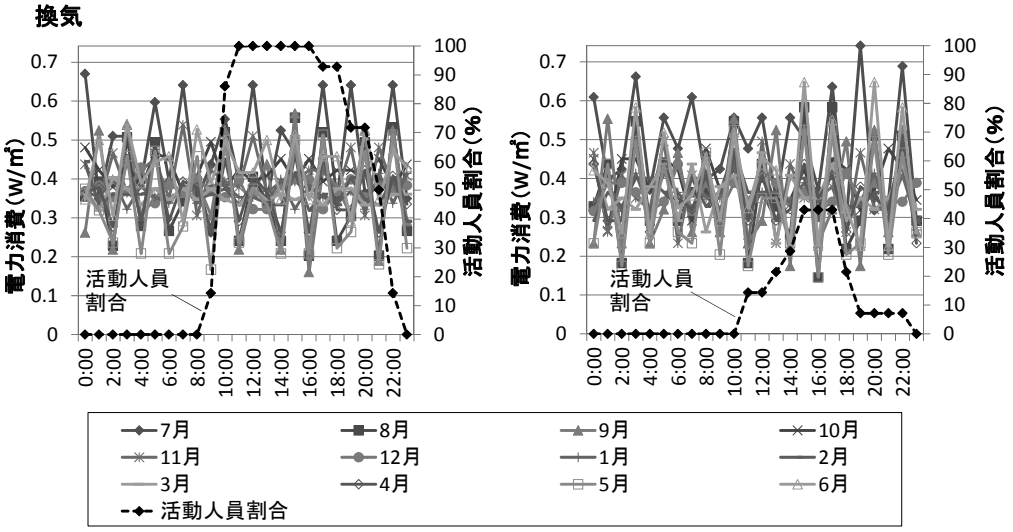


図-3.9(2)　用途ごとの月平均時刻別電力消費（左：平日、右：休日）

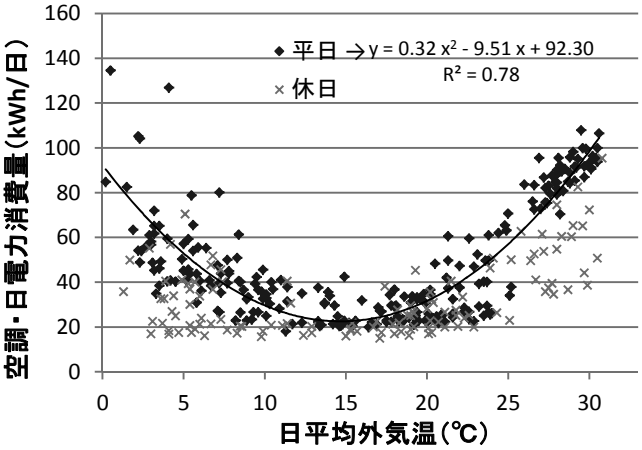


図-3.10　空調の日電力消費量と日平均外気温の関係

東日本大震災以降、夏期及び冬期のピーク時の電力使用抑制は重要な課題となっている。図-3.11には、夏期、冬期におけるピーク日の時刻別平均電力消費を示す。なお、ピーク日は特異日の影響を排除するため、平日におけるピークの週を抽出し、さらにそのうち夏は気温が低く、冬は気温が高い日を排除した日の平均と定義した。(夏：7 月 11、13～15 日の平均、冬：1 月 24～26 日の平均)

ピークは夏期：14 時、冬期：17 時となっているが、この時刻における消費電力の割合と図-3.6 で示した年間の電力消費割合との関係を図-3.12 に示す。年間電力消費量では実験系コンセントの割合が高いが、ピーク時においては空調の割合が高くなることが分かる。本施設においても、年間の電力消費削減、夏期ピーク電力削減、冬期ピーク電力削減のそれぞれの目的において、各用途が占める割合には差違があることを確認した。但し、この結果は本項冒頭に述べたとおり、節電対策を行った年のデータをもとにしていることに留意する必要があり、その影響については後述する。

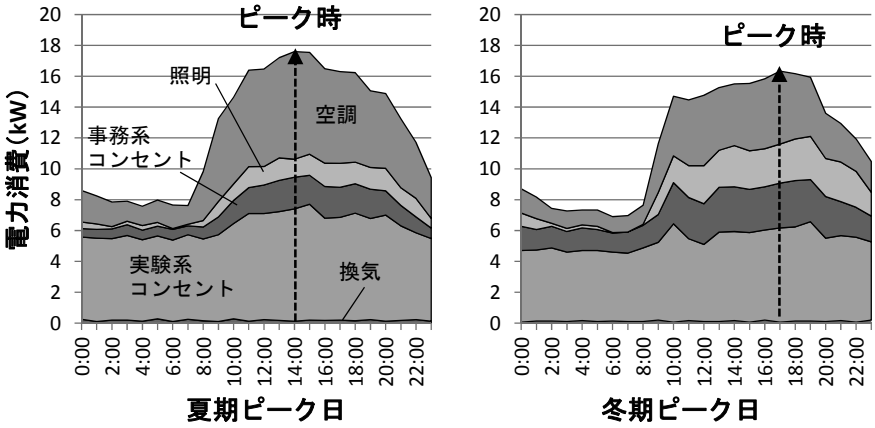


図-3.11　夏期・冬期ピーク日の時刻別平均電力消費

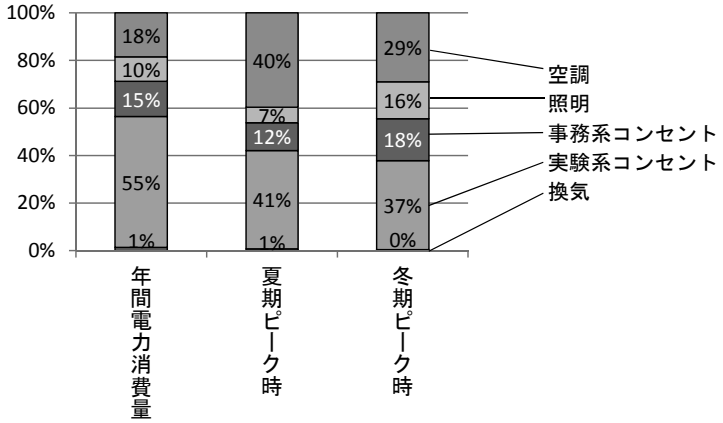


図-3.12　電力消費割合

3.2.4　情報科学系研究室の実測結果

生物科学系研究室と同様、平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月までの 1 年間の実測結果を示す。図-3.13 に月ごとの床面積当たりの電力消費量（生物科学系研究室との比較）を示す。表-3.2 に記載のとおり、情報科学系研究室ではオープンラボのコンセント、機器室の大型サーバおよび空調のみを計測対象としている。なお、機器室の空調は EHP 床置形と EHP 天井カセット形が併設されているが、EHP 天井カセット形については室内機のみ電力量が計測されていない。また照明、換気、その他の室のコンセント・空調用途等は計測できていないが、図より機器室を含めた研究室エリア全体の床面積を分母とした電力消費量原単位において、生物科学系研究室より大きな電力を消費していることが分かる。

図-3.14 ではより詳細に負荷特性を把握するため、月ごとの時刻別平均電力消費を示す。大型サーバの電力消費は時刻変動が小さいことが確認でき、大きな変動の主要因は研究室代表者へのヒアリングからサーバを構成する演算装置の稼働台数の影響であることが分かった。また大型サーバに付随し空調も 24 時間の稼働が必要で、大型サーバ用電力消費に対する空調用電力消費の割合を算出す

ると、図-3.15 に示すように 0.28～0.56 程度（夏期ほどその値が高い）となっており、昼夜を問わず大きな空調用電力消費が存在することが確認できる。前章で示したとおり、大学内の理科系研究施設は、ベース電力量が大きいことが分かっているが、サーバとサーバ用空調の電力消費がそれを押し上げる要因の一つとして考えられる。

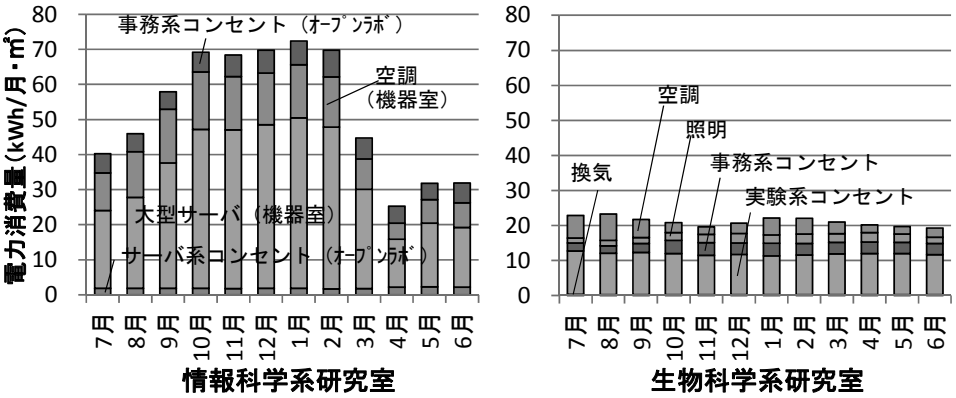


図-3.13　月ごとの電力消費量（生物科学系研究室との比較）

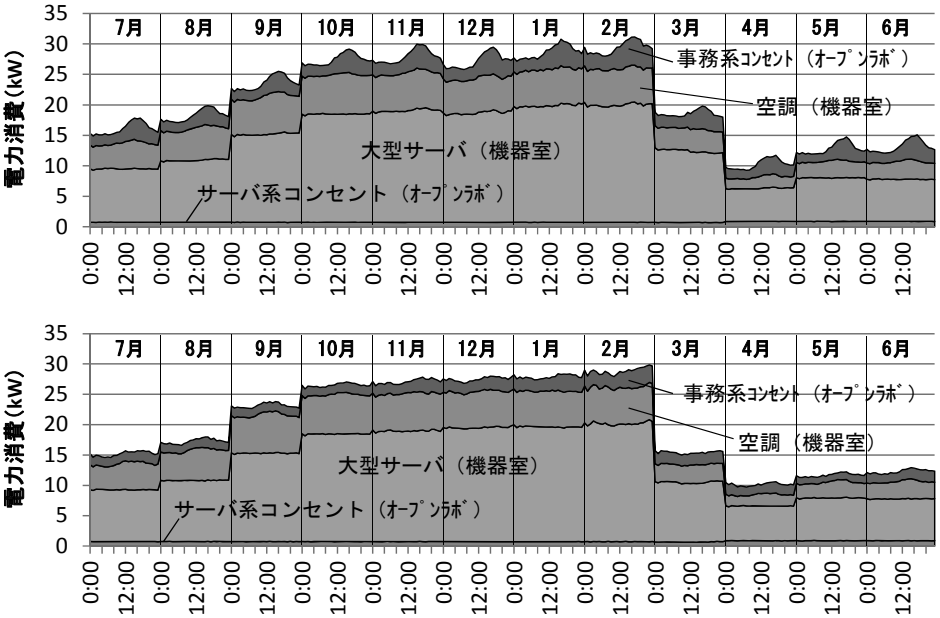


図-3.14　月ごとの時刻別平均電力消費（上：平日、下：休日）

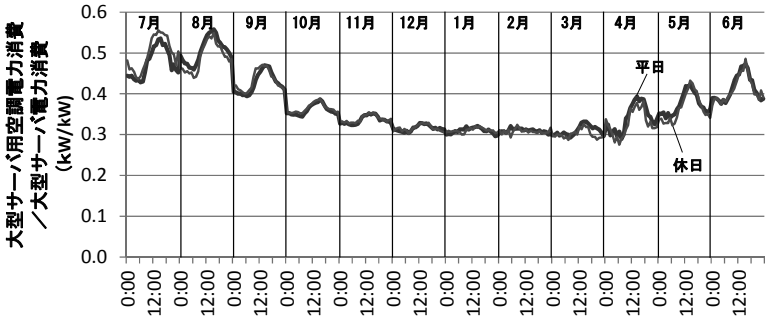


図-3.15　大型サーバ用電力消費に対する空調用電力消費の割合

3.3　運用段階の省エネルギー手法の定量評価

本節では、前節で実測調査を行った生物科学系研究室を対象に、運用時の各種省エネルギー手法がもたらす効果について、建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST 専門版を用いて評価を行う。

第 1 章で述べたとおり、平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災発生以降、エネルギーを取り巻く環境は大きく変化している。節電実績調査 [3.3)~3.5)]、節電環境下における満足度・快適性・知的生産性確保に関する研究 [3.6)~3.8)]、 節電対策の定量評価 [3.9)~3.10)]等、多数の報告がなされ、夏期及び冬期のピーク時の電力使用抑制は、今後も当面重要な課題となることが予想される。この状況を踏まえ、年間電力消費量削減／夏期ピーク電力削減／冬期ピーク電力削減という異なる視点から評価を行う。

3.3.1　シミュレーションの再現性評価（節電対策後期間での検証）

シミュレーションの再現性を確認するため、実測データが得られている平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月（節電対策後）において、実測値より推定した照明・機器発熱量を入力条件として BEST 内で与えることにより、各月および夏期ピーク時、冬期ピーク時の空調電力消費量シミュレーション値が実測値と整合するかを確認した。入力条件を表-3.3 に示す。

また、ピーク日の検証における機器発熱量、照明発熱量は、当該日の時刻別電力消費量実測値を与えて検証した。なお、表-3.3 に示すとおり、気象データは実測期間のものではなく拡張アメダス設計用気象データ（豊中）を用いているが、実測期間における気象庁発表 [3.2)]の「大阪府豊中」の各月平均温度との差異は、図-3.16 に示すとおり、中間期である 11 月を除いて 1℃以下であるためこの影響は無視し、ピーク日の検証においては気象データ上の外気温度が近い日を選定することで検証精度を高めた。

表-3.3　節電対策後入力条件

気象	拡張アメダス設計用気象データ（豊中）
建物	竣工図データ
機器発熱	月別、室別、平日・休日別に時刻別電力消費量の実測平均値を算出し入力値を求めた。
照明発熱	室別の照明用電力消費の実測データがないため、研究室全体の時刻別照明用電力消費量の実績値を月別、平日・休日別に算出し、室ごとの定格消費電力を基にその値を案分することで、各室の月別、平日・休日別の時刻別電力消費量を算出し、入力値を求めた。
人体発熱	研究室代表者へのヒアリングにより、室別、平日・休日別に平均的な時刻別在室人員（研究室全体で最大14人）を算出し、入力値を求めた。
換気量	隙間風[注1)]＋研究室代表者へのヒアリングによる換気設備運転状況により入力値を求めた。（24時間一定風量、全熱交換器効率は60%に設定）
空調	研究室代表者へのヒアリングによる設定温度[注2)]とし、空調時間は以下とした。 培養室・機器室・測定室：10:00～20:30 上記以外の一般居室：9:00～22:30

注 1）隙間風は夏期 0.2 回/h、冬期 0.6 回/h[3.11)]、中間期 0.4 回/h とした。
注 2）空調設定温度は表-3.4 に示す。

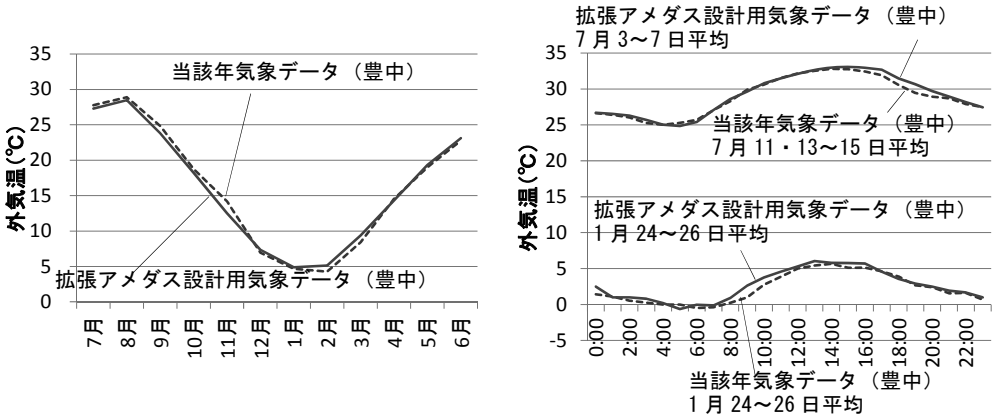


図-3.16　気象データの差違（左：月平均外気温、右：ピーク日の時刻別外気温）

シミュレーション結果を図-3.17 に示す。各月とも精度よく再現がなされ、年間電力消費量の誤差は 3.5%となっている。また、ピーク時における誤差は、夏期：3.0%、冬期：3.4%となっており、良好な再現性が確保されているものと判断する。

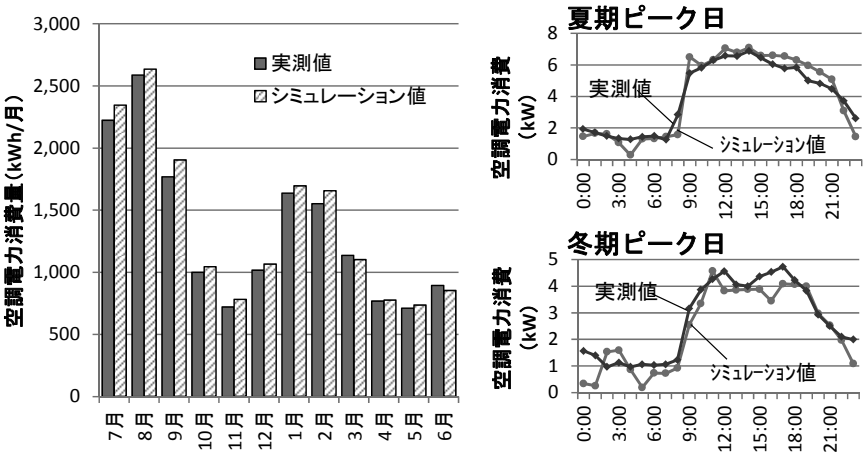


図-3.17　節電対策後のシミュレーション結果

（左：月別、右上：夏期ピーク日、右下：冬期ピーク日）

「3.3 運用段階の省エネルギー手法の定量評価」における空調の設定温度一覧

表-3.4　空調設定温度一覧

	3.3.1節電対策後			3.3.2 節電対策前			3.3.3(1)基準ケース			3.3.3(2)試算ケース		
	夏期	冬期	中間期	夏期	冬期	中間期	夏期	冬期	中間期	夏期	冬期	中間期
教授室	28	23	―	28	24	―	26	22	―	28	20	―
教員室	28	―	―	27	20	―	26	22	―	28	20	―
研究員室	28	22	―	28	22	―	26	22	―	28	20	―
研究室	28	―	―	28	25	―	26	22	―	28	20	―
事務室	―	―	―	28	25	―	26	22	―	28	20	―
大実験室	28	23	―	28	25	―	26	22	―	28	20	―
機器室	―	―	―	―	―	―	26	22	―	28	20	―
小実験室	28	23	―	28	25	―	26	22	―	28	20	―
恒温室	23	20	―	20	20	20	20	20	20	20	20	20
培養室	28	23	―	28	25	―	26	22	―	28	20	―
低温庫	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
測定室	28	―	―	26	25	―	26	22	―	28	20	―

（凡例）　―：空調停止

3.3.2　節電対策前期間の推計

運用段階の省エネルギー手法の定量評価を行う上での「基準ケース」は節電対策前の運用状態とするが、本項では、そのもととなる節電対策前期間の消費の推計を行う。

表-3.5　節電対策前電力消費量の推計方法

照明	系統回路単位の実測値が得られているH23年4～5月（節電対策前）の平日・休日別平均電力消費量が年間を通して継続すると仮定し、これに各月の日数を乗じた値を与える（図-3.18に示す照明：Li）。なお、時刻変動スケジュールは節電対策後と同じとする。
換気	系統回路単位の実測値が得られているH23年4～5月（節電対策前）の日平均電力消費量（図-3.18に示す換気：Ve）が年間通して継続すると仮定し、各日その値を与える。
コンセント	節電対策後（H23年7月～H24年6月）の各時刻の電力消費量実測値に、月ごとに算出した以下の係数を乗じる（図-3.18に7月の例を示す）。なお、時刻変動スケジュールは節電対策後と同じとする。 事務系・低温室：②b／②a 大実験室・機器室：（④b＋⑤b＋⑦b）／（④a＋⑤a＋⑦a） 培養室・恒温室：（①b＋⑥b）／（①a＋⑥a） 測定室・小実験室・暗室・ミクロトーム室：③b／③a
空調	上記の照明・機器発熱量を利用し、BESTにより試算する。気象条件、人体発熱、換気量は表-3.3と同様の設定方法とする。設定温度は研究室代表者へのヒアリングによる設定値[注1)]とする。

注 1）空調設定温度は表-3.4 に示す。

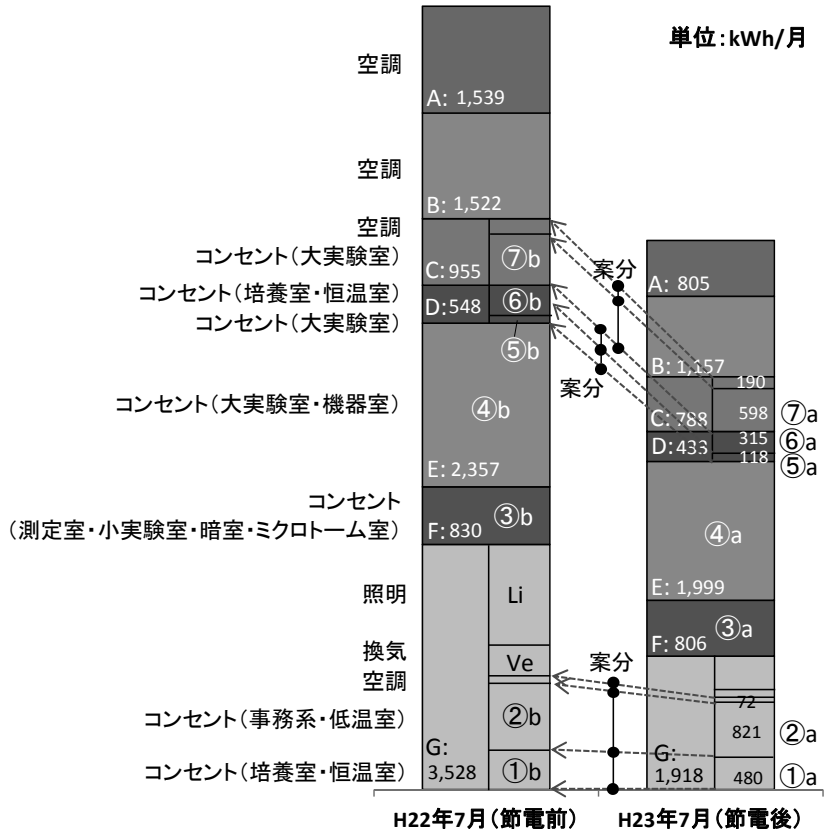


図-3.18　節電対策前のコンセント電力消費量の推計方法（7 月の例）

平成 23 年 3 月の東日本大震災以前には系統回路単位ごとの詳細な計測を開始していないが、平成 21 年の全面改修以降、建物側にて研究室全体の電力消費量と図-3.18 に示す A～G の 7 区分のデータが計測されている。このデータを節電対策前後で比較し、照明・換気については平成 23 年 4～5 月の節電対策前の期間に計測されている系統回路単位ごとの実測値を活用することで、節電対策前期間（平成 22 年 3 月～平成 23 年 2 月）の詳細な電力消費量の推計を行った。推計方法を表-3.5 に示す。

推計結果を図-3.19 に示す。節電対策前の各月の電力消費量は最大誤差 1.3%で実測値とほぼ合致している。図-3.19 では節電対策後実測値との比較も示しているが、年間では 25.6%もの電力消費量が削減できている。

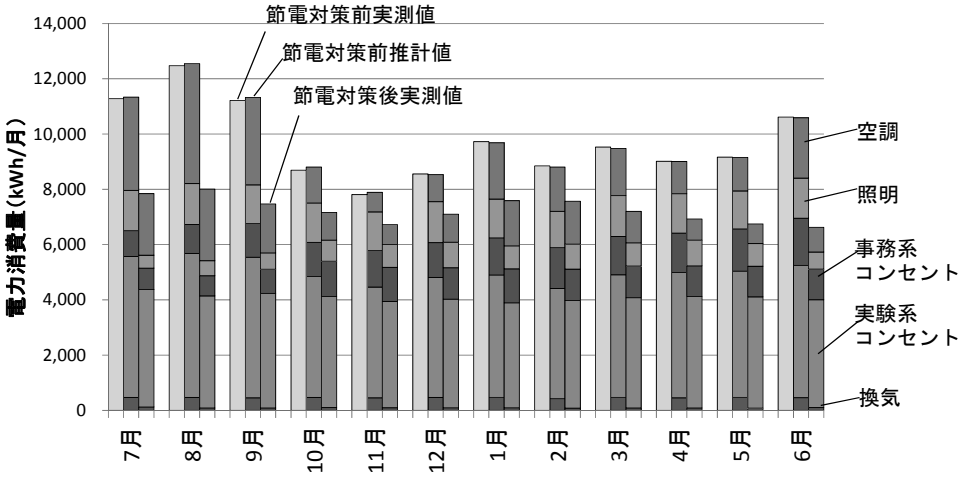


図-3.19　節電対策前電力消費量の推計結果と節電対策後との比較

3.3.3　各種省エネルギー手法の定量評価

3.3.3(1)　基準ケース

基準ケースは 3.3.2 で推計した節電対策前とする。但し、本研究室では省エネルギー対策として東日本大震災以前においても空調設定温度の緩和を行うなど、一般的な設定と異なる運用をしていたため、この影響を考慮し一般居室における空調設定温度を夏期 : 26℃、冬期 : 22℃としたもの（詳細は表-3.4 による）を基準ケースとした。基準ケースにおける夏期・冬期のピーク日の時刻別平均電力消費と、年間、夏期・冬期ピーク時における電力消費割合を図-3.20、3.21 に示す。なおピーク日は 3.3.1 で選定した日と同じとする。

図-3.20 に示すように節電対策後に比べ、照明・機器の内部発熱量や換気量増などの影響により、空調割合は夏期増加し、冬期減少していることが分かる。また、夏期ピーク日においては内部発熱量増や設定温度の変更などにより、立ち上がり負荷が増加し、ピーク時は午前に移行していることが確認できる。

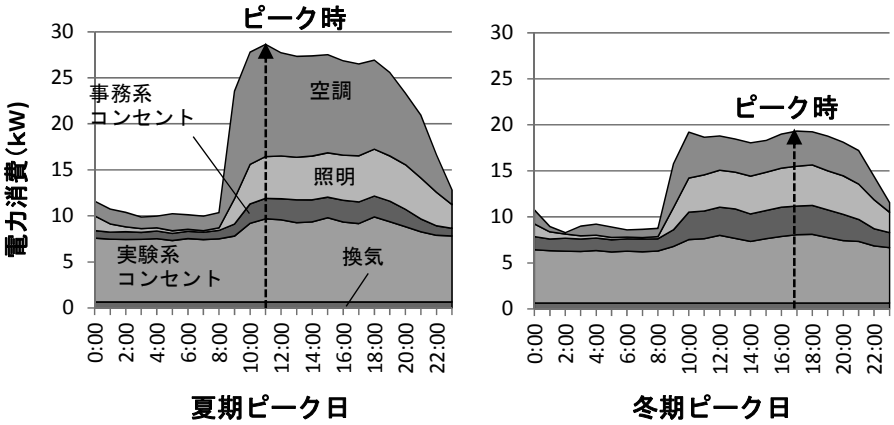


図-3.20　夏期・冬期ピーク日の時刻別平均電力消費（基準ケース）

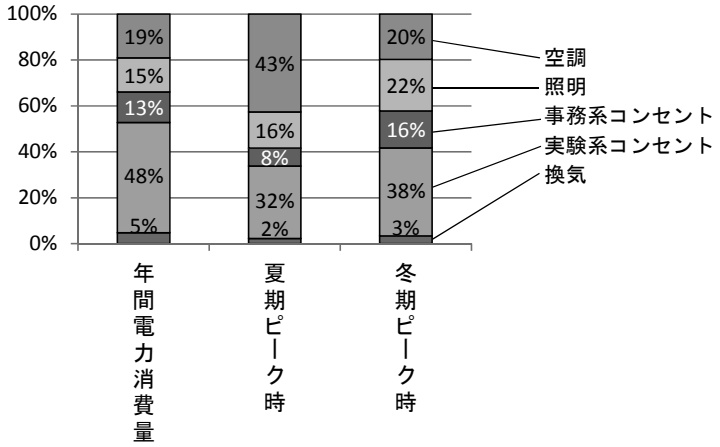


図-3.21　電力消費割合（基準ケース）

3.3.3(2)　試算ケース

本施設は、断熱含む内装や設備の全面改修後間もない施設であり、試算ケースは、大規模な改修工事を伴わず対応可能な運用改善の対策を想定している。表-3.6 に試算ケースを示す。

表-3.6　試算ケース

ケース	対象用途		省エネルギー手法
対策Ⅰ	照明		設計照度(500～800Lux程度)を一律300Luxに低減
対策Ⅱ	換気		全熱交換器風量を50%低減(平均1.4回/h相当に低減)
対策Ⅲ	コンセント	事務系	3.3.2の推計結果と実測結果の比較に基づき、一律19%削減
対策Ⅳ		実験系	3.3.2の推計結果と実測結果の比較に基づき、一律12%削減
対策Ⅴ			冷蔵庫、フリーザー類の設定温度の緩和
対策Ⅵ	空調		一般居室:夏期:28℃、冬期20℃[注1)]

注 1）空調設定温度は表-3.4 に示す。

対策Ｖの効果を設定するため、研究室代表者による判断により庫内設定温度の変更が可能な冷蔵庫・フリーザー類を抽出し、実際に 1℃～5℃緩和して電力消費量を確認する実測を行った。実測は中間期を選定し、対策前後の使用実態が近い条件下で計測している。なお、通常時は 5 月 29 日 12:00～5 月 30 日 12:00 の 24 時間、設定温度変更後は 5 月 30 日 12:00～5 月 31 日 12:00 の 24 時間で実施した。結果を図-3.22 に示す。合計で 8.14kWh/日の削減効果が確認でき、対策Ｖでは年間を通じて冷蔵庫・フリーザーの電力消費量を 8.14kWh/日削減できると仮定した。

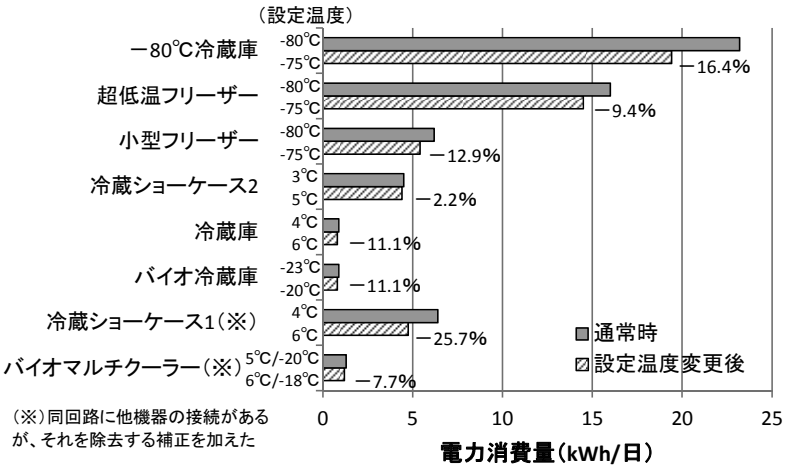


図-3.22　生物科学系研究室におけるフリーザー類設定温度変更による省エネルギー効果実測値

3.3.3(3)　試算結果

各対策を実施することによる年間電力消費量、夏期ピーク電力消費、冬期ピーク電力消費の削減率の試算結果を図-3.23 に示す。なお、対策Ⅰ～Ⅴは、これを行うことで内部発熱量や外気導入量が変化し、空調の電力消費にも影響を及ぼすことから、空調用電力消費の増減値（対策Ⅵは行わない場合）も示している。

図より、各目的において効果的な削減対策が異なることが確認できる。得られる知見を以下に示す。

・照明およびコンセントの対策は年間電力消費量・夏期ピーク時・冬期ピーク時とも一定の削減効果がある。

・季節・昼夜を問わず定常的に大きな電力消費があるコンセントの対策は、低減率が高くなくても大きな削減効果が得られる。

・冬期ピーク時における照明・コンセント等の対策は、内部発熱量減少の影響により空調用電力消費の増加を招く。

・ピーク時における換気の対策は、外気量低減による空調電力削減効果が高い。

・空調は年間電力消費量や冬期ピーク時の削減効果は小さいが、夏期ピーク時においては、設定温

度の変更による効果のほか、照明・コンセント・換気の対策による処理熱量減の効果により、大きな削減効果が得られる。

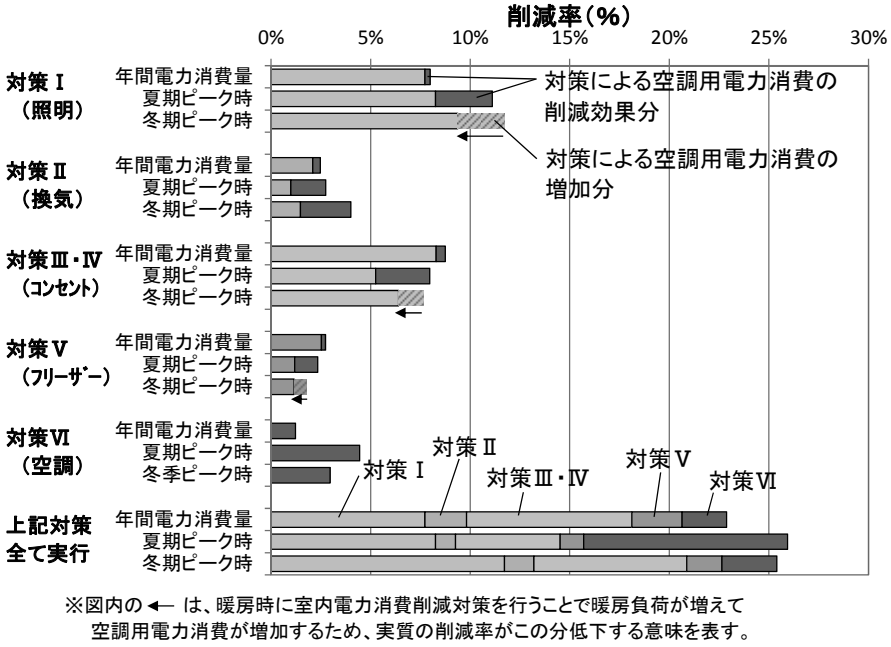


図-3.23　各対策による削減率試算結果

3.3.4　空調機器能力の適正化による削減効果試算

基準ケースにおける冷房処理熱量の日中のピーク値を研究室全体で合算すると 48.9kW（143W/㎡）であるのに対し、実際の納入設備容量は合計 90.6kW（264W/㎡）と過大な機器仕様となっている。年間を通してみると負荷率の低い領域での運転時間が非常に長く、他事例 [3.12)] と同様、低効率での稼働を強いられている可能性がある。そこで本項では基準ケースにおいて空調機器能力を適正に選定し、合計設備容量を 57.0kW（63%に低減）としていた場合の電力消費削減効果を試算した。試算結果を図-3.24 に示す。室外機の部分負荷特性は BEST のデフォルトを使用しているが、空調用年間電力消費量は 7.0%削減され、研究室全体の年間電力消費量の 1.3%の削減分に相当し、前項における対策Ⅵとほぼ等しい効果が得られることが分かった。

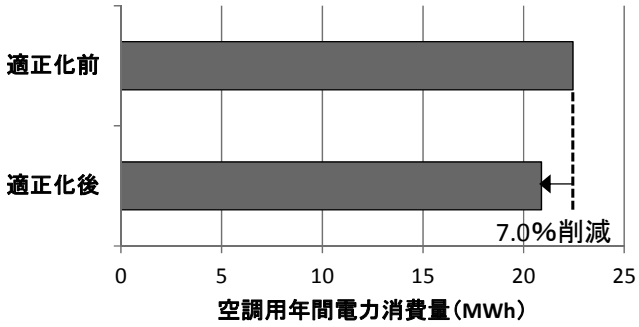


図-3.24　空調機器能力適正化による削減効果

設計・計画時においては、実験機器等の需要率が予測できないため一般に過大な機器が選定される傾向があるが、機器選定方法の見直しや、年間稼働時間の大半を占める低負荷時の効率を向上させた機種の開発等により、空調用電力消費量を大きく削減できる可能性がある。

3.4　まとめ

本章では、一般的な理科系研究施設のエネルギー消費実態に近い施設の研究室において、系統回路単位で電力消費量を調査・分析し、東日本大震災の影響による節電対策前後のエネルギー消費実態を明らかにした。さらに建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST 専門版を利用し、年間電力消費量削減／夏期ピーク電力削減／冬期ピーク電力削減の各目的において、運用段階の各種省エネルギー対策がもたらす効果の定量化を試みた。得られた主な知見を以下に示す。

1) 生物科学系研究室では、季節・昼夜問わず定常的に大きな実験系コンセントの電力消費が存在し、節電対策後において年間電力消費量の 55%を占めることが分かった。主な要因は 24 時間稼働するフリーザー類の影響が大きいと推察される。

2) 情報科学系研究室では、大型サーバとサーバ用空調の電力消費量が非常に大きく、サーバ機器は稼働台数の影響以外は 24 時間変動が少ない電力消費値を示す傾向がある。1)のフリーザー類と合わせ、大学内の理科系研究施設のベース電力を高くする要因の一部として考えられる。

3) 生物科学系研究室をモデルとした試算において、年間電力消費量／夏期ピーク時／冬期ピーク時の電力消費割合は大きく異なり、効果的な省エネルギー対策も異なることを明らかにした。

4) パッケージ空調機の能力は、設計・計画時においては実験機器等の需要率が予測できないため一般に過大な機器が選定される傾向があるが、適切な機器選定とすることで低負荷時の低効率で稼働する時間が減少し、空調用電力消費を抑制できる可能性がある。

参考文献

3.1）財団法人建築環境・省エネルギー機構：建築物の省エネルギー基準と計算の手引き　新築・増改築の性能基準（PAL/CEC），2009.9，改訂２版 2010.9

3.2）気象庁： http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php，入手 2012-7-2

3.3）高口洋人,亀谷茂樹,半澤久,吉野博,浅野良晴,奥宮正哉,下田吉之,村川三郎,依田浩敏,坊垣和明,松縄堅,村上周三：非住宅（民生業務部門）建築物のエネルギー消費量データベース構築に関する研究（第 6 報）2011 年夏季節電実態緊急調査概要，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.149-152，2012.9

3.4）依田浩敏,田村剛士,黒木知世,赤司泰義,住吉大輔,高偉俊,葛隆生,前田昌一郎,村上周三,坊垣和明,松縄堅,亀谷茂樹,高口洋人,半澤久,吉野博,浅野良晴,奥宮正哉,下田吉之,村川三郎：非住宅（民生業務部門）建築物のエネルギー消費量データベース構築に関する研究　東日本大震災に伴う平成 23 年度夏季節電対策の実態調査結果（大学・研究機関とスポーツ施設），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.161-164，2012.9

3.5）迫田一昭,岡本泰英,柳原隆司,磯部雅彦：大学施設における環境負荷低減手法に関する研究　その 9 東京大学における電力需給対策に向けた取組，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.1295-1298，2012.9

3.6）田辺新一,對馬聖菜,岩橋優子,西原直枝,平岡雅哉,弘本真一,菰田英晴,田渕誠一：東日本大震災後の節電環境下における夏季オフィスの快適性・知的生産性・エネルギー消費量（第 1 報）節電意識と物理環境測定結果, 空気調和･衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1255-1258, 2012.9

3.7）對馬聖菜,田辺新一,岩橋優子,西原直枝,平岡雅哉,弘本真一,菰田英晴,田渕誠一：東日本大震災後の節電環境下における夏季オフィスの快適性・知的生産性・エネルギー消費量（第 2 報）各環境満足度とエネルギー消費量，空気調和･衛生工学会大会学術講演論文集，pp.1259-1262，2012.9

3.8）望月悦子,吉澤望,岩田利枝,宗方純,平手小太郎,明石行生：2011 年震災によるオフィス照明環境の実態調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ｉ，pp.405-408，2012.9

3.9）佐藤孝輔,渡邊剛,岡田清嵩,小池万里,丹羽英治,時田繁：システムシミュレーションによる業務用建築物の節電対策の定量評価（第 1 報）節電対策の抽出と大規模建築物における定量評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.2139-2142，2012.9

3.10）渡邊剛,佐藤孝輔,吉野沙野,尹奎英,中井一夫,高井裕紀,丹羽英治：システムシミュレーションによる業務用建築物の節電対策の定量評価（第 2 報）中小規模建築物における定量評価と今後の課題，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.2143-2146，2012.9

3.11）井上宇市：改訂 4 版空気調和ハンドブック，丸善，1996.1，第 4 刷 2000.2

3.12）河野匡志, 柳原隆司, 花木啓祐, 磯部雅彦, 坂本雄三：国立大学施設における環境負荷低減手法に関する研究　東京大学における CO_2 排出量削減に向けた実効ある対策の計画と実践の事例，日本建築学会環境系論文集，Vol.76，No.666，pp.727-734，2011.8

第 4 章：理科系施設のエネルギー消費内訳の推計と分析

4.1　序論

前章では、特定の理科系研究室のエネルギー消費実態把握を行ったが、本章では広く理科系施設のエネルギー消費構造を明らかにすることを目的としている。研究室規模では計測器の追加設置により 3 章のような分析が可能となるが、既存の建物規模、キャンパス規模での用途別エネルギー需要の把握は、計測器設置のコスト的な制約により現実的には困難である。

計測器を設置せず一般的に入手可能な情報から消費内訳を推計する既往研究として、月別エネルギー消費量のデータなどを用い、外気温とともに需要が変動しない月の中から最小の日平均消費電力量を非空調用とし、それ以上を空調用とした宋の研究 [4.1)]、需要が最小となる月にも空調用のエネルギー消費があることに着目し業務施設の空調用エネルギー消費量を推定した陳らの研究 [4.2)]、大学施設において陳らの推計手法を適用した研究 [4.3)]などがある。また迫田ら [4.4)]は大学キャンパスを対象に、保有する機器情報と月別電力消費量のデータから空調・照明・実験機器・その他の用途別内訳の推計を行っている。しかし、いずれの研究も非空調用途のエネルギー需要は月変動がないことを前提としているが、大学内の施設においては夏季・冬季の長期休暇に需要が減少したり、研究論文の作成期には活動量が増大したりするなど、季節により非空調用途の需要が変動することで、推計精度が低下する可能性がある。

本研究では、非空調用途の需要に月変動があることを前提とした推計手法を提案する。設備に関わる情報として、一般的に入手可能もしくは最小限の費用で把握可能な情報、具体的には、内訳を推計するエリアの保有機器のデータベース、エリア全体の時刻別電力消費量および月別ガス使用量のみが把握できる条件において、シミュレーションソフトを利用することで建物規模でのエネルギー消費内訳の推計手法を提案する。また、実際の理科系 2 施設にこの推計手法を適用してエネルギー消費内訳を推計するとともに、各種運用改善がもたらす効果の定量化を行った。

さらに、分析規模を拡大してキャンパス規模での内訳の推計を行うため、推計手順を簡易化した手法も提案し、約 10 万㎡分の理科系施設のエネルギー消費内訳を推計する。また、建物条件や使用状況の変化がもたらす感度分析や、改修による削減ポテンシャルの把握、効果的な機器更新方法の提案を行う。

これまでの分析結果から、理科系施設では 24 時間稼働する実験機器等の対策が重要と考えられるが、全学を対象に実施した実験機器・備品類の設置状況調査結果を踏まえ、理科系施設のエネルギー消費量を削減する上での課題を示す。

4.2　建物規模でのエネルギー消費内訳の推計と分析

4.2.1　研究対象施設の概要とエネルギー消費実態

4.2.1(1)　建物概要

本節での研究対象施設は、前章で系統回路単位の電力量実測を行った研究室が属する生物科学系施設および情報科学系施設とする。両施設とも大阪大学吹田キャンパス内にある理科系研究施設で、施設全体の電力消費量を東日本大震災以前より時刻ごとに計測しており、震災後の省エネルギー効果も把握可能な施設である。表-4.1 に建物概要を示す。生物科学系施設はフリーザーやインキュベーター、情報科学系施設は大型サーバ機器など 24 時間稼働する機器を多数保有する特徴を持つ。生物科学系施設は主要建物である生物科学系 A 棟の他に、小規模の付属建物 8 棟からなる施設で、情報科学系施設は 2004 年、2008 年竣工の 2 棟の建物で構成されている。

表-4.1　建物概要

施設概要			
	生物科学系施設	情報科学系施設	
総延床面積	11,460㎡	12,350㎡	
棟数	9棟	2棟	
竣工	1972年～2009年	2004年、2008年	
主要建物概要			
建物名称	【A棟】	【A棟】	【B棟】
延床面積	7,854㎡	5,751㎡	6,599㎡
竣工	2009年全面改修（設備含む）	2004年	2008年
空調方式	EHP（※一部GHP）	EHP	GHP（※一部サーバ室等EHP）

† EHP：電気式空冷ヒートポンプパッケージ方式
GHP：ガス式空冷ヒートポンプパッケージ方式

4.2.1(2)　エネルギー消費実態

図-4.1 に研究対象施設および大阪大学理科系（カテゴリーⅡ）平均の平成 22 年度～平成 24 年度の一次エネルギー消費量原単位推移を示す。大阪大学では平成 23 年 6 月中旬より東日本大震災の影響により全学的な省エネルギー対策が実施されているが、平成 22 年度で一次エネルギー原単位を比較すると理科系平均（2,685MJ/㎡・年）に比べ生物科学系施設は約 45%高く、情報科学系施設は約 6%低い施設となっている。

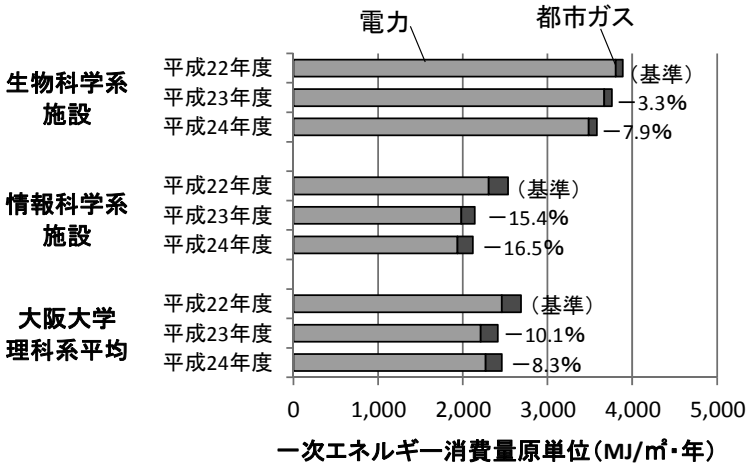


図-4.1　一次エネルギー消費量原単位推移

両施設とも平成 22～24 年度の間は大規模な改修工事は行われていないが、主に運用面の省エネルギー対策により図-4.1 に示す削減効果が確認できる。

次に一次エネルギー消費量のうち、平成 22 年度実績で生物科学系施設の 98%、情報科学系施設の 91%を占める電力について削減効果を確認する。図-4.2 に月別電力消費量の推移を示す。両施設とも節電活動の影響により、平成 23 年 7 月頃より電力消費量の低減が確認でき、特に情報科学系施設において顕著である。

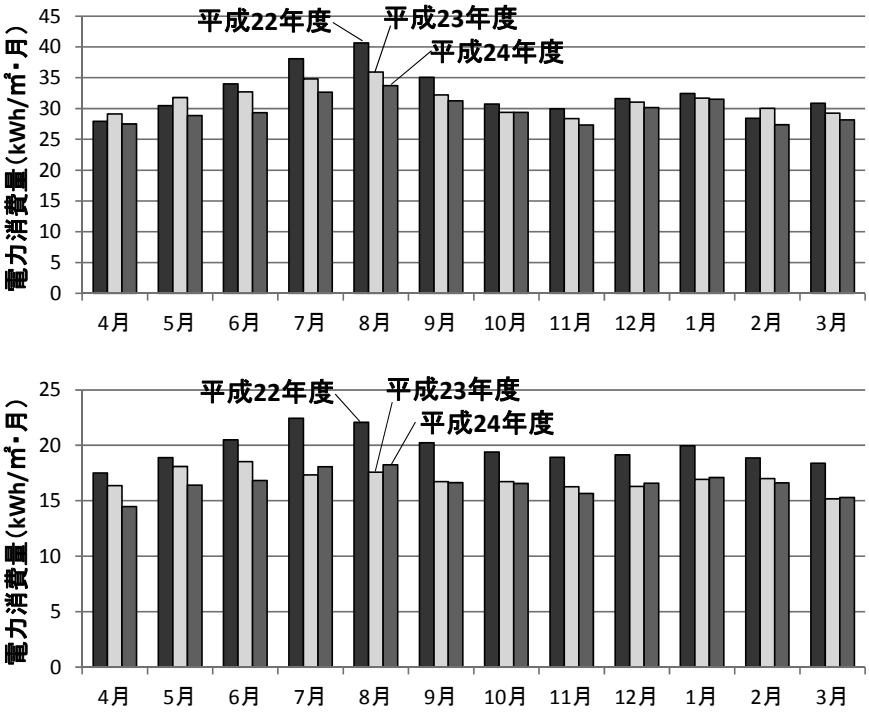


図-4.2　月別電力消費量の推移（上：生物科学系施設、下：情報科学系施設）

さらに、先述のとおり両施設は施設全体の電力消費量が時刻ごとに計測されている。図-4.3 では、2 章の手法に倣い、各月の電力消費量を、人の活動に関係しない電力消費量「ベース分」（＝式(2.3)）と、人の活動に伴って必要となる電力消費量「変動分」（式(2.4)と式(2.5)の合算）とに分け、年間で積算して年度ごとに比較した。

図-4.3によれば、省エネルギー対策前の平成22年度において、ベース分は年間電力消費量のうち、生物科学系施設：81%、情報科学系施設：79%と多くの割合を占めている。しかし、平成 22 年度に対する平成 23 年度、平成 24 年度の削減率は、変動分がいずれも 20%以上であるのに対し、ベース分はその率が小さいことが確認でき特に生物科学系施設において顕著である。施設利用者が日中に利用する空調、OA・実験機器、照明などは省エネルギー対策がなされているものの、人の活動に関係しない 24 時間稼働する機器は相対的に前者ほど対策が進んでいない実態が窺われる。

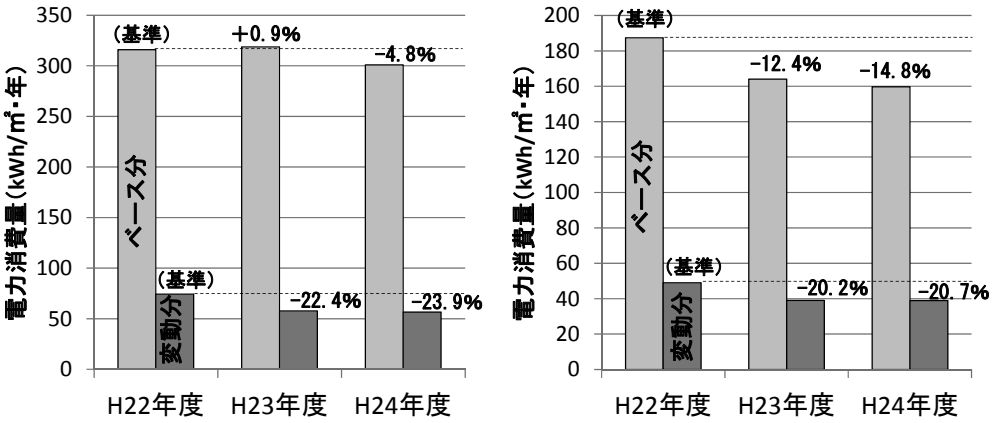


図-4.3　電力消費量の削減率（左：生物科学系施設、右：情報科学系施設）

4.2.2　保有機器調査

第 2 章で示したとおり、大阪大学の理科系施設では、ベース分が年間電力消費量の 77%と大部分を占めており、省エネルギー対策の立案にはこの内訳の把握が欠かせない。前項のとおり生物科学系施設、情報科学系施設とも年間電力消費量に占めるベース分の割合は大阪大学理科系施設の値に近い。両施設においてベース分の電力消費量の内訳を推察するため、施設内保有機器の調査を実施した。

4.2.2 (1)　調査概要

調査は平成 24 年 4 月より行い、各施設に属する研究室や施設事務への記入式アンケートにより実施した。なお回答は両施設とも全配布先より得ている。調査対象機器は冷蔵庫・冷凍庫・フリーザー類、実験機器（500W/台以上）、サーバ、パソコン、事務機器、AV 機器、個別暖房機器、調理機器等とし、建物に付随する建築設備（空調、照明、換気、給湯機器等）は対象外とした。調査では各機器の機器種別（選択式）、機器名称（実験機器のみ）、台数、製造年、定格消費電力、定格燃料消費量等に加え、年間稼働時間（①0～300h 未満、②300～1,000h 未満、③1,000～2,000h 未満、④2,000～3,000h 未満、⑤3,000h～、⑥8,760h の中から選択）および平成 23 年度夏期・冬期の省エネルギー対策の実施状況（選択式）も確認している。なお、調査の回答率を上げるため、実験機器は 500W/台以上の機器を調査対象とし、パソコン、事務機器、調理機器の定格消費電力の入力は任意としている。

4.2.2 (2)　調査結果

図-4.4 には年間の稼働時間が 8,760 時間（年間 24 時間）とされた機器の定格消費電力の容量比率の結果を示す。なお、定格消費電力が未記入の機器は、同じ機器種別の数値入力機器の平均値を代入した。

定格消費電力に対する実際の消費電力量の割合は、機器種別によりそれぞれ異なるため実際の消費量内訳とは差違があるが、ベース分は主にこれらの機器と、24 時間稼働の空調や待機電力、変圧

器損失などにより構成されているものと考えられる。施設ごとに特徴を確認すると、生物科学系施設ではフリーザー・冷凍庫類や実験機器が、情報科学系施設はサーバ・大型計算機類、パソコンの比率が高いことがわかる。

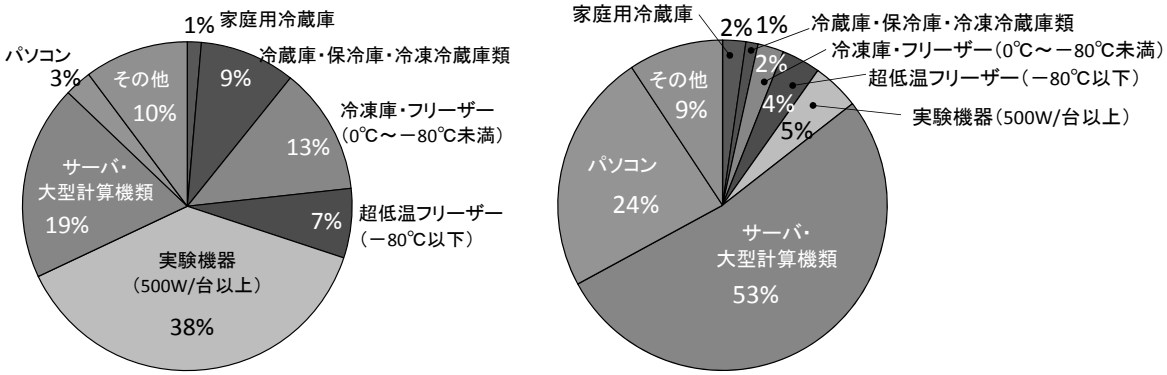


図-4.4　24 時間稼働機器の定格消費電力容量比率（左：生物科学系施設、右：情報科学系施設）

図-4.5 では稼働時間別の省エネルギー対策の実施状況を示す。図は定格消費電力基準での割合を示しているが、8,760 時間（年間 24 時間）稼働の機器よりも、その他の間欠運転機器の対策が実施されている状況が確認でき、図-4.3 の傾向と一致する。また、図-4.3 によると特に生物科学系施設のベース分の削減率が低いが、生物科学系施設の 8,760 時間（年間 24 時間）稼働機器の対策実施率の差の低さがその一因として考えられる。

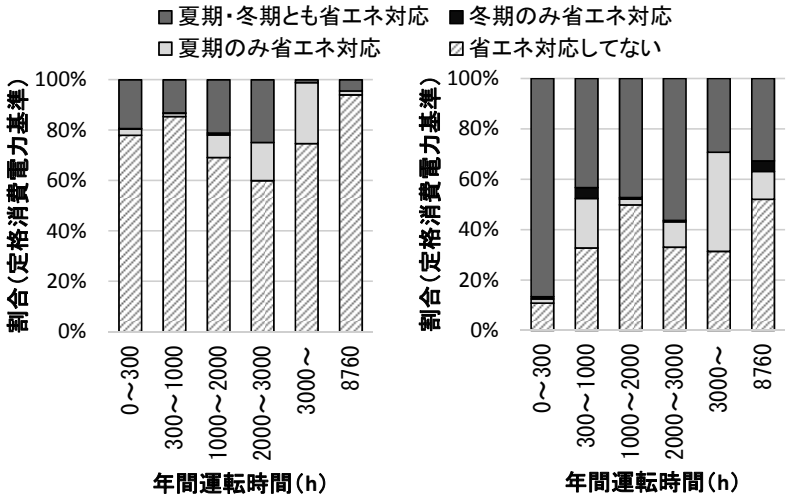


図-4.5　稼働時間別の省エネルギー対策実施状況（左：生物科学系施設、右：情報科学系施設）

図-4.6 では機器別の省エネルギー対策の実施状況を示す。機器により対策実施の許容度に差があると考えられるが、情報科学系施設では、図-4.4 に示された設置率の高いサーバ・大型計算機類、

パソコンで省エネルギー対策の実施率が比較的高い。このことが図-4.1 に示す情報科学系施設のエネルギー削減率の大きさに繋がっているものと推察される。

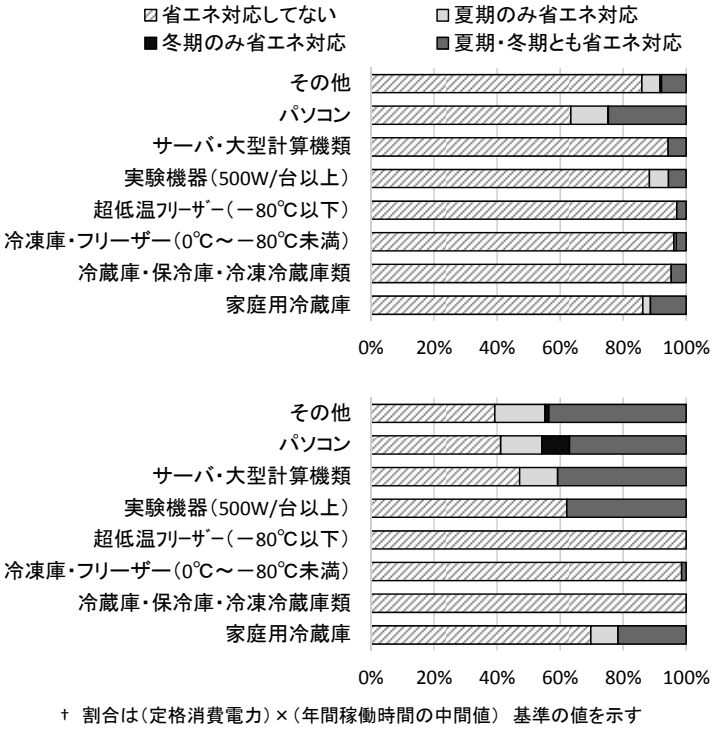


図-4.6 機器別の省エネルギー対策実施状況（上：生物科学系施設、下：情報科学系施設）

以上のように施設により稼働機器の内訳は異なっており、その実態を把握して、効果的な省エネルギー対策を見出した上で実行に移すことが重要である。次項では空調、照明など建築設備を含めた内訳の推計を行う。

4.2.3 エネルギー消費内訳の推計

4.2.3 (1) 従来法

エネルギー消費内訳のうち、空調用エネルギー消費量を推計する手法として、従来は月別エネルギー消費の変化量から推計する事例 4.1)~4.3)が一般的である。しかしこれらの手法は非空調用途のエネルギー需要は月変動がないことを前提としているが、大学施設では、夏季・冬季長期休暇に需要が減少したり、研究論文の作成期には活動量が増大したりするなど、季節により非空調用途の需要が変動する可能性がある。図-4.7 には平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月の平日における大阪大学吹田キャンパス全体（延床面積約 65 万㎡）の日電力消費量と日平均外気温の関係を示す。なお、外気温は気象庁統計情報 4.5)の大阪「豊中」のデータによる。夏期や冬期は空調需要の増大により日電力消費量が増加するが、8 月、9 月、3 月は他の月に比べ電力需要が明らかに少ないことが確認でき、外気温の変動以外の要素により電力需要に差が生じていることが分かる。

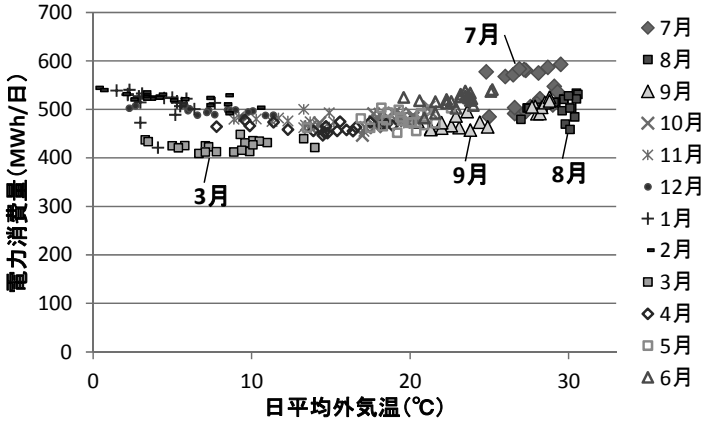


図-4.7　吹田キャンパスの日電力消費量（平日）と日平均外気温の関係

また、第 3 章で取り上げた生物科学系研究室（生物科学系施設 A 棟内・床面積 343.2 ㎡）の月別電力消費量の内訳（実測値）を図-4.8 に示すが、非空調用途の電力消費量は月により最大 12%の差がある。加えて従来法では総一次エネルギー消費量と空調用一次エネルギー消費量の最小月は同じ月に発生することを前提としているが、本研究室では前者は 6 月、後者は 5 月と一致しておらず、仮に従来法で空調用電力消費量を試算し実測結果と比較すると年間で 14%、最も誤差が大きい月では 56%の差違が生じることとなる。また、同様に第 3 章で取り上げた情報科学研究室では、多大な電力を消費する大型サーバの稼働率が研究スケジュール等の影響により月ごとに大きく異なっており、このような施設では従来の算定方法はそぐわない。

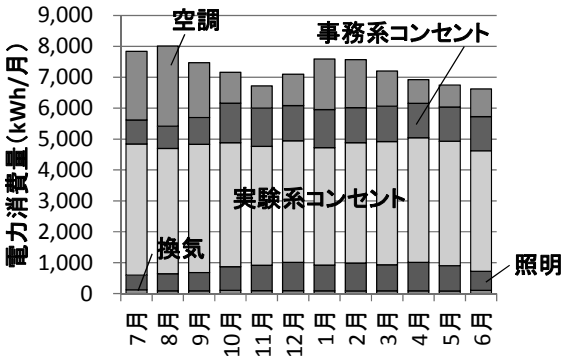


図-4.8　生物科学系研究室の電力消費量実測値

4.2.3 (2)　内訳推計手法の提案

提案する手法で分離する内訳は「照明」、「空調」、「換気」、「コンセントその他」の 4 用途とする。設備に関わる既知情報として、内訳を推計するエリアの保有機器（空調、照明、換気等）のデータベース、エリア全体の時刻別電力消費量および月別ガス使用量のみが把握できる条件において、建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST 専門版を利用することで、非空調用途の需要に

月変動があることを前提としたエネルギー消費内訳の推計手法を提案する。

提案する手法では、理科系研究施設において絶対量の多いコンセントその他の需要量が、月の違いにより変動が特に大きいと想定するものとする。照明、換気は機器データベースおよび時刻別電力消費の実績ロードカーブを活用して推計し、空調、コンセントその他の特定には BEST を利用する。先に推定した照明、換気を入力条件として与え、月ごとにシミュレーション上でコンセントその他の負荷を変化させ、各月のエネルギー消費量の総量が実績値と合致するポイントを特定することで空調とコンセントその他の割合を算定する。なお大阪大学の理科系研究施設の大半は個別分散方式であり、本手法は個別分散方式（主として EHP 方式）の建物での推計を想定している。図-4.9 に提案手法の概要、図-4.10 に BEST 利用時（Step 2）のフローチャートを示す。

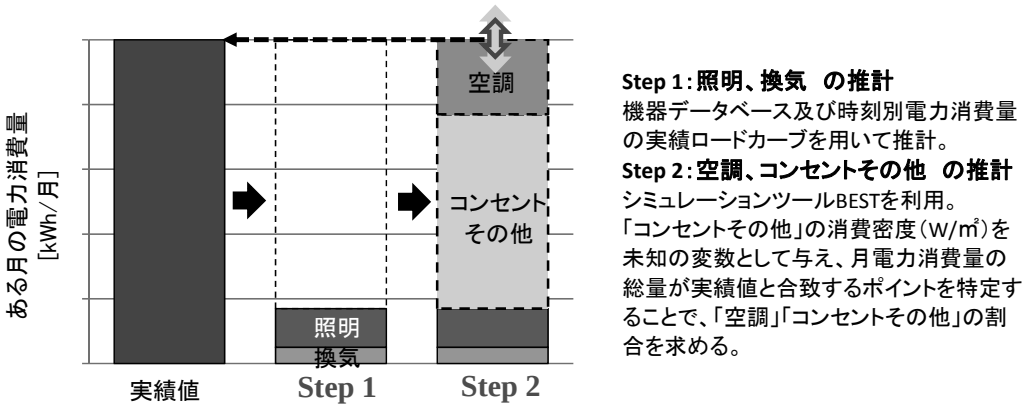


図-4.9　提案手法の概要

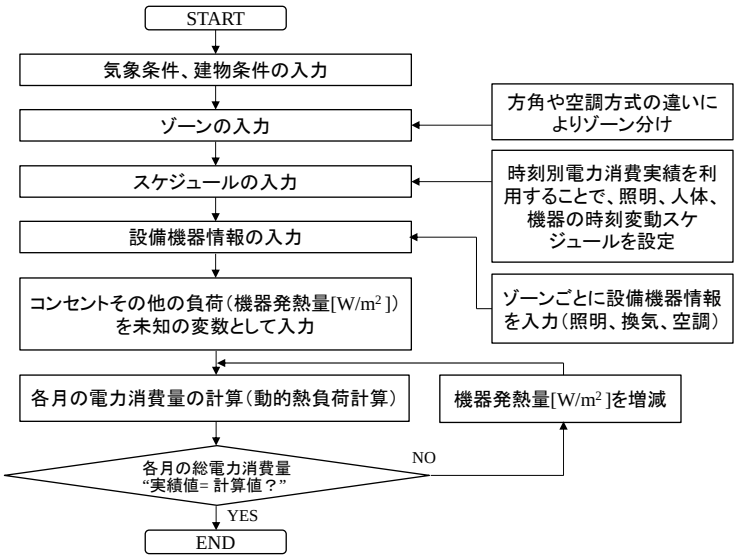


図-4.10　BEST（図-4.9 の Step2）のフローチャート

以下に推計手法の詳細を示す。

1）推計の前提

シミュレーションを行う際、照明、人体、機器（コンセントその他）の時刻変動スケジュールを与える必要があるが、その設定には推計対象エリア全体の時刻別電力消費実績を利用する。照明、人体の時刻変動スケジュールは第 3 章の結果からも夜間や休日は実働量が少なく、平日の日中にかけて増加する曲線を示すことから、「変動分」の時刻変動に近い特性を持つものと考え、次式(4.1)、(4.2)および図-4.11 により月ごとに平日・休日別に定義した。

$$Sd_A_{wd}(h)(n) = act_{wd}(h)(n) \ / \ act_{wd}max(n) \quad \cdot\cdot\cdot(4.1)$$

$$Sd_A_{we}(h)(n) = act_{we}(h)(n) \ / \ act_{wd}max(n) \quad \cdot\cdot\cdot(4.2)$$

ここで、

$Sd_A_{wd}(h)(n)$	：n 月平日 h 時の照明・人体スケジュール値	[%]
$Sd_A_{we}(h)(n)$	：n 月休日 h 時の照明・人体スケジュール値	[%]
$act_{wd}max(n)$	：n 月の平日平均変動分電力消費の最大値	[kW]
$act_{wd}(h)(n)$	：n 月の平日平均変動分電力消費の h 時の値	[kW]
$act_{we}(h)(n)$	：n 月の休日平均変動分電力消費の h 時の値	[kW]

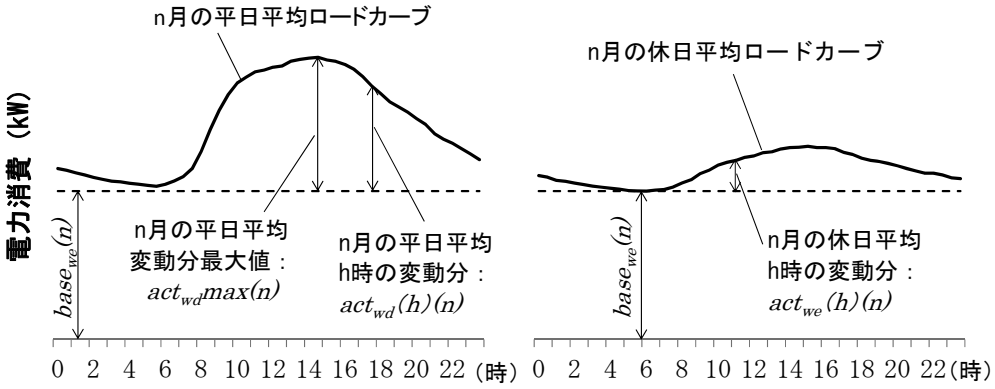


図-4.11　n 月の照明、人体の時刻変動スケジュールの設定

機器（コンセントその他）については第 2 章、第 3 章の結果からも夜間も一定の電力消費が存在すると考えられる。時刻変動スケジュールは、後に示す照明、換気の電力消費を算出した後に、n 月の平均ロードカーブから照明、換気の電力分を差し引き、図-4.12 に示される $R_{wd}max(n)$、$R_{wd}(h)(n)$、$R_{we}(h)(n)$を用いて次式(4.3)、(4.4)に示す式により月ごとに平日・休日別に設定した。なお、実際にはこのスケジュール値に空調用消費電力の変動も含まれるが、その影響は無視する。

$$Sd_B_{wd}(h)(n) = R_{wd}(h)(n) \ / \ R_{wd}max(n) \quad \cdot\cdot\cdot(4.3)$$

$$Sd_B_{we}(h)(n) = R_{we}(h)(n) \ / \ R_{wd}max(n) \quad \cdot\cdot\cdot(4.4)$$

ここで、

$Sd_B_{wd}(h)(n)$　：n 月平日 h 時の機器スケジュール値　[%]

$Sd_B_{we}(h)(n)$　：n 月休日 h 時の機器スケジュール値　[%]

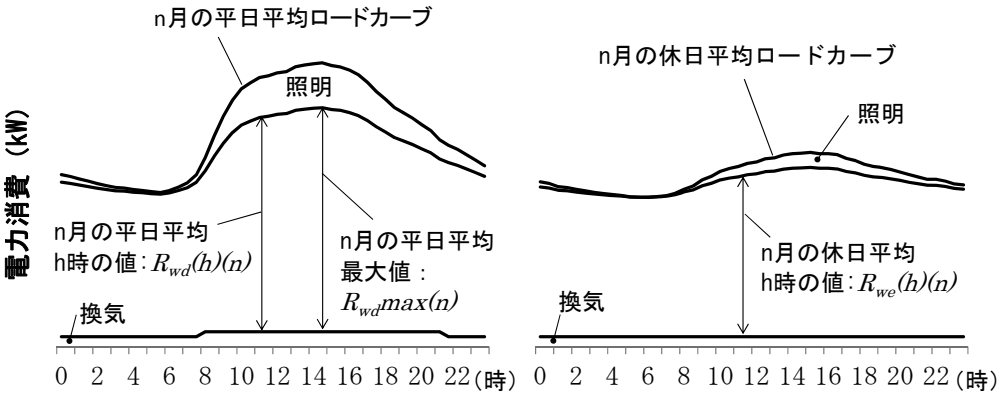


図-4.12　n 月のコンセントその他の時刻変動スケジュールの設定

2）照明の推計

照明の電力消費量は、竣工図や機器台帳のデータベースから得られる各器具の定格消費電力の合計値に、先に示した $Sd_A_{wd}(h)(n)$、$Sd_A_{we}(h)(n)$を乗じることで、月ごとに、平日、休日別に各時刻の電力消費量を算出する。なお、倉庫や機械室など点灯時間が極端に短いと考えられる室用途については点灯時間がないものと仮定して算出する。

本推計方法の実建物での検証は 4.2.3(3)にて行うが、第 2 章で示した理科系（カテゴリーⅡ）のロードカーブを用いて算定したところ、全点灯相当時間（$Sd_A_{wd}(h)(n)$ や $Sd_A_{we}(h)(n)$の日積算値を 100 で除した値）の各月の平均は、平日：12.4 時間、休日：3.0 時間となっており、文献[4.6)]から得られる事務所等の値（11.45 時間）と比較しても妥当であると判断する。

3）換気の推計

全熱交換器など居室用換気は 24 時間運転と仮定し、竣工図や機器台帳のデータベースから得られる各機器の定格消費電力を用いる。トイレ等の日中のみ運転するファンは文献[4.6)]を参考に、平日の 8 時から 13.6 時間運転する（事務所等年間運転時間 3,300 時間を適用し算出した。（3,300／243＝約 13.6 時間））こととし、運転時間が極端に短いと考えられる間欠用途のファンは無視した。また、ドラフトチャンバー用の排気ファンは生物科学系施設 A 棟における実測結果をもとに、全設置台数の 70%が定格消費電力に対し 75%で 24 時間運転するものとした。

4）空調、コンセントその他の推計

BEST を利用して算出する。入力条件を以下に示す。

a）気象条件: 実在年再現用に加工した気象データ。（米国エネルギー省公開の気象データ「OSAKA」

[4.7]をベースに、気温は気象庁統計情報[4.5]の大阪府「豊中」を、湿度は「豊中」は未計測のため大阪府「大阪」を利用し、各検討対象期間と同期間の時刻別データを代入した。)

b) 建物条件: 内訳推計するエリアを、負荷特性や空調方式の違いによりゾーン分けを行う。全ての室を①EHP（日中のみ運転)、②EHP（24h 恒温運転)、③EHP（24h 年間冷房運転)、④GHP（日中のみ運転)、⑤GHP（24h 恒温運転)、⑥非空調の 6 種に分け、さらに⑥を除く①～⑤のそれぞれを外皮条件により分類（外壁に接しないインテリア室と外壁に接する室は方位別に区分け）し、ゾーンとして定義した。③は主にサーバ室、②⑤は研究目的上 24 時間の空調運転が必要な恒温室等が該当する。仮に外壁面が 4 方位ある場合のゾーン数は、最大で、5（①～⑤）×5（4 方位＋インテリア室）＋1（⑥）＝26 となる。竣工図より各ゾーンの総床面積を算出した後、ゾーンごとに外皮面積を算定し、壁体・窓の条件をそれぞれ BEST 上で与える。同様にゾーンごとに隣り合うゾーンの内壁面積を算定し、ゾーン間の熱的影響も考慮し入力条件として与える。

本設定は、3 次元空間としては実在し得ない建物となるが、熱収支としては精度の高い実態の再現が可能となる。

c) 照明発熱: 機器データベースにより、ゾーンごとに最大発熱量（照明器具の消費電力の合計値を床面積で除した値（W/㎡））を算出し、1)で設定した照明・人体スケジュール値を乗じることで毎時の照明発熱量を与える。

d) 人体発熱: 最大人員（人/㎡）は⑥非空調ゾーンを除いて一律同じとし、内訳を推計するエリア全体の利用人員（教職員数＋在籍学生数）を⑥非空調ゾーンを除く総床面積で除した値とする。最大人員（人/㎡）と、1)で設定した照明・人体スケジュール値を用いることで、人体発熱量を与える。

e) 機器発熱: ⑥非空調ゾーンは人体と同様に発熱がないものとする。最大発熱量（W/㎡）は未知の変数とする。ここで、③EHP（24h 年間冷房運転）のゾーンはそもそも室内負荷が高く、機器発熱量がその他のゾーン（①、②、④、⑤）とは大きく異なるため、前項の保有機器情報を利用し、③EHP（24h 年間冷房運転）とその他（①、②、④、⑤）とで、入力する最大発熱量（W/㎡）の重み付けをする。重み付けは（定格消費電力）×（年間稼働時間）基準により行う。なお、年間稼働時間は 4.2.2（1）で示した選択肢ごとに中間値を採用している。最大発熱量（W/㎡）と、1)で設定した機器スケジュール値を用いることで、機器発熱量を与える。

f) 換気量: 隙間風(夏期 0.2 回/h、冬期 0.6 回/h[4.8]、中間期 0.4 回/h)と、3)の条件下での換気量をゾーンごとに算出し入力値として与える。なお全熱交換器効率は 60%とした。

g) 空調の運転条件: 日中のみ運転するエリア（①、④）の空調の運転時間は 1)で設定した照明・人体スケジュール値が 25%を超えた時刻を開始時とし、25%を割り込む時刻を停止時とした。

h) 空調機器 : 機器データベースの情報をもとに、ゾーンごとに機器を平均化して与える。それぞれのゾーンで機種種別（ビル用マルチ、ルームエアコンなど）ごとに設置機器の冷房・暖房能力や消費電力・ガス消費量を合計し、設置台数で除した能力の機器を与えた。

以上の条件を入力値として与え、月ごとにシミュレーション上で機器発熱量（W/㎡）を変化させ、各月の電力消費量の総量が実績値と合致するポイントを特定することで空調と機器（コンセントそ

の他）の割合を算出し各エネルギー消費量を求める。

今回の提案法は、人体・機器発熱量については、ゾーンごとの配分が実際とは若干異なる可能性があるが、推計対象エリア全体での負荷量は整合しており、ゾーン間の相互の熱的影響も考慮しているため、推計対象エリア全体の空調用エネルギー総量の算出においては一定の精度は確保されているものと考える。

4.2.3 (3)　内訳推計手法の精度検証

提案法の推計精度を確認するため、用途別のエネルギー量が計測されている第 3 章で示した生物科学系研究室を対象に、本手法による推計値と実測値を比較した。検証期間は計測を開始した平成 23 年 4 月からの 1 年間とした。但しこの期間においては東日本大震災の影響により 6 月中旬より全学的な節電対策が実施されており、本研究室でも 6 月以降、照明は間引きが行われている特殊条件下であるため、節電期間中の照明最大発熱量（W/㎡）については実測値を用い、換気は運転状況のヒアリングにより運転時間を設定した。なお、空調の設定温度条件は、研究室代表者へのヒアリングで得た温度（詳細は表-4.2 による）としている。

結果を図-4.13、図-4.14 に示す。図-4.13 に示すとおり年間一次エネルギー消費量の内訳誤差は最も大きいコンセントその他でも 1.1%と精度よく内訳推計がなされている。節電対策前の期間のみ（4、5 月）で検証しても内訳誤差は照明、換気で 0.8%、空調で 0.2%、コンセントその他で-1.8%と小さい。また、空調以外の需要が月ごとで変化しても、空調用の月別一次エネルギー消費量の差は最大でも 7 月の 14%と、従来法と比較して高い精度で再現がなされており、本提案法が内訳の推計法として有効であると判断する。

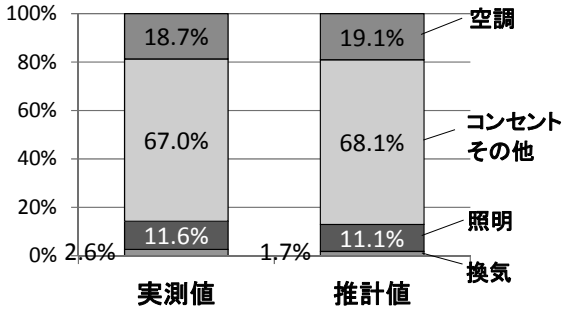


図-4.13　年間一次エネルギー消費量の内訳推計検証結果

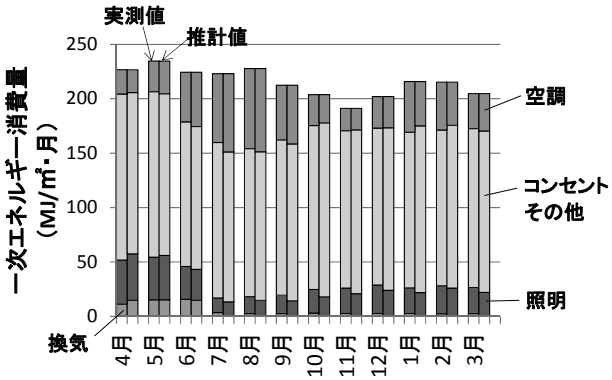


図-4.14　月別一次エネルギー消費量の内訳推計検証結果

「4.2.3 エネルギー消費内訳の推計」における空調の設定温度一覧

表-4.2　空調設定温度一覧

	4.2.3 (3)精度検証			4.2.3 (4)推計	
	節電対策前	節電対策後			
	冷房	冷房	暖房	冷房	暖房
日中のみ運転	28	28	23	26	22
24h恒温運転	20	23	20	20	20
24h年間冷房運転	―	―	―	24	―

4.2.3 (4)　理科系研究施設のエネルギー消費内訳の推計

表-4.1 の生物科学系施設および情報科学系施設のエネルギー消費内訳を推計する。対象期間は節電対策前の平成 22 年度とする。空調の設定温度条件は生物科学系研究室の節電対策前のヒアリングや文献値 [4.9]を参考に設定した（詳細は表-4.2 による）。結果を図-4.15、図-4.16 に示す。なお、情報科学系施設については、空調用とその他用とでガスメーターが分かれており、空調（GHP）用の月別ガス消費量が把握可能となっている。この計測値と推計値を比較したところ、年間で-2.3%と小さな誤差であることを確認している。

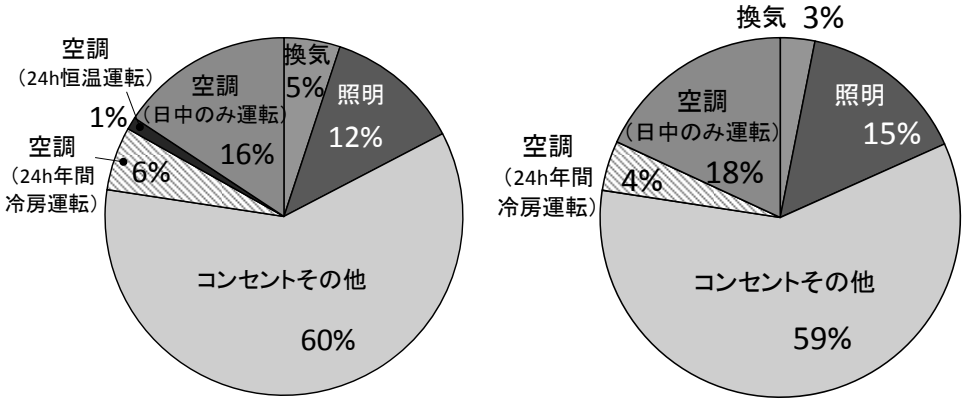


図-4.15　年間一次エネルギー消費量の内訳推計結果

（左：生物科学系施設、右：情報科学系施設）

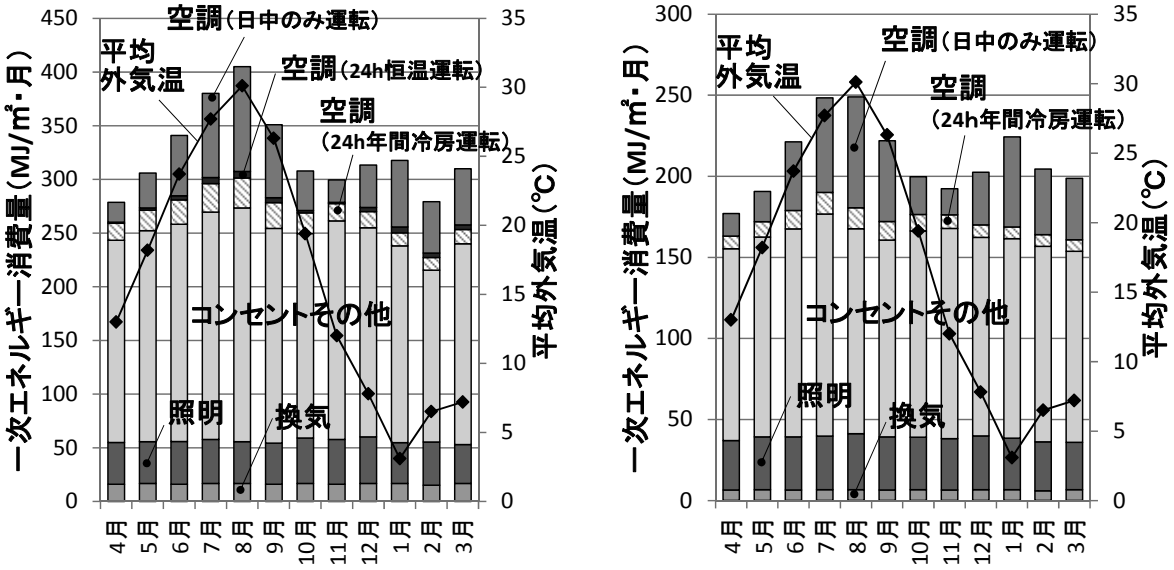


図-4.16　月別一次エネルギー消費量の内訳推計結果

（左：生物科学系施設、右：情報科学系施設）

図-4.15 では年間一次エネルギー消費量の内訳推計結果を示す。生物科学系施設、情報科学系施設とも、コンセントその他の一次エネルギー消費量が非常に多く、年間の約 6 割を占める結果となった。空調の合計はともに約 23%でほぼ一致しているが、この一致は異なる要因により図らずも一致したものと考えられる。一因として、空調用消費量に対する内部発熱量の割合は比較的近いが、両者の空調用消費量に対する外皮負荷、外気負荷の割合を推察すると、生物科学系施設の方が内部発熱量の絶対値が大きいため相対的に全負荷に占める外皮負荷の割合が小さくなるが、逆に換気量は多いため外気負荷が多くなり、結果として外皮＋外気負荷の割合が同程度となり、空調のエネルギー消費割合が近くなったことなどが考えられる。

図-4.16 では、月別一次エネルギー消費量の内訳推計結果を示す。ともに論文作成期後の冬季休暇の時期（2 月前後）は、コンセントその他の消費量がやや需要が少なくなる傾向が確認できる。生物科学系施設での夏期のコンセントその他の消費量の多さは、フリーザーや冷凍庫、低温庫など、気温により効率が低下する機器の影響が一因として考えられる。

推計結果をもとに、図-4.17 では外気温との相関を確認するため、平日の日平均外気温と各用途の日エネルギー消費量の関係を表す気温感応度分析を行った。

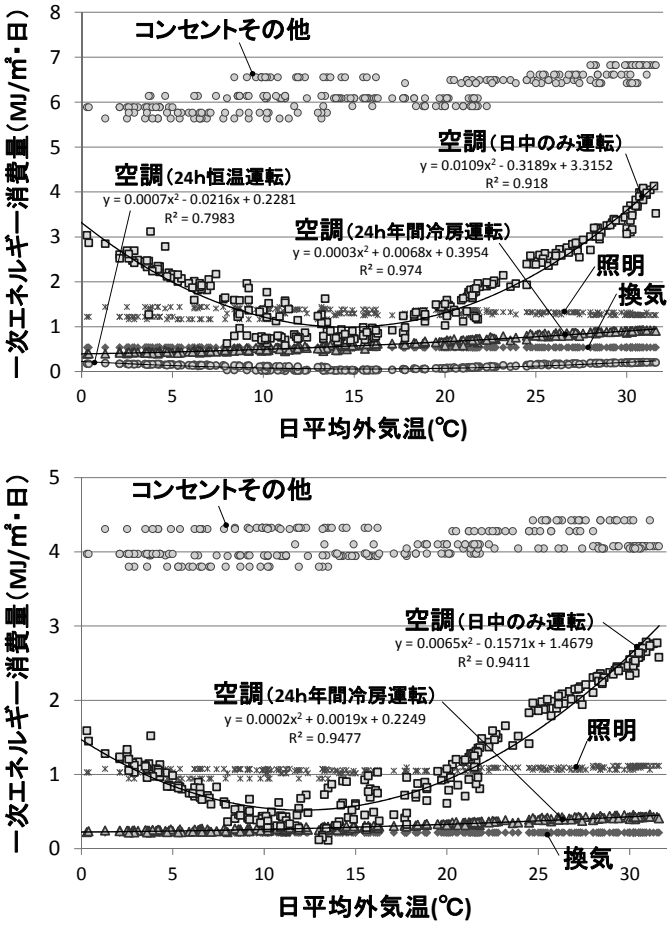


図-4.17　各用途の気温感応度分析

（上：生物科学系施設、下：情報科学系施設）

空調は、外気温の夏期の上昇および冬期の低下に伴い需要が増加するが、サーバ・大型計算機類など内部発熱量の大きい 24h 年間冷房運転の系統については、外気温の上昇とともに右肩上がりにエネルギー消費量が増加することが確認できる。また夏期だけに着目すると、日中のみ運転する系統の空調は、外気温の上昇に伴い、外皮負荷・外気負荷の増加や空調機器効率低下によりエネルギー消費量が顕著に上昇するが、24h 年間冷房運転の系統は、相対的に内部発熱量が大きいために外気温変動の影響が小さいことが確認できる。

4.2.4　エネルギー削減効果の定量化

4.2.4 (1)　評価ケース

前項で内訳推計した節電対策前を基準とし、各種の運用改善がもたらす削減効果の定量化を行った。評価ケースを表-4.3 に示す。

対策Ⅰは本施設居室における一般的な設計照度 500～800lx 程度から、1／3 の照明器具を間引きして 333～533lx 程度に抑えることを想定している。対策Ⅱは前章に示した生物科学系研究室における実績値（事務系コンセントで 19%、実験系コンセントで 12%の年間電力消費量を削減）を参考に一律 15%削減と設定した。また、対策Ⅲは、空調設定温度を 2℃緩和するものとし、一般居室では冷房 28℃、暖房 20℃となる条件とした。

表-4.3　評価ケース

ケース	対象用途	概要
対策Ⅰ	照明	1/3を間引き
対策Ⅱ	コンセントその他	一律15%削減
対策Ⅲ	空調	設定温度を2℃緩和
対策Ⅳ	対策Ⅰ～Ⅲを全て実施	

4.2.4 (2)　試算結果

図-4.18 に試算結果を示す。図では夏期、冬期、年間それぞれの期間において、各対策を行った際の施設全体に対する削減率（棒グラフ）、および用途ごとの削減率（折れ線グラフ）を表している。なお、夏期は 6～9 月、冬期は 12～3 月の期間を示す。

両施設とも、対策Ⅰ、Ⅱを行うと照明やコンセントその他の消費量が削減されるが、これに伴い内部発熱量が減少することで夏期では空調エネルギーも削減されることとなる。逆に冬期において暖房運転となる日中のみ運転や 24h 恒温運転の系統の空調はエネルギーが増加することが確認できる。

空調のエネルギー消費量を削減するには、日中のみ運転や 24h 恒温運転の系統では設定温度の緩和（対策Ⅲ）が効果的だが、24h 年間冷房運転の系統では個別の削減率をみても対策Ⅲの効果は低く、コンセントその他の負荷低減（対策Ⅱ）によって生じる空調削減量の方が多いことが分かる。

これは 24h 年間冷房運転の系統の空調は、全体負荷に占める機器発熱負荷の割合が高いため、対策Ⅱに比べ、対策Ⅰや対策Ⅲの削減効果が低くなることに起因するものと考えられる。

試算の結果、対策Ⅰ～Ⅲを全て行う対策Ⅳでは生物科学系施設で 16%、情報科学系施設で 18%の年間削減効果があることを把握した。

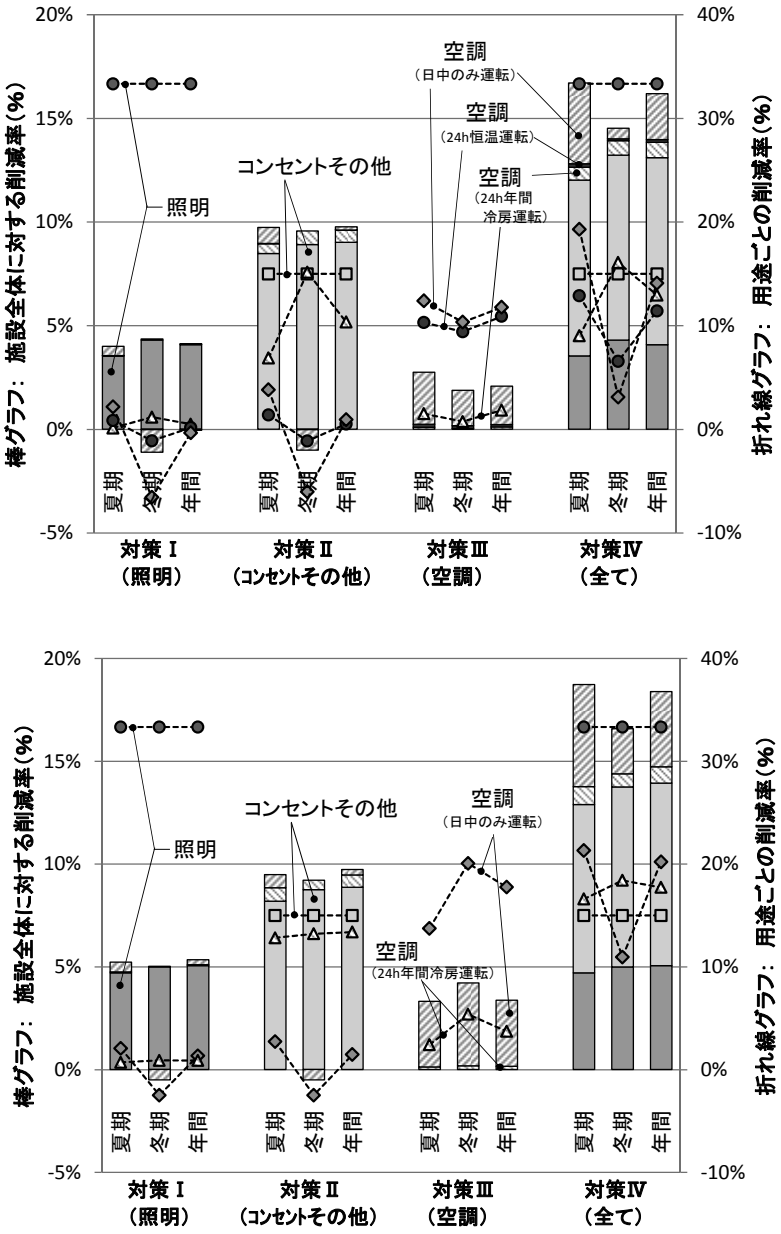


図-4.18　一次エネルギー消費量削減率の試算結果

（上：生物科学系施設、下：情報科学系施設）

4.3　キャンパス規模でのエネルギー消費内訳の推計と分析

本節では前節の結果を踏まえ、理科系施設を対象としたキャンパスレベルでの消費特性分析を行い、この分析規模に適した内訳の推計手法を提案する。また、建物条件や使用状況の変化がもたらす感度分析や、改修による削減ポテンシャルの把握、効果的な機器更新方法の提案を行う。

4.3.1　研究対象施設の概要とエネルギー消費実態

4.3.1(1)　施設概要

本節における分析対象施設を表-4.4 に示す。選定にあたっては、大阪大学吹田キャンパスの理科系施設の中から、他施設から熱供給を受けている部局、近年建物の改修や増築を行った部局、取り壊し予定の建物がある部局などを除いたものとした。対象施設の合計延床面積は 101,708 ㎡で大阪大学理科系施設全体の 20%に相当する。

なお、対象施設の平成 22 年度時点の一次エネルギー消費量の平均は、2,994 MJ/㎡・年となっている。(大阪大学理科系施設の平均は 2,685MJ/㎡・年)

表-4.4　対象施設の概要

	施設名	延床面積 (m^2)
A	応用物理系	5,040
B	建設系	12,201
C	原子力系	8,333
D	応用生物系	4,380
E	応用化学系	8,784
F	材料系	14,712
G	情報科学系	12,350
H	生命機能系	14,128
I	生物科学系	11,460
J	接合科学系	10,320
	合計	101,708

4.3.1(2)　エネルギー消費実態

対象施設ごとの延床面積と一次エネルギー消費量の関係を図-4.19 に示す。

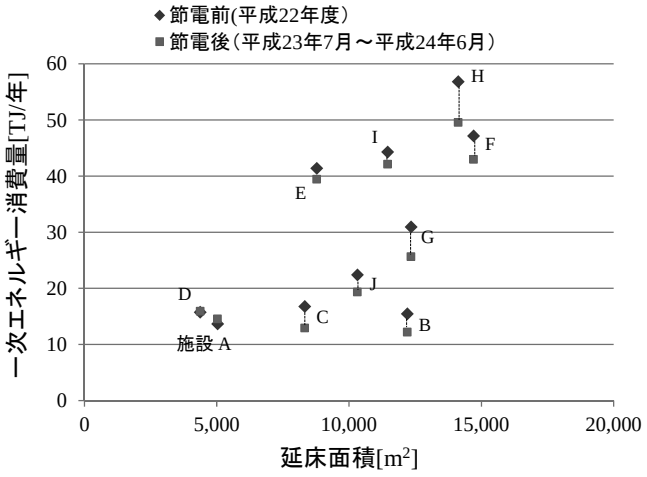


図-4.19　各施設の延床面積と一次エネルギー消費量の関係

東日本大震災の影響により、大阪大学では平成 23 年 7 月から全学的な節電活動を行っており、多くの施設でエネルギー消費量が削減されていることがわかる。節電前の平成 22 年度と比較すると、節電後（平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月）は合計で 10%の一次エネルギー消費量が削減されている。

図-4.20 には、年間一次エネルギー消費量を以下に規定する式(4.5)（4.6)により、「ベースエネルギー」と「季節変動エネルギー」に分離して、年間一次エネルギー消費量とそれぞれ比較したものを示す。

$$En_b = En_min \times 12 \quad \cdots \quad (4.5)$$

$$En_f = En_t - En_b \quad \cdots \quad (4.6)$$

ここで、

En_b	：ベースエネルギー	[MJ/㎡・年]
En_f	：季節変動エネルギー	[MJ/㎡・年]
En_min	：一次エネルギー消費量が最小となる月の消費量	[MJ/㎡・月]
En_t	：年間一次エネルギー消費量	[MJ/㎡・年]

図-4.20 より、施設間で一次エネルギー消費量に大きな差があるが、季節変動エネルギーの差はそれほど大きくなく、季節の変化に関わらず定常的に消費されるエネルギーの差が直接的に年間エネルギー消費に影響していることが推察される。

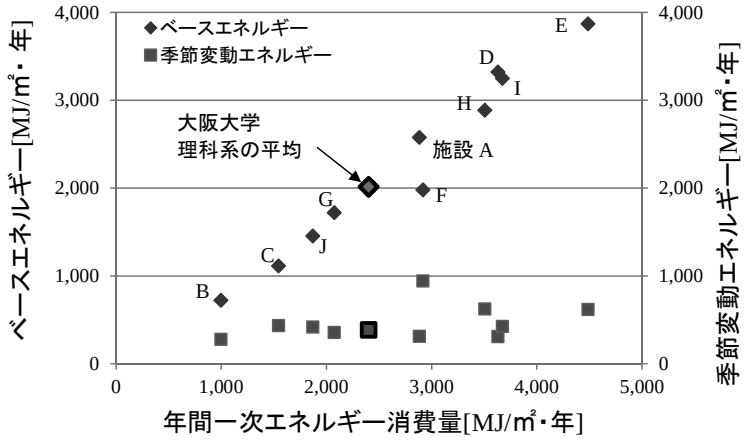


図-4.20　一次エネルギー消費の分析（平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月）

対象施設の一次エネルギー消費量のうち、96%が電力消費である。対象施設の電力可視化システムの計測結果を図-4.21 に示す。ここで、図-4.22 では 2 章の手法に倣い、各月の電力消費量を、人の活動に関係しない「ベース電力消費」（＝式(2.3)）と、人の活動に伴って必要となる量「変動電力消費」（式(2.4)と式(2.5)の合算）とに分け、年間で積算した上で、年間電力消費量と比較した。

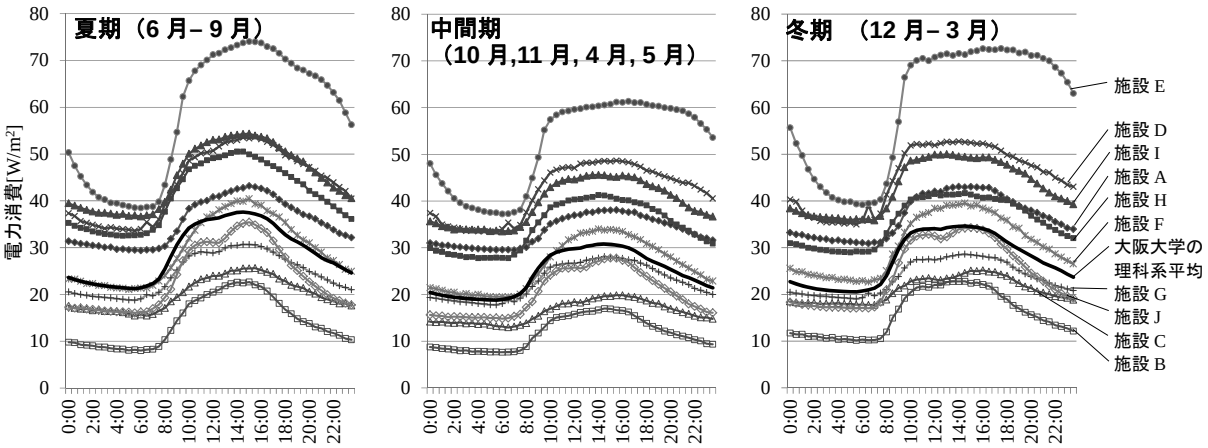


図-4.21 各施設の電力日負荷曲線（平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月・平日）

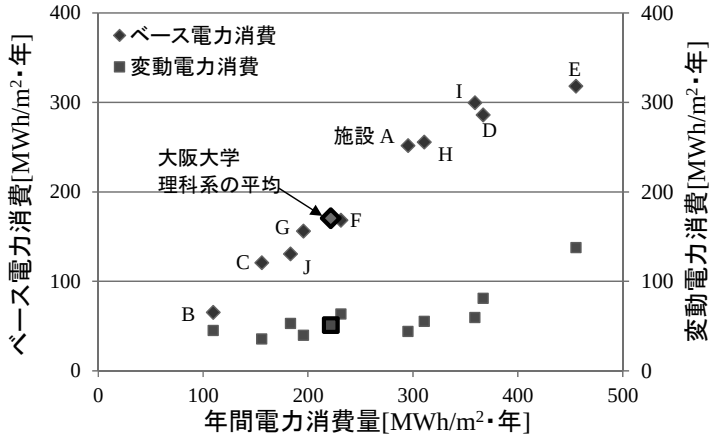


図-4.22 電力消費の分析（平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月）

図-4.22 の結果より、年間電力消費の大きさは、ベース電力消費 の大きさに影響されていることがわかり、図-4.20 の結果にも近い。このことから日々のベース電力の大きさが、季節の変化に関わらず定常的に消費されるエネルギーの大きさの違いを生み、さらには年間エネルギー消費量にも多大な影響を与えているもの考えられる。

4.3.2 空調設備の設置状況調査

エネルギー消費に関わる分析や、改修による削減ポテンシャルの把握を行うためには、設備機器の設置状況の把握が欠かせない。表-4.4 の施設を対象に、図面確認や現地調査により空調、換気、照明等、建築設備の設置状況調査を行った。なお、対象施設の空調は全てパッケージ方式となっている。

図-4.23、図-4.24 に空調設備の調査結果を示す。図-4.23 には各施設の一次エネルギー消費量原単位（MJ/㎡・年）と冷房能力原単位（W/㎡）の関係を示す。冷房能力原単位は施設により約 3 倍の

違いが確認でき、一次エネルギー消費量原単位の大きな施設ほど、その値が大きい傾向が確認できる。

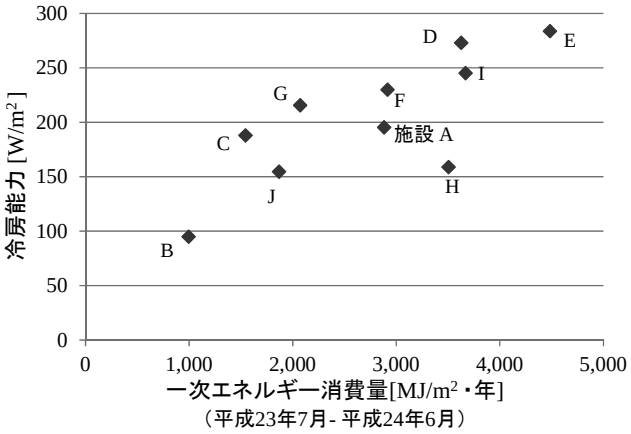


図-4.23　各施設の冷房能力原単位

図-4.24 には機種別の定格の COP 分布（冷暖平均値）を示す。対象施設全体での電気式ビル用マルチ型パッケージ：電気式ペア型パッケージ・家庭用エアコン：ガスヒートポンプの設置割合は機器能力基準で 18%：66%：16%となっており、ペア型や家庭用エアコンの設置率が高いことが分かる。また、電気式の機種では、COP が 3.5 以下の割合が 35%を占め、機器更新による効率向上の余地があることがわかる。

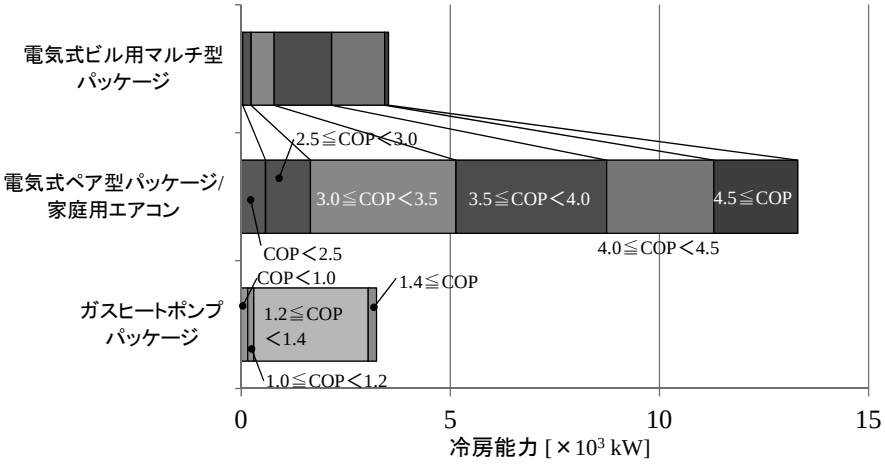


図-4.24　機種別 COP 分布

4.3.3　エネルギー消費内訳の推計

前節では、一般的に入手可能な情報（設備台帳、各月のエネルギー消費量、施設全体の電力ロードカーブ）に加え建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST 専門版を利用することで、建物レベルで精度よくエネルギー消費の内訳（換気、照明、コンセントその他、空調）を推計する手法を提案した。本節ではこの考え方をベースに、分析対象がキャンパス規模であることを考慮し、

簡易化した内訳推計手法を提案する。

4.3.3 (1)　簡易化した内訳推計手法の提案

内訳の推計は、節電対策前の平成 22 年度を対象とし、研究内容が与える影響を考慮して施設ごとに推計を行う。照明、換気については前節と同様の方法（図-4.9 の Step 1）とする。コンセントその他、空調の算定においてはシミュレーションツールを用いて推計を行う（図-4.9 の Step 2）が、前節では実際の建物を入力条件としていたが、本手法では規模レベルに応じて入力を簡易化するため、大阪大学吹田キャンパス内の全理科系施設の平均的な建物「代表建物モデル」を設定することで推計を行う。前節との違いを表-4.5 に示す。

代表建物モデルの概要を表-4.6 に示す。代表建物モデルの延床面積、階数は既往研究 [4.10)]の手法により算出している。各施設においては、代表建物モデルが複数棟（各区分の総床面積÷5,775 ㎡）存在するものとして内訳を推計する。

本推計は、エネルギー原単位が比較的大きい理科系施設を対象としており、表-4.6 に示すように断熱性能は実際の建物条件を考慮するものの、建物形状自体が計算結果に与える影響は比較的小さいという仮定のもと、建物形状は「代表建物モデル」を用いて推計を行うものである。

表-4.5　建物条件の違い

	4.2の推計手法	本手法
建物入力条件	実際の建物	代表建物モデル
ゾーン数	26†	4

†外壁面が4方位ある建物の場合

表-4.6　「代表建物モデル」の概要

延床面積	5,775 m^2
階数	5
階高	3,900 mm
天井高	2,800 mm
平面アスペクト比	1.82 (吹田キャンパス理科系施設の平均)
主方向	吹田キャンパス軸
断熱性能	各施設の実際の値
窓面積比	0.22 (前節の建物の平均)

表-4.5 に示すようにシミュレーションで与えるゾーン数は、前節では忠実さに重きを置き、方位の違いを考慮して細分化していたが、本手法では、①EHP（日中のみ運転）、②EHP（24h 年間冷房運転）、③GHP（日中のみ運転）、④非空調の 4 種のみを与えた。なお、各空調ゾーンの床面積当たりの外皮負荷はそれぞれ同等となるよう設定している。

算定に当たっては区分ごとに施設全体の電力ロードカーブを必要とするが、これらの施設では節

電対策前（平成 22 年度）は未計測のため、データの収集が始まった節電対策後（平成 23 年 7 月～平成 24 年 6 月）のデータを基準に、各施設の月総量の変化率で毎時値を補正したものを用いた。また、空調機器の COP は設備調査が行われた平成 25 年時点のものを利用しているが、いずれの施設も大規模な改修工事を行っていないため、この影響は無視する。

4.3.3 (2)　提案手法の精度検証

前節による推計手法と本提案手法による推計の誤差を確認するため、前節で内訳推計を行った施設 I（生物科学系）および施設 G（情報科学系）において検証を行った。図-4.25、図-4.26 にその結果を示す。いずれの用途も年間内訳の誤差は 1 %以下で、実際の建物条件でなく、代表建物モデルを用いた推計でも結果に大きな差がないことが確認できる。

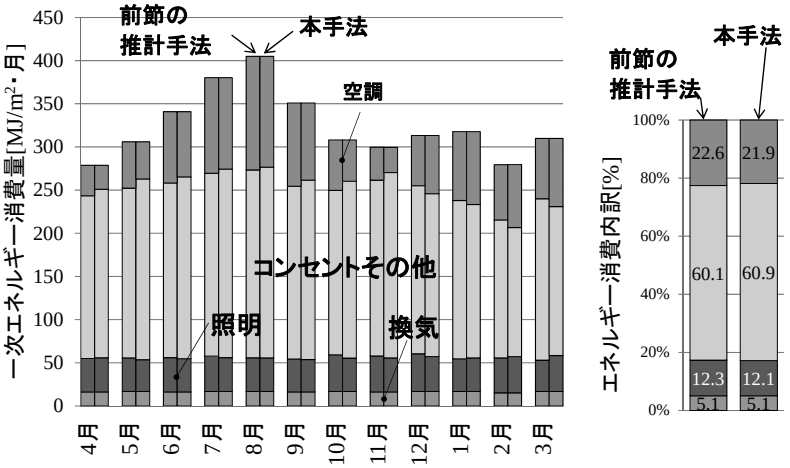


図-4.25　施設 I（生物科学系）での精度検証

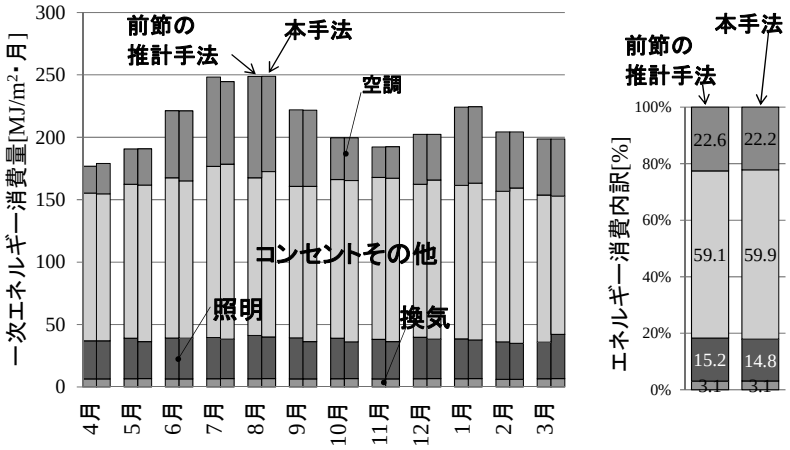


図-4.26　施設 G（情報科学系）での精度検証

4.3.3 (3)　理科系施設のエネルギー消費内訳の推計

本提案手法により表-4.4 の施設のエネルギー消費内訳推計を行った。主な入力条件を図-4.27、表-4.7 に示す。

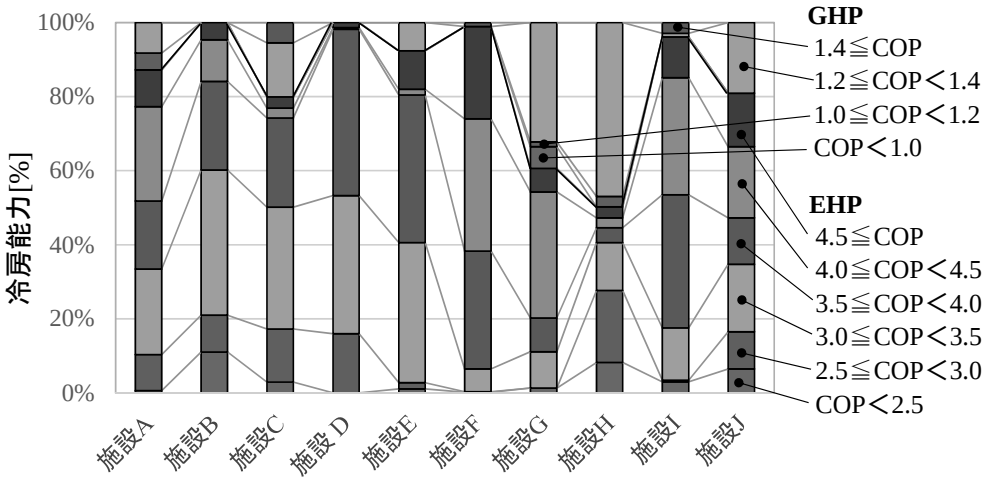


図-4.27　各施設の冷房能力

表-4.7　各施設の主な入力条件

		施設									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
空調運転時間†1[h/日]		15.6	15.3	16.1	17.3	17.2	15.5	15.7	15.7	16.2	13.9
機器発熱量†2 [W/m^2]	4月	15.6	9.9	9.0	26.6	43.0	23.0	17.0	28.5	23.6	17.2
	5月	15.4	9.4	11.6	27.8	47.0	53.4	18.4	31.9	24.6	17.0
	6月	15.4	9.1	11.6	28.4	50.2	62.3	19.5	33.2	26.3	17.8
	7月	18.8	15.3	14.0	31.8	61.6	78.0	22.3	36.4	28.7	23.4
	8月	17.4	9.3	10.5	31.3	48.2	67.3	20.4	33.2	29.2	20.7
	9月	16.5	11.5	10.9	29.8	50.2	27.4	18.7	33.2	26.4	22.0
	10月	15.0	15.4	10.1	29.5	50.1	28.6	18.5	33.0	24.8	19.7
	11月	14.7	13.9	11.7	32.4	56.0	31.3	19.1	31.0	25.9	15.3
	12月	11.8	7.3	10.1	26.7	36.8	24.6	18.1	23.2	22.6	28.6
	1月	20.7	16.7	10.7	38.9	66.0	42.8	18.2	33.4	22.6	29.9
	2月	17.6	8.8	10.6	29.7	54.3	31.5	19.0	31.3	21.4	22.1
	3月	13.2	4.5	5.9	25.9	45.0	22.6	15.9	25.5	20.6	8.4
換気回数†3 [回/h]		2.3	1.3	2.3	1.8	7.1	1.6	0.5	1.7	4.8	3.8

†1　各月の平日運転時間の平均 (日中のみ運転のゾーン)
†2　日中のみ運転のゾーン
†3　換気回数は空調ゾーンの換気ファンによる換気回数を示し、全熱交換器による換気の場合は、交換効率を乗じた値としている。

内訳推計結果を図-4.28、図-4.29 に示す。図-4.29 は一次エネルギー消費量の割合を示すが、対象施設の平均では、コンセントその他の割合が 59%と非常に大きく、理科系施設ではこれらの設備の省エネルギー化が大きな課題であることがわかる。また、図-4.29 は一次エネルギー消費原単位が高い順に表示しているが、一次エネルギー消費原単位が高くなるに伴い、空調の比率が低くなる傾向が確認できる。これは一次エネルギー原単位が高い施設ほど、外皮負荷の割合が相対的に下がることが要因の一つとして考えられる。なお、設置機器の COP は施設 F と施設 G で図-4.27 に示すように高いが、これらの施設では空調の割合が他に比べ相対的にやや低くなっていることも確認できる。空調の比率には COP の影響の他にも換気量など、様々な要因が影響しているものと推察されるが、次項ではこれらの要素が空調のエネルギー消費量に与える影響について分析する。

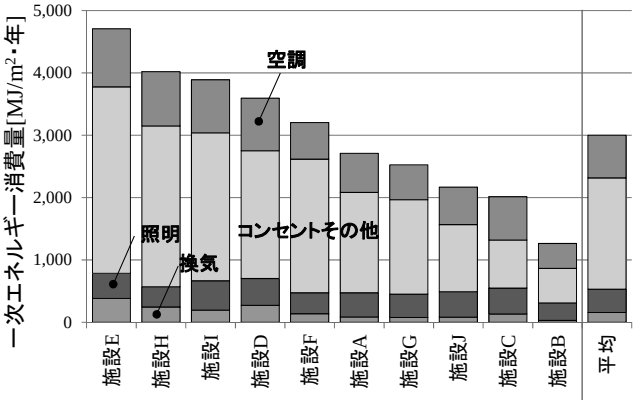


図-4.28　年間一次エネルギー消費量の推計結果

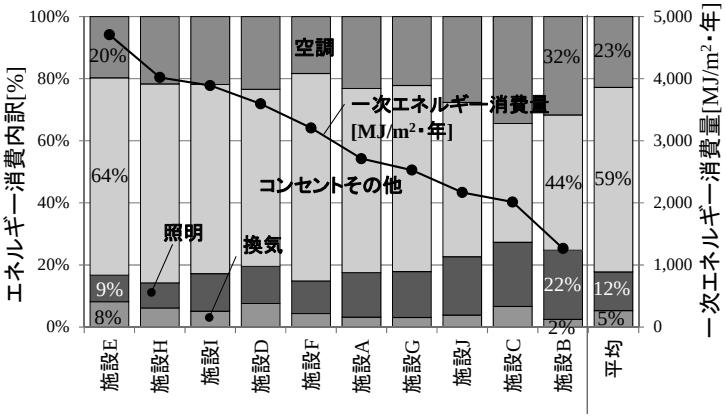


図-4.29　エネルギー消費内訳の推計結果

4.3.4　感度分析

本項では、一次エネルギー消費量が最大の施設 E と最小の施設 B を対象に、換気回数、窓面積比、COP の変化がエネルギー消費比率に与える影響の感度分析を行った。なお、換気回数は空調エリアの換気ファンによる換気回数を示し、全熱交換器による換気の場合は、交換効率を乗じた値として

いる。窓面積比は外皮条件が与える影響を確認するためにパラメータとして設定した。

前項の推計結果をもとに、各パラメータを変化させた場合の一次エネルギー消費内訳の変化を図-4.30、図-4.31 に示す。

窓面積比の変化による影響をみると 2 施設とも小さい。代表建物モデルでは表-4.6 に示すとおり一律 0.22 の値を与えているが、この結果より、他の施設においても実際の建物と窓面積比の相違があっても内訳推計の誤差は小さいものと考えられる。

換気回数の変化による影響は、エネルギー消費量が小さい施設 B ほど、相対的に影響を受けやすいことが確認できる。また、居室用換気は前節に示すとおり 24 時間運転の条件を与えているため、実際の運用状況と違いがある場合には、この誤差を考慮しなければならないことが課題といえる。

COP はいずれの施設でも空調消費量に大きな影響を与えることが確認できる。

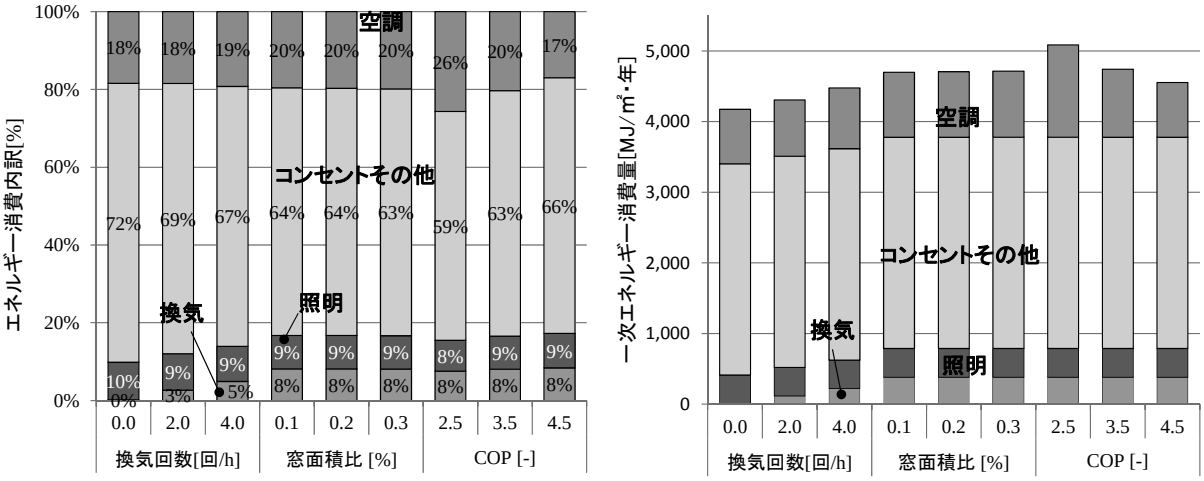


図-4.30　施設 E での感度分析（左：エネルギー消費内訳、右：一次エネルギー消費量）

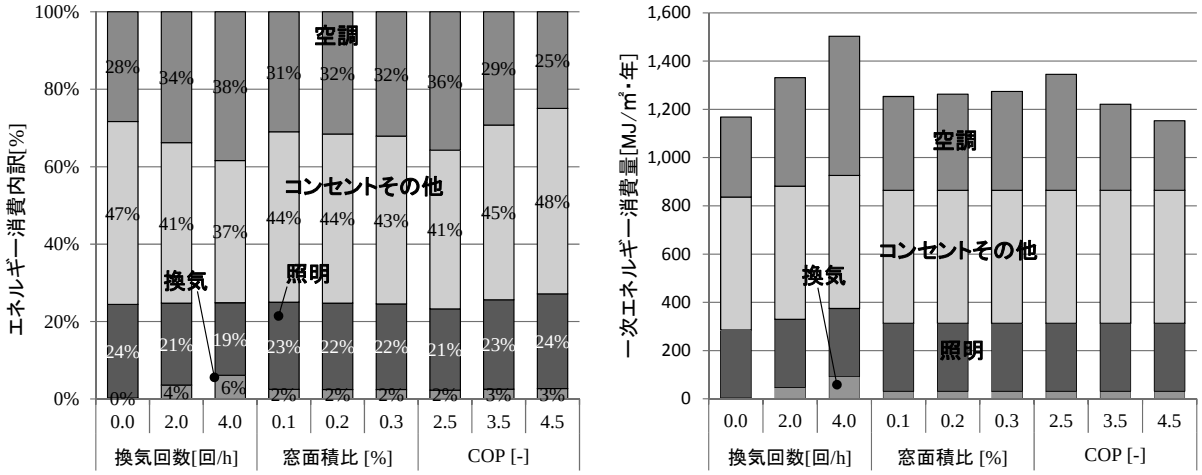


図-4.31　施設 B での感度分析（左：エネルギー消費内訳、右：一次エネルギー消費量）

4.3.5　機器更新によるエネルギー削減ポテンシャル

本項では、表-4.4 の研究対象施設全体において、空調設備、および照明設備を更新した場合の削減ポテンシャルを算出する。空調設備は最新の高効率機器に、照明設備は同等の照度を保ち、全て LED に改修した際のポテンシャルを算出した。結果を図-4.32 に示す。

それぞれ単独では、空調 16%、照明 33%の削減効果が見込まれる結果となった。空調と照明、両方の対策を行った場合は、図-4.33 に示すとおり、日中のみ運転の系統（夏期 : 冷房、冬期 : 暖房）は照明更新により冷房時の空調負荷が減少し、暖房時の空調負荷は増加することとなる。年間冷房運転系統は年間を通じて空調用のエネルギー消費が削減できる。なお、夏期は 6 月～9 月、冬期は 12 月～3 月を示す。結果としてトータルでは、図-4.32 に示すように空調更新のみに比べ空調エネルギー消費がさらに 1.0%削減され、全体としては基準ケース（2010 年度）に比べ、8.1%のエネルギー削減効果があることが分かった。

図-4.34 には施設別の削減効果を示す。一次エネルギー消費量原単位の小さい施設ほど削減率が高

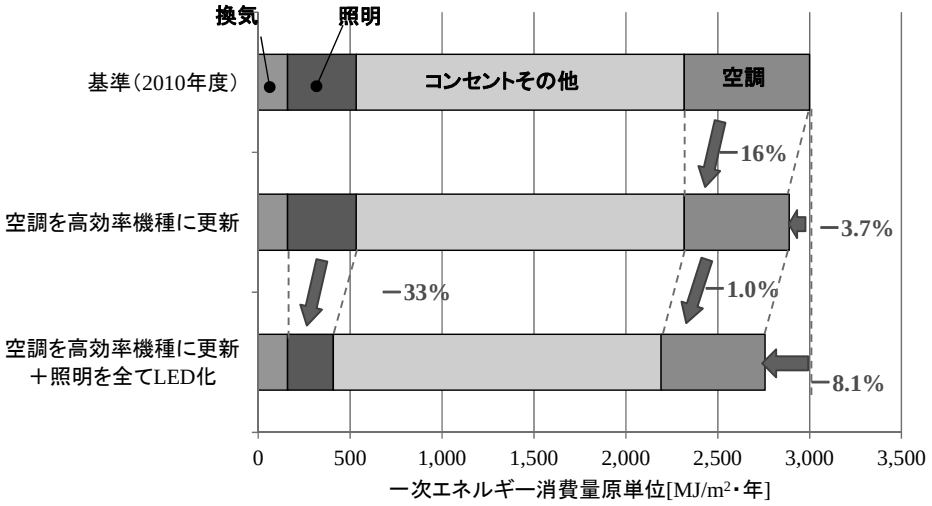


図-4.32　機器更新による削減効果

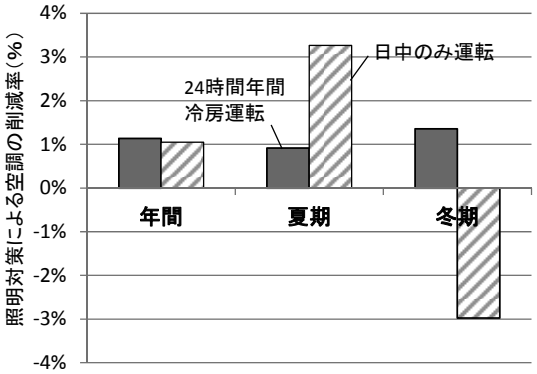


図-4.33　照明の対策による空調の削減効果

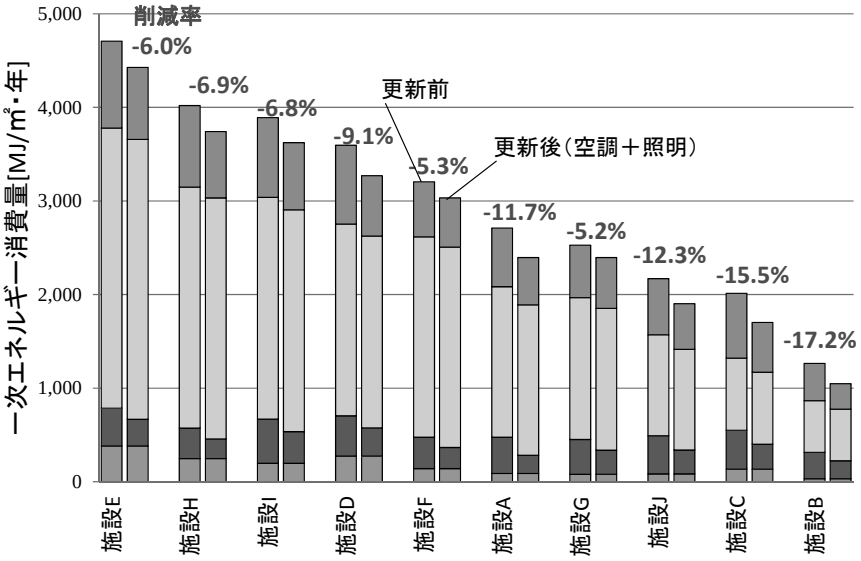


図-4.34　機器更新による削減効果（施設別）

い傾向がある。これは図-4.29 に示すように一次エネルギー消費量原単位が小さい施設ほど照明、空調の割合が高いことに起因する。

4.3.6　効果的な機器更新方法

前項では、空調機器と照明の機器更新によるエネルギー削減ポテンシャルの定量化を行った。既往研究[4.11)]では個別分散空調の投資回収年数の長さも指摘されているが、効果的に省エネルギーを推進するには、優先順位を定め、同じ能力の機器でも費用対効果の高い機種から更新していくことが課題となる。例えば、パッケージ空調機では、COP が低いことは当然として、かつ運転時間が長い機種から順に更新する方が効果的であるといえる。部分負荷効率および外気温特性は無視するものとし、機器能力が（C）kW あり、定格 COP_{n1} で年間（h_1）時間運転する機種と、定格 COP_{n2} で年間（h_2）時間運転する機種を、ともに定格 COP_x の機種に更新する場合において、削減量が同等となる条件は、下記の関係式が成り立つときとなる。

$$(C\times h_1)/COP_{n1} - (C\times h_1)/COP_x = (C\times h_2)/COP_{n2} - (C\times h_2)/COP_x \quad \cdots (4.7)$$

よって

$$h_1 / h_2 = (COP_{n1} / COP_{n2}) \times (COP_x - COP_{n2}) / (COP_x - COP_{n1}) \quad \cdots (4.8)$$

図-4.35 では、この関係式に COP_x＝4.5 を代入した場合、削減効果が同等となる条件を曲線として表現している。図内のプロットは、4.3.3 (3)の結果から得られた各施設の電気式のパッケージ空調機の運転状態を示したものであるが、同じ能力の機器を更新する場合（同じ更新費用を投資する場合）、左上に位置する施設の方が削減できる空調エネルギー量が多く、費用対効果の高い省エネルギー改修が実施できる可能性が高いと考えられる。

本評価は先述のように部分負荷効率や外気温特性は無視しているため、例えば施設間の相対比較において、負荷率が低く ON-OFF となる領域での運転が多い場合や外気条件が異なる運転時間帯が長い場合には、結果に誤差が生じる可能性もある。このように本手法は簡易的な分析ではあるが、このような検証を行った上で改修計画を策定することが、効果的な更新に繋がるものと考える。

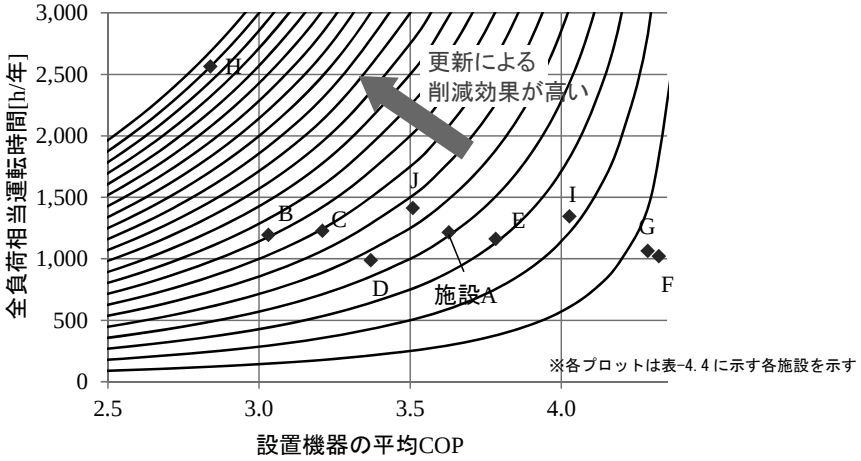


図-4.35　効果的なパッケージ空調機の更新順位の検証

4.4　実験機器・備品類の設置状況調査

これまでの分析結果より、理科系施設において大きなエネルギー削減を実現するには、「コンセントその他」に関わるエネルギーの削減が避けられないことが推察できる。第 2 章におけるベース分の多さ（図-2.24）や第 3 章における研究室での実測結果からも、特に 24 時間稼働する機器の影響が大きいことと考えられる。

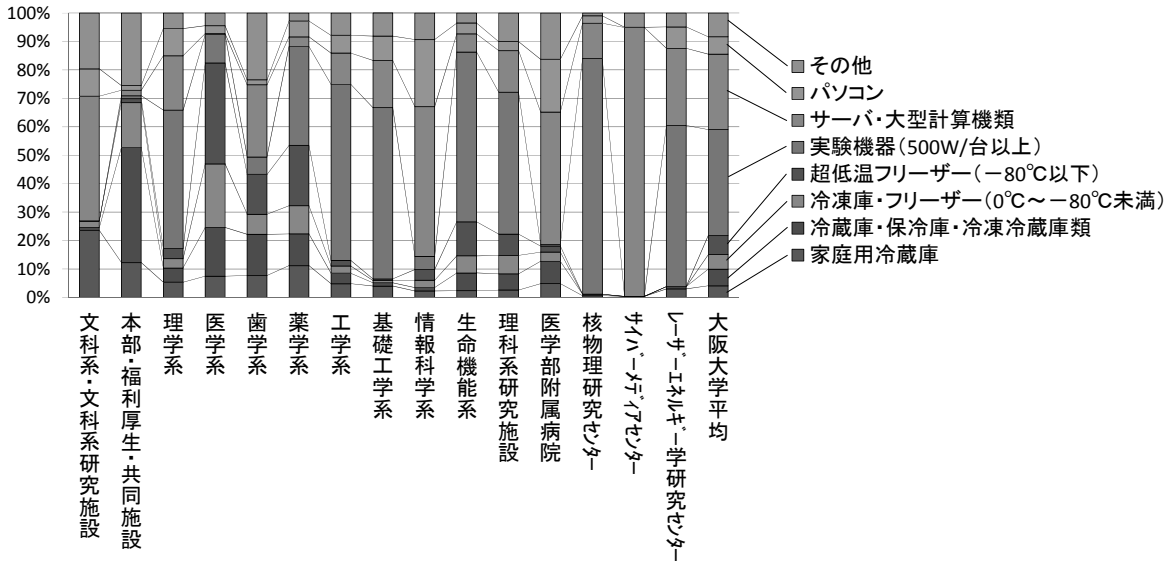


図-4.36　24 時間稼働機器の定格消費電力容量比率

図-4.36 には 4.2.2（1）で示した保有機器調査の全学の結果を示す。建物分類ごとにその比率も大きく異なり、例えば医学系ではフリーザー類、工学系では実験機器、情報科学系ではサーバ・大型計算機類の比率が高い。省エネルギー対策を計画する上では、この特徴を踏まえ、各建物の実態に合わせた効果的な対策を行うことが今後の課題となる。

4.5　まとめ

本章では、広く理科系施設のエネルギー消費構造を明らかにするため、はじめに 4.2 では大学内の 2 つの理科系施設において実測データ分析や保有機器の調査を実施した。これを踏まえ、機器データベースや、限られたエネルギー消費データから、建物規模で「照明」、「空調」、「換気」、「コンセントその他」の 4 用途のエネルギー消費内訳を推計する手法を提案し、各種運用改善がもたらす省エネルギー効果の定量化を行った。得られた知見を以下に示す。

1) 研究対象とした 2 つの施設では、時刻別電力消費量の実測値の分析により、東日本大震災後の節電活動による電力量削減率はベース分に比べ変動分の方が高いことを明らかにした。また、保有機器の調査結果により、施設の違いでベース分の主な要素と考えられる 24 時間稼働機器の構成が大きく異なることを示し、節電対策実施のアンケート調査も踏まえ、効果の高い対策を実行することが削減率上昇に繋がることを確認し、エネルギー消費内訳把握の重要性を示した。

2) 大学施設の特徴を鑑み、非空調用途のエネルギー需要に月変動があることを前提としたエネルギー消費内訳の推計方法を提案し、実例での検証においても精度よく内訳推計がなされることを確認した。

3) 提案した手法にて、大学内の 2 つの理科系施設において、エネルギー消費量の内訳推計を行った。「コンセントその他」のエネルギー消費量の高さを明らかにするとともに、空調目的の違いによる気温感応度の特徴を示した。

4) 3)の結果を踏まえ、各種の運用改善がもたらす効果の定量化を行った。同じ対策でも季節間で削減効果が異なることを示し、対策Ⅰ～Ⅲを全て行う対策Ⅳでは、生物科学系施設で 16%、情報科学系施設で 18%の年間削減効果があることを把握した。

さらに 4.3 では分析対象をキャンパス規模に拡大した。4.2 の結果を踏まえ、理科系施設を対象としてこの分析規模に合わせ簡略化した内訳の推計手法を提案した。また、建物条件や使用状況の変化がもたらす感度分析や、改修による削減ポテンシャルの把握、効果的な機器更新方法の提案を行った。得られた知見を以下に示す。

5) 月別一次エネルギー消費量および電力可視化システムのデータ分析により、理科系施設では、日々のベース電力の大きさが、季節の変化に関わらず定常的に消費されるエネルギーの大きさの違いを生み、さらには年間エネルギー消費量にも多大な影響を与えていることを示した。

6) 4.2 で示したシミュレーションを利用する内訳推計手法を、分析規模に応じて改良し入力を簡易化した。この手法でも精度よく推計が行われることを確認したのち、約 10 万㎡分の理科系施設のエネルギー消費の内訳を推計した。対象とする理科系施設においては、59%のエネルギー消費が

コンセントその他によるものであることがわかった。

7）建物条件や使用状況の変化が、空調のエネルギー消費量にもたらす影響を感度分析した。窓面積比の違いが与える影響はどの施設でも小さいが、特にエネルギー消費量が少ない施設においては換気回数の多さが相対的にはエネルギー消費に大きな影響を与えることを示した。また、COP はいずれの施設でも空調エネルギー消費量に大きな影響を与えることが確認された。

8）空調および照明設備を高効率機器に更新した場合の削減ポテンシャルを得た。また、効果的に省エネルギー改修を推進する上では、優先順位を定め、費用対効果の高い機種から更新していくことが重要であるが、これを簡易的に検証する手段を示した。

以上の結果からも、理科系施設において大きなエネルギー削減を行うには特に 24 時間稼働する機器の対策が不可欠であることが推察されるが、保有機器の設置状況調査からも、建物分類ごとに機器の構成比率が大きく異なり、特徴に合わせた対策を実施することが今後の課題となる。

参考文献

4.1）宋城基：多様な空調システムが混在する大学キャンパスのエネルギー消費実態調査研究，空気調和・衛生工学会論文集，No.156，pp.1-9，2010.3

4.2）陳超,渡辺俊行,龍有二,赤司泰義：各種業務施設の空調用エネルギー消費量に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.501，pp.61-68，1997.11

4.3）三瀬農士,佐藤春樹：慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスにおける電力および冷暖房需要の推定，日本建築学会環境系論文集，No.609，pp.55-62，2006.11

4.4）迫田一昭,河野匡志,花木啓祐,野城智也,磯部雅彦：大学キャンパスにおける二酸化炭素排出削減策の立案・実行 －東京大学サステイナブルキャンパスプロジェクト－，エネルギー・資源学会技術報告，Vol.30，No.4，pp.240-243，2009.7

4.5）気象庁: http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php，入手 2013-7-16

4.6）財団法人建築環境・省エネルギー機構：建築物の省エネルギー基準と計算の手引き 新築・増改築の性能基準（PAL/CEC）,2010.9

4.7）U.S. Department of Energy: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/，入手 2013-7-31

4.8）井上宇市：改訂 4 版空気調和ハンドブック，丸善，1996.1，第 4 刷 2000.2

4.9）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 年度版，2009.10

4.10）山口容平,下田吉之,水野稔：建築・設備ストックの集積状況を考慮した大阪市の民生業務部門エネルギー需要モデルの開発と温暖化対策の評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No.64, pp.853-862，2009.7

4.11）河野匡志,柳原隆司,花木啓祐,磯部雅彦,坂本雄三：国立大学施設における環境負荷低減手法に関する研究　東京大学における CO2 排出量削減に向けた実効ある対策の計画と実践の事例，日本建築学会環境系論文集，Vol.76，No.666，pp.727-734，2011.8

第 5 章：病院施設熱源のエネルギー性能評価

5.1　序論

本章では第 2 章で示した大阪大学の一次エネルギー消費量の 40%を占める大規模施設（カテゴリーⅢ）についての分析を行う。これまでの結果から大規模施設においても実験系や医療系のエネルギー消費が非常に大きいと推察され、これらの機器の省エネルギー化が大きな課題となる。一方で大半の施設において中央熱源方式の空調システムが採用されている。いずれの施設でも熱源設備は設置後 20～30 年程度経過し、最新の技術に照らし合わせると大きな無駄を抱えながら運用されている可能性があり、熱源設備の改修による性能改善の予測を行うことは、エネルギー使用の合理化を行う上で非常に有効な手段となる。

本章では、大規模施設の熱源設備に関わるエネルギー性能を評価するため、大阪大学の大規模施設の一次エネルギー消費量の 57%を占める医学部附属病院を対象に検証を行う。

建築設備の効果的な省エネルギー実現のため、コミッショニングやライフサイクルマネジメントの必要性が広く認識されつつある。新築時のみならず、運用・改修段階においても設備の運転状況やエネルギーの使用状況を確認し、最適な設定による運転を行うことはエネルギー使用合理化の観点において極めて重要である。この分野の既往研究として、久保木ら[5.1)]は新聞印刷工場の熱源システムにおいて、百田ら[5.2)]は地域冷暖房施設において、それぞれコミッショニングに関する実践的な研究を行っている。また渡邊ら[5.3)]は、シミュレーションを活用した空調システムのライフサイクルマネジメントを提案し、シミュレーション実施の有効性を示している。一瀬ら[5.4)～5.6)]は、建築設備は建築本体より耐用年数が短く、建物ライフサイクルにおいて数回の改修が必要であることに着目し、熱源改修プロジェクトにおいてコミッショニングを適用している。しかしながら改修時の検証事例はそれほど多く見受けられないのが現状で、経年劣化した熱源設備のエネルギー性能を検証した例は少ない。また古い設備では計測箇所が少ないが故に、容易に実態把握や検証が行えない側面も大きい。

熱源の省エネルギー改修においては、改修前の運用フォルトや二次側負荷の実態、熱源機器劣化度等を把握した上で検討を進めることが非常に重要である。近年、省エネルギー性を重視した熱源設備改修の手段として、ESCO 事業が盛んに実施されているが、削減量を保証する必要がある ESCO 事業においてすら、既存設備の計測箇所の不足が原因で、信頼性の低い機器劣化度を算定に用いたり、時々刻々変化する熱源の部分負荷効率に月ごとに同一の値を与えたりするなど、概略的に効果予測がなされている場合がある。また、一般に二次側が低負荷の時期などは送水往還温度差が確保できなくなる傾向があり、この影響を考慮しないと必要な熱源稼働台数が適切に評価されないが、そのような事例も少なく予測精度が低下している可能性がある。ESCO 事業に限らず一般の熱源改修時においても、運用時のフォルトを明らかにし、さらに改修前の事前のシミュレーションにより削減効果を詳細に予測し定量化することは、最適システムの計画や精度の高い効果予測が可能にな

るだけでなく、様々な条件が変動する実際の運用時において効果的な運用改善策を見出すことに繋がり、その利用意義は大きい。

医学部附属病院では平成 24 年度に主に熱源設備の改修を目的とした ESCO 事業（ギャランティード・セイビングス型）の公募が行われている。病院施設は民生部門内の他用途と比較すると、給湯・加湿・医療用・厨房など蒸気需要が必要とされる場合が多く、厳密な温湿度管理が要求される室も存在する。また小部屋が多く熱負荷が多様なため一般に複雑なエネルギー消費特性をもつ。本施設は平成 5 年竣工のため計測器の設置が十分ではないが、シミュレーションモデルを利用することでその不足を補完し、熱源機器の劣化度を特定して運用時における不具合を同定・定量化した。さらに本モデルにより改修後のエネルギー削減効果を予測するとともに、更なる改善の可能性として本熱源システムにおける二次側の送水往還温度差改善の影響を分析した。一連の検証を行うことは、効果的なエネルギー使用の合理化が見込めるばかりでなく、他事例にも応用可能な知見が得られるものと考える。

5.2　建物・設備概要と熱源機器性能

5.2.1　建物・設備概要

5.2.1 (1)　竣工時～ESCO 事業実施前

対象とする医学部附属病院は平成 5 年に大阪府内で新築移転し、平成 24 年現在病床数 1 000 床を超える大規模総合病院である。エネルギーセンターは 4,000USRt 以上の熱源を保有する DHC 規模の施設であり、二次側は病院のほか、周辺の講義棟、管理棟、図書館等に冷水・冷温水・蒸気を供給している。なお、蒸気の二次側利用用途は、給湯、医療用、空調用加湿、熱交換器を介した空調用温水となっている。エネルギー供給対象エリアの総延床面積は約 196,000 ㎡、平成 23 年度実績の一次エネルギー消費量原単位は 3,684MJ/㎡・年となっている。竣工時から ESCO 事業実施前までの熱源機器表を表-5.1、5.2 に、熱源システム系統図を 図-5.1 に示す。

表-5.1　熱源機器表（空調用）

機器名称	型　式	冷房能力 [kW]	暖房能力 [kW]	設置年
RA-1	蒸気吸収冷凍機	2 110	-	H5年3月
	⬇ (H22年3月更新)			
	ガス吸収冷温水機	2 110	-	H22年3月
RA-2	蒸気吸収冷凍機（一重効用）	2 110	-	H5年3月
	⬇ (H23年3月更新)			
	排温水投入型蒸気吸収冷温水機	2 110	-	H23年3月
RA-3	ガス吸収冷温水機	2 813	2 733	H5年3月
	⬇ (H24年6月更新)			
	インバータターボ冷凍機	3 516	-	H24年6月
RA-4-1	ガス吸収冷温水機	4 747	4 022	H5年3月
	⬇ (H23年3月更新)			
	排温水投入型ガス吸収冷温水機	4 747	3 256	H23年3月
RA-4-2	ガス吸収冷温水機	4 747	4 022	H5年3月
	⬇ (H24年6月更新)			
	ガス吸収冷温水機	2 461	2 264	H24年6月

表-5.2　熱源機器表（蒸気用）

機器名称	型　式	能力	台数	設置年
CGS-1～2	ガスエンジンCGS	発電：1 325kW 排熱：　789kW（0.8MPa蒸気） 排熱：1 211kW（0.1MPa蒸気）	2	H5年
BS-1～3	炉筒煙管ボイラ	8 000kg/h	3	H5年

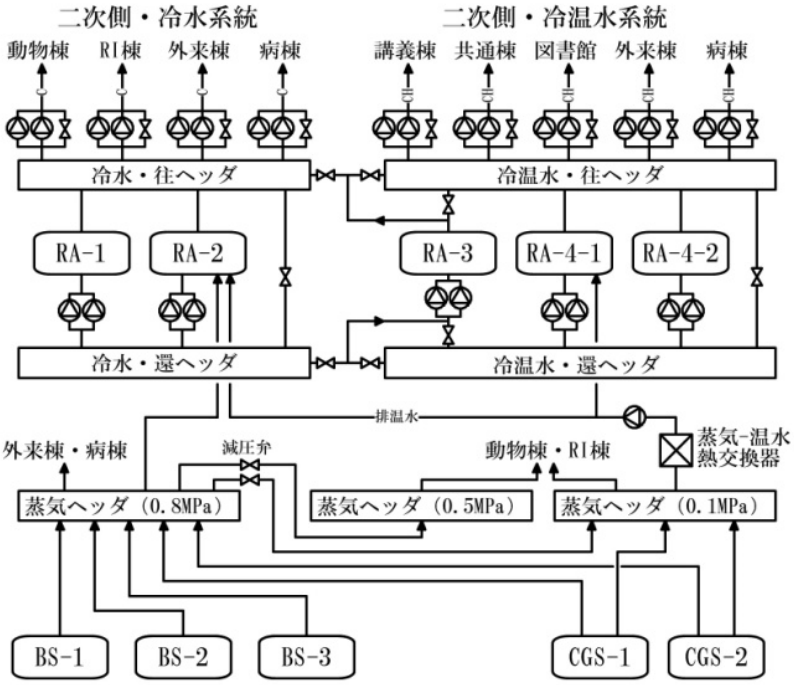


図-5.1　熱源システム系統図（竣工時～ESCO 事業実施前）

空調用熱源は平成 22 年に RA-1、平成 23 年に RA-2、RA-4-1、平成 24 年には RA-3、RA-4-2 と近年全て更新されている。竣工時には全て吸収式タイプであったが、RA-3 は過流量制御型インバータターボ冷凍機に更新されている。

平成 24 年 6 月以前の一次ポンプは全て定流量ポンプであったが、平成 24 年 6 月以降 RA-3 一次ポンプのみ変流量制御となっている。二次ポンプは、病棟系は定流量、それ以外は変流量制御（吐出圧一定制御・但し 2 台並列運転時は定流量）となっている。

二次側には空調機、ファンコイルユニット等が設置されているが、室用途の違いにより、冷水／温水、冷温水、冷水／冷温水など多様な熱媒の供給形態が存在している。

5.2.1 (2)　ESCO 事業実施後

医学部附属病院では、平成 24 年度に ESCO 事業の公募を行っており、平成 25 年度末までに BEMS の導入を含む中央監視・自動制御設備の更新のほか、空調機ファンのインバータ設置、LED 照明の導入など様々な省エネルギー改修工事が行われている。本研究では、熱源廻りで特に省エネルギー

効果が高いと思われる工事に着目し分析・評価を行う。検討対象とする機器を表-5.3 に、熱源システム系統図を図-5.2 に示す。熱源機器としては、新たに熱回収型チラー（RA-5）が追加され、ボイラは小型貫流ボイラに更新された。また、既存熱源の一次ポンプおよび二次ポンプは全て変流量制御に更新された。二次ポンプの制御は推定末端差圧による送水圧力可変制御も導入されている。

夏期は冷水系統と冷温水系統の往ヘッダ間、還ヘッダ間のバイパス弁を開とし、冷水の融通を行う運用が予定されており、その間 RA-5 は冷房単独運転となる。また冷温水系統が温水供給に切り替わる期間は熱回収運転を行う。

表-5.3　ESCO 事業による納入熱源機器

機器名称	型　式	能力
RA-5	水冷インバータチラー（熱回収型）	冷房運転時 冷房：518kW×3 熱回収運転時 冷房：428kW×3　暖房：555kW×3
BS-1-1～7	小型貫流ボイラ	2 500kg/h×7

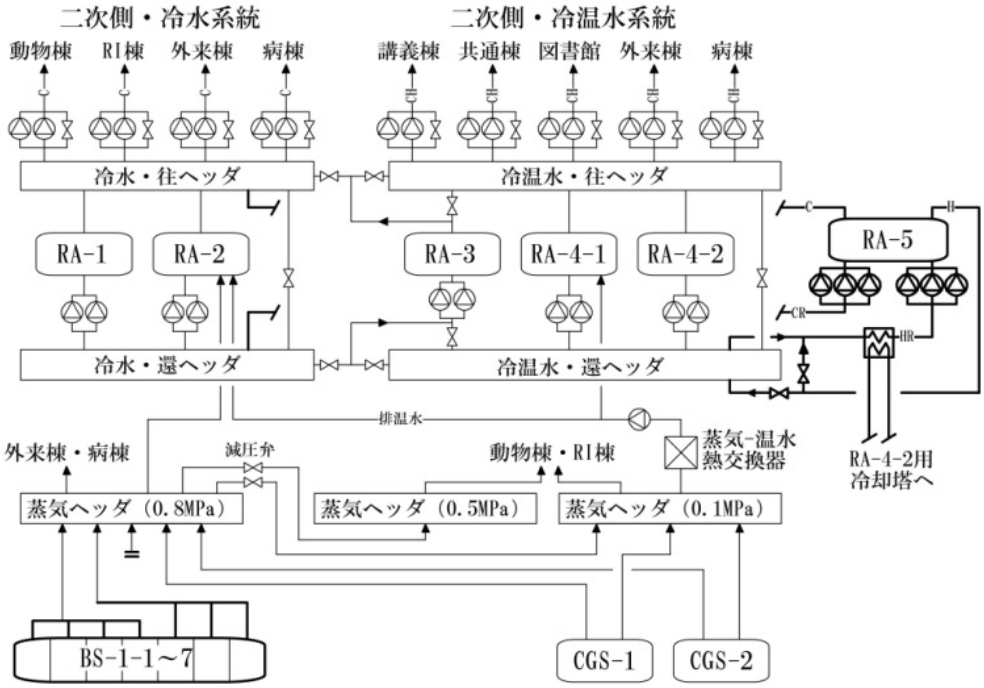


図-5.2　熱源システム系統図（ESCO 事業実施後）

5.2.1 (3)　計測器の設置概要

1）常設計測器

中央監視室では、CGS 発電量、二次側供給エリアごとの冷水・冷温水の往還温度・流量、二次側各棟への蒸気供給量、RA-2 へ直接投入される蒸気供給量が計測されている。一次側の各熱源機廻りの温度・流量や、排温水投入型熱源機へ蒸気-温水熱交換器を介して供給される分の蒸気量は計測さ

れていないが、排温水投入型熱源機は CGS が稼働する時間帯のみ排温水を利用する制御となっているため、計算により熱交換器への蒸気供給量は算出が可能である。冷却水の流量・出入口温度は一切計測されていないが、平成 24 年に更新されたターボ冷凍機（RA-3）に関しては付属の制御機器に冷水の流量・出入口温度、冷却水の流量・出入口温度、電動機消費電力など、熱源廻りの詳細なデータが蓄積されている。なお、温度計に関しては平成 24 年 12 月にメーカーによる誤差点検が実施されており、±1.0℃以下の良好な指示状態が確認されている。

また各熱源への入力値として、RA-1 のガス消費量、その他ガス吸収式熱源機への合計ガス消費量、CGS ガス消費量、ボイラガス消費量、ボイラへの給水量が計測されている。

2）仮設計測器

平成 23 年 8 月 2 日～8 日の期間については、冷水系統において仮設計測器による冷凍機廻りの詳細な運転データが計測されている。RA-1 は冷水の流量・出入口温度、冷却水の流量・出入口温度、RA-2 はこれらに加え排温水の流量・出入口温度が計測されている。また、この期間は冷水系統と冷温水系統の往ヘッダ間、および還ヘッダ間のバイパス弁を開とし、冷水の融通を行う一体の運用がなされていたが、このバイパス流量も計測されている。

3）蒸気流量の計測誤差

図-5.3 では平成 23 年度の蒸気流量計の計測値の合計と、計算値（ボイラへの給水量実績およびブロー量の設定値から算定したボイラ蒸気量と、CGS 発電量から算出した CGS からの蒸気量の合算値）とを比較した。夏期において大きな差違があることが確認できる。この原因を調査したところ、二次側の蒸気需要が少ない時間帯では蒸気流量が計測器の計測保証レンジ内に納まらず、適切に計測されていない可能性が高いことが判明した。よって以後の検証では、計算値を用いることとする。なお、RA-2 に直接投入される系統の蒸気流量計については、RA-2 更新時にこれに対応した最新の小流量対応形の計測器に更新されており計測誤差はないものとしている。

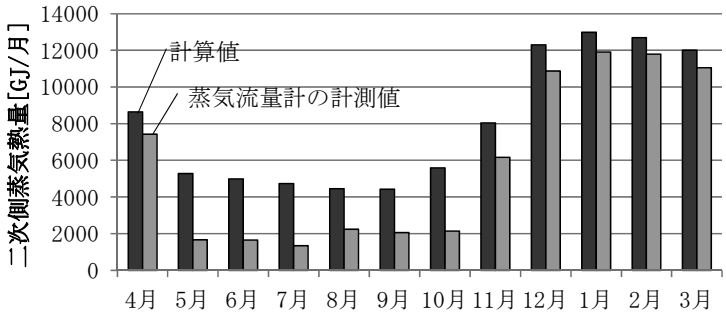


図-5.3　蒸気流量計測誤差の検証

5.2.2　エネルギー消費特性と熱源機器の性能

5.2.2 (1)　エネルギー消費特性

図-5.4 に中央監視室で計測している平成 23 年度の月別熱負荷を示す。熱負荷は二次側の需要量を示し、RA-2、RA-4-1 に投入される排温水および蒸気分は除いている。冷温水系統は 4 月 30 日～5 月 8 日、10 月 21 日～11 月 7 日は冷水／温水の切替え期間で冷温水供給を行っていない。

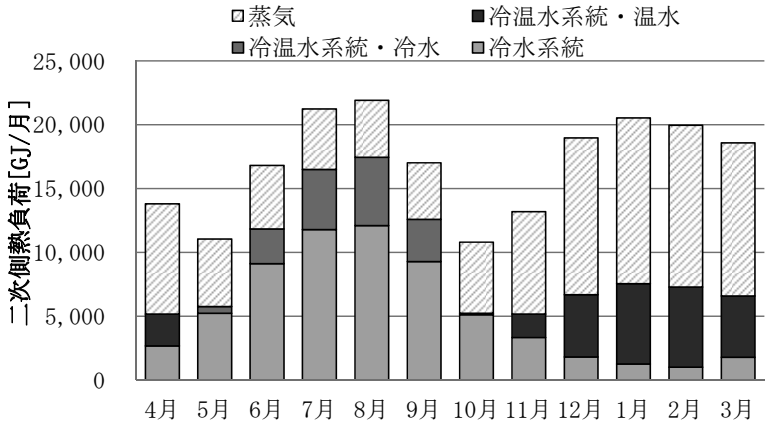


図-5.4　平成 23 年度の月別熱負荷

5.2.2 (2)　熱源機器の実 COP の検証

一般に熱源機器は経年劣化や能力補償誤差等により、定格の機器効率と差違がある可能性がある。シミュレーションで再現性を確保するには、実機の COP の把握が欠かせない。ここでは各熱源機器の実際の COP を推計する。

1）空調用熱源機器

a)　平成 23 年度時点（RA-1・RA-2・RA-4-1：更新後、RA-3・RA-4-2：更新前）

本中央監視室で計測しているデータのみでは、各熱源機器の COP は算出できない。しかし仮設計測器により平成23年8月2日～8日間の一部冷凍機廻りの詳細な運転データが計測されているため、このデータを用いることで各熱源機器の COP の推計を行った。

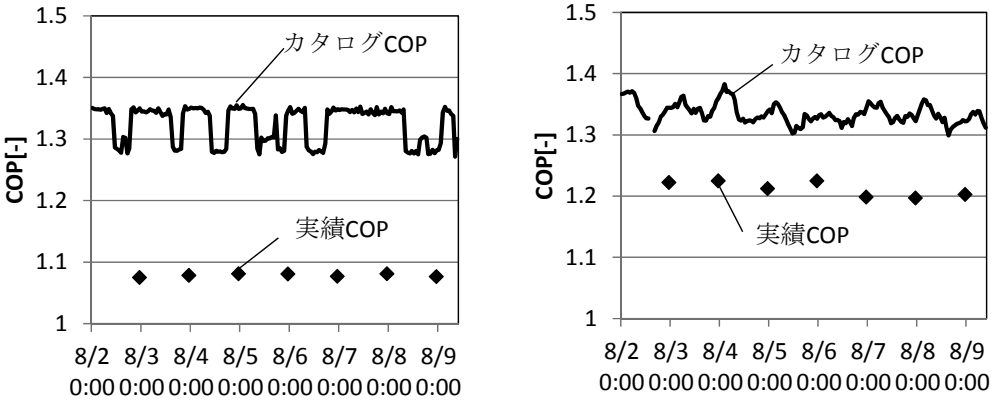


図-5.5　COP の検証（左：RA-1、右：RA-2）

仮設計測器が設置してある RA-1、RA-2 の COP を推計する。図-5.5 では、メーカーが開示している部分負荷時 COP 特性曲線を用い、負荷率や冷却水温度の変動を考慮して得られる COP（以下、カタログ COP）と実績 COP を比較した。なお、ガス消費量および蒸気消費量は日積算値しか計測されていないため、実績 COP は日積算値から得られる日単位での値を示している。

この期間における時刻別カタログ COP の平均値に対する日別実績 COP の平均値の割合（以下、COP 低下率）は RA-1：81.5%、RA-2：90.5%であった。なお期間中の冷却水入口温度は、RA-1、RA-2 ともに定格の 32℃よりも低く正常な値を示している。更新後間もない機種である RA-1、RA-2 の能力が低下している原因は、若干の性能劣化や能力補償誤差、伝熱管の汚れ等による影響以外に、計測期間中の冷却水流量（定流量ポンプ）が定格流量に対し RA-1：90～96%（期間平均 92.8%）、RA-2：85～87%（期間平均 85.8%）と不足していることが影響しているものと考えられる。

RA-3、RA-4-1、RA-4-2 に関しては、冷凍機廻りの詳細な運転データが計測されていない。しかしながら、冷水系統の冷凍機製造熱量・二次側熱負荷および冷温水系統の二次側熱負荷は、中央監視室の計測データおよび仮設計測器の計測データにより把握可能である。8 月 6～8 日の期間において、冷温水系統は RA-4-1 のみ稼働しているため、ガス消費量データから RA-4-1 の期間 COP が算出可能である。ここで、RA-4-1 の冷却水温度は未計測であるが、RA-1、RA-2 と同様の冷却塔制御を行っているため、冷却水温度も同等と仮定し、この期間の RA-1・RA-2 平均冷却水温度と RA-4-1 の負荷率を用いてカタログ COP を算出した。RA-1、RA-2 と同様に実績 COP と比較した結果、RA-4-1 の COP 低下率は 71.2%であった。さらに冷温水系統で RA-4-1 と RA-4-2 が 2 台稼働している期間において、先に得られた RA-4-1 の COP 低下率を利用し、同様の手法で RA-4-2 のカタログ COP を算出して実績 COP と比較した結果、RA-4-2 の COP 低下率は 67.6%であった。

RA-3 に関しては COP が推計できるデータが得られなかったが、RA-4-2 と同じ経過年数であるため、RA-4-2 と同じ COP 低下率とした。

b) RA-1・RA-2・RA-4-1 更新前

RA-1・RA-2・RA-4-1 の更新前は詳細データがないため、更新前の RA-4-2 と同じ COP 低下率とした。

c) RA-3・RA-4-2 更新後

RA-3（インバータターボ冷凍機）の性能は先述のとおり付属の制御機器に詳細計測データが蓄積されている。更新後 RA-3 が稼働した平成 24 年 8 月 19 日～10 月 18 日のこれらのデータを用い、部分負荷時 COP 特性曲線を作成した。作成した部分負荷時 COP 特性曲線を図-5.6 に示す。なお、メーカーが開示している部分負荷時 COP 曲線と比較すると、負荷率 100%近くではほぼ差がない結果となっている。

RA-4-2 は冷凍機廻り運転データがないため、メーカーが開示する部分負荷時 COP 特性曲線を補正せずに用いる。

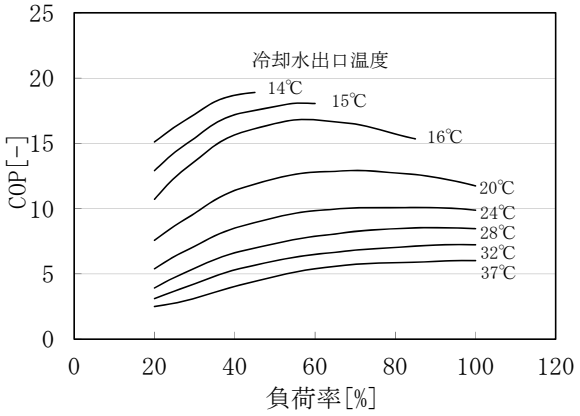


図-5.6　インバータターボ冷凍機　実機の COP 特性曲線

後述するシミュレーションモデルでは、メーカーが開示している部分負荷時 COP 特性曲線をベースに、算出した COP 低下率（表-5.4）を、部分負荷時も含め一律に乗じて補正した COP を用いることとする。

表-5.4　各熱源機器の COP 低下率

	更新前	更新後
RA-1	67.6%（0.95）	81.5%（1.28）
RA-2	67.6%（0.55）	90.5%（1.27）
RA-3	67.6%（1.02）	図-5.6による
RA-4-1	67.6%（1.03）	71.2%（1.30）
RA-4-2	67.6%（1.03）	100%（1.32）

※　（）内は定格COP(ガスはHHV基準）を示す。

2）蒸気用熱源機器

a）炉筒煙管ボイラ

平成 23 年度のボイラへの給水量実績およびブロー量の設定値から算出した蒸気量と、ガス消費量実績によりボイラ効率を算定する。図-5.7 に負荷率と効率の関係を示す。負荷率 40%までは近似式で得られる効率とし、負荷率 40%以上は一律 82.6%（HHV 基準）とする。

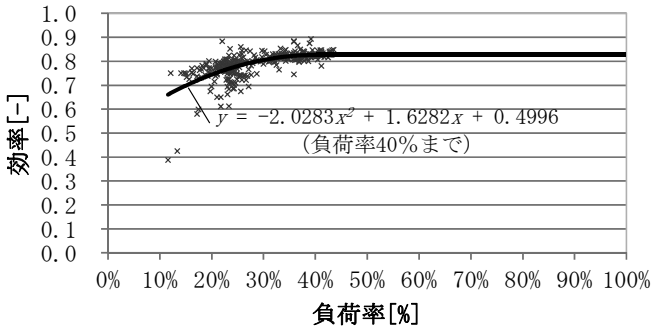


図-5.7　ボイラ効率の検証

b) ガスエンジン CGS

本施設の CGS は、メンテナンス費増加の影響により主に保守目的の運転に止まり、年間運転時間も平成 21 年～23 年度実績で平均 204 時間となっている。この期間のガスエンジン CGS の燃料消費は熱源機器類の一次エネルギー消費量の 2.2%程度で、検証に与える影響も少ないことから、発電効率、排熱回収効率は部分負荷時も含めメーカーが開示している効率を用いる。

3) ESCO 導入機器

ESCO 事業での導入機器（RA-5、BS-1-1～7）の能力はメーカーが開示している部分負荷時 COP 特性曲線を補正せずに用いる。

5.2.2 (3) 熱源機器の冷凍能力限界

各熱源機器は 5.2.2 (2)で検証した COP だけでなく、経年劣化等により定格値まで冷凍能力が出せていない可能性がある。ここでは各熱源の冷凍能力限界値を推計する。

平成 23 年度時点の各熱源の冷凍能力限界値を、5.2.2 (2)と同様に平成 23 年 8 月 2 日～8 日間の仮設計測器による運転データにより推計を行う。図-5.8 に RA-1、RA-2 の冷凍機入口温度と出口温度の関係を示す。設計値は 12℃→7℃であるが、図より入口温度が RA-1 は 11.4℃、RA-2 は 11.0℃を超えると 7℃で送水できなくなっている。このポイントでの熱量基準負荷率を算定すると、RA-1：83.9%、RA-2：78.6%であり、これ以上の負荷率だと冷凍能力が発揮できないことを意味するため、これを冷凍能力限界と規定する。COP 低下と同様に、冷却水流量の不足が能力低下を招いていると推察される。

その他の機種は計測データが不足しているため、文献値[5.7]を参考に、経年劣化により年 1.0%ずつ能力が低下するものとして、以降の試算を行う。

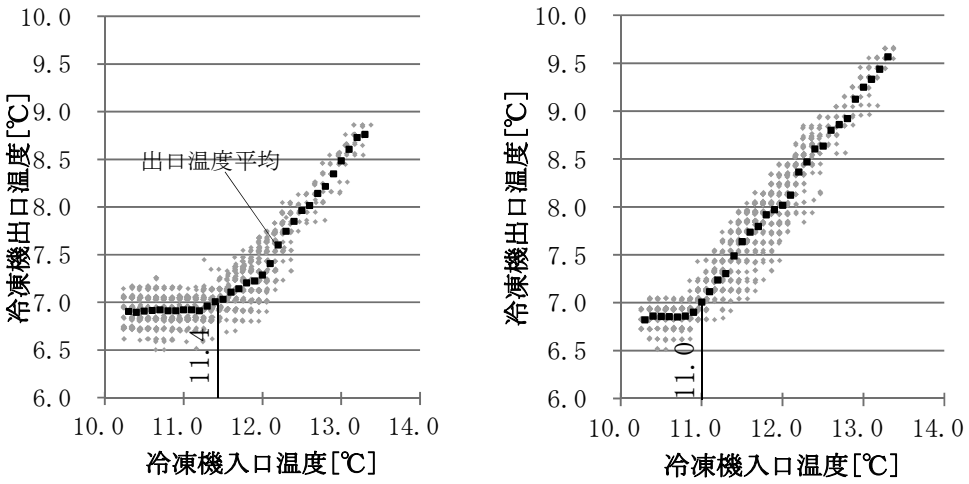


図-5.8 冷凍能力限界の検証（左：RA-1、右：RA-2）

5.3　シミュレーションモデルの概要と再現性検証

運用上のフォルトや省エネルギー手法の定量化・分析を行うため、既に報告が行われている熱源シミュレーション手法[5.8)、5.9)]をベースに熱源システムモデルを作成した。

5.3.1　シミュレーションモデルの概要

シミュレーションモデルのフロー図を図-5.9 に示す。熱源は前節で規定した機器性能を与える。冷却塔モデルは既報告[5.8)、5.9)]によるが、一部冷却塔のファンは 2 段制御をしており、これに対応したモデルに改良している。またポンプモデルは実機の性能曲線から得られる値を用いた。

なお、本モデルのタイムステップは 1 時間であるが、二次側蒸気需要量は日単位のデータしか計測されていないため、ボイラに関する計算ステップのみ 1 日としている。

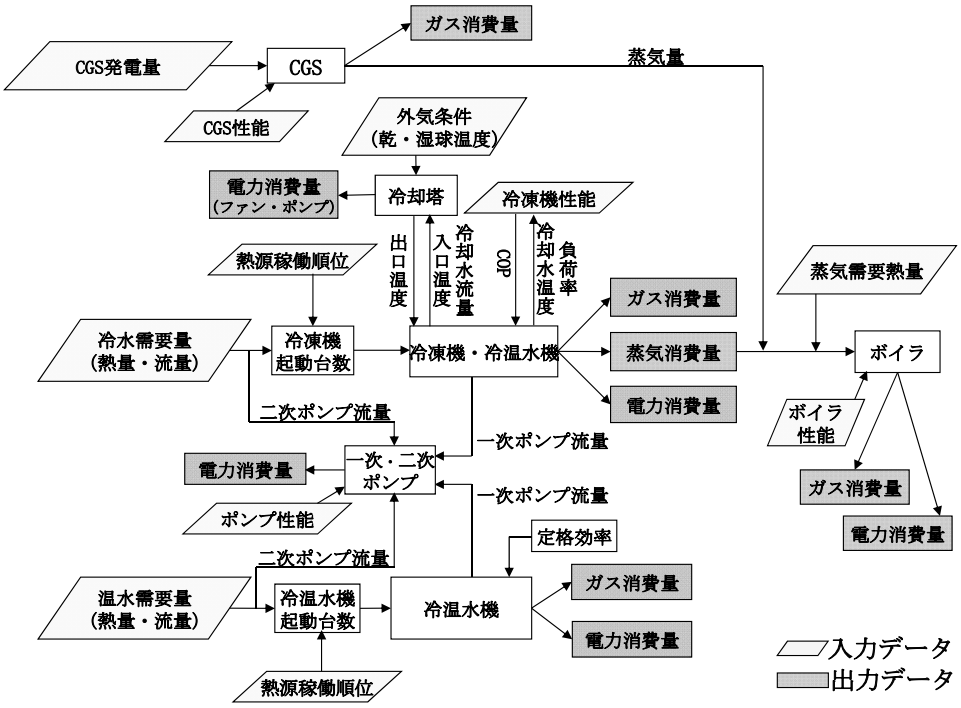


図-5.9　シミュレーションモデルのフロー図

5.3.2　シミュレーションモデルの再現性検証

5.3.2 (1)　平成 23 年度運転実績の検証

平成 23 年 4 月～平成 24 年 3 月の期間における熱源機器の一次エネルギー消費量実績値と、気象条件を含め実態に即した入力値を与えた場合のシミュレーション結果との比較により再現性を検証する。なお、実際の熱源発停は手動により行われており、モデルの精度検証を行う目的であるため、期間を区切り実態の運用に近い発停順位を与え、二次側の熱量を満たすよう台数制御する設定とした。

図-5.10 に検証結果を示す。実績値とシミュレーション結果の誤差は 0.3%となっており、良好な

精度が確保できているものと判断する。

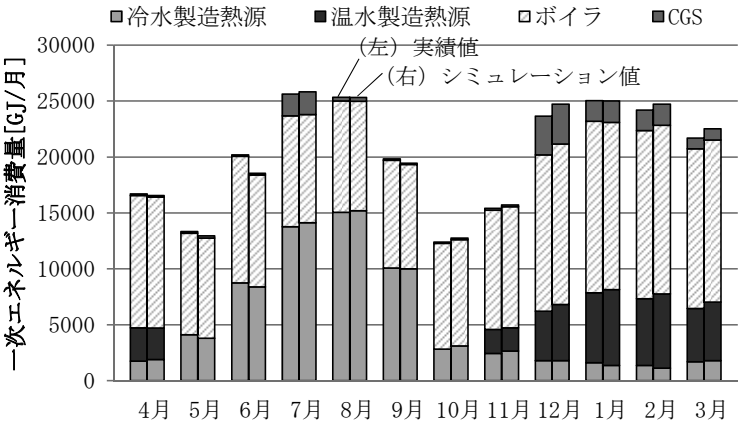


図-5.10　シミュレーションモデルの再現性検証結果

5.3.2 (2)　ターボ冷凍機導入後の検証

平成 24 年 6 月に納入されたターボ冷凍機廻りには先述のとおり、流量・温度に関する詳細なデータが計測されている。ターボ冷凍機は冷却水温度によって COP が大きく変動するが、ここでは、実態の冷却水温度の変動が比較的大きい状態であった 9 月 7～13 日の期間において、ターボ冷凍機廻りの冷水流量・温度データと電力消費量の再現性を検証した。

RA-1～RA-3 は冷水系統として運用されているが、この期間は冷水系と冷温水系間のバイパス弁は閉で、互いに冷水の融通は行われていない。ターボ冷凍機の一次ポンプは変流量制御であるが、流量下限値を定めつつ二次側冷水流量合計から RA-1、RA-2 の合計流量を差し引いた流量を設定値として制御がなされていることから、シミュレーションでもこの条件を与えた。また熱源稼働台数は実態の条件を与えた。結果を図-5.11 に示す。冷水流量、送水温度差とも良好な再現性が確認でき、この期間の RA-3 の電力消費量の実測値とシミュレーション値の誤差も 2.5%と小さい。

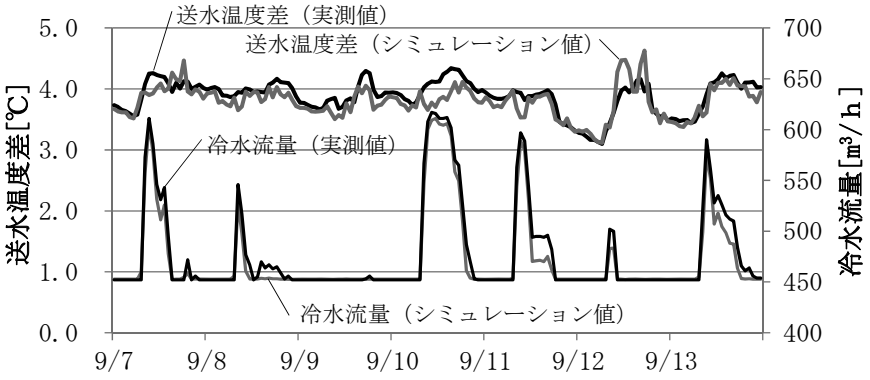


図-5.11　ターボ冷凍機廻りの再現性検証結果

5.4　運用時のフォルト分析とシミュレーションモデルを用いたエネルギー効率の定量化

本節では、運用上のフォルトを明らかにし、その影響や過去の熱源改修による効果を、シミュレーションを用いて定量化するとともに、ESCO 実施による省エネルギー効果の推計・分析を行う。

5.4.1　運用時のフォルト分析

5.4.1 (1)　二次側往温度と送水温度差

表-5.1 に示すように近年熱源機器が順次更新されているが、図-5.12 では、平成 21 年～24 年夏期における冷水系統二次側の往温度、送水温度差、流量、熱負荷の実測データより、それぞれ外気条件が近い平日 5 日間を抽出して平均化し時刻別に示した値を示す。設計値は往温度 7℃、送水温度差 5℃であるが、往温度・送水温度差が徐々に改善しているものの、熱負荷は逆に増加しているのが確認できる。また図-5.13 では平成 23 年度一年間の冷水熱負荷と温度差の実績を示すが、二次側熱負荷が少ない冬期や中間期ほど送水温度差が確保できなくなる傾向が読み取れる。

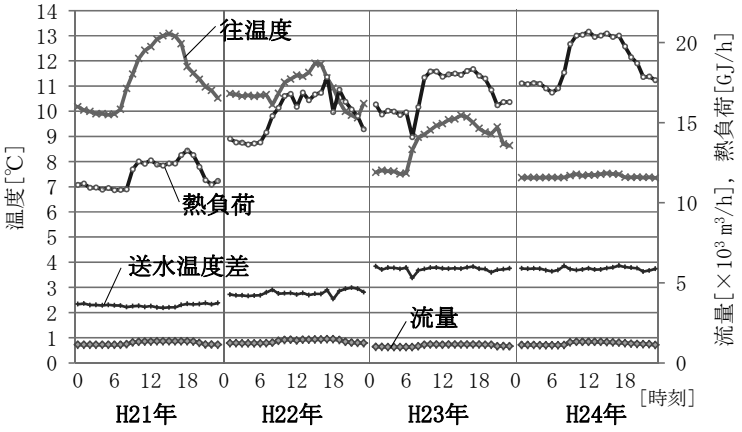


図-5.12　冷水系統二次側の温度・流量･熱負荷（夏期）

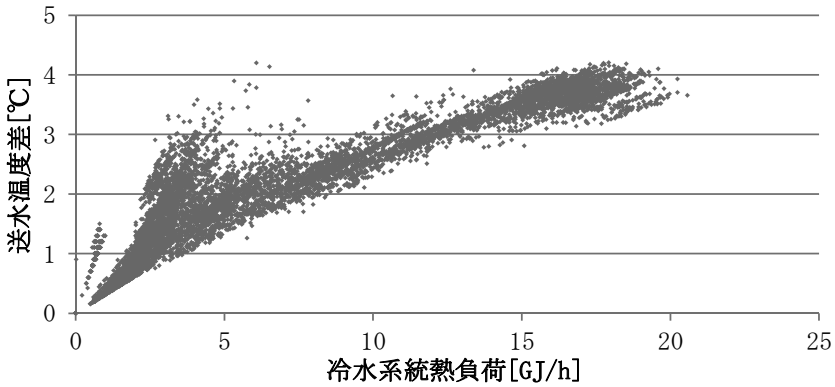


図-5.13　冷水系統の熱負荷・送水温度差相関

この理由には複合的な要因が考えられるが、推測される主な事項を以下に示す。

1) 往温度・送水温度差の改善は熱源更新の影響が大きいと考えられる。熱源更新前の一次ポンプは全て定流量だが、劣化による機器能力低下により送水温度差が確保できず、二次側熱負荷が増加する時刻は往温度も上昇していたと推察される。

流量と温度の変化を詳細に確認するため、仮設計測器が設置された平成 23 年 8 月 2 日～8 日の熱源廻りの流量バランスと往温度・送水温度差の推移を図-5.14、図-5.15 に示す。この期間は冷水系統の詳細データに加え、冷水ヘッダと冷温水ヘッダ間のバイパス流量も計測されている。期間中 RA-1、RA-2、RA-4-1 が常に稼働しており、RA-4-2 は 8 月 2 日～5 日の昼間のみ稼働している。図-5.14 に示すように、この期間の冷水系統二次側へは RA-1、RA-2 に加え冷温水系統熱源機から冷水が供給されているが、それでも流量の不足が生じ、冷水一次側の往・還ヘッダ間のバイパスにおいて逆流（還り冷水が往ヘッダで熱源機からの冷水と混合）が生じている。RA-1、RA-2 の冷凍機出口温度は、夜間は定格の 7.0℃前後で推移していることは別途確認できているが、図-5.15 に示すように二次側への冷水往き温度は夜間でも 7.5℃程度となっており、逆流により還り冷水が混入し、若干の温度上昇を招いているものと考えられる。また、冷温水系統の熱源が定格流量確保できていると仮定して計算で求められる各冷凍機出口温度の平均は RA-4-1 : 7.5℃、RA-4-2 : 10.3℃であった。RA-4-2 は設置後 18 年経過していることによる能力低下の影響が大きいと推察されるが、日中はこの機器が稼働するため往温度が大きく上昇していることが確認できる。

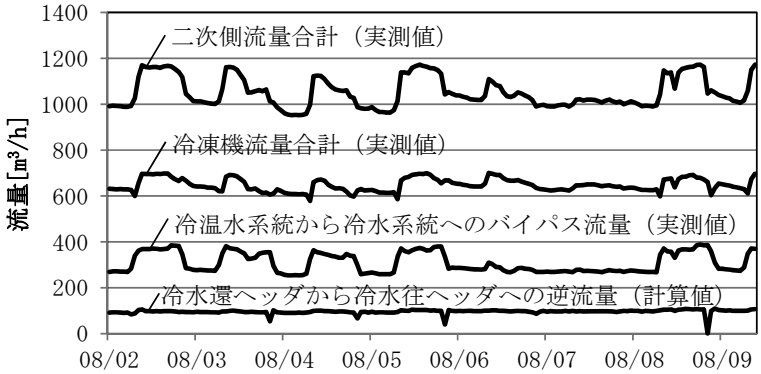


図-5.14　冷水系統の流量バランス

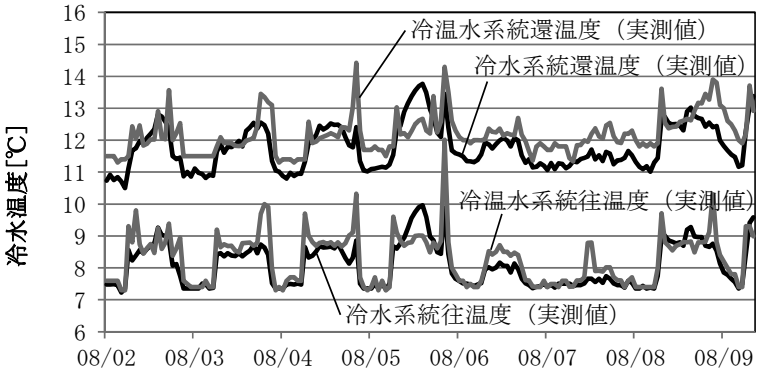


図-5.15　冷水系統・冷温水系統の往・還温度

逆流の直接的な要因としては、送水温度差が確保されていない状態において熱量ベースで熱源を手動発停していることに起因するものと考えられる。送水温度差が確保されていなかった平成21・22年の往温度の高さは逆流の影響も存在していた可能性がある。また、往温度の上昇は、空調機などの必要冷房能力に対しコイル列数の不足を招き温度差が確保できなくなる要因にもなり得る。

2) 既設のファンコイルユニットは構造上、還温度が確保しにくく温度差が確保できなくなる。それに加え、二次ポンプは病棟系を除いて変流量制御であるが、吐出圧一定制御となっている。特に負荷流量が少ない冬期や中間期においては、配管抵抗の減少に伴い空調機やファンコイルユニットには過剰な圧力が掛かることになる。ファンコイルユニットは二位置弁で容量制御ができないため、過剰な圧力が掛かると定格以上の過流量となり、温度差が確保できなくなる一因として推測される。

近年は冷凍機の更新により往温度・送水温度差が改善されたものと考えられる。しかし熱源更新後でも二次側の要求流量は多く、過去から横ばいであるため逆に熱負荷は増加している。年間の熱負荷も図-5.16に示すように増加傾向にある。一例ではあるが、図-5.14、図-5.15の計測と同時期（平成23年）に実施された目視による調査の結果では、特に除湿再熱を必要としている空調機において冷水二方弁の開度が100%となっている系統が多数存在していることが確認されている。プラント管理者のヒアリングからも二次側の大きな設定変更はなく、実態としてはそれまで処理しきれなかった負荷を処理しているものと推察される。

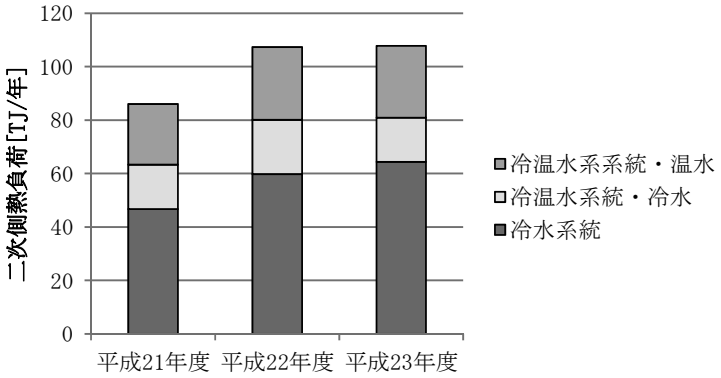
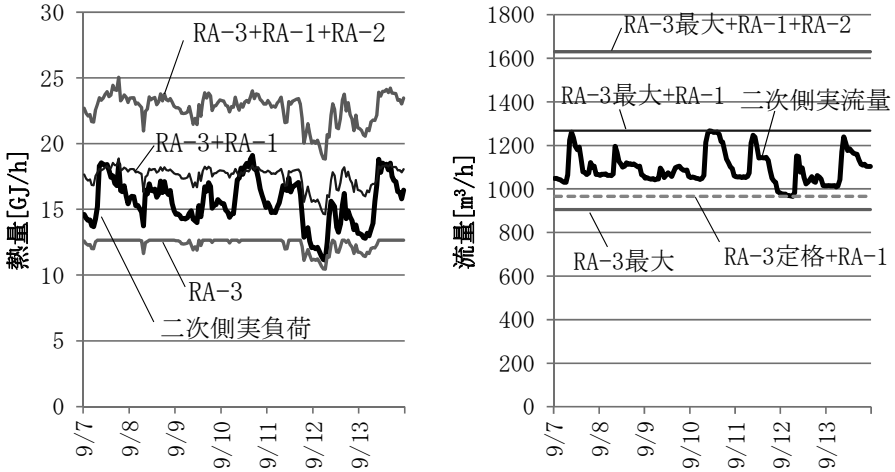


図-5.16　冷水・冷温水系統の二次側熱需要

平成23年度時点の対策としては、空調機の除湿設定の緩和、二次ポンプ制御方式の見直し、さらに温度差が確保できていない場合の熱源台数増段の抑制を目的とした過流量制御型の熱源機器の導入等が考えられた。これらの検証を踏まえ、表-5.1に示すように、平成24年6月、RA-3は冷水流量が定格の150%まで対応可能な過流量制御型インバータターボ冷凍機に更新された。この効果として平成24年度夏期においては、性能劣化した熱源の運転もないことから、往温度が改善しているのが確認できる。

図-5.17にはターボ冷凍機導入後の5.3.2 (2)で示した期間の冷水系統の実際の熱量・流量の推移と、

実温度差状態において各熱源が出し得る最大の能力を示す。ESCO 事業後は熱源台数制御機能が付加される予定であるが、この期間においては手動発停であるため、期間中、RA-3、RA-1、RA-2 の 3 台が常時稼働し、先述のとおり二次側冷水流量合計から RA-1、RA-2 の合計流量を差し引いた流量を設定値としてターボ冷凍機が運用されていた。熱源台数制御機能付加後は、RA-3 をベース機として稼働させ、かつ過流量制御機能を最大限活用する運用とすれば、図-5.17 の検証期間の例では、二次側の実負荷・実流量に対し、RA-3 と RA-1 の 2 台の運転で負荷・流量ともほぼ需要を満たせることが確認でき、熱源の稼働台数を抑制することで、補機類停止の効果も含め大幅な省エネルギーを達成できる可能性がある。



注　流量（右）の「RA-3 最大」は過流量制御（定格の 150%）の値を示し，RA-1，RA-2 に関しては定格流量を示す。また，熱量（左）は各機器の定格能力以下でかつ各流量（RA-3 は最大値）×二次側の実温度差以下として定義される供給可能熱量を示す。

図-5.17　冷水系統の機器能力と実績値の比較（左：熱量　右：流量）

5.4.1 (2)　冷却水流量の不足

先述の通り RA-1、RA-2 の冷却水の平均流量はそれぞれ定格値に対して RA-1：92.8%、RA-2：85.8%と不足しており、所定の能力が発揮できていない可能性がある。実機の納入メーカーに確認して得た性能特性により算出したところ、RA-1 は冷凍能力・COP ともに 97.0%に、RA-2 は冷凍能力：96.5%、COP：99.4%に性能が低下している可能性があることが分かった。

5.4.1 (3)　ボイラの稼働台数

現状では突発的な蒸気使用量増加に対応しやすいなどの理由によりほぼ常時 2 台の運用がなされているが、図-5.7 の結果から負荷率に余裕がある時間帯も多く、特に夏期などは効率が低下した領域での稼働となっている。

運転台数を緩和することでエネルギーを削減できる可能性がある。

5.4.2　シミュレーションを用いたエネルギー効率改善の定量化

シミュレーションモデルを用い、過去の熱源更新による総合エネルギー効率の定量化、前項で示した現状におけるフォルトの定量化、ESCO 実施による省エネルギー効果の試算・分析を行った。評価するケースを表-5.5 に示す。ここで、評価ケース「平成 21 年度」～「平成 23 年度」については、各年の実際の気象条件、二次側熱負荷・二次側流量・熱源発停順位は実態に即した条件を与え、「基準ケース」以降は「平成 23 年度」と同じ気象条件を与えている。また「基準ケース」以降は「平成 23 年度」と同じ二次側熱負荷を与えている。往温度の低下より送水温度差が若干改善される可能性があるが「基準ケース」～「ケース 6」はその影響は無視し、二次側流量は「平成 23 年度」と同じとする。

表-5.5　評価ケース

位置付け	評価ケース	概　要
過去実績の定量化	平成21年度	熱源更新前
	平成22年度	RA-1更新
	平成23年度	RA-2，RA-4-1更新 （5.3.2におけるシミュレーション結果）
基準ケース		平成23年度を基準に，一次側の往・還ヘッダー間のバイパス逆流による冷水往温度上昇を解消するため，二次側流量を満たす熱源台数を運転
現状の運用フォルトの定量化	ケース1	RA-1，RA-2の冷却水流量不足を解消 （5.4.1（2）の能力低下を改善）
	ケース2	「ケース1」+ボイラの運転台数適正化
	ケース3	「ケース2」+RA-3，RA-4-2更新 （熱源台数制御を行わない平成24年度の運転方法）
ESCO実施による効果予測	ケース4	「ケース3」+熱源制御の最適化 （過流量制御型のターボ冷凍機をベース機とした熱源台数制御、一次側・二次側変流量制御）
	ケース5	「ケース4」+ボイラ更新（BS-1-1～7）
	ケース6	「ケース5」+熱回収チラー（RA-5）を導入

さらに、「ケース 5」までは反映した上で、二次側の条件変化がもたらす効果を確認するため、表-5.6 に示す感度分析を行った。

表-5.6　感度分析の評価ケース

	冷水送水温度差	
	実績より50%改善	設定値（5℃差）に改善
熱回収チラー導入前	ケース7	ケース9
熱回収チラー導入後	ケース8	ケース10

ESCO 後は二次ポンプの推定末端差圧による送水圧力可変制御の導入等も予定されており冷水の送水温度差改善が見込まれる。また、今後ファンコイルユニットの本体や制御方法の更新などで更なる改善の可能性もある。過流量制御型ターボ冷凍機や冷房主体運転の熱回収チラーを導入する本施設において、冷水送水温度差改善の影響を把握しておくことは、今後の改修計画を策定する上で

非常に有効となる。本研究では、冷水の送水温度差が設計値の 5℃差に対し、50%改善される（温度差 50%改善の場合の定義は式（5.1）に示す）と仮定した場合「ケース 8」と、設計通り通年において冷水送水温度差が設計値通り確保できる場合「ケース 10」を評価ケースとして設定した。なお既往の調査[5.10]によれば、二次側の改善によっても低負荷領域における温度差改善は困難であり、実際には現状との中間になると予想される。

$$\Delta Ta = 0.5\ (5 - \Delta Tb) + \Delta Tb \qquad \cdots\cdots (5.1)$$

ここに,

ΔTa : 温度差 50%改善後の温度差 ［℃］

ΔTb : 改善前の温度差 ［℃］

さらに、「ケース 6」では「平成 23 年度」と同じ二次側条件で評価を行っているが、熱回収チラーが熱回収運転となる冬期においては図-5.13 に示すように冷水送水温度差が確保されていない条件であるため、冷房主体運転の熱回収チラーの冷房出力が低下し、これに伴い暖房能力も定格まで出力を発揮できない可能性がある。そこで、冷水送水温度差が改善された場合における熱回収チラーの導入効果を把握するため「ケース 7」「ケース 9」を設定し、「ケース 8」「ケース 10」との比較によりその効果を確認する。

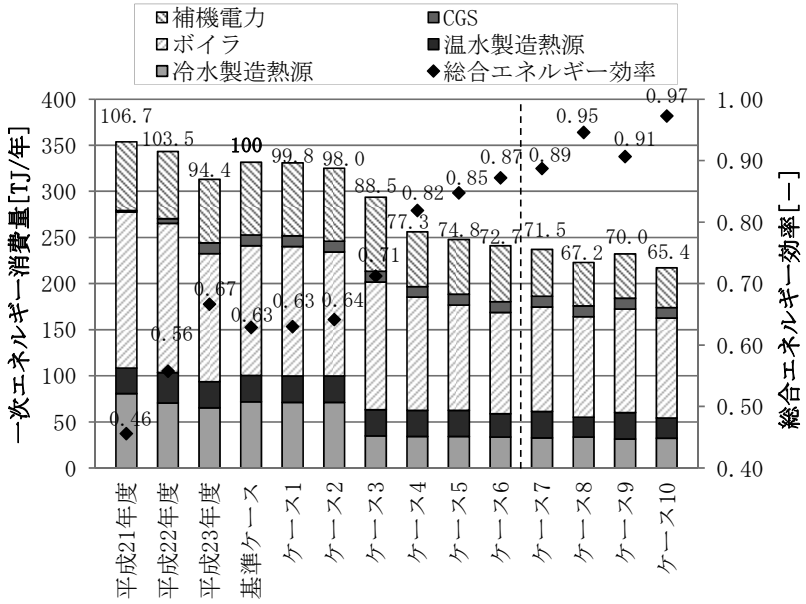
なお、CGS についてはメンテナンス費の影響により、運転時間を制限する運用を行っているため、「基準ケース」以降は平成 23 年度の稼働実績と同じとする。また、「ケース 3」は先述のとおり、年間を通じて冷水系と冷温水系間のバイパスを閉としてそれぞれ別の運用がなされていたためこれを再現するが、その他のケースは、夏期においてはこのバイパスを開とする一体運用の条件としている。

試算結果を図-5.18 に示す。なお、「平成 21 年度」「平成 22 年度」の熱源は全てガス式であるが、年間ガス消費量の実績値に対するシミュレーション結果の誤差はそれぞれ-1.9%、-1.8%と良好な精度が保たれている。

「平成 21 年度」～「平成 23 年度」においては、先述のとおり二次側熱負荷が増加しているものの、熱源の更新に伴う COP の改善と温度差改善による稼働台数の低減等により一次エネルギー消費量は減少し、総合エネルギー効率では「平成 21 年度」から「平成 23 年度」で 46.3%向上していることが確認できる。「基準ケース」においては二次側流量を満たすために熱源稼働台数が増加し、効率が低下した機種の運転や補機動力の増加により、「平成 23 年度」実績より一次エネルギー消費量は 5.9%増加することとなる。

図-5.18 内では「基準ケース」の一次エネルギー消費量を 100 とした場合の割合を併記しているが、「ケース 1」、「ケース 2」の冷却水流量不足の解消やボイラ運転台数の適正化により、エネルギー消費量は 2.0%削減可能であることが分かった。「ケース 3」では熱源の更新効果が確認できるが、年間を通じて冷水系と冷温水系間のバイパスを閉とする運用を行っているため熱源稼働台数が増え、補機動力は若干増加している。「ケース 3」と「ケース 4」の比較では、過流量制御型であるターボ

冷凍機導入のメリットを最大限活かす最適な制御とすることなどで 12.7%のエネルギー削減を見込むことができる。さらに、ボイラ更新「ケース 5」で 3.3%、熱回収チラーの導入「ケース 6」で 2.7%の削減効果が期待できる。以上の分析により、ターボ冷凍機の導入と、これをベース機とした運転の最適化の効果が非常に大きいことが確認できる。



※図内に記載の一次エネルギー消費量の数値は基準ケースを100とした場合の割合を示す

図-5.18　シミュレーション結果

続いて感度分析の試算結果を検証する。

熱回収チラー導入前の「ケース 5」、「ケース 7」、「ケース 9」の比較においては冷水送水温度差が改善されるに従い、一次エネルギー消費量の指数も 74.8→71.5→70.0 と減少する。「ケース 9」で過流量制御型の導入メリットはなくなるが、過流量制御型を導入していることで「ケース 7」でも比較的大きな削減効果が得られることが確認できる。

熱回収チラーの導入効果は、冷水送水温度差の改善がない場合は先述のように 2.7%だが、冷水温度差が 50%改善した場合においては「ケース 7」と「ケース 8」の比較で 6.0%、冷水温度差が設定値まで改善した場合においては「ケース 9」と「ケース 10」の比較で 6.6%の削減効果が確認でき、一定の冷水温度差改善は熱回収チラーの導入効果も高めることが分かる。

以上の感度分析により、本施設においては 50%程度の冷水送水温度差の改善でも一定の省エネルギー効果があることを見出した。

また、二次側の送水温度差を考慮しない概略的な試算では「ケース 6」と「ケース 10」の比較により最大 10.0%の誤差が生じることとなり、詳細なシミュレーション実施の重要性が確認できる。

5.5　まとめ

本章では、平成 5 年竣工のため計測器の設置が十分ではない施設において、シミュレーションモデルを利用することでその不足を補完し、熱源機器の劣化度を特定して運用時における不具合を同定・定量化した。さらに本モデルにより改修後のエネルギー削減効果を定量的に評価するとともに、更なる改善の可能性として本熱源システムにおける二次側の送水往還温度差改善の影響を分析した。主な成果を以下に示す。

1) 蒸気流量が計測器の計測レンジ内に納まらず、適切に計測されていない実態を明らかにし、適正な蒸気流量で熱源システムの性能を評価した。
2) 経年した熱源機器の劣化度を把握する重要性を指摘し、COP および冷凍能力の低下率を把握することで、適切な性能の検証を行った。
3) 往温度や送水温度差が確保されていない実情を明らかにし、過去の改善の経緯や実測データなどから原因を考察した。また運用時のフォルトとして、冷却水流量の不足やボイラ稼働台数、熱源の制御方法等の問題を顕在化させ、シミュレーションを用いてその定量化を実施した。
4) 今後の ESCO 工事による省エネルギー効果の定量化を実施した。また送水温度差の改善がもたらす削減効果を感度分析することで、本施設においては 50%程度の冷水送水温度差の改善でも一定の省エネルギー効果があることを見出した。
5) 二次側の送水温度差を考慮しない概略的な試算では、最大 10.0%の誤差が生じることを示し、シミュレーション実施の重要性を確認した。

一連の性能検証は、建物ライフサイクルでの省エネルギーを達成する上で非常に大きな意義があると考える。図 5-18 における「平成 23 年度」と「ケース 10」の比較では 96.1TJ/年の一次エネルギー消費量削減が見込まれることとなる。これは平成 23 年度実績での大規模施設全体の 10%、大阪大学全体の 4%に相当するもので非常に大きな削減量となる。

得られた知見を実際の運転にフィードバックしてその効果を確認するとともに、更なる改善のため本施設での送水往還温度差改善の検証や他の大規模施設での検証に役立てることを今後の課題とする。

参考文献

5.1）久保木真俊,富樫英介,牛尾智秋,田辺新一：熱源システムシミュレーションを用いた新聞印刷工場におけるコミッショニングと省エネルギー効果実証,日本建築学会環境系論文集，vol.74，No.642，pp.991-999，2009.8

5.2）百田真史,井上隆,射場本忠彦,柳原隆司,岡垣晃："運転保守管理段階におけるコミッショニング"の地域冷暖房への適用に関する実践的研究 竣工後三年間にわたるコミッショニングの実施と効果検証，空気調和・衛生工学会論文集，No.101，pp.21-31，2005.8

5.3）渡邊剛,坂井友香,尹奎英,丹羽英治,時田繁,奥宮正哉：建築設備のライフサイクルマネジメントにおけるシステムシミュレーションの活用に関する研究　第2報-BEMSとシミュレーションを利用した空調システムのエネルギーマネジメント，空気調和・衛生工学会論文集，No.163，pp.29-37，2010.10

5.4）一瀬茂弘,河路友也,羽津本好弘,松田則雄,中原信生：事務所ビルの空調設備改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究 第1報-復性能検証過程の枠組みと各フェーズにおける実行概要，空気調和・衛生工学会論文集，No.153，pp.13-24，2009.12

5.5）一瀬茂弘,河路友也,桐山大蔵,羽津本好弘,山羽基,松田則雄,中原信生：事務所ビルの空調設備改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究　第2報-機能性能試験の枠組みと夏期における試行概要，空気調和・衛生工学会論文集，No.160，pp.31-40，2010.7

5.6）一瀬茂弘,河路友也,桐山大蔵,羽津本好弘,山羽基,松田則雄,中原信生：事務所ビルの空調設備改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究　第3報-機能性能試験の実行結果と実用化に向けての課題と考察，空気調和・衛生工学会論文集，No.174，pp.1-13，20119

5.7）日本冷凍空調工業会：ガス吸収冷温水機・吸収冷凍機 新しい運転管理の実務，第7版，p.111，2007.6

5.8）栂野良枝,上田憲治,下田吉之：民生業務用熱源システムにおける高効率ターボ冷凍機の使用法に関する研究（第2報）新たな運転手法の省エネルギー効果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 ，pp.1607-1610，　2008.9

5.9）栂野良枝,上田憲治,山口容平,下田吉之：民生業務用熱源システムにおける高効率ターボ冷凍機の使用法に関する研究（第2報）都市未利用熱源を冷却源とする熱源システムの省エネルギー性評価，空気調和・衛生工学会論文集，　No.144，pp.43-51，　2009.3

5.10）名古田知志,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，空気調和・衛生工学会論文集，　No.124，pp.47-56，　2007.7

第 6 章：総括

6.1　総括ならびに結論

大学は持続可能な低炭素化社会の実現に向け、教育・研究活動を通じて社会貢献することが求められている。同時に社会の一翼を担う立場として、エネルギー使用の合理化に関する法律や自治体条例等の遵守を前提に、施設運営に関わるエネルギー消費量や温室効果ガス排出量を削減することは不可避な状況にある。

様々な施設が混在する大学施設においては、エネルギー消費の実態を体系的に捉え、それぞれ異なる消費特性に合わせ、的確な省エネルギー戦略を立案することが重要となる。そこで本研究では、大学内の施設をエネルギー消費特性により、文科系・理科系・大規模施設の 3 カテゴリーに分類し、その中から特にエネルギー消費量の多い理科系、大規模施設（それぞれ大阪大学の一次エネルギー消費量の 53%、40%を占める）に焦点を当て、エネルギー消費の実態の把握とその低減に役立つ知見を得ることを目的とした。

各章で得られた知見を以下に示す。

第 1 章：緒論

我が国のエネルギー消費動向をエネルギー部門別にみると、大学施設が属する業務部門は、2011 年度時点で 1973 年度比 2.8 倍と大幅に上昇しており、全エネルギー消費に対するシェアも急激に増加している。主な原因の一つに延床面積の増が挙げられるが、近年の大学施設の床面積増加率は業務部門全体のそれより高く、エネルギー需要も伸びていることが推察される。社会的責務を果たす上でもエネルギー消費量の削減は不可避な状況にあり、大学は社会の実験の場として率先してこれらの問題解決に向け努力し、その成果を積極的に還元する役割が求められていることを示した。

第 2 章：大規模総合大学施設のエネルギー消費実態と巨視的分析

大学には多様な施設が混在するが、はじめに大学施設を文科系、理科系、大規模施設の 3 つのカテゴリーに分類することで、年間のエネルギー消費特性に顕著な差があることを示した。また既往研究では、限られた施設での実測データ分析や、年別・月別・日別の実測データを用いた分析が一般的であったが、本研究では建物単位で全学的な計測を行っている電力可視化システムの時刻別実測データを用いることで詳細な分析を行った。これにより特に理科系および大規模施設においてほとんど人間の活動が無いと考えられる 1 月 1 日にも終日多大な電力が消費されていることを示し、人の活動に関わらず定常的に発生する電力消費の存在（ベース分）について言及するとともに、カテゴリー間の年間電力消費量の差はベース分の差の影響が大きいことを明らかにした。加えて、時刻別実測データを用いた内訳推計により、理科系では最大需要電力の過半がベース分であること、大阪大学の年間電力消費量の 79%がベース分であることなどを明らかにし、年間電力消費量削減や電力ピークカット等あらゆる面において 24 時間稼働している機器の影響が大きいことを示した。その他、気温感応度分析により、日最高気温が大学全体の最大需要電力に与える影響や、日平均気温

の変化が各施設の日電力消費量に与える影響を明らかにすることでエネルギー消費特性の把握に役立つ知見を得た。

第 3 章：理科系研究室のエネルギー消費実測と運用改善によるエネルギー削減効果試算

大阪大学の一次エネルギー消費量の 53%を占める理科系施設（カテゴリーⅡ）のエネルギー消費実態を把握するため、特定の 2 研究室において系統回路単位での電力量実測を行った。生物科学系研究室の実測では、季節・昼夜を問わず定常的に大きな実験系コンセントの電力消費が存在し、これが年間電力消費量の 55%を占めることを明らかにした。主な要因は 24 時間稼働するフリーザー類の影響が大きいと推察される。また、情報科学研究室では大型サーバとサーバ用空調の電力消費量が非常に大きく、サーバ機器は稼働台数の影響以外は 24 時間変動の少ない電力消費値を示す傾向があることを確認した。生物科学系研究室でのフリーザー類と合わせ、これらの実験機器が大学内の理科系研究施設のベース電力を高くしている要因のひとつとして考えられることを示した。

東日本大震災以降、エネルギーを取り巻く環境は大きく変化し、エネルギー消費量削減とともに、夏期および冬期のピーク時の電力使用抑制は重要な課題となっている。一方で節電環境下においても、施設利用者の満足度・快適性・知的生産性の維持は欠くことができない。そこで、運用段階において、どのような省エネルギー手法を選択することが効果的な削減に繋がるのかを確認するため、一次エネルギー消費量原単位が理科系施設全体と近い生物科学系研究室を対象とし、BEST を用いたシミュレーションにより、年間電力消費量／夏期ピーク時／冬期ピーク時のそれぞれにおいて、様々な手法がもたらすエネルギー削減効果を定量的に算出した。照明およびコンセントの対策は一定の削減効果があることを確認し、空調については年間電力消費量や冬期ピーク時の削減効果は比較的小さいが、夏期ピーク時においては、設定温度の変更による効果のほか、照明・コンセント・換気の対策による処理熱量減の効果により、大きな削減効果が得られることを示した。

第 4 章：理科系施設のエネルギー消費内訳の推計と分析

研究室規模においては計測器の設置により前章のような実測や分析が可能となるが、既存施設において建物規模、キャンパス規模で用途別エネルギー需要を把握することは、コスト的な制約により現実的に困難である。そこで第 4 章では広く理科系施設（カテゴリーⅡ）のエネルギー消費構造を明らかにするため、一般的に入手可能な情報（保有機器のデータベース、エリア全体の時刻別電力消費量および月別ガス使用量）、およびシミュレーションツールを利用することで、建物規模あるいはキャンパス規模でエネルギー消費内訳を推計する手法を提案した。また、推計時のシミュレーション入力を簡易化する手法も提案した。なお、従来の推計法では非空調用途のエネルギー需要は月変動がないことを前提としたものが一般的で、長期休暇期間など月によって需要が変動する大学施設では大きな誤差が生じることとなるが、本提案手法ではこの問題を解決したものとしている。

精度検証により本手法の推計誤差が小さいことを確認した上で、最終的には理科系施設約 10 万㎡分のエネルギー消費内訳の推計を行い、理科系施設ではコンセントその他のエネルギー消費が全体の 59%を占めることを示した。また感度分析により、使用状況や建物条件の違いがエネルギー消費構造に与える影響を検証し知見を得た。本推計手法は大学施設のみならず、月により活動量が変化する他の教育施設や宿泊施設などの分析にも応用できるものと考える。

推計結果を踏まえ、空調および照明設備を高効率機器に更新する場合の効果を試算し、合計で8.1%の削減ポテンシャルがあることを見出した。また、効果的に省エネルギー改修を推進する上では優先順位を定めて費用対効果の高い機種から更新していくことが課題となるが、年間運転時間と機器能力を考慮することで、これを簡易的に検証する手段を提案した。

理科系施設では特に24時間稼働する機器の対策が不可欠と言えるが、保有機器の設置状況調査から、建物分類により機器の構成比率が大きく異なることを示し、その特徴に合わせた対策実施の重要性を説いた。

第5章：病院熱源設備のエネルギー性能評価

大阪大学の一次エネルギー消費量の40%を占める大規模施設（カテゴリーⅢ）についての分析を行った。大規模施設では実験系や医療系のエネルギー消費が非常に大きいと推察されるが、大半の施設で中央熱源方式の空調システムが採用されており、改修に合わせ性能の検証を行うことはエネルギー使用の合理化を図る上で有効な手段となる。しかしながら改修時の検証事例は多くみられないのが現状で、経年劣化した熱源設備のエネルギー性能を検証した例も少ない。この要因としては、古い設備では計測箇所が十分でないために、実態把握や検証自体が容易に行えないことが一因として挙げられる。本章では大規模施設の一次エネルギー消費量の57%を占める医学部附属病院を分析対象とし、計測器の設置が十分でない本施設において、シミュレーションモデルを用いることでその不足を補完し、熱源機器の劣化度を特定して運用時における不具合（一次側の往・還ヘッダ間のバイパス逆流、冷却水流量不足、ボイラの運転稼働台数など）を同定・定量化した。またESCO工事後の省エネルギー効果を試算するとともに、さらなる改善を見据え送水温度差の適正化がもたらすエネルギー削減効果の感度分析を行い、本施設においては50%程度の冷水温度差改善でも一定の省エネルギー効果があることを確認した。計測箇所が十分でない既存の中央熱源においても、このようなフォルトの検証や改善検討を行うことは建物のライフサイクルにわたる省エネルギーを達成する上で非常に有意義であり、広く応用されることを期待するものである。

6.2　論文の課題と発展

以下にカテゴリーごとの課題と今後の発展を示す。

(1) 文科系施設のエネルギー消費の実態とその低減

本論文ではエネルギー消費量の多い理科系、大規模施設に着目したが、文科系施設の省エネルギー分析は省略している。文科系施設は大阪大学の一次エネルギー消費量の 7%程度と全体に与える影響は小さいが、文科系中心の大学では大きな課題となる。

文科系施設の電力日負荷曲線は、図-2.14に示すように夜間の需要が少なく標準的な事務所のカーブ[6.1)]に近く、一次エネルギー消費量原単位も大きくないため、照明、空調等の建築設備によるエネルギーが需要の多くを占めているものと推察され、事務所ビル等で採用されている最新の省エネルギー技術の導入が有効と考えられる。大阪大学では平成23年に大学創立80周年を記念し、大学のシンボルとして「大阪大学会館」の省エネルギー改修を行っている。各種の省エネルギー技術に加え、創エネルギー技術（太陽光発電）も実装し、ZEB化を目指した運用がなされおり、このような

取組を継続してゆくことが今後の課題となる。

(2) 理科系施設のエネルギー消費の実態とその低減

第 3 章、第 4 章にて理科系施設の分析を行い、エネルギー消費の実態を明らかにした。その中でエネルギー消費の内訳を推計する手法を提案しているが、今回提案した手法は「換気」「照明」「コンセントその他」「空調」の 4 用途の内訳推計に限定しており、今後、個別の建物において更なる省エネルギー手法を検討する上では、特に「コンセントその他」の詳細な内訳把握が課題と言える。

実験機器の省エネルギーを重要視し、対策事例をまとめた文献[6.2)]もあるが、現状、これらの機器の省エネルギーを実現するには、ユーザーである研究者の理解と協力が不可欠である。例えば、サーバ、フリーザー、乾燥機、電気炉、ドラフトチャンバー等、実験機器ごとに電力消費の特性を把握し、省エネルギーに寄与する運用手法をマニュアル化して周知するなどの対策が今後望まれる。また大学施設における光熱水費の負担は、計測器設置の限界により純粋な受益者負担とは程遠い状況が多く、これがユーザーの省エネルギーを推進する意欲を阻害する要因となっている可能性がある。ハード面ソフト面双方の取組が必要であると考える。

(3)大規模施設のエネルギー消費の実態とその低減

本論文では医学部附属病院の熱源設備を対象に検証を実施した。ここで得られた知見を実際の運転にフィードバックしてその効果を確認するとともに、更なる改善のため PDCA サイクルを継続することが今後の課題となる。また、ここで得られた知見は、大学施設のみならず他用途の施設においても応用・発展が可能であり、広く役立てられることを願うものである。

参考文献

6.1）（社）日本エネルギー学会編　柏木孝夫監修：天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2002，日本興業出版，2002.4

6.2）文部科学省大臣官房文教施設企画部：大学における省エネルギー対策事例集　業務用機器（実験装置）編，2012.3

本論文は下記の学術論文を取りまとめたものである。

1）大橋巧，宮崎正幸，下田吉之：大規模総合大学施設のエネルギー消費実態に関する研究　電力日負荷曲線の実測データを用いた大阪大学のエネルギー消費特性分析，日本建築学会環境系論文集，Vol.78，No.684，pp.193-201，2013.2

2）大橋巧，宮崎正幸，下田吉之：理科系研究施設の電力消費実態と省エネルギー手法の定量評価，日本建築学会環境系論文集，Vol.78，No.688，pp.529-536，2013.6

3）大橋巧，服部勇紀，下田吉之：シミュレーションを利用した病院施設熱源設備の運用フォルト定量化と改修による省エネルギー効果予測，空気調和・衛生工学会論文集, No.199, pp.1-10, 2013.10

4）大橋巧，宮崎正幸，宅康平，下田吉之：理科系研究施設におけるエネルギー消費内訳の推計，日本建築学会環境系論文集，Vol.79，No.699，pp.443-450，2014.5

5）Takumi OHASHI, Masayuki MIYAZAKI, and Yoshiyuki SHIMODA: ANALYSIS OF UNIVERSITY SCIENCE FACILITIES’ ENERGY CONSUMPTION, Journal of Environmental Engineering, AIJ, Vol.80, No.707, pp.45-53, 2015.1　(in printing)

謝　辞

本論文は大阪大学環境イノベーションデザインセンター（CEIDS）低炭素キャンパスプロジェクトにおける研究の成果をとりまとめたものです。

研究にあたり、大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻 下田吉之教授には、研究の開始から作成に至るまで終始一貫して数多くの御助言や懇切なるご指導を賜り、心から感謝申し上げます。同教授の御指導がなければ、本論文を体系的にバランスよくまとめることは困難であったと考えます。また実務的な視点だけではなく、学術的な価値を見出す重要性を御教示いただき、研究のレベルを昇華させることができたのもその適切なる御指導によるところが非常に大きいと考えます。ここに改めて深甚なる謝意を表する次第です。

また、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 相良和伸教授、大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻 澤木昌典教授には、本論文をまとめるに当たり、多くの貴重な御意見を賜りました。ここに記して深く謝意を表します。

第 3 章の実測調査においては、当該生物科学系研究室及び情報科学系研究室の教職員・関係者各位に、実測に関わる工事やアンケートなどで多大な御協力を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

電力可視化システムの運営、設備調査、実験機器・備品類の調査は、大阪大学環境・エネルギー管理課の職員の皆様の御尽力がなければ実現は不可能なものでした。大阪大学の省エネルギー・低炭素化という大きな目標に向かう中で、皆様に賜りました格別のご厚情に改めて感謝申し上げます。また、病院施設熱源のエネルギー性能評価においては、医学部附属病院管理課の皆様ならびに冷凍機メーカー他の方々に、計測データのご提供やヒアリング等で多大なる御協力を得ました。厚く御礼を申し上げます。

共同研究者である大阪大学下田研究室（当時含む）の服部勇紀、宮崎正幸、宅康平の諸氏には、時に深夜までのデータ解析作業を伴うなど、あらゆる面で御協力を頂きました。以上の皆様に対し、深く感謝の意を表する次第です。

最後に、3 年間に亘る大学勤務を笑顔で支えてくれた妻 典子、2 人の娘 和佳 凜子に心より感謝いたします。

2014 年 12 月　大橋 巧