

都市・街区・キャンパスの低炭素化・省エネルギー化に向けて

Toward realization of low carbon and energy saving in cities, blocks and campuses

摂南大学 理工学部 住環境デザイン学科

Setsunan University, Dept. of Living and Environmental Design

大橋 巧

Takumi OHASHI

キーワード：低炭素（Low Carbon）、省エネルギー（Energy Saving）、都市（City）、キャンパス（Campus）、地域冷暖房（District Heating and Cooling）

1. はじめに

業務・家庭部門の省エネルギー推進が課題となる中、近年その取り組みも盛んである。本報告では、中小規模建築の集合体である大阪大学が実践した事例紹介、地域冷暖房地区における需給一体型の省エネルギーの可能性、低炭素型ライフスタイルを実現する都市構造の検討など、都市・街区・キャンパス、様々なスケールで低炭素化・省エネルギー化の可能性を考える。

2. 大阪大学が実践した省エネルギー化の取り組み

2. 1 省エネルギー推進の背景

大阪府北部に位置する大阪大学は、主要3キャンパス（吹田、豊中、箕面）で敷地面積約165万㎡、延床面積約100万㎡の規模を有し、学生・教職員約3万人が活動する集合体であり、様々な用途の建物が混在する都市の縮図ともいえる。ここで実行される省エネ施策は、他大学のみならず、業務部門全体の省エネ対策としても発展・応用されることを期待した。

2. 2 電力可視化システムの導入

省エネルギー戦略の立案のためには、エネルギー分析の基となるエネルギー計測が欠かせない。大阪大学の一次エネルギー消費量のうち、約85%は電力消費であるが、2011年6月中旬より、主要3キャンパスにおいて、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、リアルタイムに情報が閲覧できるシステム（以下、電力可視化システム）を導入した（図2-1）。

2. 3 戦略立案のためのエネルギー分析

総合大学である大阪大学には病院、研究所、講義棟、図書館など多様な施設が混在しており、エネルギーの消費実態も施設によって様々である。問題を効果的に解決するにはそれぞれの建物特性に合わせた対策を選択し講じていく必要がある。

そこで第一のステップとして、巨視的な分析により大学の施設群を分類することからはじめた。図2-2には大阪大学の部局ごとの延床面積と一次エネルギー消費量の関係を示す。この図による

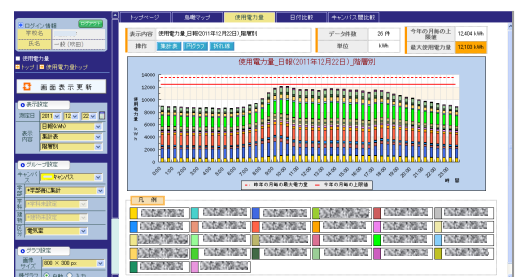


図2-1 電力可視化システムの閲覧画面

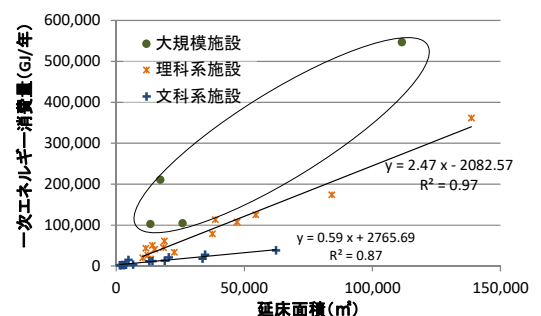


図2-2 エネルギー消費による施設の分類

と、大学の施設は文科系施設、理科系施設、大規模施設の 3 つに分類でき、それぞれエネルギー消費特性が大きく異なることがわかる。大規模施設とは、医学部附属病院や、加速器、高出力レーザー、大型計算機など特殊な設備を扱う研究施設が該当し、これらはエネルギー消費密度が極めて高い施設群となっている。

図 2-3 には電力可視化システムのデータを用いた分析例として、施設ごとの各月の電力ロードカーブを示す。図より 1 月 1 日でも多大な電力が定常的に消費されていることがわかる。電力量の単位は Wh であるが、この図で示す「面積 (=W×h)」が電力量の大きさを示すことになる。つまり 1 月 1 日でも相当な電力量が消費されていることが見て取れるが、このことから人の活動に関わらず必要な電力（以下、ベース電力）が年間を通して終日一定量存在するものと推察できる。

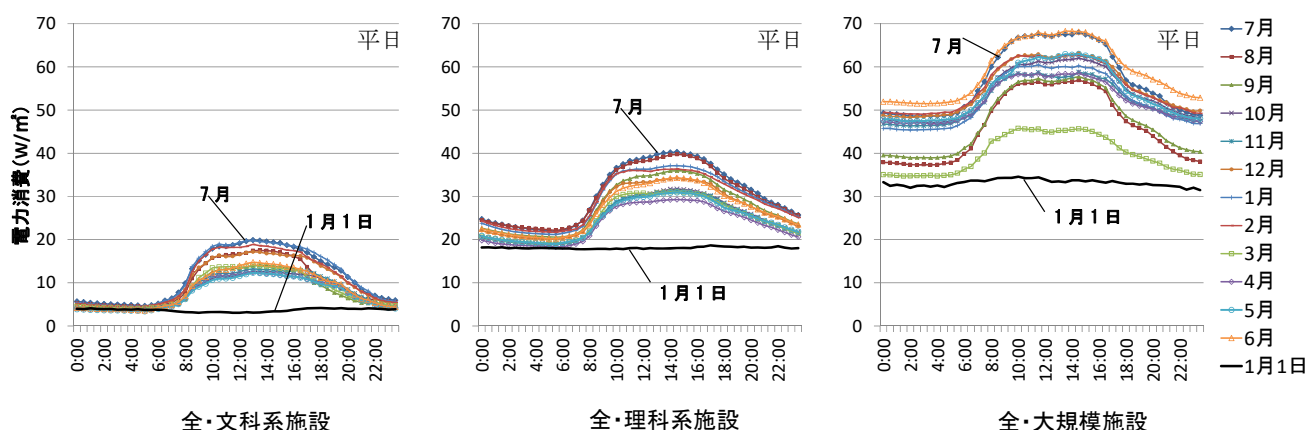


図 2-3 施設ごとの月別電力ロードカーブ

この視点で年間電力消費量のうちベース電力が占める割合を算出すると、文科系施設:45%、理科系施設:77%、大規模施設:88%となり、理科系施設や大規模施設でのベース電力の多さが際立つ。ベース電力は 24 時間稼働が必要な実験機器、サーバー、空調などによるものと推察され、これらの機器の省エネルギー対策が重要であることがわかる。以上より、同じ大学施設といっても上記 3 種の施設間でエネルギー消費実態が大きく異なるため、省エネルギーを目指す上で求められる対策も当然異なったものとなってくる。

次節以降では、各施設の特徴を踏まえた上での具体的な取り組み事例を紹介する。

2. 4 文科系施設での取り組み

文科系施設はエネルギー消費密度が非常に低く、電力ロードカーブの実績からも一般的なオフィスのエネルギー消費実態に近い。このような施設では、最新のオフィスビルなどで導入されている技術の活用が効果的といえる。

大阪大学では、2011 年、大阪大学創立 80 周年記念事業の一環として、大学のシンボルづくりおよびエコ改修モデルとして「大阪大学会館」の改修工事を実施している。大学設立当初から存在する本施設は、国の登録有形文化財建造物にも指定されている建物である。改修にあたって文化財としての外観に配慮しつつ、各種の「省エネルギー技術」の導入に加え、エネルギーを作り出す「創エネルギー技術」として太陽光発電パネルを本施設用に約 128kW 設置している（図 2-4）。

本施設は、2014 年度のネットでの年間一次エネルギー消費量は 185 MJ/m²年、エネルギー自給率は

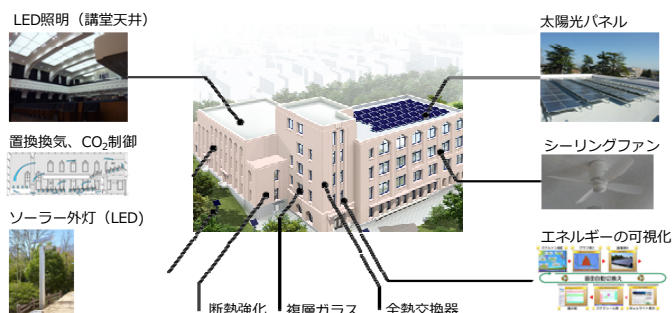


図 2-4 大阪大学会館の省エネルギー改修

64%と優れた省エネ性能を達成している。昨今、建物でのトータルのエネルギー使用量ゼロを目指す ZEB（ゼロ・エネルギー・ビル）化の可能性が各所で議論されているが、文科系施設は床面積あたりの一次エネルギー消費量が 2011 年度実績で平均 765MJ/m²・年と小さく、省エネルギー技術と創エネルギー技術の導入により ZEB 化が目指しやすい建物群であるともいえる。今後も学内でこのような取組みを進めるとともに、広く業務部門の建築物の低炭素化実現に向け、得られた知見を社会に還元してゆくことが課題となる。

2. 5 理科系施設での取り組み

理科系施設は図 2-3 から実験機器のエネルギー消費量の多さが推察できる。それらの機器を動かすかどうかはユーザーである学生や研究者の判断によるため、これら理科系施設での省エネルギーを推進するには、ユーザーの直接の行動が鍵となる。しかしながら実態としては、どの機器がどれくらいのエネルギーを消費し、改善によってどの程度削減が可能なのかユーザー側が把握できていない状況にある。まずは各施設でのエネルギー消費構造の把握が不可欠であるため、いくつかの研究室で機器ごとの電力量を実測することからはじめた。

このデータを基に、実際の行動に結びつけるため、各対策の効果を定量的に示すことを目的として、シミュレーションツール BEST を用いてその効果を試算した。図 2-5 はある生物科学系の研究室を対象とした例で、運用改善の対策を行ったとき、研究室全体に対しどの程度の削減効果があるかを確認することができる。図の中では年間電力消費量の削減に加え、東日本大震災以降、重要度が増したピーク電力の削減効果も算出しているが、この結果を用いることで、ユーザーである研究者が各手法を天秤にかけ、自身の許容度と照らし合わせながら実際に行う対策を練ることができる。このように効果を事前に把握しておけば、負担を最小限に抑えつつ賢い省エネルギー活動を行うことができる。

いくつかの研究室でこのような電力量の実測調査を行ったものの、より範囲を広げてキャンパス規模でエネルギー消費構造を把握するのは、計測器設置に伴うコスト的な制約により現実的には難しい状況にある。そこで次のステップとして、シミュレーションを用いることで、より広範囲に約 10 万 m²分の理科系施設のエネルギー消費内訳の推計を試みた（図 2-6）。広範囲の内訳の把握ができると、例えば照明や空調機器を最新の高効率機種に更新する場合の効果試算も可能となる。

また、理科系施設では先述したように 24 時間稼働機器の対策が重要となるが、この消費実態を把握するため、学内で保有する実験機器類の設置状況調査も実施している。年間 24 時間稼働している機器の内訳を分析する

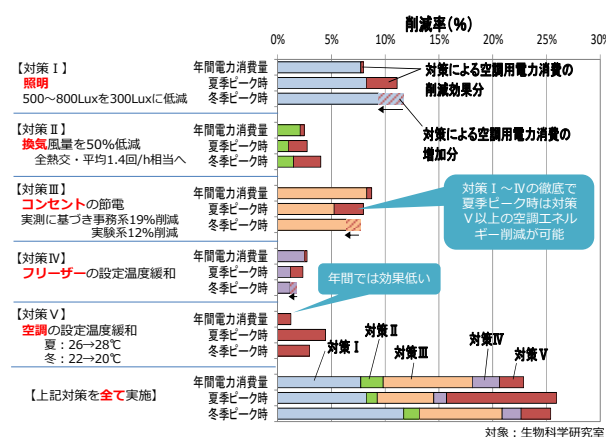


図 2-5 BEST を用いた運用改善対策の評価

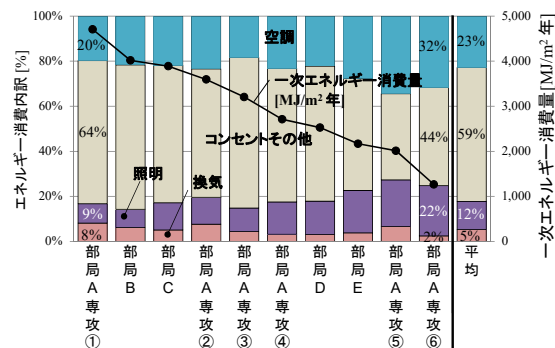


図 2-6 BEST を用いた理科系施設のエネルギー消費内訳の推計

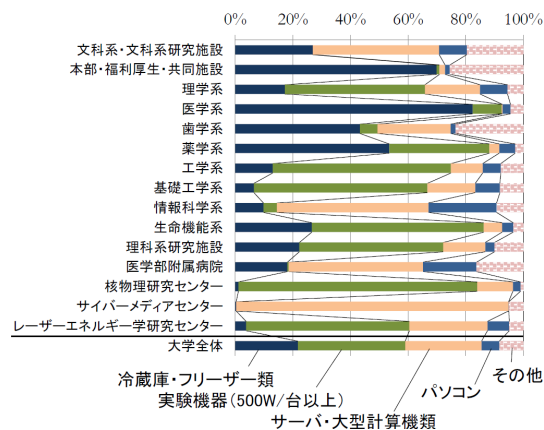


図 2-7 24 時間稼働実験機器の定格消費電力容量比率の調査

と、例えば医学系ではフリーザー、工学系では実験機器、情報系ではサーバーの割合が大きいなど施設による違いが確認できる（図 2-7）。このような特色を踏まえた上での対策もポイントとなる。

省エネルギーの推進にはこのような実態調査や評価が欠かせないが、理科系施設では先述のとおりユーザーの直接の行動が不可欠となる。行動を促すため、大阪大学では本部主催の省エネルギー推進会議（年 2 回開催）や教授会などでの分析結果の周知、ポスターによる啓蒙、自主的な行動を誘起する節電シールの研究室単位での配布など、あらゆる手段を講じてきた。このように様々な方策の適切な組み合わせにより、2014 年度実績（2010 年度比）で大学全体の理科系施設のエネルギー消費量を原油換算 2,630kL/年削減（7.4%減）、床面積あたりのエネルギー消費量を 16.5%削減している。

2. 6 大規模施設での取り組み

大阪大学の年間一次エネルギー消費量の約 4 割を占める大規模施設は、24 時間稼働する実験機器や医療機器のエネルギー消費が非常に大きいと推察され、これらの対策が必要不可欠となる。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おり、いずれの施設でも設置後 20～30 年が経過していた。これら中央熱源設備の省エネルギー改修や運転の最適化は有効な手段になり得ると考え、3 施設においてギャランティード型の ESCO 事業を行った。（2013 年当時）

表 2-1 にその概要を示す。改修に必要な初期投資費は、光熱水費の削減により各事業とも短期間で回収でき、2014 年度実績ではエネルギー削減量を原油換算 4,703kL/削減することができた。

また、この ESCO 事業に関連し、計測器設置の不足を補完するシミュレーションツールも開発し、運用時の不具合検証や更なる改善方策の検討にも役立ててきた。

2. 7 取り組みのまとめ

以上のような対策の結果、大学の全構成員の協力を得て着実に省エネルギーを実現し、延床面積が増加する中、2014 年度の主要 3 キャンパスのエネルギー消費量を 2010 年度比で原油換算 7,716kL/年削減（11.8%減）、床面積あたりのエネルギー消費量を 18.6%削減した。（図 2-8）

表 2-1 大規模施設での ESCO 事業の概要

施設名称	項目	概 要		エネルギー削減量※1 (kL/年)		投資回収年数
		改善前	改善後	保証値	'14年度実績	
核物理研究センター	熱源	ガス吸収式冷水温水機＋ターボ冷凍機	INVターボ冷凍機を主とするベストミックス熱源、フリークーリング等	202	205	9.1
	小計			202	205	9.1
医学部附属病院	熱源	ガスor蒸気吸収式冷水温水機を中心とする熱源システム	熱回収チラーとINVターボ冷凍機※2を主とする高効率熱源システム	2,062	1,970	1.2
	熱源	炉筒煙管ボイラ	高効率小型貫流ボイラ	568	639	2.2
	搬送	冷水、冷温水2・3次ポンプは定流量or吐出圧一定制御	推定末端差圧制御を導入同時に、高層系の2次・3次ポンプ間に熱交換器を設置し、余分な加圧ロスを解消	498	674	6.3
	照明	非LED照明	LED化・人感センサー付きHf階段灯	220	220	10.5
	給湯	炉筒煙管ボイラ	ボイラ排熱を利用したヒートポンプ給湯器の導入	45	54	10.0
	その他		換気ファンINV導入など	586	228	36.6
	小計			3,980	3,785	4.3
レーザーエネルギー学研究センター	熱源	ガス吸収式冷水温水機	熱回収チラーを主とするベストミックス熱源	239	368	4.0
	空調	大空間実験室のクリーン度確保のため大風量送風機を設置し、ダンパーで風量を調整	抵抗となっていたダンパーを全開とし、インバーター導入により風量調整	147	181	1.6
	空調	水冷パッケージ＋再熱用電気ヒーター（竣工当時は電算室の室）	空冷パッケージ（現在は研究室用途のため、過冷却・再熱を取り止め）	56	68	4.2
	搬送	送水圧力一定制御	夜間用の小流量ポンプの設置と末端差圧制御の導入	49	57	3.6
	その他		全熱交換機のバイパス制御など	28	38	4.1
	小計			519	713	3.5
合計				4,700	4,703	

※1 ESCO契約上のベースライン（2009～2011年度実績より設定）に対する削減量を示す
※2 病院のINVターボ冷凍機は別途工事にて納入

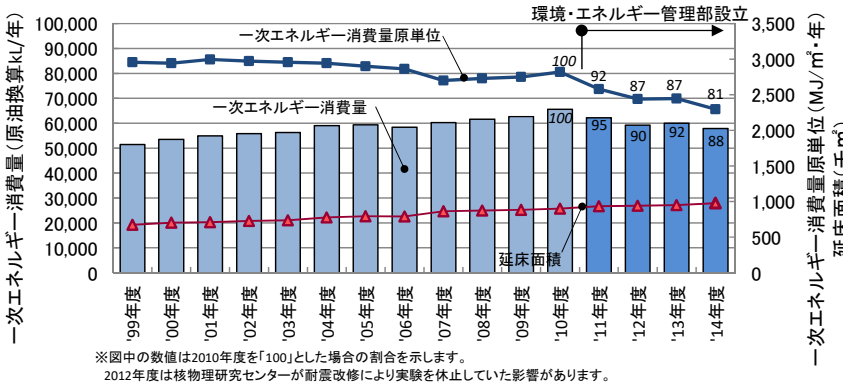


図 2-8 大阪大学のエネルギー消費量推移

3. 地域冷暖房地区における需給一体型運用による省エネルギーの可能性

3. 1 地域冷暖房地区における省エネルギー推進の課題

昨今注目されているエネルギーの面的利用を推進する上で、地域冷暖房は有用な手法であるが、供給側（プラント）と需要側の協調の欠如が省エネルギー性を損なっているといった問題がある。また、そもそも供給側にとっては販売した熱量により対価を得るビジネスモデルであるため、需要側の省エネルギーには消極的にならざるを得ない構造となっている。（図 3-1）

下田ら¹⁾は、熱量でなく居住者が最終的に求める一定の「熱環境」（例えば年間を通じて室温 20～26℃に保つ）や「光環境」をビジネスの供給対象とするモデルの可能性を検討しているが、このサービスモデルは上記の問題を解決できる可能性がある。そこで本研究ではこの考え方をベースに、供給側・需要側の双方がメリットを享受できる仕組みの構築が可能か、収益性も勘案した考察を行った。

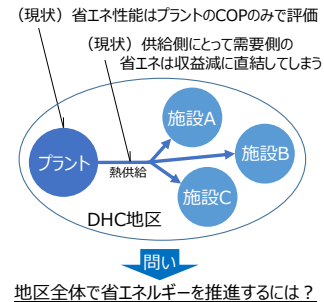


図 3-1 DHC 地区の省エネ推進の課題

3. 2 室内環境保証型サービスモデルの概要

図 3-2 に室内環境保証型サービスの概念図を示す。これまでの熱供給事業では冷水・温水等、販売した熱量により対価を得るビジネスモデルであったが、本モデルでは需要側設備の運転や維持管理も供給側が担うことで「熱環境」や「光環境」を提供するサービスを想定する。これにより需要側での運転や維持管理に関するコスト削減効果は供給側のメリットとなり、省エネルギー推進へ積極的なインセンティブが働く仕組みが構築できる。

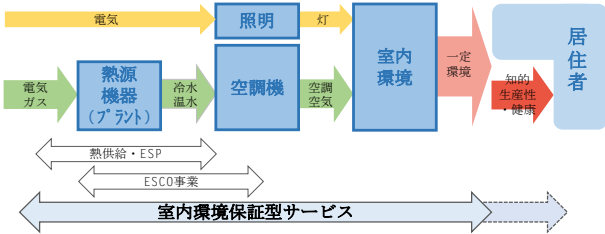


図 3-2 室内環境保証型サービス概念図

一方で需要側は、一定の環境を享受する対価としてサービス料を支払うこととなるが、サービス料が従来の熱料金と運用・維持管理コストの合計よりも安価な料金設定であれば、コストの削減も期待できる。

また、これまで地域冷暖房の省エネルギー性を評価する指標としては、供給側のみの年間総合エネルギー効率（COP）が主であったが、削減すべきは地区全体のエネルギー消費量である。本モデルでは供給側設備と需要側設備を同じ事業者が運用することとなるため、地区全体の統合的なエネルギー評価も可能となる。

3. 3 コスト収支の試算

1) 現状の熱供給モデル

文献²⁾に示される全国の地域冷暖房の平均的な規模を想定し、供給延床面積あたりの支出および収入を供給側、需要側それぞれの立場で試算した。主な試算条件を表 3-1、試算結果を図 3-3（上）に示す。

この条件下で、供給側のエネルギー効率が仮に 4% 向上した場合を試算すると、光熱水費の支出減により供給側の利益は+30 円/㎡・年増加することとなる。しかしながら、需要側の省エネルギー化などにより熱需要が 1.5%減少すると、熱供給単価を同じとした場合には、この利益分はゼロになる試算となり、供給側にとっては熱需要量の多寡が収支上、非常に重

表 3-1 主な試算条件

試算条件		備考
■供給側各種条件（供給延床面積あたり）		
販売熱量	451 MJ・㎡・年	文献2)の全国121地区のH28年度データをもとに作成
電力消費量	18.28 kWh/㎡・年	
ガス消費量	7.477 m³/㎡・年	
冷却水使用量	0.242 m³/㎡・年	
■需要側一次エネルギー消費量		
空調電力	187 MJ/㎡・年	文献5)の事務所・2015-2016年度データ、および文献6)のオフィスビルの用途別エネルギー消費内訳のデータをもとに作成
照明電力	332 MJ/㎡・年	
その他電力	554 MJ/㎡・年	
■各種単価		
熱供給単価	6.2 円/MJ	文献2)の全国121地区のH28年度データをもとに作成
電力単価	15.75 円/kWh	文献3)のH29年度データをもとに作成（高圧）
ガス単価	65.95 円/m³	文献3)のH29年度データをもとに作成（商業用と工業用の平均）
上水単価	448 円/m³	東京都を想定
■供給延床面積あたりの費用		
水道料金	330 円/㎡	文献4)をもとに作成
需要側設備保全費	4.079 円/㎡	文献4)をもとに作成（清掃衛生業務費は除く）
供給側維持管理費	327 円/㎡	文献4)をもとに作成

要であることがわかる。

2) 室内環境保証型サービスモデル

次に室内環境保証型サービスモデルにおける収支を試算した。本モデルでは需要側設備に関わる光熱水費や設備保全費（管理業務や保安業務等）も供給側が負担して、一定の「熱環境」や「光環境」を提供する代わりに、サービス料を徴収するスキームを想定するが、表 3-2 に示すとおり、現状モデルの需要側コストの総額より 3 % 安価に提供する条件とした。

また本モデルでは供給側と需要側を一体で管理することとなるが、送水温度の可変制御や一部の需要家側に設置の分散熱源の運転最適化など、これまでの地域冷暖房地区にはない統合的な制御によるメリットが期待できる。さらに、需要側室内環境条件の適正化や空調・照明設備の適切な発停管理、2 次側搬送系の積極的な省エネルギー化等に加えて、設備保全の統合による管理コスト削減も期待できると考え、表 3-2 に示す仮定の条件にて試算を行った。

試算結果を図 3-3（下）に示す。需要側としては現状モデルより 265 円/㎡・年（-3 %）支出を抑えることができ、同時に供給側は 291 円/㎡・年の増益という結果が得られ、供給側・需要側の双方がメリットを享受できる可能性が確認できる。

室内環境保証型サービスモデルは、一定の環境を提供するモデルであるため、例えば適切な室内温湿度管理や再熱方法の見直し、外気導入量の適正化など、空調負荷自体の低減にも積極的な対策を施せる可能性がある。エネルギー削減量は「空調負荷の減」×「効率向上」により決まるため、従来の熱供給の省エネルギー（効率向上）だけでは得られない相乗的な効果が期待できる。

今後は、既存地域冷暖房地区における制御実態や導入可能性の調査、より詳細な省エネルギー量の定量化等の実施を課題とする。

表 3-2 室内環境保証型モデルの試算条件

	試算条件
供給側エネルギー効率	7%向上
熱需要	5%削減
需要側空調エネルギー	5%削減
需要側照明エネルギー	5%削減
需要側設備保全費	10%削減
サービス料	現状モデルの需要側コストより3%削減

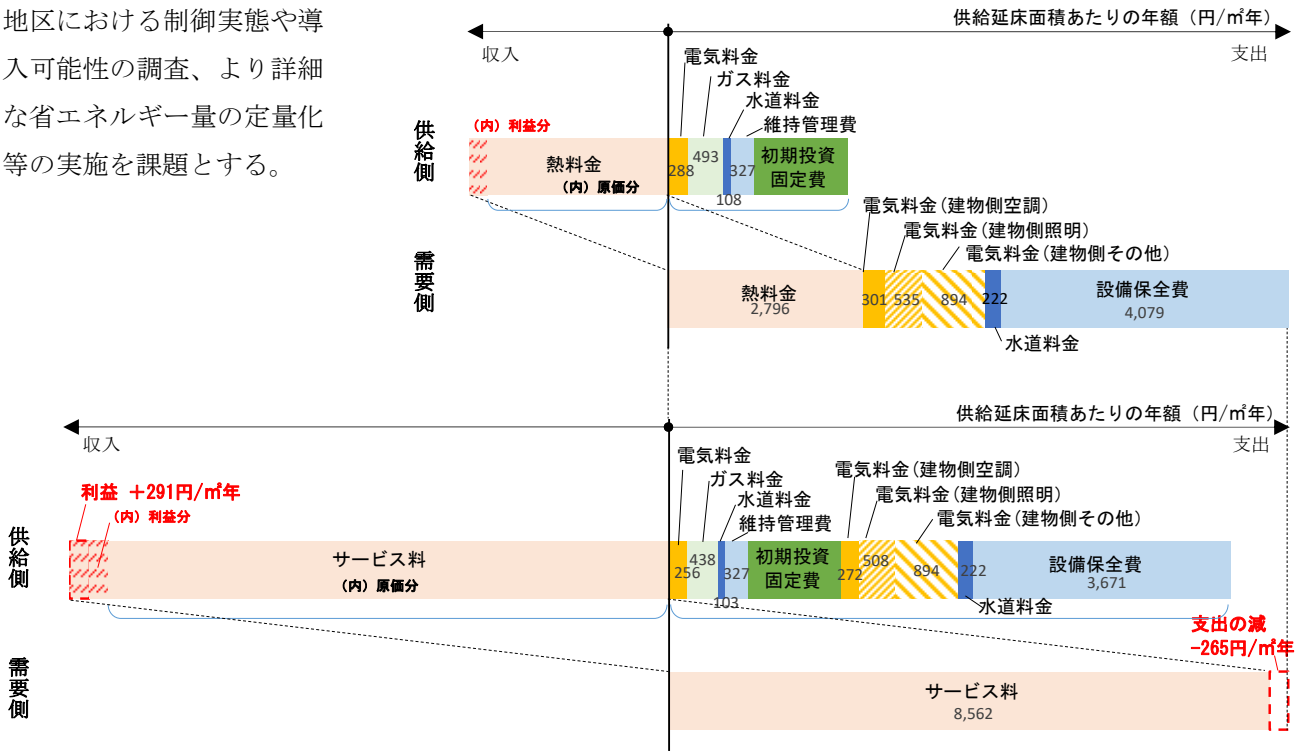


図 3-3 収支試算結果（上：現状の熱供給モデル、下：室内環境保証型サービスモデル）

4. 低炭素型ライフスタイルを実現する都市構造の検討

4. 1 検討の概要

低炭素都市を実現する上で、どのような都市構造が低炭素化に寄与するか定量的な評価が必要である。都市構造の違いにより、住民のライフスタイルにも違いが生じ、一人あたりのCO₂排出量にも影響を及ぼすという仮説のもと、本研究では愛知県の自治体を対象にこの関係性を調査した。ここで、一人あたりのCO₂排出量は、電気・冷暖房・自動車等の直接CO₂排出量だけでなく、食料・医療・教育・娯楽など生活活動に伴う間接CO₂排出量も加えた評価とする。

4. 2 直接・間接CO₂排出量の推計方法

推計にあたっては、ArcGIS 消費支出推計データを用いて、文献⁷⁾の手法により、消費支出金額からエネルギー源別の直接的なCO₂排出量原単位と、井原ら⁸⁾の方法から平野⁹⁾が作成した支出項目ごとの間接CO₂排出量原単位を用いて、愛知県の市町村別の一人あたり直接・間接CO₂排出量を算出した。

4. 3 愛知県の一人あたり直接・間接CO₂排出量

試算の結果、愛知県の一人あたり直接・間接CO₂排出量は4,736kg-CO₂/人・年となった。図4-1にその内訳を示す。「食料」「光熱・水道」「交通・通信」で全体の約3/4と多くの割合を占めていることが分かる。

図4-2には、市町村別の一人あたり直接・間接CO₂排出量の推計結果を示す。

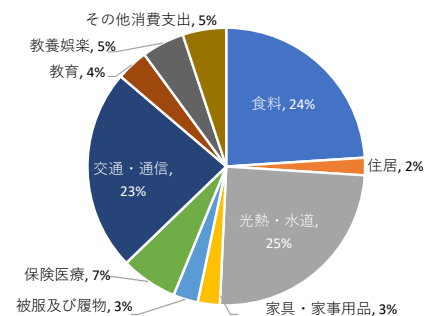


図4-1 愛知県の直接・間接CO₂排出量内訳

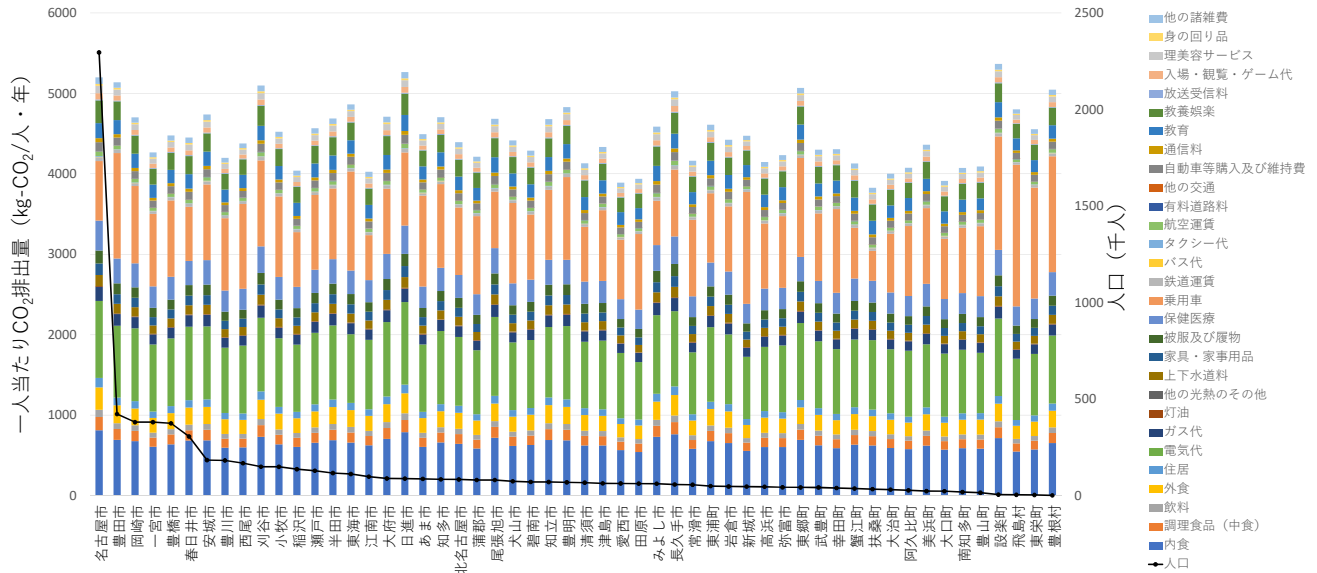


図4-2 愛知県の市町村別一人あたり直接・間接CO₂排出量

4. 4 単回帰分析

排出割合が高い「食料」「光熱・水道」「交通」に着目し、各項目においてどのような変数が排出量の増減に影響を与えるか単回帰分析を行った。検証する説明変数は下記の4項目とした。

- ・世帯人数：文献¹⁰⁾に示す一世帯あたりの人数（2015年）
- ・65歳以上割合：文献¹⁰⁾に示す65歳以上人口割合（2015年）
- ・人口密度：文献¹⁰⁾に示す1km²あたりの人口密度（2015年）

・所得：文献¹¹⁾に示す納税義務者一人当たり課税対象所得（2013 年）

分析結果のうち、「食料」「光熱・水道」「交通」で、排出量がそれぞれ最も多い内食、電気代、乗用車の各変数の決定係数 R^2 のまとめを表 4-1 に示す。この 3 項目のみで一人当たり直接・間接 CO_2 排出量の 52% を占める。 CO_2 排出量を抑制するライフスタイルの実現を目指す上で、所得については建築・都市構造の在り方の議論には適さないと考えるが、世帯人数や人口密度との相関がみられる項目については、住まい方や都市構造を共用化、コンパクト化することによる削減の可能性が示唆される。

本報告では市町村別の推計を行ったが、より詳細な地域別の分析を行うことで、個別の特性を反映させたより有意な結果を見出せる可能性があり、今後の課題とする。

表 4-1 各指標の決定係数 R^2

区分		一人当たり直接・間接 CO_2 排出量に占める割合	世帯人数	人口密度	65歳以上割合	所得
食料	内食	15%	0.30	0.21	0.16	0.58
光熱・水道	電気代	19%	0.15	0.13	0.07	0.52
交通	乗用車	18%	0.02	0.27	0.10	0.03
合計		52%				

(凡例) : 決定係数 0.5 以上
 : 決定係数 0.25 ~ 0.5

5. 2025 年大阪・関西万博のゼロ・エネルギー化及びカーボンフリー化の可能性

5. 1 概要

2018 年 12 月、「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマとする 2025 年大阪・関西万博の開催が決定した。この万博では国連が掲げる持続可能な開発目標「SDGs」が達成される社会の実現を目指しているが、万博開催の責任として、ゼロ・エネルギー、カーボンフリーによる開催を目指すべきと考える。

そこで本報告では、万博開催期間中において会場で使用する一次エネルギー消費量の実質ゼロ化および CO_2 排出量のゼロ化の可能性を検討した。

5. 2 ゼロ・エネルギー化、カーボンフリー化の定義

建築物のゼロ・エネルギー化の考え方は、経済産業省の ZEB の実現と展開に関する研究会では、「ZEB とは建築物における一次エネルギー消費量を、建築物・設備の省エネ性能の向上、エネルギーの面的利用、オンサイトでの再生可能エネルギーの活用等により削減し、年間での一次エネルギー消費量が正味（ネット）でゼロ又は概ねゼロとなる建築物」と定性的に定義し、空気調和・衛生工学会でもその評価期間、評価時間は「原則として年間積算値とする」¹²⁾ とある（図 5-1 左）。

一方で、万博開催による一次エネルギー消費量及び CO_2 排出量は非常に大きいものと予想されるが、恒久的な施設ではなく、その開催期間は約半年間に限定される。そこで本報告では、10MW 級の太陽光発電の活用を想定し、マクロ的視点での地球環境に与えるインパクトとしては、僅かな年度のギャップは無視できるものと考え、図 5-1 右に示すように、万博が開催される 2025 年までの積算発電量により、会場で使用する一次エネルギー消費量の実質ゼロ化および CO_2 排出量のゼロ化が可能か検討する。

5. 3 愛・地球博の実績調査

大阪・関西万博の一次エネルギー消費量及び CO_2 排出量を想定するため、2005 年 3 月 25 日～9 月 25 日の 185 日間、愛知県で開催された愛・地球博の実績を調査した。

2005 年日本国際博覧会公式記録¹³⁾によると、延床面積は長久手会場 172,000 m^2 （グローバルループを除く）、瀬戸会場 14,800 m^2 で合計 186,800 m^2 、空調システムは冷水の中央熱源方式となっており、熱源の容量は電気式

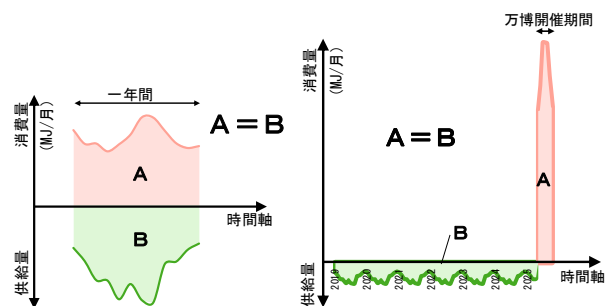


図 5-1 ゼロ・エネルギー化、カーボンフリー化の考え方

（左：従来の考え方、右：本報告での考え方）

5.8%、ガス式 94.2%であった。日最大供給熱量は 1,255GJ/日、開催期間の総供給熱量は 123,143GJ であったが、電気熱源、ガス熱源からの各供給熱量の内訳は不明である。また、期間中の電気の使用総量は 48,738MWh（内訳不明）、ガスの使用総量は 470 万 N m³（うち空調用は 313 万 N m³、その他用途は 157 万 N m³）であった。

5. 4 大阪・関西万博のエネルギー需要予測

大阪・関西万博は大阪市夢洲地区において 2025 年 5 月 3 日～11 月 3 日（185 日間）までの期間開催され、延床面積は 255,200 m²（愛・地球博の約 1.37 倍）と想定されている¹⁴⁾。冷水の総供給熱量は延床面積に比例して増加するものとするが、愛・地球博と大阪・関西万博では開催時期に差異があるため、文献値¹⁵⁾より商業施設の空調負荷（4 月～9 月と 5 月～10 月とでは空調負荷が約 8.7%増加）を参照し、大阪・関西万博における開催期間中の総供給熱量を 182,817GJ と想定した。

5. 5 ゼロ・エネルギー化、カーボンフリー化の検討条件

熱源構成が異なると電気・ガスの使用量も変化し、一次エネルギー消費量や CO₂ 排出量にも影響を与えることになるため、表 5-1 に示すケースを設定し感度分析を行った。

ケース 0 は愛・地球博同等とし、5. 3 で示した電気・ガス使用量に延床面積の増（約 1.37 倍）を考慮した値とした（電気：66,584MWh、ガス：6,791,648N m³）。

基準となるケース 1 は、図 5-2 に示すように、愛・地球博の熱源構成比率を参照して開催期間中の総供給熱量を電気熱源・ガス熱源分に按分し、使用量の多いガスについては文献¹⁶⁾に示す二重効用の期間 COP=1.27 を用いて空調用のガス使用量を算出（3,013,730N m³）し、ガスのその他用途は愛・地球博と同等（2,144,882N m³）として、使用総量（5,158,612N m³）を求めた。

一方、ケース 1 の電力量はケース 0 と同じとするが、文献¹⁶⁾に示される遠心冷凍機の期間 COP=5 を用いて熱源分の電力使用量 588MWh を求め、残りの 65,996 MWh は熱源補機、搬送機器および照明・コンセント等のその他用途と規定し、以降、ケース 2～6 においては、熱源以外の用途の使用量は不変とし、電気熱源、ガス熱源からの熱供給の配分を変化させることで電気、ガス使用量を算出した。

創エネルギーとなる太陽光発電量は、10MW のパネルを基準とし、大阪の年間日射量 1,417kWh/m²・年（南面・傾斜角 20°）¹⁷⁾ に表 5-2 に示す太陽光発電の電気変換効率 0.76 を乗じて算定した。この 10MW パネルに加え、1MW、2MW、3MW、4MW、5MW のパネルを増設する場合も検討を行った。なお試算にあたり、一次エネルギー換算係数と CO₂ 排出係数は、表 5-3 の値を使用した。

5. 6 検討結果

試算結果を図 5-3、5-4 に示す。ケース 2～6 に着目すると、今回設定した熱源の期間 COP、CO₂ 排出係数では、一次エネルギー消費量、CO₂ 排出量ともに電気熱源比率が高い順に有利となり、10MW のパネルの場合、最も有利なケース 6 で、ゼロ・エネルギー化に 8.0 年、カーボンフリー化に 8.2 年を要する結果となった。また、仮に 6 年以下を達成するには、一次エネルギー消費量基準、CO₂ 排出量基準共に +4MW のパネルを設置する必要がある

表 5-1 検討ケース

ケース 0	愛・地球博同等
ケース 1	基準
ケース 2	ガス 100%
ケース 3	ガス 75%、電気 25%
ケース 4	ガス 50%、電気 50%
ケース 5	ガス 25%、電気 75%
ケース 6	電気 100%

表 5-2 PV 電気変換効率

	係数
日射量年変動補正係数	0.97
経時変化補正係数	0.95
アレイ回路補正係数	0.97
アレイ負荷整合補正係数	0.94
インバータ実行効率	0.90
合計	0.76

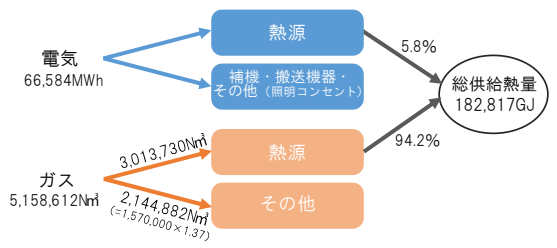


図 5-2 ケース 1 における電気・ガス使用量の算定

表 5-3 試算に用いた各種係数

	電気	ガス
一次エネルギー換算係数	9.76MJ/kWh	45MJ/Nm ³
CO ₂ 排出係数	0.418kg-CO ₂ /kWh	0.0509t-CO ₂ /GJ

※CO₂ 排出係数は、電気は関西電力 2017 年度（調整後）、ガスは大阪ガスの値とした。

ることがわかった。本報告では CGS の利用や、照明・コンセント系の省エネルギー化などは考慮していないが、これらを勘案することで、より短い期間で達成できる可能性があり、今後の課題とする。

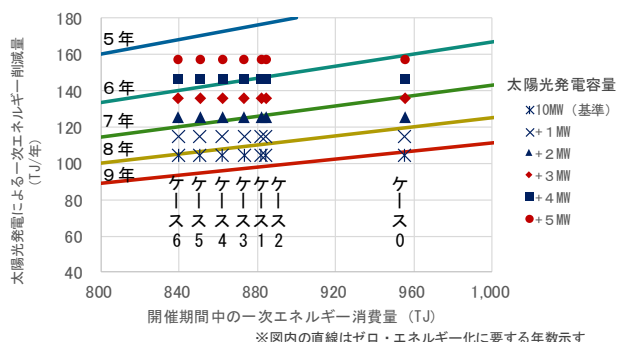


図 5-3 試算結果（一次エネルギー消費量基準）

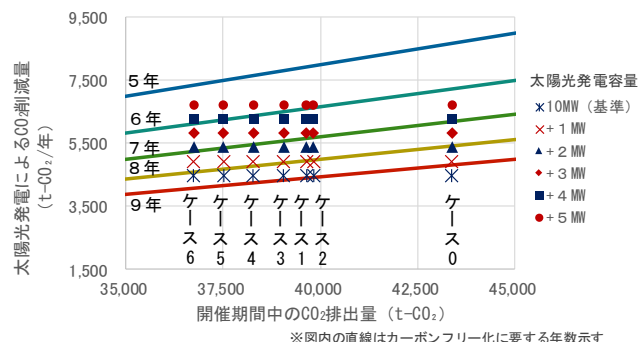


図 5-4 試算結果（CO₂ 排出量基準）

6. おわりに

本報告では、中小規模建築の集合体である大阪大学が実践した省エネルギー化の事例、地域冷暖房地区における需給一体型の省エネルギーの可能性、低炭素型ライフスタイルを実現する都市構造の検討、2025 年大阪・関西万博のゼロ・エネルギー化及びカーボンフリー化の可能性検討など、様々なスケールで低炭素化・省エネルギー化の可能性を見てきた。本報告が、都市・地域のサステナブルな開発行動の一助となれば幸いである。

本報告は以下の内容を取りまとめ編集したものです。

- ・一般社団法人省エネルギーセンター：月刊省エネルギー，下田・大橋 大規模総合大学キャンパスにおける省エネルギーの実践，36-39，vol. 68 No. 2，2016
- ・大橋他：室内環境保証型サービスの可能性検討 第 1 報 地域冷暖房エリアにおける検討，日本建築学会大会（北陸）学術講演，2019. 9
- ・大橋他：低炭素型ライフスタイルを実現する都市構造に関する研究 その 2 愛知県を対象とした分析，日本建築学会大会（東北）学術講演，2018. 9
- ・西谷他：2025 年大阪・関西万博におけるゼロ・エネルギー化及びカーボンフリー化の可能性，日本建築学会大会（北陸）学術講演，2019. 9

【参考文献】

- 1) 下田吉之他：室内環境保証型エネルギーサービスの実現可能性に関する考察，第 26 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，2010
- 2) 一般社団法人日本熱供給事業協会：平成 29 年度熱供給事業便覧，2018. 3. 1
- 3) 一般社団法人エネルギー情報センター：新電力ネット，<https://pps-net.org/unit> (2018. 12. 25 閲覧)
- 4) 一般社団法人東京ビルディング協会：平成 25 年度「ビルの運営管理に関する調査」のまとめ
- 5) 一般社団法人日本サステナブル建築協会：DECC 統計処理情報，2018. 9
- 6) 一般財団法人省エネルギーセンター：オフィスビルの用途別エネルギー消費，https://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html#01_02 (2018. 12. 26 閲覧)
- 7) 平野勇二郎他：家庭における直接・間接 CO₂ 推計に基づく 低炭素型ライフスタイルの検討，環境科学会誌 30 (4)，261-273，2017
- 8) 井原他：産業連関表を用いた家計消費支出に伴う CO₂ 排出解析の考察，環境システム研究論文発表会講演集，37，267-273，2009
- 9) 平野他：全国主要都市の家庭における CO₂ 排出量の構造分析とエネルギー用途の推定手法，環境システム研究論文集，38，309-316，2010
- 10) 総務省統計局，平成 27 年国勢調査人口等基本集計，<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.html>，（参照 2017-12-01）
- 11) 総務省，市町村税課税状況等の調，http://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/future/keizai-jinkou_data.html，（参照 2017-12-01）
- 12) 公益社団法人空調和・衛生工学会：「ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の定義と評価方法」の公開について，<http://www.shasej.org/base.html?oshirase/1506/ZEB/zebteigi.html> (2019. 3. 12 閲覧)
- 13) 財団法人 2005 年日本国際博覧会協会：2005 年日本国際博覧会公式記録，2006. 9
- 14) OSAKA KANSAI, JAPAN EXPO 2025 Bid Dossier，2017. 9
- 15) 一般社団法人都市環境エネルギー協会：地域冷暖房技術手引書，2013. 11
- 16) 中原信生：新版 ビル・建築設備の省エネルギー -設計・管理技術の基礎から応用まで-，2001. 7. 6
- 17) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：日射量データベース閲覧システム，<https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (2019. 3. 12 閲覧)