

建築ストックの集積状況とエネルギー消費の関係—大阪市の業務建築を例として

大阪大学大学院工学研究科 山口容平
 大阪大学大学院工学研究科 有城丈博
 大阪大学大学院工学研究科 東真太郎
 大阪大学大学院工学研究科 下田吉之

1. はじめに

都市計画の分野では地区や街区の特徴として、建築の密度、用途の分布、加えて、対象とする空間領域内に存在する個々の建築の規模、形状、使われ方などが考慮される。これらは開発時期や歴史性、土地所有の状況、交通インフラの整備状況、建築ストックの集積効果といった地区・街区の文脈、都市計画法や建築基準法で規定される高さや容積率などの規制、都市計画に基づく開発などによって形づくられてきたものである。本研究は地区・街区における建築ストックの集積状況と、業務建築におけるエネルギー消費の関係性について論ずる。

交通部門のエネルギー消費と都市の形態の関係性（建築の集積密度の高い都市ほど交通部門の一人当たりのエネルギー消費は小さい¹⁾などの関係）は古くより認識され、都市計画と交通マネジメントは統合すべき領域として議論されてきた。これに対して、建築におけるエネルギー消費と都市の形態や建築ストックの集積状況の関係は明確に示されていない。このことは、都市計画における建築ストックのマネジメントと建築におけるエネルギー管理を統合した計画を検討する機会を阻害してきたと考えられる。

エネルギー管理の視点から都市の形態に適した技術を検討した研究は複数存在する。この例には、太陽光発電技術と地域冷暖房システムについて、導入効果が対象地域の建築ストックの集積状況に依存することを示した田頭²⁾の研究がある。これらの研究成果はエネルギー管理に重要な示唆をもたらすものの、建築ストックのマネジメントとエネルギー管理の統合を主張するものではない。また、対策技術の導入を前提としてエネルギー管理の観点から望ましい都市の形態を議論する研究が存在するが³⁾⁴⁾、その検討内容は「まちの姿を積極的に転換する」主張を含み、都市計画の分野で受け入れられてきたとはいえない。

このように、都市計画における建築ストックのマネジメントと建築におけるエネルギー管理を統合して扱う研究領域が確立されてきたとはいえない。一方、近年の地球温暖化対応策を背景とする大幅な二酸化炭素排出量の削減の必要性は、両領域の統合を希求するものである。著者ら⁴⁾⁵⁾は、大阪府の大阪市の民生業務部門、豊中市の民生家庭・業務部門を対象として2050年までに達成可能な二酸化炭素排出削減量の水準の推計を行い、建築内で使用されるエネルギー消費機器の効率向上（LEDなど将来技術の利用を含む）、個々の建築における省エネルギー技術の普及のみでは、2000年を基準として50%以上の削減を実現することは不可能であり、エネルギーの面的利用（地域冷暖房システムの導入や太陽エネルギー利用技術の大規模な利用）やまちなみの変更（小規模建築の大規模建築への集約化など）が必要であるという結果を得た。この結果は、大規模な二

酸化炭素排出量の削減を実現するためには建築ストックのマネジメントとエネルギー管理の統合が不可欠であることを示唆する。

このような背景から、本研究は（1）建築ストックの集積状況と建築のエネルギー消費の関係性を明示し、都市計画領域、建築のエネルギー管理領域の統合の意義を明確にすること、（2）建築ストックのマネジメントで考慮される現実的な制約や機会を考慮したうえで二酸化炭素排出量の削減を実現する道筋を示すことが重要であると考えている。本論文の内容は（1）に対応するものである。

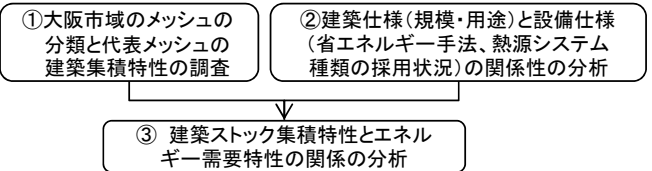


図-1 研究の方法の概要

表-1 エネルギー消費に影響を及ぼす建築の属性

要因	説明
立地環境条件	気象条件と隣接建物の状況(建築の外界条件の決定要因)
建築仕様	規模、形状(建物基準階床面積、階数)、ゾーニングなど
設備仕様	熱源システムの種類、省エネルギー手法採用状況、個々のエネルギー消費機器の効率など
建築の使われ方	階層別の用途、居住者の行動、エネルギー消費機器の設置状況、運用パターンなど
運用上の問題	不具合など意図しないエネルギー消費の変動要因

2. 研究方法

研究方法の概要を図-1に示す。本研究では建築のエネルギー消費に影響を及ぼす要因を表-1のように分類し、このうち建築の集積状況に応じて何らかの規則性を持って存在する要素（表中下線で表す）を挙げ、建築ストックの集積状況との関係性を調査した。調査の対象としたのは大阪市の複数の地区（500メートル四方）である。次に、対象地区別にエネルギー消費量の推計を行い、その比較に基づいて、建築ストックの集積状況とエネルギー消費の関係性を示す。

まず、大阪市全域を対象として規模や用途など建築集積状況を表すパラメータの情報を500メートルメッシュデータとして整備し、その類型化を行う。ここで得られた各類型から平均的な性質をもつメッシュを選択し（代表メッシュとする）、メッシュ内に存在する建築の規模、用途、形状などの調査を行う。これによって建築の集積状況が異なる複数の地区について、建築のエネルギー消費を決定づける要因のうち「建築仕様」、「建築の使われ方」（表-1）の情報を整備することができる。

次に、建築の規模と用途と設備仕様（省エネルギー手法、熱源システムの採用状況）の関係性を分析する。分析には

母集団が大阪市内に立地する建築と同じと想定されるサンプルを用いる。これによって建築の規模・用途と建築の設備仕様の一般的な関係性を把握することができ、この関係性を代表メッシュに適用することで、代表メッシュに存在する各建築に「設備仕様」の情報を与えることができる。

最後に、代表メッシュに集積する業務建築について「建築仕様」、「設備仕様」、「使われ方」を考慮してエネルギー消費量を推計し、その比較を行う。以下に方法の詳細を説明する。

(1) 大阪市の類型化と代表メッシュにおける建築ストック集積状況の調査

大阪市計画調整局作成の 500m×500m 建物床面積メッシュデータ (2001 年調査)⁷⁾に基づいて以下のデータを整備した。

- メッシュ内の建物用途別床面積 (事務所、商業 (飲食・物販・遊興など)、宿泊、医療、学校、集合住宅、戸建住宅の 7 区分)
- グロス容積率 (延床面積合計をメッシュ面積で除した値、ただし住宅は含まない)
- 平均階数 (延床面積を一階床面積で除した値)

ただし、同データは官公庁など固定資産税の非課税建築を含まないことから、1985 年に実施された同調査の結果から非課税建築の床面積を抽出し、メッシュデータに加えた。

次に、これらのデータを変数としてクラスター分析 (Ward 法を用いた) を行い、メッシュデータを類型化した。さらに、地区類型別にグロス容積率、用途別床面積比率が平均値に最も近いメッシュを代表メッシュとして選択し、建築ストックの調査を行った。調査は代表メッシュ内のすべての業務建築を対象とし、表-2 の情報を収集した。基準階床面積の把握には、大阪市計画調整局の土地利用現況調査⁷⁾を用いた。窓面積率、ゾーニング、アスペクト比、階数、周囲の建築との関係、建築の使われ方は、現地調査により目視で確認した。延床面積は基準階床面積と階数の積で推計した。

表-2 代表メッシュを対象とする調査項目の一覧

建築の形状	延床面積、基準階床面積、階数、ゾーニング、アスペクト比、窓面積率
周囲の建築との関係	隣接する建築との距離、隣接する建築の高さ
建築の使われ方	主用途、フロア別用途

(2) 建築仕様と設備仕様の関係性の分析

省エネルギー手法、熱源システムの採用状況の分析には社団法人建築技術者協会の ELPAC⁸⁾、社団法人空気調和・衛生工学会の竣工設備データ⁹⁾を用いた。省エネルギー手法については関東以西の建物のデータ、熱源システムについては関西地域の都市ガス供給エリアのデータをサンプルとして抽出し、用途別・規模別に省エネルギー手法の平均採用数、各省エネルギー手法の採用率を算出した。熱源システムについても同様に、各熱源システム採用比率を算出した。なお、建築で採用されている熱源システムがセント

ラル方式であるか、個別方式であるかによって建築で採用されている省エネルギー手法に違いが生じると考えられることから、セントラル方式、個別方式それぞれを採用している建築を分離し、別々に省エネルギー手法の採用状況を集計した。熱源システムの区分を表-3 に示す。

表-3 熱源システム

システム	冷熱源	温熱源	E 源	判別
ターボボイラ	ターボ冷凍機(電気)	ボイラ(ガス)	左記	○
吸収式	ガス吸収式冷温水器(ガス吸収式)		ガス	○
空冷 HP	空冷ヒートポンプ(空冷 HP)		電気	○
ビルマルチ	ビルマルチ式空調システム(ビルマルチ)		電気	
GHP	ガスエンジン駆動ヒートポンプ(GHP)		ガス	

*E 源はエネルギー源を表す。ガスは都市ガスを表す。右端の列「判別」の○印は対象の熱源システムがセントラル方式であることを表す。

(3) 代表メッシュのエネルギー消費特性の推計

街区における建築ストックの集積状況とエネルギー消費特性の関係を明らかにするため、(1) で選択された代表メッシュを対象として下記①から④の指標を推計し、その比較を行った。

- ① 電気・都市ガス消費量
- ② 二酸化炭素排出量
- ③ ピーク電力需要値 (瞬時値ではなく一時間平均値の最大値)
- ④ 排熱量 (顕熱・潜熱別に 8 月の積算値を推計)

推計には著者らが開発した地域エネルギーシステムモデル¹⁰⁾を用いた。本モデルは対象地区に存在する建築一棟毎に冷暖房需要、電力需要、給湯需要シミュレーション、各需要に対する供給システムシミュレーションを行うモデルであり、結果を積み上げて各代表メッシュについて①から④の指標を推計する。シミュレーションの入力条件は表-2 に示した建築 1 棟別のデータである。なお、(2) 節で整備された情報をデータベースとして用い、シミュレーションに反映させた。規模別・用途別の省エネルギー手法採用率と乱数を比較し、採用率が乱数よりも高い場合、対象とする省エネルギー手法が採用されるものとし、各建築で採用されている省エネルギー手法を決定した。加えて、代表メッシュ内のすべての建築について表-3 の 5 種の熱源システムを想定してエネルギー消費量を算出し、用途別・規模別に整備された熱源システム採用比率に基づいて重み付け平均を行い、各建物のエネルギー消費量を定量化した。

この方法によって、代表メッシュに集積するすべての業務建築について、「建築仕様」、「設備仕様」、「使われ方」を個別に想定し、①～④の指標を推計することができる。また、各指標を比較することで、地区における建築ストックの集積状況とエネルギー消費の関係性を明らかにすることができる。

3. 結果

(1) 大阪市の類型化と代表メッシュにおける建築ストック集積状況の調査

大阪市内の 971 メッシュを 13 類型に分類し、代表メッシ

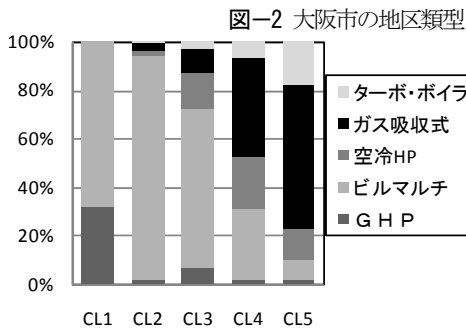
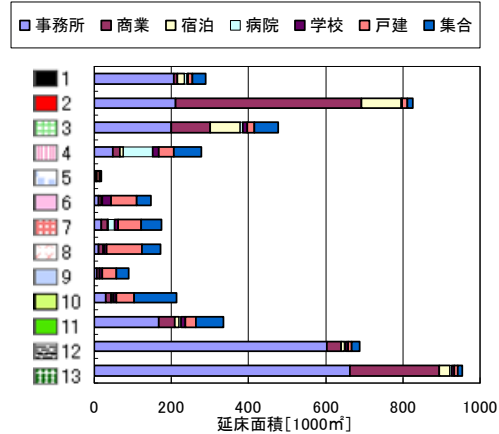
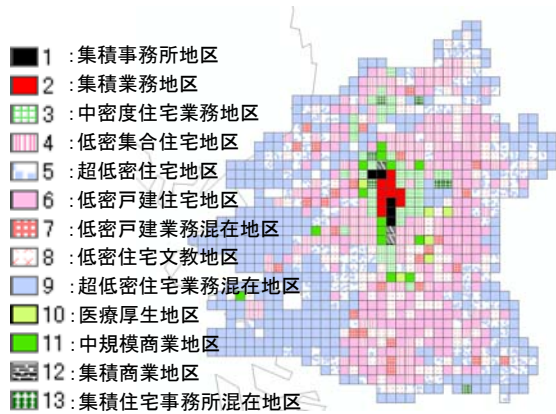


図-5 オフィスビルの熱源システム採用率

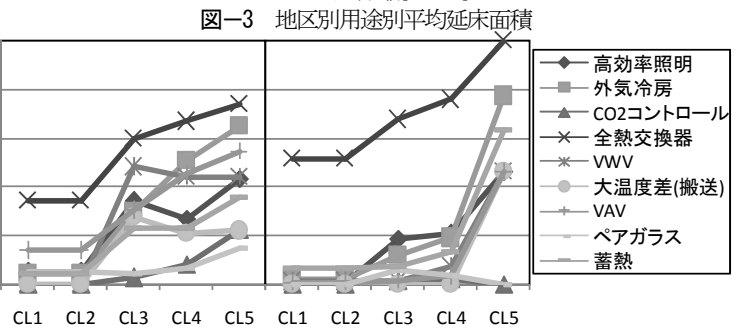


図-6 セントラル空調方式を採用しているオフィスビルの省エネルギー手法採用率 (左)、個別方式の省エネルギー手法採用率(右)

を選択した。地区類型結果を図-2 に示す。各類型の用途別延床面積の平均値(1メッシュあたり)を図-3 に示す。地区12(集積商業地区)については、ストックの集積状況が大きく異なる二つのメッシュ(大阪駅周辺、心斎橋周辺)が含まれたことからそれらを2類型に分割することとし、それぞれを代表地区とした。また、地区9(超低密住宅業務混在地区)はメッシュ数が327と多く、業務建築の床面積が小さいことから、検討の対象外とした。

代表メッシュにおける建築規模の分布を図-4 に示す。図-3、図-4 から、代表メッシュによって集積する建築の特徴に違いが存在することがわかる。

(2) 建築の規模・用途と省エネルギー手法、熱源システム採用状況の関係

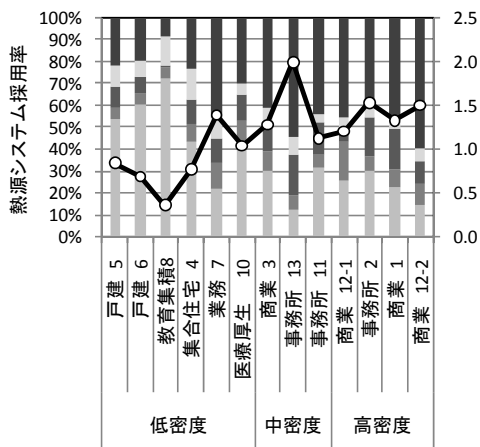


図-4 地区別延床面積比率

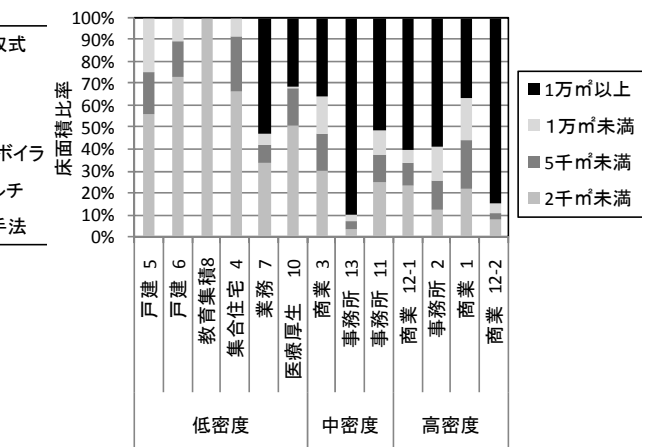


図-7 地区別熱源システム採用比率・と省エネルギー手法採用数平均値

図-5、図-6 に省エネルギー手法、熱源システムの採用状況を示す。横軸は規模の水準を示し、CL1 から CL5 の順に規模の大きい建築の結果を表す。CL2 と CL3 の境界は延床面積 2000 ㎡ (2000 ㎡以上は省エネ法の対象) であり、それ以外は基準階床面積、延床面積から区分した。全体的な傾向として、規模が大きい建築ほど省エネルギー手法の採用数が高く、都市ガスをエネルギー源とするセントラル方式の熱源システムの採用率が高い。結果はオフィスビルのもののみを示したが、すべての用途について同様の結果を得ている。ここで得られた結果に基づき、各代表メッシュにおける省エネルギー手法の平均採用数、熱源システム採用率の推計結果を図-7 に示す。図からわかるように、密度の高い地区では多くの省エネルギー手法が使用されて

おり、セントラル方式の都市ガスを使用した熱源システムが多く用いられている。一方、密度が低い地区では電気を熱源とする個別方式（ビルマルチ、GHP）の熱源システムの採用率が高い。この結果は、建築ストックの集積形態によって設備仕様の設置状況に差異が生じている。

(3) エネルギー消費にかかわる4指標の推計結果

代表メッシュについて前述の4指標の推計を行った。結果を図-8、図-9に示す。図-8の左軸は電力・都市ガスの年間消費量（二次エネルギー原単位として表示[$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$]）、右軸は単位面積当たりのピーク電力需要値[W/m^2]と年間 CO_2 排出原単位[$\text{kg}\text{-CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{年}$]を示す。図-9は顕熱・潜熱排出量推計値を示し、左軸は8月の顕熱・潜熱排出量積算値[$\text{GJ}/\text{メッシュ} \cdot 8\text{月}$]、右軸は排熱総量に占める顕熱排熱の比率を示す。この結果は、代表メッシュに集積する建築の規模、使われ方、それに付随する設備仕様のすべてを内包するものである。

全体的な傾向として、街区における建築の集積密度が高いメッシュほど二次エネルギーに占める都市ガスの割合が大きい。一方、ピーク電力需要値では、低密度のメッシュの値が大きい。二酸化炭素排出量では商業系の建築の割合が高いメッシュほど高い値となった。排熱量は建築ストックの集積密度が大きいほど総量が大きくなっているが、密度が大きいメッシュほど潜熱の割合が高い。

4. まとめと今後の課題

本研究では、建築ストックの集積状況が異なる500メートル四方の地区（代表メッシュ）の調査を行い、大阪市域には多様な建築ストックの集積パターンが存在することを示した。これと並行して、建築竣工設備データ掲載の建築を対象として規模、用途と省エネルギー手法、熱源システムの採用状況を調査し、この結果を調査対象地区に適用したところ、建築の集積状況によって、省エネルギー手法、熱源システムの採用状況に差異が生じることがわかった。この結果は、建築のエネルギー消費を決定する要因である「建築仕様」、「設備仕様」、「建築の使われ方」が地区に集積する建築ストックによって特徴づけられていることを示す。この関係性を前提として代表メッシュのエネルギー消費を推計し、業務建築で消費される電気・都市ガス量、地区・街区のピーク電力需要値、排熱量は建築の集積状況によって異なることを示した。

これまで都市の形態と建築のエネルギー消費の関係は明確にされてこなかったが、本研究の結果はその関係性を示すものである。加えて、建築ストックの集積状況とエネルギー消費特性の関係性の存在は、建築ストックのマネジメントによってエネルギー管理が可能になることを意味する。少子高齢化や人口減少などの社会的環境の変化により長期的には業務建築に対する需要は変化すると考えられるが、このような変化に合わせて今後どのようなまちなみを残し、作っていくのかによって将来のエネルギー消費、二酸化炭素排出量、都市インフラへの負荷（ピーク電力需要

値など）、ヒートアイランド影響は大きく異なると考えられ、建築ストックのマネジメントとエネルギー管理を統合する意義を見出すことができる。今後は、冒頭で述べたように両領域を統合的にとらえ、建築ストックのマネジメントで考慮される現実的な制約や機会を考慮したうえで二酸化炭素排出量の削減を実現する道筋を示すことを課題とする。

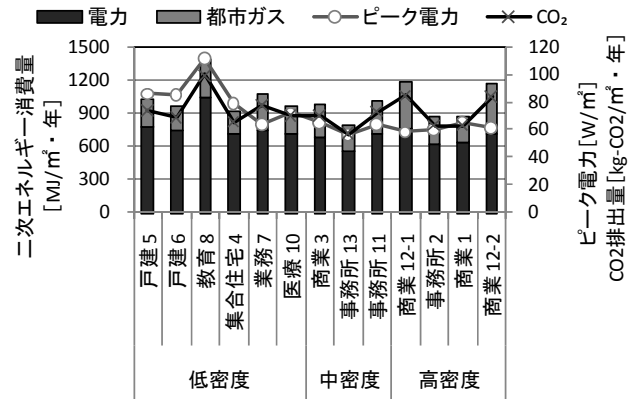


図-8 地区別電力・ガス消費量、ピーク電力、CO₂排出量

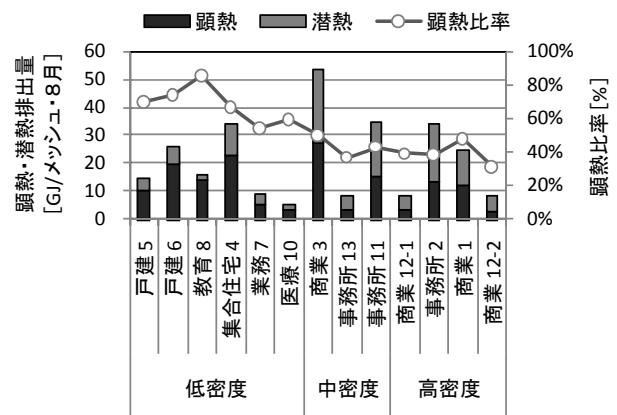


図-9 地区別顕熱・潜熱排出量

参考文献

- 1) 松橋啓介 (2007) 「低炭素社会に向けた交通システムの将来ビジョンの構築について」日本都市計画学会論文集, No.42-3, pp. 889-894
- 2) 田頭直人 (2003) 「CO₂排出の少ない都市の空間構造に関する分析: コージェネレーションを用いた地域冷暖房及び太陽光発電システムの導入を考慮して」, 日本都市計画学会論文集, No. 38-3, pp. 409-414
- 3) 小林隆史, 大澤義明 (2002) 「太陽光発電導入が地域空間構造に与える影響」日本都市計画学会論文集, No. 37, pp. 1-6
- 4) 下田吉之, 山口容平, 浅井崇志, 水野稔 (2006) 「地区を基本単位とした都市エネルギー需要のモデル化と将来シナリオに関する研究」, 日本都市計画学会論文集, No. 41-3, pp. 833-838
- 5) Yamaguchi, Y., Shimoda, Y., Mizuno, M. (2007) 「Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management」, Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 580-592
- 6) 有城丈博, 山口容平, 下田吉之 (2008) 「豊中市民生部門における既存技術の向上と建物ストックマネジメントのCO₂排出削減効果」, 平成20年度空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集
- 7) 大阪市計画調整局, 平成12年度大阪市土地利用現況調査
- 8) (社) 建築設備士技術者協会 (2005) 「ELPAC2005」
- 9) (社) 空調調和・衛生工学会 (1995年~2004年) 「竣工設備一覧」, 空調調和・衛生工学, Vol.69-78, No.2
- 10) Yamaguchi, Y., Shimoda, Y., Mizuno, M. (2007) 「Transition to a sustainable urban energy system from a long-term perspective: Case study in a Japanese business district」 Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 1-12