

都市ヒートアイランド現象の空調・給湯用 エネルギー消費への影響評価

平野勇二郎¹・茅陽一²・柴崎亮介³

¹学生会員 修士 東京大学大学院 社会基盤工学専攻 博士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²工博 慶應義塾大学教授 政策・メディア研究科 (〒252-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322)

³正会員 工博 東京大学教授 空間情報科学研究センター (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

本研究の目的は、東京大都市圏を対象とし、ヒートアイランド現象により生じている冷房用エネルギー消費の増大と暖房・給湯用エネルギー消費の減少をそれぞれ定量化し、ヒートアイランド現象のエネルギー消費への影響を明らかにすることである。そこでまず、気温を考慮したエネルギー消費原単位の推定式を作成した。また、現状の気温分布と、ヒートアイランドが生じないと想定した場合の気温分布を推定した。その上で、それぞれの気温分布について、エネルギー消費の空間分布をメッシュ単位で推定し、結果を比較した。この結果、東京においてはヒートアイランド現象により、空調・給湯用エネルギーの年間総消費量は家庭部門では減少、業務部門では増大しており、全体では減少していることが明らかになった。

Key Words : *heat island, energy consumption, spatial distribution, urban thermal environment, climatic condition*

1. はじめに

ヒートアイランド現象に代表される都市気温の高温化(以下、すべて「ヒートアイランド現象」と呼ぶ)は今後の都市の環境管理においてますます重要な問題になると考えられる。ヒートアイランド現象の解明は、土木・建築・地理・気象などのさまざまな分野において古くから研究テーマであり、数多くの知見が得られている^{1),2),3)}。今日ではこうした現象に関する知見は十分に蓄積され、今後はヒートアイランド現象によるインパクトを緩和するという段階に移行すべきであると言われている⁴⁾。そのため、近年はヒートアイランド緩和策の提案やその効果の検討などの報告も増えつつあり^{5),6)}、現実的な政策への応用が期待されている。しかしながら、実際にはヒートアイランド現象により生じる社会・経済的なインパクトが必ずしも明確ではないため、こうした緩和策の効果を示すことが困難であると言える。

こうした背景から、ロサンゼルスでは定量的にヒートアイランド現象のエネルギー消費や大気汚染、気象などへの社会・経済的な影響評価が行われている⁴⁾。しかしながら東京においては、ヒートアイランド現象によりさまざまな社会・経済的なインパクトが生じるという定性的な指摘は多いが、定量的な検証は十分になされているとは言えない。

とくに東京において最もよく指摘されるのは、

ヒートアイランド現象による冷房用エネルギー消費の増大である^{2),3),7)}。これを東京全体の冷房用エネルギー消費量と平均気温の関係から概算した例はあるが^{2),8)}、空間分布を考慮した評価は行われていない。したがって、これは複雑な空間分布を形成するヒートアイランド現象の影響評価としては必ずしも十分ではない。また、通常はこうした熱環境の評価は最も快適性を損なう夏季について検討されるが、エネルギー消費量に関する影響評価を行う場合には、暖房・給湯用エネルギー消費の減少も考慮し、年間を通じた評価を行う必要がある。しかしながらこうした検討もなされていない。

そこで本研究は東京大都市圏を対象とし(図-1)、ヒートアイランド現象により生じている冷房用エネルギー消費の増大および暖房・給湯用エネルギー消費の減少をそれぞれ空間分布を考慮して定量化し、ヒートアイランド現象が空調・給湯用エネルギー消費に与えている影響を明らかにすることを目的とした。

なお、実際にはこうしたヒートアイランド現象によるエネルギー消費の増減は、その都市の気候条件や土地利用形態などにより異なるものである。本研究で提案する手法は一般性があると考えているが、評価結果についてはあくまで東京における結果であることを最初に述べておく。

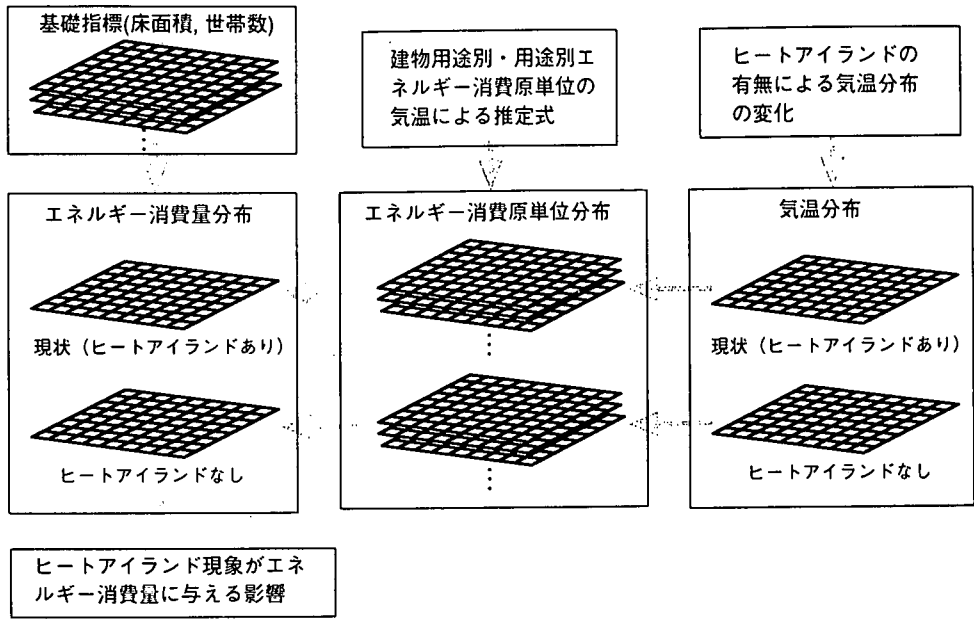


図-2 本研究の全体構成

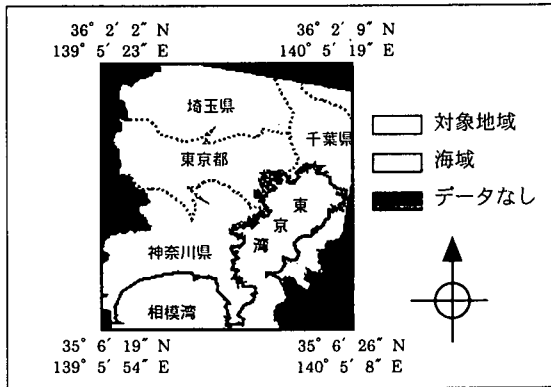


図-1 本研究における対象地域

2. 方法

気温の変化に対するエネルギー消費の変動の大きさ（「気温感応度」と呼ぶ）を調査した例は多く⁹⁾¹⁰⁾、これにより暑夏や冷夏などのマクロな気温変化や日々の気象条件がエネルギー消費に与える影響の評価が行われている。しかしながら従来の気温感応度の算出はエネルギー供給側の実績データを用いて行なわれることが多く、対象地域内の詳細な空間分布を把握することは困難である。したがってこれは、ヒートアイランド現象のような複雑な空間分布を形成する現象の影響評価には適用できない。

一方、エネルギー消費の空間分布に関しても多くの研究がなされている¹¹⁾¹²⁾。これらの研究は、エネ

ルギー消費原単位を基礎指標の空間分布のデータに乗じるという方法により行われている。エネルギー消費原単位とは床面積や世帯あたりのエネルギー消費量であり、基礎指標とはその分母となる床面積や世帯数である。ただし、エネルギー消費原単位は気温による影響を考慮していないので、この方法をそのままヒートアイランド現象の影響評価に用いることはできない。

そこで本研究では図-2に示す方法により、エネルギー消費の気温感応度と空間分布の両方を考慮した影響評価を行った。以下にその手順を説明する。

まずエネルギー消費原単位を気温の関数として表現することにより、エネルギー消費原単位の気温による推定式を作成した。その一方で、現状の気温分布と都市の影響がない場合の仮想的な気温分布をメッシュ単位で推定した。その上でこれらの気温の各メッシュに最初に作成した推定式を適用し、それぞれの気温分布に応じたエネルギー消費原単位をメッシュ単位で推定した。次にこのエネルギー消費原単位の各メッシュを基礎指標のメッシュデータに乗じることにより、現状の気温分布とヒートアイランドがない場合の気温分布のそれぞれに応じたエネルギー消費量を推計した。そしてこれらを比較し、ヒートアイランド現象がエネルギー消費に与える影響を定量化した。

なお本研究の方法では、よく指摘されるエネルギー消費とヒートアイランド現象のフィードバックループの効果は考慮されていない。実際には、ヒート

表-1 エネルギー消費原単位データの出典

資料1	家庭部門 (年合計値)	澤地ほか(1994): 日本建築学会 計画系論文集, No.462, pp.41-48.
資料2	家庭部門 (月別・時刻別パターン)	財団法人 空気調和・衛生工学会 (1994): 『都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価』, pp.138-142.
資料3	業務部門 (年合計値, 月別・時刻別パターン)	日本地域冷暖房協会 (1995): 『プロジェクト2010 日本全国地域冷暖房導入可能性調査研究平成6年度報告書』, pp.22-27.

表-2 エネルギー消費原単位データの分類

部門	建物用途	基礎指標	用途
家庭部門	戸建住宅 集合住宅	世帯数	暖房用 冷房用 給湯用
業務部門	病院 事務所 商業施設 ホテル 娯楽施設 文化施設 学校	床面積	

アイランド現象の形成要因は人工排熱以外にも数多く、また東京の人工熱排出源¹³⁾のうち、産業部門・運輸部門や民生部門の動力・照明用エネルギー消費の占める割合も大きい。したがって空調・給湯用エネルギー消費はヒートアイランド現象の形成要因のごく一部であり、しかも後述する本研究の計算結果から、ヒートアイランド現象による空調・給湯用エネルギー消費の変動はさらにその数%程度である。したがってこれが気温に影響し、それが再び空調・給湯用エネルギー消費に与える影響は無視して差し支えないと考えられる。

3. エネルギー消費原単位の推定式作成

(1) 利用データ

本研究で用いたエネルギー消費原単位の出典を表-1に、これらのデータの分類および基礎指標を表-2にそれぞれ示す。なお、本研究において用いたデータはいずれも1次換算値である。

家庭部門のエネルギー消費原単位に関する調査は比較的多いと言える¹³⁾。ただし、戸建住宅と集合住宅では原単位は大きく異なること¹³⁾、都心と郊外では戸建・集合の比率が異なることを考慮すれば、本研究のような目的では、これらを区別して集計したデータを用いる必要がある。そこで本研究では家庭部門の原単位の年間合計値として資料1の東京のデータを用いた。この資料では、集合住宅は複数のデータが記載されているため、サンプル数により加重平均した。ただし、本文中にはずれ値であることが明記されているサンプルは除外した。また、このデータから月別値・時別値を得るため、資料2に記載された住宅の月別・時刻別需要パターン¹⁴⁾のデータを用いた。

業務部門のエネルギー消費原単位は、年間総消費量、月別・時刻別パターンとも資料3のデータを用

いた。業務部門は、家庭部門と比較して建物の種類が多くエネルギー使用状況も多様であるため、調査例が少ない¹³⁾。このため本研究では、体系的である上、床面積のデータとの建物用途の分類が明確なデータとして、資料3のデータが適切であると判断した。なお、資料3には「冷熱消費」という用語が用いられているが、出典である早稲田大学・尾島研究室資料から、これは除去熱量ではなく冷房用エネルギー消費の意味であると考えられる。

これらの時刻別パターンのデータは冬季、夏季、中間季の区分となっているものが多い。そこで冬季、夏季、中間季の代表月をそれぞれ1月、8月、4月とし、他の月はこれらをもとに気温により比例配分する形で補間した。その上で年間総消費量を月別・時刻別パターンにより配分し、建物用途別・用途別・月別・時刻別エネルギー消費原単位を計算した。

(2) 推定式の作成と精度評価

前述した建物用途別・用途別・月別・時刻別エネルギー消費原単位を月別平均気温と対応させることにより、気温からエネルギー消費原単位を推定するための建物用途別・用途別・時刻別の推定式を作成した。原単位データの大半が過去10年程度の期間に都心部で調査されたものであることから、気温データは東京23区内の大気汚染常時監視測定局20地点における1984～1993年の月別・時刻別平均値を用いた。

以下に事務所における14時の冷房用エネルギー消費原単位を例とし、この作成方法を説明する。まず、エネルギー消費原単位のデータと平均気温のデータを表-3に、これらの散布図を図-3に示す。

図-3から、4月頃の気温を境界として傾きが変化していることが読みとれる。空調が稼働している限り、関係は直線的であると考えられるが、通常はあ

表-3 事務所における14時の冷房用エネルギー消費原単位 (Kcal/m²・時) と14時の月別の平均気温 (°C)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
原単位	1.54	1.70	1.85	3.82	16.31	34.69	46.19	49.89	41.69	18.78	4.14	2.15
平均気温	8.7	9.1	11.7	17.6	21.4	24.2	27.5	29.7	25.8	20.1	15.8	11.4

表-4 エネルギー消費原単位の推定式作成方法 (事務所における冷房用, 14時の例)

	回帰式を作成する月の組み合わせ	回帰式 I	回帰式 II	交点 (°C)	平均二乗誤差
A	I: 1,2月, II: 12,3,11,4,10,5,6,9,7,8月	$E = -1.82 + 0.39T$	$E = -37.65 + 2.90T$	14.22	4.26
B	I: 1,2,12月, II: 3,11,4,10,5,6,9,7,8月	$E = -0.32 + 0.22T$	$E = -43.60 + 3.15T$	14.77	3.55
C	I: 1,2,12,3月, II: 11,4,10,5,6,9,7,8月	$E = 0.35 + 0.14T$	$E = -58.00 + 3.73T$	16.26	2.52
D	I: 1,2,12,3,11月, II: 4,10,5,6,9,7,8月	$E = -1.79 + 0.36T$	$E = -63.97 + 3.96T$	17.25	2.36
E	I: 1,2,12,3,11,4月, II: 10,5,6,9,7,8月	$E = -1.21 + 0.30T$	$E = -58.85 + 3.77T$	16.63	2.46
F	I: 1,2,12,3,11,4,10月, II: 5,6,9,7,8月	$E = -10.04 + 1.10T$	$E = -65.37 + 4.01T$	19.05	3.09
G	I: 1,2,12,3,11,4,10,5月, II: 6,9,7,8月	$E = -11.31 + 1.22T$	$E = -29.48 + 2.71T$	12.18	6.37
H	I: 1,2,12,3,11,4,10,5,6月, II: 9,7,8月	$E = -18.25 + 1.78T$	$E = -11.78 + 2.08T$	-21.26	15.34
I	I: 1,2,12,3,11,4,10,5,6,9月, II: 7,8月	$E = -22.99 + 2.15T$	$E = -0.25 + 1.69T$	49.11	9.73

E: エネルギー消費原単位 T: 気温

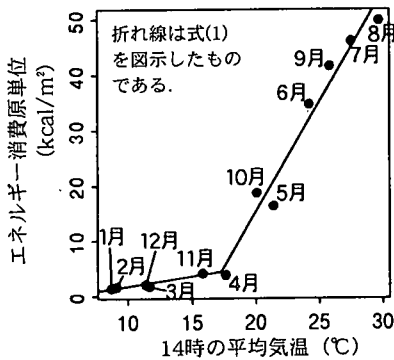


図-3 平均気温とエネルギー消費原単位の散布図 (事務所における冷房用, 14時の例)

る気温を境界として空調機器が稼働しはじめるため、結果としてこのような分布になっていると考えられる。このためこうした傾向は、8月の学校を除く他のすべての建物用途・時刻において見られた。また傾きは逆であるが、暖房用に関しても同様であった。

このような傾きの変化は図中に示したような折れ線で近似できる。そこでデータを2つのグループに分け、それぞれの回帰式を作成した。グループ分けは複数の組み合わせが考えられるが、その中で平均

二乗誤差が最小となる組み合わせを選択した。以下にその例を示す。

まず表-3のデータを気温により昇順に整列化した。この例では1, 2, 12, 3, 11, 4, 10, 5, 6, 9, 7, 8月の順番である。したがって、表-4に示すような9通りの組み合わせが可能であることがわかる。そこで表-4に示した通り、これらのすべての組み合わせについて2つの回帰式を作成し、さらにその回帰直線の交点となる気温を計算した。その上で、交点の気温を境界として、それぞれの回帰式により気温からエネルギー消費原単位を推定した場合の平均二乗誤差を算出した。

表-4から、組み合わせDにおいて平均二乗誤差が最小になっていることがわかる。したがって、14時の事務所における冷房用エネルギー消費原単位の推定式は、

$$\begin{aligned}
 & T \leq 17.25 \text{ の場合} \\
 & \quad E = -1.79 + 0.36 T \\
 & T > 17.25 \text{ の場合} \\
 & \quad E = -63.97 + 3.96 T
 \end{aligned}$$

(1)

T: 平均気温 (°C)
E: 冷房用エネルギー消費原単位 (Kcal/m²・時)

となる。

同様の方法を用い、暖房用・冷房用のそれぞれについて、エネルギー消費原単位の気温による推定式を建物用途別・時刻別に作成した。ただし、学校は8月のデータがはずれ値であったため、これを除外して推定式を作成した。給湯用に関しては気温との関係が直線的であるため、通常の単回帰式を作成し、これを推定式とした。また、全ての推定式について月別に残差を計算した。なお、ここでは建物用途別・用途別・時刻別の648(9×3×24)の推定式が得られたが、数が多いので掲載は省略する。

次に、これらの推定式の信頼性について検討した。本研究では気温の変化に対するエネルギー消費原単位の変化を推定するために用いることから、推定式の傾きの信頼性や折れ線で近似することの妥当性などがとりわけ重要であると言える。このため、この評価には相関係数を用いることが適切であると判断した。そこでそれぞれの推定式について、実際のエネルギー消費原単位と気温による推定値の相関係数を計算した。この結果、暖房用に関しては全て $R=0.97$ を超えた。冷房用は、学校が $R=0.96\sim 0.97$ 程度であったが、他の建物用途は全て $R=0.97$ を超えた。また給湯用はほとんどが $R=0.8$ を超えた。給湯用が $R=0.8$ 以下であったのは、2時と3時の住宅および9時の商業施設だけある。給湯用エネルギー消費には気温感応があるが、住宅における深夜の入浴の頻度や店舗の開店時のエネルギー消費の立ち上がりも季節依存しており、結果としてこれらの相関係数が下がった可能性が高い。ただしこれらはいずれも絶対値が非常に小さいため、解析には影響しないと考えられる。この検討結果から、本章で作成した推定式は十分に利用可能な精度であると判断した。

4. 月別・時刻別気温分布のメッシュ推定

(1) 重回帰式による気温分布推定

気温分布の推定方法の模式図を図-4に示す。本研究と同様の対象地域において、月別・時刻別平均気温を平均二乗誤差 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 程度の精度でメッシュに展開する手法がすでに示されている¹⁴⁾。これは、まず気温観測点の周辺の地域条件からその地点の平均気温を説明する重回帰式を作成し、次にそれを説明変数のメッシュデータに当てはめることにより各メッシュの気温を推定するという手法である。地域条件として周辺の土地利用や地形因子、海岸からの距離などを用いている。被説明変数の気温データは対象地域内96地点の大気汚染常時監視測定局による1984~1993年の月別・時刻別平均値であり、これは前章で用いた気温データと対応するものである。

各気象観測点の月別・時刻別平均気温を土地被覆条件などから説明する重回帰式¹⁴⁾

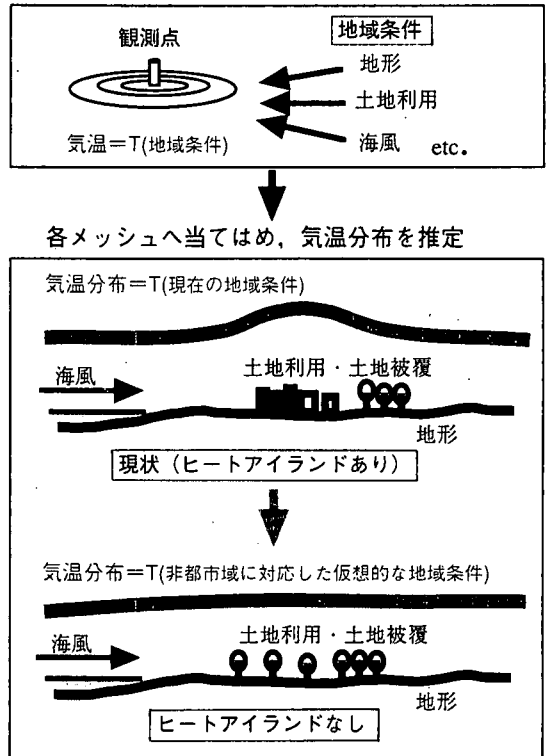


図-4 気温分布推定の模式図

そこで本研究ではまず、この手法を用いて対象地域の現状の月別・時刻別平均気温分布を1kmメッシュで推定した。ただし、ここでは説明変数として緑被率のかわりにリモートセンシングデータ(1993年10月28日のLandsat TM)の植生指標(NDVI)を用いた。これにより説明変数の多重共線性は増大したが、平均二乗誤差は減少した。このため、ここでは説明変数の評価ではなく気温の推定が目的であることを考慮し、植生指標を用いる方が適切であると判断した。ここで得られた月別・時刻別気温推定式の例として、7月15時および12月21時の式を次に示す。

$$T_{7,15} = 2472.0 - 0.0229x_a + 2.646x_b - 1.055x_c + 38.11x_d + 15.36x_e + 29.85x_f + 8.388x_g + 11.52x_h - 188.2x_i$$

$$T_{12,21} = 842.6 + 0.3187x_a + 12.45x_b - 4.029x_c - 18.01x_d - 29.33x_e + 7.955x_f + 76.56x_g - 9.763x_h - 349.3x_i \quad (2)$$

$T_{m,t}$: m 月 t 時の推定気温(×100)
 x_a :傾斜, x_b :地形のラプラシアン, x_c :海岸線からの距離, x_d :相模湾からの距離(対数), x_e :東京湾の西側からの距離(対数), x_f :東京湾の東側からの距離(対数), x_g :人工被覆率, x_h :農地率, x_i :植生指標

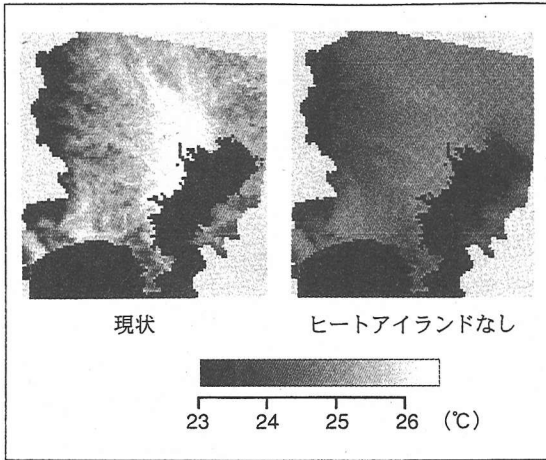


図-5 気温分布のメッシュ推定値 (8月20時の例)

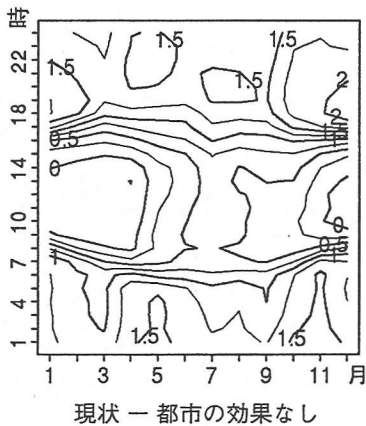


図-6 気温差のアイソプレス (°C)

次に、都市の影響がない場合の仮想的な気温分布を推定した。これは、前述した説明変数のメッシュデータの土地利用率や植生指標に非都市域の値を代入し、これに同様の重回帰式を適用するという方法により行った。ただし、説明変数の土地利用率や植生指標の間には強い多重共線性がある ($R=0.5\sim 0.7$ 程度)。一方、土地利用率や植生指標と地形因子や海岸距離の間にはほとんど多重共線性はない ($R=0.0\sim 0.3$ 程度)。したがって、ある程度信頼性のある予測値を得るためには、土地利用率および植生指標を整合性のある形で変化させる必要がある。また、重回帰式を当てはめることにより予測するため、極端な外挿は避ける必要がある。これらの理由から、対象地域内の非都市域の土地利用率や植生指標を都市域に当てはめるという方法が適切であると考えられる。このため、ここでは郊外の代表地域として神奈川県秦野市を選択し、植生指標が秦野市の

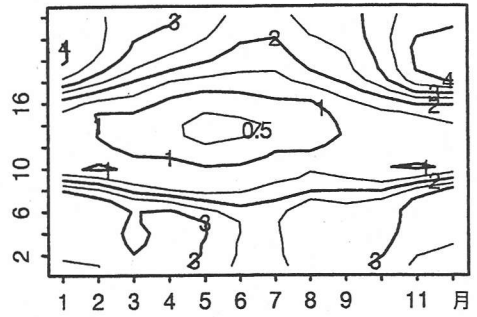


図-7 ヒートアイランド強度¹⁰⁾ (°C)

平均値未満のメッシュの土地利用率・植生指標をすべて秦野市の平均値に置き換えた。その上で、同様の重回帰式を当てはめることにより、都市の影響がない場合の仮想的な気温分布を推定した。

これらの推定により得られた気温分布の8月20時の例を図-5に示す。また、大手町の月別・時刻別の気温差 (現状 - 都市の効果なし) を図-6にアイソプレスとして示す。図-6から、都市の影響による昇温が最大となるのは12月19時で、2.2°C程度であることがわかる。

(2) 妥当性の検討

前節において行った気温分布の推定結果は、精度の定量的な検証が非常に困難である。このため、ここでは他の手法による推定結果との定性的に比較により妥当性を確認するだけにとどめた。定量的な検証に関しては、重要な今後の課題であると言える。なお、第6章2節においては、気温分布の推定誤差が最終的なエネルギー消費量の推定結果に与える影響を概算することで、結果の信頼性の評価を試みている。

a) ヒートアイランド強度との比較

ヒートアイランド強度とは都心と郊外の気温差により定義され、都市の影響による昇温を近似する指標である。ただしこれは、空間分布を把握できないこと、異なる2点の気温差なので都市以外の影響が含まれていることなどが本研究の推定手法と異なる。

ここでは丸の内と青梅をそれぞれ都心と郊外の代表点として算出したヒートアイランド強度のアイソプレス¹⁰⁾を図-7に例示する。これと図-6を比較すると、冬季の夕方過ぎにピークがあり、都市の影響による昇温が主に夜間に生じること、冬季に比較的顕著であることなどの傾向はよく一致していると言える。

また、夏季日中には図-7は図-6と比較して相対的

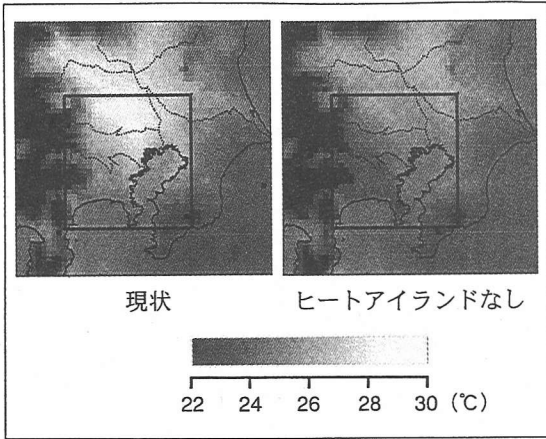


図-8 シミュレーション結果¹⁵⁾ (8月20時の例)

に低いが、これは都心部が東京湾からの海風の冷却効果を受けるため、結果としてヒートアイランド強度が低くなったと考えられる。また、絶対値は図-7の方が大きい、これは都心部が海洋の保温効果の影響を受けることと、想定している土地利用条件の違いの両方によると考えられる。したがって、相違点に関しても整合性があり、妥当な結果であると考えられる。

b) 数値シミュレーションとの比較

都市の影響がない場合の気温分布の推定は、物理モデルの数値シミュレーションにより行うことが一般的である。しかしながら、これはある特定の気象条件を再現する手法であるのに対し、本研究の手法は気候値(長期間の平均値)として平均気温の分布を推定するものであり、性質が異なる。したがって定量的な検証は困難なので、ここでは定性的な比較にとどめ、妥当性を確認した。

比較対象は、計算条件や対象地域が本研究と類似している例として気象庁によるシミュレーション結果¹⁶⁾を用いた。これは東京を中心とした200km×200kmの範囲を対象とし、現状および都市を取り除いた場合の気温分布を4kmメッシュでシミュレーションしたものである。都市を取り除いた場合は、人工排熱をなくし、都市的土地利用をすべて林、水田、畑とした状態を想定している。また太陽高度は8月15日に設定し、気象条件は典型的な晴天日を想定している。

まず、空間分布について検討するため、このシミュレーション結果を図化し、前述した重回帰式による月別・時刻別メッシュ推定値と比較した。ここでは図-5と対応させるため、20時の例を図-8に示す。図-8は現状の気温分布では都心部を中心とし埼玉方面へ高温帯が広がっているが、都市の影響をな

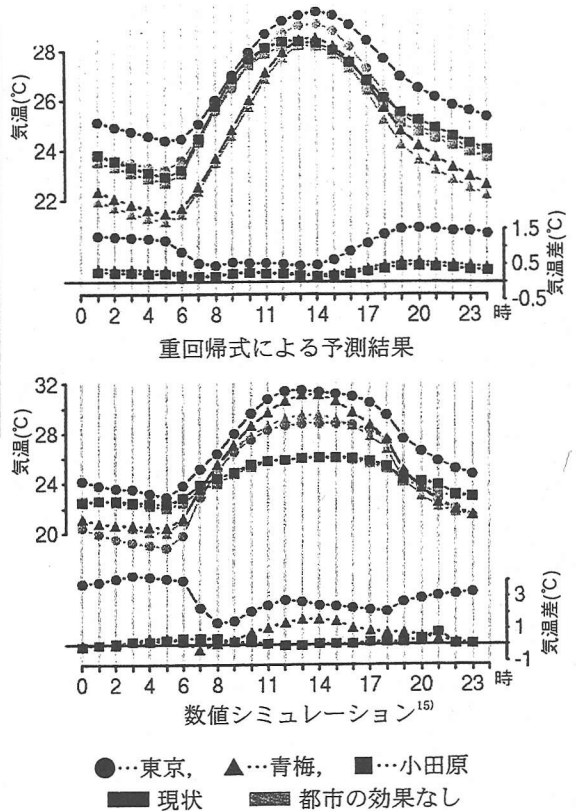


図-9 気温予測結果の比較 (8月の日変化パターン)

くした場合はこの高温帯が見えないという点が特徴的である。これらは対象とするスケールが異なるため詳細な比較は困難であるが、定性的にはよく一致していると言える。また、他の時刻についても同様に比較し、よく一致していることが確認された。

次に、大手町、青梅、小田原の3カ所について、現状と都市の影響がない場合のそれぞれの気温およびこれらの気温差の日変化パターンを比較した(図-9)。この結果、都市の影響による昇温は大手町が最も顕著であり、青梅、小田原の順でこれに続くこと、日中と比較し夜間に顕著であることといった傾向は比較的よく一致していると言える。

ただし、本研究における推定値は曇天日などを含む平均値であるのに対し、シミュレーションは晴天日を想定しているため違いが生じている。例えば、都市の影響による昇温がピークに達するのは、メッシュ推定値では夕方過ぎであるのに対し、シミュレーション結果では明け方近くである。ヒートアイランドは、晴天時は夜半過ぎから明け方にかけて顕著であるのに対し、曇天時は夜半にかけて発達しその後は弱まるといわれており¹⁶⁾、整合性はある。また

シミュレーション結果では、小田原の日中の気温が他と比較して低いが、これは相模湾からの海風の冷却効果が晴天日の夏季・日中に強く生じるためである。その他、都市の影響による昇温はシミュレーション結果の方が大きい、これは晴天時においてヒートアイランド現象が顕著に生じやすいこと¹⁶⁾、想定した土地利用・土地被覆条件が異なることの両方によると考えられる。

以上の検討から、本研究の気温推定値の時空間的な変動パターンは、ヒートアイランド強度とも数値シミュレーションの結果ともよく一致しており、的確であると言える。また相違点に関しても、想定している条件の違いを考慮すれば整合性があり、定性的にはほぼ妥当な結果であると考えられる。

なお、昇温の変動幅の大きさは過小評価になっている可能性があるが、これは想定する土地利用条件により変わるものであるため問題はない。ただし、本研究はあくまでここで示した気温分布を設定した場合の影響評価と位置づける必要がある。

5. 居住世帯数のメッシュデータ作成

ここでは家庭部門のエネルギー消費原単位の基礎指標である世帯数のメッシュデータを作成した。その手順を以下に示す。

まず図-10に灰色で示した地域に関しては、「住宅統計調査報告」による市(区)町村の行政区ごとの世帯数および建物数のデータ¹⁷⁾が利用可能である。そこでこれを用い、戸建住宅・共同住宅のそれぞれの行政区ごとの世帯数を算出した。また、細密数値情報に含まれる行政区分のメッシュデータを用いて、戸建住宅と集合住宅の1kmメッシュ床面積データ¹⁸⁾をそれぞれ行政区ごとに集計した。その上でこれらを用いて、世帯数を行政区ごとに床面積で重みづけする形で1kmメッシュに配分した。計算式は、

$$h_n = H \cdot f_n / \sum f_n \quad (3)$$

H : ある行政区の世帯数
 h_n : ある行政区の n 番目のメッシュの推定世帯数
 f_n : ある行政区の n 番目のメッシュの床面積

である。

また、図-10に黒で示した地域は「住宅統計調査報告」からは世帯数を特定できない。これらは「住宅統計調査報告」にデータが記載されていない行政区(人口2万人以下の行政区)および、本研究の対象地域に区域全体が含まれていない行政区である。な

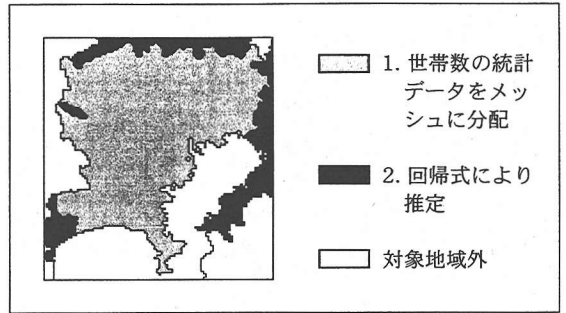


図-10 世帯数推定のための地域分類

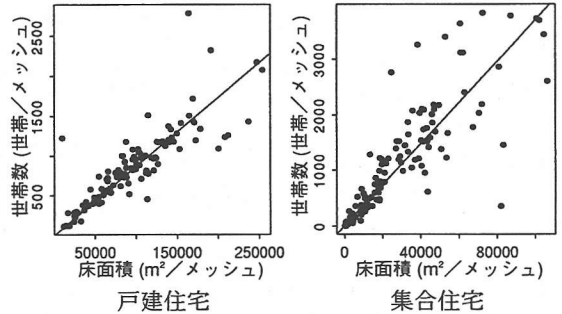


図-11 床面積と世帯数の関係(1メッシュあたり)

お後者をできる限り少なくするため、図-1に「データなし」と記した地域のうち、床面積データおよび行政区分データが利用可能な地域は、ここでは対象地域に組み込んだ。

これらの地域は回帰式を用いて世帯数を推定した。まず図-10に灰色で示した地域の行政区ごとに集計した床面積および世帯数の散布図を図-11に示す。ただし、各行政区の面積の違いから生じる相関の影響を除去するため、世帯数、床面積とも1メッシュあたりとした。また都心部はこの関係が直線的ではなかったため、東京23区は除外してある。この図から、これらはほぼ比例関係であることが読み取れる。そこで、原点を通る回帰式を作成した結果、

$$\begin{aligned} y_1 &= 0.00866x_1 \quad (R=0.856) \\ y_2 &= 0.0370x_2 \quad (R=0.847) \end{aligned} \quad (4)$$

y_1 : 戸建住宅の世帯数(1メッシュあたり)
 x_1 : 戸建住宅の床面積(1メッシュあたり)
 y_2 : 集合住宅の世帯数(1メッシュあたり)
 x_2 : 集合住宅の床面積(1メッシュあたり)

を得た。この式を用い、図-10に黒で示した地域においては床面積のメッシュデータから世帯数を推定した。この地域はほとんどが郊外であるため、居住世帯数は少なく、ヒートアイランド現象による昇温も小さい。したがって、式(4)には多少のばらつきが

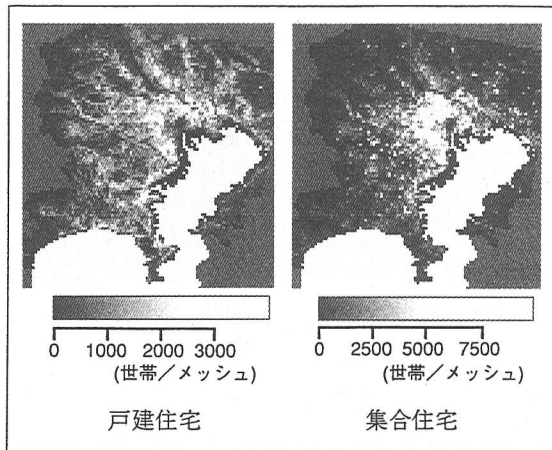


図-12 世帯数のメッシュデータ

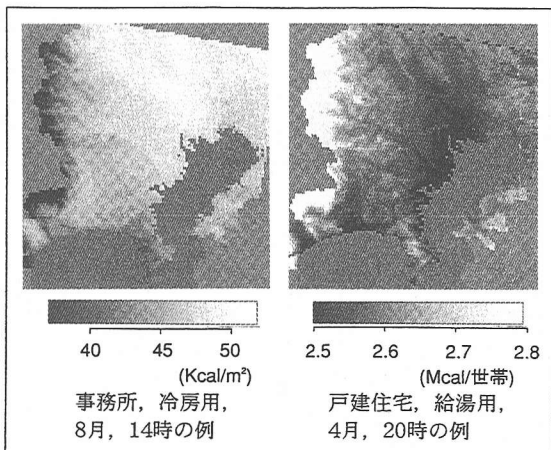


図-13 エネルギー消費原単位の空間分布

あるが、結果には大きな影響を与えないと考えられる。

なお式(4)を世帯あたりの床面積に換算すると、集合住宅は27 (m²/世帯) となり、すこし少ないと思われる。これは、住宅以外の建物に居住する世帯を集合住宅に居住する世帯の中に組み込んだことによる差や、床面積のデータと世帯数のデータのタイムラグなどにより生じていると考えられる。また、本研究において用いた床面積のメッシュデータは「固定資産税概要調書」に基づいて作成されているため、住宅の総床面積は信頼できるが、戸建・集合の配分には誤差が含まれている可能性がある。いずれにせよ「住宅統計調査報告」はより信頼できると考えられるため、本章で作成した世帯数のメッシュデータは利用可能な精度であると考えられる。

以上の結果により得られた世帯数の分布図を図-12に示す。

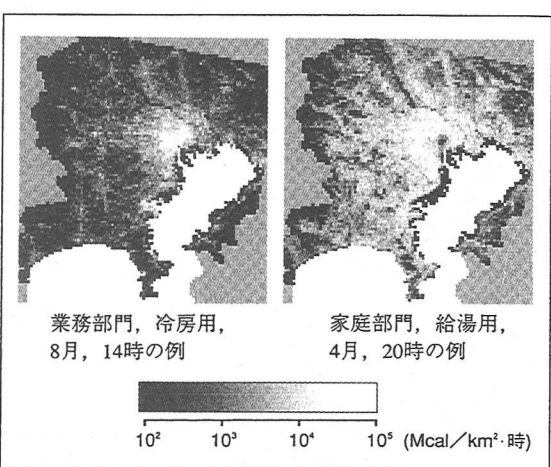


図-14 エネルギー消費の空間分布

6. 都市ヒートアイランド現象の影響評価

(1) エネルギー消費量の推定と比較

まず、第4章において推定した気温分布のメッシュデータに第3章で作成した推定式をメッシュ単位で適用した。また、第3章において推定式を作成した際の残差を足しあわせ、値を補正した。第3章において作成した推定式は建物用途別・用途別・時刻別のエネルギー消費原単位を気温から推定するためのものであり、気温のメッシュデータは、月別・時刻別のメッシュデータである。したがって、建物用途別・用途別・月別・時刻別エネルギー消費原単位の1kmメッシュの推定値が得られた。この例を図-13に示す。

次に、このエネルギー消費原単位を基礎指標の

メッシュデータにメッシュ単位で乗じることにより、エネルギー消費量の空間分布を推定した。用いた基礎指標のデータは、家庭部門は第5章において作成した世帯数のメッシュデータ、業務部門は床面積のメッシュデータ¹¹⁾である。その上でこの建物用途を家庭部門および業務部門に集約し、エネルギー消費量の部門別・用途別・月別・時刻別のメッシュ推定値とした。この例を図-14に示す。

また、第4章で推定した都市の影響がない場合の仮想的な気温分布に関しても、同様の推定式と基礎指標のデータを用い、部門別・用途別・月別・時刻別エネルギー消費量をメッシュ単位で推定した。これはヒートアイランド現象が生じないと仮定した場合に予想される仮想的なエネルギー消費量であるため、これらの比較により、ヒートアイランド現象のエネルギー消費への影響を定量化できる。

そこでまず、現状とヒートアイランドがない場合

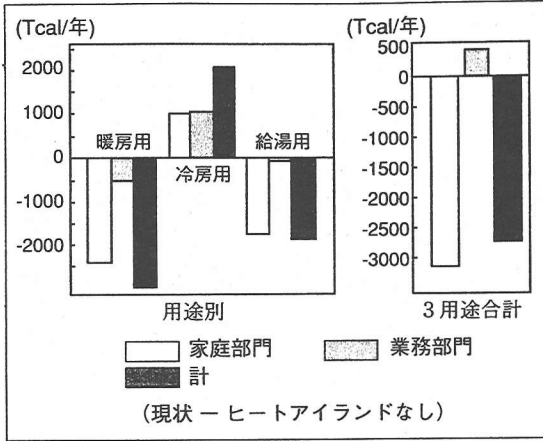


図-15 年間総消費量の差

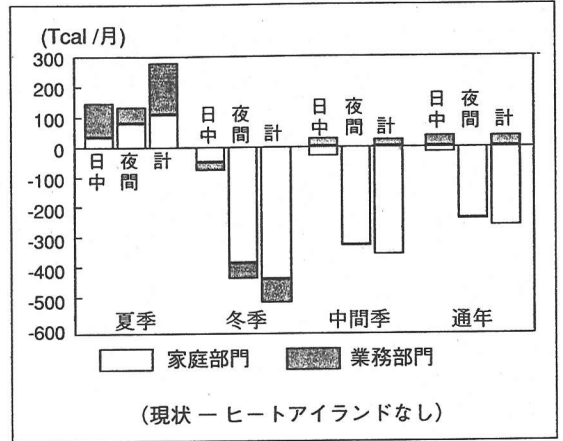


図-16 季節別・時間帯別消費量の差 (1ヵ月あたり)

のそれぞれについて、対象地域全体の部門別・用途別の年間総消費量およびその差を算出した(図-15)。

この結果、家庭部門においては、ヒートアイランド現象により暖房用エネルギー消費は約2400Tcal/年(10100TJ/年)、給湯用エネルギー消費は約1800Tcal/年(7300TJ/年)ほど減少していることが示された。これに対し、冷房用エネルギー消費の増大は約1000Tcal/年(4100TJ/年)であり、変動幅は暖房用・給湯用の減少分と比較すれば小さい。このため、結果として家庭部門全体ではエネルギー消費量は約3200Tcal/年(13300TJ/年)ほど減少している。

一方、業務部門ではヒートアイランド現象によりエネルギー消費は増大している。とくに冷房用エネルギー消費の増大が大きく、このため3用途の合計としては約400Tcal/年(1800TJ/年)ほど増大している。

この業務部門のエネルギー消費の増大分は、家庭部門における減少分と比較すれば、明らかに小さい。このため、両部門の合計では、現状の気温分布の方が約2800Tcal/年(11500TJ/年)ほど少ない。したがって、東京ではヒートアイランド現象により空調・給湯用エネルギー消費は減少しているという結果となった。変動率は、空調・給湯用エネルギー全体で家庭部門において3.6%の減少、業務部門において1.3%の増大、両部門合計では2.3%の減少である。

また、熱環境という観点からはこうした評価は季節・時間帯別に行なう必要がある。そこで夏季・冬季・中間季および日中・夜間に分け、それぞれ1ヵ月あたりのエネルギー消費の増減を算出した(図-16)。なお、ここでは6~8月を夏季、12~2月を冬

季、3~5月および9~11月を中間季とし、また6~17時を日中、18~5時を夜間とした。

この図から、夏季のエネルギー消費は家庭・業務両部門とも同程度に増大していることがわかる。また冬季には両部門とも減少しており、とくに夜間の家庭部門が強く影響を受けている。中間季の日中は、家庭部門では減少し、業務部門では増大しているが、どちらも変動幅は小さい。中間季の夜間は冬季と同様に家庭部門が強く影響を受けており、業務部門への影響はほとんどみられない。なお、これらのエネルギー消費構造のさらに詳細な検討は3節において行うことにする。

(2) 気温感応度に着目した感度解析

今回算出したエネルギー消費量の推定値は、推定に利用されたさまざまな推定式や仮定の影響を受ける。したがって、これらの誤差が結果にどの程度の影響を与えるかをできるだけ定量的に評価することが重要である。とくに最終結果に大きな影響を与え得る要素としては、エネルギー消費原単位の推定式および気温分布の推定精度が考えられるが、前者に関しては第3章において信頼性を検討し、良好な結果が得られている。したがって、これは気温分布の精度に比べ重要性は低いと判断し、ここでは気温分布の推定誤差に焦点をあてて感度解析を試みることにした。感度解析にあたっては、気温変化に対応するエネルギー消費量の変化(気温感応度)を算出することにより、都市による昇温やその推定誤差がエネルギー消費量の推定結果に与える影響について検討した。

エネルギー消費原単位の推定式は折れ線または直線で近似したため、都市による昇温とエネルギー消費の増減は、昇温幅が小さければほぼ比例関係とし

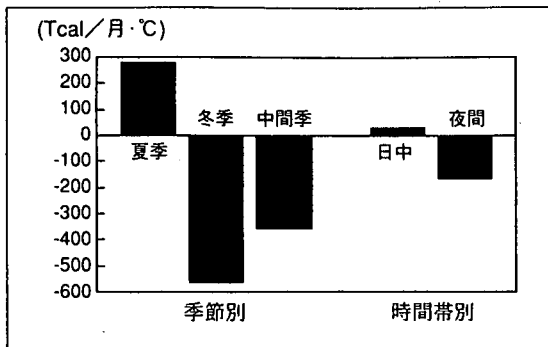


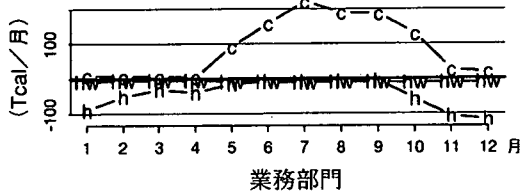
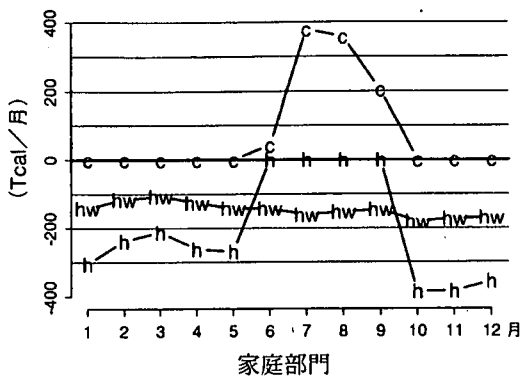
図-17 気温感応度 (1ヵ月あたり)

て近似できる。そこで、前節で定義した夏季・冬季・中間季および日中・夜間に分け、それぞれについて昇温の変動パターンおよび対象地域のエネルギー消費の増減から気温感応度を概算した(図-17)。ただし、昇温パターンは場所により異なるため、ここでは代表地点として大手町における昇温パターン(図-6)を用い、他の地点は大手町の昇温幅に比例する形で設定した。したがって図-17は、第4章で推定した昇温の空間分布を保持したまま大手町の昇温幅が1℃拡大した場合、1ヵ月あたりのエネルギー消費量がどの程度の増減するかを示すものである。

この図から、夏季は冬季・中間季と比較して昇温幅によるエネルギー消費量の変動が小さいことがわかる。これは主に冷房用エネルギーの増大と給湯用エネルギーの減少が互いに打ち消し合うためである。この結果を用い、夏季において冬季・中間季の4倍以上の昇温が生じない限り、夏季のエネルギー消費の増大分が冬季・中間季の減少分を上回らないことが算出できる。

また、日中と夜間を比較した場合、日中はわずかに正の気温感応があるが、実際には夏季のエネルギー消費の増大と冬季のエネルギー消費の減少によりほとんど相殺されている。これに対し、夜間は家庭部門の暖房・給湯用エネルギーなどが大きく影響するため、負の気温感応が生じている。この結果から、日中において夜間の6倍近い昇温が生じない限り、日中のエネルギー消費の増大分は夜間の減少分を上回らないことが算出できる。

本来は季節と時間帯の両方の誤差を同時に評価すべきであるが、複雑になるのでこれ以上の検討は省略する。しかしながら、よく言われるとおりヒートアイランド現象が冬季に生じやすく夜間に顕著であるとすれば、ヒートアイランド現象により東京における通年のエネルギー消費が減少していることは、ほぼ間違いないと考えられる。



h. 暖房用, c. 冷房用, hw. 給湯用
(現状 - ヒートアイランドなし)

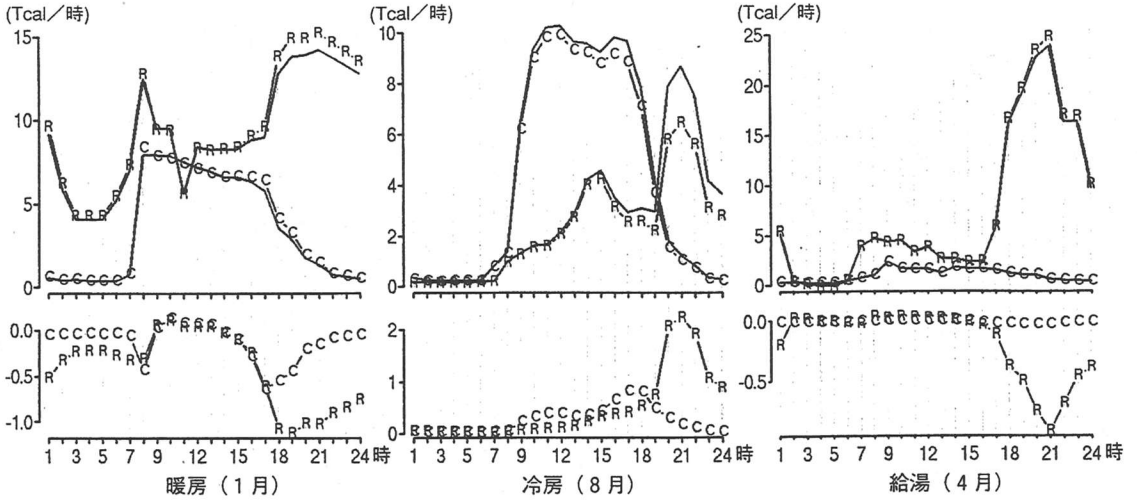
図-18 用途別・月別消費量の差

(3) 時空間変動パターンの構造解析

次に、ヒートアイランド現象によるエネルギー消費の増減の構造を明らかにするため、まず増大量(現状-ヒートアイランドなし)を用途別・月別に計算した(図-18)。この図から、暖房用エネルギー消費の減少は、家庭部門では大きく、また10月から5月までの長期間にわたって生じているのに対し、業務部門では比較的小さいことがわかる。また、冷房用エネルギー消費の増大は家庭・業務の両部門において生じている。この影響は、家庭部門においては7月から9月までの短期間であるが変動幅は大きく、業務部門においては5月から10月までの長期間にわたって生じているが、変動幅は家庭部門と比較して小さいと言える。給湯用エネルギー消費は、家庭部門においては年間を通じて減少しているが、業務部門においてはほとんど影響は見られない。家庭部門の給湯用エネルギーは風呂が大きな割合を占めており、これが気温の影響を受けやすいためこうした違いが生じていると考えられる。

次に1月の暖房用、8月の冷房用、4月の給湯用のそれぞれについて、現状とヒートアイランドがない場合の時刻別エネルギー消費量およびその差(現状-ヒートアイランドなし)を計算した(図-19)。

図-19の下段に示した現状とヒートアイランドなしの差の図から、エネルギー消費がヒートアイランド現象の影響を強く受けるのは家庭部門の18~22時



R. 家庭部門, C. 業務部門

上段：時刻別エネルギー消費量（記号…ヒートアイランドなし，実線…現状）
 下段：エネルギー消費量の差（現状－ヒートアイランドなし）

図-19 時刻別消費量および消費量の差（1月の暖房，8月の冷房，4月の給湯の例）

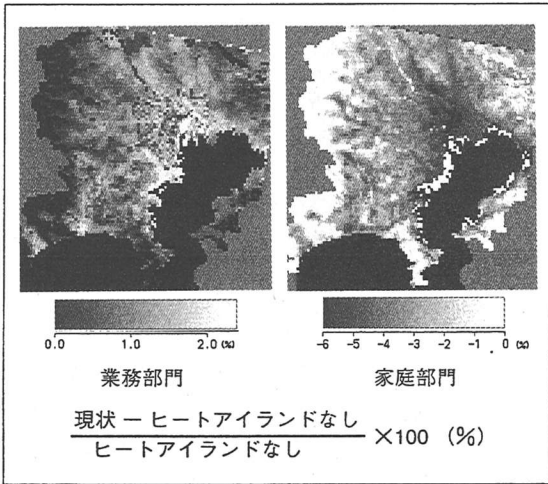


図-20 年間消費量の増大率の空間分布

頃であることが読みとれる。図-6から読み取れる通り，都市の影響による昇温が18時頃から6時頃までの間が顕著であるのに対し，家庭部門のエネルギー消費量は18～22時頃に多い。この両方の影響により，ヒートアイランド現象は夕方の家庭用エネルギー消費に大きく影響するという解釈が可能である。

さらに，ヒートアイランド現象による影響の空間分布を把握するため，メッシュ別に増大率・減少率を算出した（図-20）。この図から，家庭部門においては住宅が存在しない東京湾の埋立地を除けば，都心部を中心にエネルギー消費が減少していること

が読み取れる。一方，業務部門に関しては分布形は複雑であるが，概ね湾岸沿いに千葉から横浜付近まで増大率が大きい地域が広がっていると言える。

7. まとめ

本研究では東京大都市圏を対象とし，都市ヒートアイランド現象が民生部門の空調・給湯用エネルギー消費に与えている影響の定量化を目的とした。このため，まずエネルギー消費原単位の気温による推定式を作成し，その一方で現状の気温分布およびヒートアイランドが生じないと想定した場合の気温分布を推定した。その上で，それぞれの気温分布について，エネルギー消費の空間分布をメッシュ単位で推定し，結果を比較した。その結果ヒートアイランド現象により，総エネルギー消費量は減少していること，家庭部門では暖房・給湯用エネルギー消費の減少，業務部門では冷房用エネルギー消費の増大が大きいこと，夕方から夜にかけて家庭部門において影響が大きいことなどが明らかになった。概算値としては，都心部において最大2.2℃程度の気温上昇が生じていると仮定した場合，空調・給湯用エネルギーの総和は家庭部門において3.6%減少，業務部門において1.3%増大し，両部門をあわせると2.3%減少しているという結果を得た。したがって，ヒートアイランド緩和策の提案は数多いが，エネルギー消費の増大を招く可能性があるため，その点では慎重な検討が必要であると言える。

また、今回の分析結果においては、全エネルギー消費が減少するという以外に、業務部門においてはヒートアイランド現象により通年エネルギー消費が増大していること、夏季は業務・家庭の両部門ともエネルギー消費が増大していることなどが重要である。このため、海陸風の利用や落葉樹による緑化など、夏季に強い冷却効果が得られる対策がとくに有効であると考えられる。また、業務地区が集中する都心部においては、ヒートアイランド緩和策によりエネルギー消費を削減できる可能性が高い。そこで本研究の今後の展望として、こうしたヒートアイランド緩和策のエネルギー消費への影響評価を行なうことがあげられる。これにより現実的な政策・計画に応用可能な成果を導くことができると考えられる。

また、ヒートアイランド現象によるエネルギー消費の増減は、実際にはその都市の気候・風土や都市活動のあり方などにより異なる。例えば、本研究で対象とした東京大都市圏においてはエネルギー消費が減少することが示されたが、より温暖な地域では増大する可能性が高い。とくに、急速な都市化が進行している発展途上国の多くが熱帯に位置することを考慮すれば、決して楽観できる状況ではない。したがって今後、様々な都市においてこうした検討を行う必要があると考えられる。また東京においても、冷房需要が年々増大していることを考慮すれば、将来的には傾向が変わり得るものである。したがって今後こうした評価は継続的に行う必要があると言える。こうしたことから、本研究で提案した手法は一般性があると考えているが、得られた知見に関しては、今後さらに体系的で一貫した調査が必要であることを付け加えておく。

謝辞：本研究を進めるにあたり、慶應義塾大学の清水浩先生、都市防災研究所アジア防災センターの鈴木広隆先生、東京大学の花木啓祐先生、埼玉大学の藤野毅先生にご助言をいただいた。また、東北工業大学の渡辺浩文先生には床面積のメッシュデータを、気象庁気候情報課の高橋俊二先生には数値シミュレーションの結果をそれぞれご提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

本稿は平野が1998年3月に慶應義塾大学に提出した修士論文を加筆・修正したものである。また、本稿の一部は1998年度土木学会環境システム研究論文発表会（アブストラクト審査部門）および、1998年度写真測量学会年次学術講演会において発表した。

本研究において使用した大気汚染常時監視測定局のデータは国立環境研究所環境データベースによる

大気環境時間値データファイルである。

参考文献

- 1) 山下脩二：京浜地域の気候環境の変化，小川一朗 編著：『東京大都市圏の地域変容』大明堂，pp.115～126，1989年。
- 2) 尾島俊雄：都市汚染，空気調和・衛生工学，Vol.64，No.9，pp.729～733，1990年。
- 3) 木村富士男：都市の熱汚染，大気汚染学会誌，Vol.27，No.6，pp.A87～94，1992年。
- 4) Meier, A. and Taha, H.: Mitigation of Urban Heat Islands: Meteorology, Energy, and Air Quality Impacts, *Proceedings of "International Symposium on Monitoring and Management of Urban Heat Island"*, pp.124-163, 1997.
- 5) 一ノ瀬俊明：シュトゥットガルトにおける「風の道」—都市計画で都市気候を制御する試み—，天気，Vol.40，No.9，pp.691～693，1993年。
- 6) 玄地 裕，霞 浩樹，猿田弘行，顧 蔚新，小宮山 宏：地下ヒートシンク冷房を利用した新しいヒートアイランド対策の提案とその可能性の検討，エネルギー・資源，Vol.18，No.5，pp.491～497，1997年。
- 7) 水野 稔：24時間都市の環境をめぐる諸問題—都市のヒートアイランドを中心に—，日本音響学会誌，Vol.49，No.11，pp.832～838，1993年。
- 8) 榎屋治紀：都市とエネルギー循環，環境情報科学，19-2，pp.23～27，1990年。
- 9) 石野友夫：家庭用暖房需要と気温の関係—灯油と電力の競合を考える—，エネルギー・資源学会 第9回 エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，pp.125～130，1993年。
- 10) 須貝康雄，堀部 浩，川瀬太郎：基準需要を利用したニューラルネットによる翌日最大電力需要予測，電気学会論文誌B，Vol.117，No.6，pp.872～879，1997年。
- 11) 渡辺浩文：東京首都圏における熱汚染のメッシュ別定量化に関する調査研究，早稲田大学博士論文，1994年。
- 12) 一ノ瀬俊明，花木啓祐，松尾友矩：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析。環境工学研究論文集，Vol.31，pp.263～273，1994年。
- 13) 守田 優：都市人工熱源の熱環境負荷原単位について，土木学会 環境システム研究，Vol.24，pp.593～600，1996年。
- 14) 平野勇二郎，茅 陽一：関東平野南部における都市気温分布の時空間構造解析，GIS—理論と応用，Vol.6，No.2，pp.1～10，1998年。
- 15) 気象庁：9-4 都市化と気候変動，『異常気象レポート'94』，pp.303～313，1994年。
- 16) 山添 謙，一ノ瀬俊明：東京およびその周辺地域における秋季夜間の晴天時と曇天時のヒートアイランド，地理学評論，Vol.67(A)，No.8，pp.551～560，1994年。
- 17) 総務庁統計局：『平成5年 住宅統計調査報告 第3巻 都道府県編』，1995年。

(1998.10.28 受付)

IMPACT ASSESSMENT OF HEAT ISLAND PHENOMENON ON ENERGY CONSUMPTION FOR AIR CONDITIONING, HEATING AND HOT WATER

Yujiro HIRANO, Yoichi KAYA and Ryosuke SHIBASAKI

The purpose of this research is to quantify the impacts of the heat island phenomenon on energy consumption for air conditioning, heating and hot water supply in the Tokyo metropolitan area. There are many indications showing that energy consumption for air conditioners may increase because of the heat island phenomenon. However, they ignore that energy consumption for heating and hot water supplies may decrease in winter. It is crucially important to take both aspects into account in order to quantify impacts. The results reveal that residential energy consumption decreases, while the commercial energy consumption increases. In addition, the total energy consumption decreases in the Tokyo metropolitan area under present air temperature rise due to the heat island phenomenon.