

都市熱環境モデルを利用した空調エネルギー需要の空間分布推計

ESTIMATION OF THE ENERGY DEMAND FOR AIR CONDITIONING USING THE OUTDOOR TEMPERATURE DISTRIBUTION CALCULATED BY THE URBAN CLIMATE MODEL

上野 賢仁 *

柴田 学 **

谷川 寛樹 ***

井村 秀文 **

Takahito UENO*, Manabu SHIBATA**, Hiroki TANIKAWA*** and Hidefumi IMURA**

ABSTRACT; This paper presents a method of estimating the energy demand for air conditioning in cities, by using a numerical simulation model of urban climate. The grid data of outdoor air temperature distribution were obtained from the numerical calculation results for Fukuoka City, while a simple house model was used to estimate the difference between the outdoor air and room temperatures for each grid. The hourly change of air conditioning load for a typical household was calculated. Then, the load maps were prepared using the digital national land information database, the number of households and the total floor space of households. These maps can demonstrate the estimated amount and the spatial distribution of the energy demand for air conditioning.

KEYWORDS; urban climate, heat island, energy load of air conditioning, house model, numerical simulation, digital national land information

1. はじめに

都市熱環境に関する研究のひとつの目的は、都市化にともなう都市気候の変化がその都市の自然環境条件の変化を通して人間生活にいかなる影響を及ぼすかを明らかにするとともに、その影響の緩和策を検討することである。特に、都市のヒートアイランド現象との関連でかねてから注目されているのが、夏季の日中最高気温の上昇が冷房用エネルギー負荷に及ぼす影響である。しかし、都市気候の変化に関する研究と建物空調のエネルギー負荷に関する研究は、相互に異なる関心に基づいて実施されることが多く、両者を統合化して都市気候の変化が都市のエネルギー需要に及ぼす影響を分析する研究はまだあまり実施されていない。

筆者らは、これまでの研究において、^{1)~3)} 数値モデルによる都市熱環境の解析を試みてきたが、これは、都市内の気温や湿度等の空間的・時間的な変化を数値的に推計することを可能にするものである。他方、建物内部の空調エネルギー負荷は、外気の気温や湿度等と密接な関係があるから、外気条件と室内空調条件とを数値的に設定すれば、空調のエネルギー需要量の推計が可能になるはずである。すなわち、数値モデルによる都市熱環境のシミュレーション結果を、気温・湿度等の空間分布としてだけでなく、空調エネルギー需要の空間分布として面的に表示することが可能となる。様々な条件下で計算して得られる気温・湿度等を空調エネルギーと直接関連付けることができれば、色々な都市気象緩和対策を考える場合の有用な指標にもなり、またその効果についてのさらに進んだ議論や検討の基礎にもなる⁴⁾。これは、ある都市内の市街地の変化、緑地・コンクリート被覆面・水面等の土地利用変化の環境的意味を、エネルギー需要との関係から評価することを可能にするもので、都市レベルでの地球温暖化対策の観点からも意義がある。

本研究では以上の考えから、数値モデルの計算で得られる気温をもとに、簡単な建築モデルを仮定することにより空調に必要とされるエネルギー量（冷房負荷）を見積もることを試みる。ただし、ここでは顕熱負荷のみを考えている。具体的には、福岡市域を解析対象として、外気温（計算気温）と空調温度との差を求め、この結果と仮定した建築モデルと住宅分布情報等から、都市域の住宅の冷房負荷（量）の時間・空間分布図を作成する。現時点では、得られる情報の制約上精度の問題があり現実的なエネルギー消費量を見積もるまでには

* 熊本工業大学土木工学科 Department of Civil Engineering, Kumamoto Institute of Technology ** 九州大学大学院工学研究科（附属）環境システム科学研究センター Institute of Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Kyushu University *** 和歌山大学システム工学部環境システム学科 Department of Environmental Systems, Faculty of System Engineering, Wakayama University

至っていないが、数値モデルによる計算結果を気温・湿度という評価尺度だけでなくエネルギーという指標で議論することの可能性を示す。

なお、都市熱環境とエネルギー消費を関連付けた試みとして平野ら⁵⁾の研究がある。平野らは、統計的手法により気温とエネルギー消費原単位の関係について推定式を求め、関東地域のヒートアイランドがある場合とない場合のエネルギー消費の空間分布を比較し、都市ヒートアイランド現象が空調・給湯用エネルギー消費に及ぼす影響の定量的評価を試みている。本研究の方法は、平野らの研究と比較した場合、数値モデルによる計算情報を利用できる面と、数値情報の整備やGIS技術の利用またはその進歩による発展の可能性があること等の面で利点のある方法と考える。

2. 解析方法

図1に解析の手順を示す。また、図2は解析対象範囲を示す。本研究の計算では、数値モデルの計算格子を基準とし、地域メッシュ統計データ⁶⁾をこれに合わせた。まず、各格子ごとに数値モデルによる計算気温を外気温として与え、住宅の空調温度との温度差を求めた。ただし、ここでは数値モデルによる計算そのものは行わず、筆者らの以前の研究(柴田ら²⁾)で得られている福岡市の1988年(夏)の計算結果を用いた。空調温度は25℃と28℃の2ケースを仮定した。次に、建築モデル(単室モデル)を仮定し、外気温と空調温度との差から1世帯当たりの冷房負荷を求めた。図3に仮定した建築モデルの概略と計算式⁷⁾を示す。空調する部屋の面積は平均床面積の1/5(25m²前後になる)を仮定した。

今回の解析では潜熱負荷は考慮しない。なお、式(1)では透過日射と内部発熱は考慮していない。また、外気温 θ_r には日射透過気温を考慮していない。計算に用いた諸定数は文献値⁷⁾をもとに設定した。これを表1にまとめる。壁、天井、床の熱貫流率の値には、無断熱の木造モルタル外壁

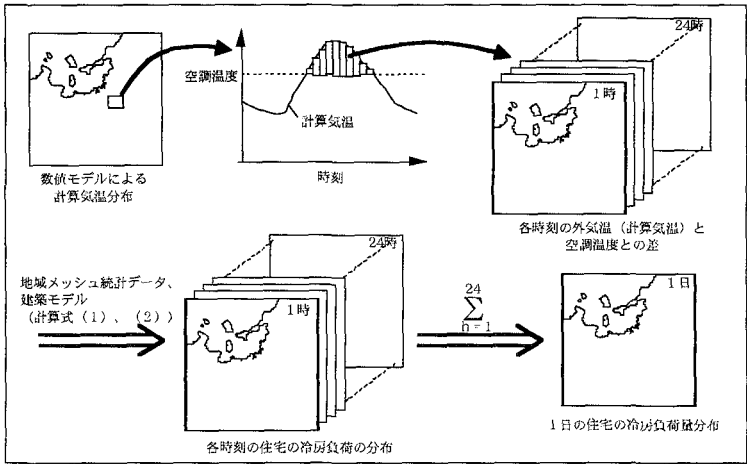
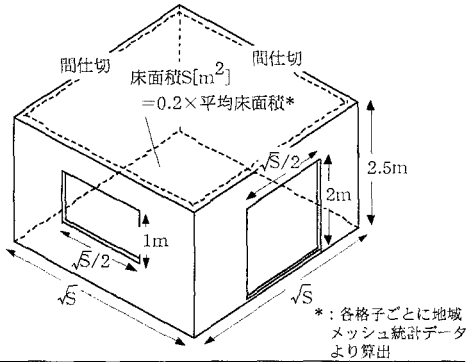


図1 解析手順



建築モデルの冷房負荷(顕熱負荷):
$$QSH = K_T (\theta_r - \theta_c) \dots (1)$$
$$K_T = \sum K_k A_k H_k + c \rho_a V \dots (2)$$

ここに、QSH: 冷房負荷(顕熱負荷) [W/K], K_T : 総熱貫流率 [W/m²K], θ_r : 外気温(計算温度), θ_c : 空調温度(冷房設計温度), K_k : 部位kの熱貫流率 [W/m²K], A_k : 部位kの面積 [m²], H_k : 温度差係数 [-], c : 空気定圧比熱 [J/kgK], ρ_a : 空気密度 [kg/m³], $V = (n \cdot v)$: 換気量 [m³/h] (ただし、n: 換気回数 [回/h], v: 建物内の気積 [m³])。

図3 建築モデルの概略と計算式⁷⁾

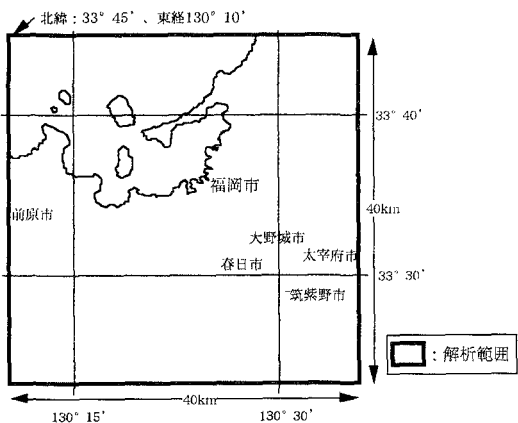


図2 解析対象範囲

と、50mm 断熱の木造モルタル外壁の平均値を用いた。この値は比較的古い木造住宅の値に相当する。得られた1世帯当たり冷房負荷に世帯数を乗じて各格子の各時刻の冷房負荷を計算した。

3. 解析結果

3.1 外気温（数値モデルによる計算気温）と空調温度（仮定）との差

図4は、午前10時の外気温と仮定した空調温度との差の分布を示したものである。この時刻では、空調温度が25℃のとき、市の中心部で外気温との差が4.2℃となっている。同様に28℃のときは1.2℃である。この図から、空調温度が25℃の場合は冷房の必要がある範囲は福岡市のほぼ全域であることがわかる。一方、空調の温度を28℃にすれば、空調が必要な領域は市中心部の比較的狭い範囲に限られることがわかる。この結果から、単純に考えれば、空調温度の設定値が都市域全体の空

表1 計算に用いた諸定数*

定数	値 [単位]	備考
壁、天井、床の熱貫流率	1.68 [W/m ² K]	
ガラス窓の熱貫流率	6.47 [W/m ² K]	
$c \cdot \rho_a$	0.339 [W/m ² K]	
居室と外気の温度差係数	1.0 [-]	
居室と床裏の温度差係数	0.6 [-]	
間仕切の温度差係数	0.7 [-]	** 注
換気回数 n	1.5 [回/h]	} *** 注
建物内の気積 v	25 [m ³]	

*: 文献7) を参考にして設定。**: 居室と居室以外の温度差係数。
***: $V (=n \cdot v)$ はモデルの体積 (2.5 S) でも良い。

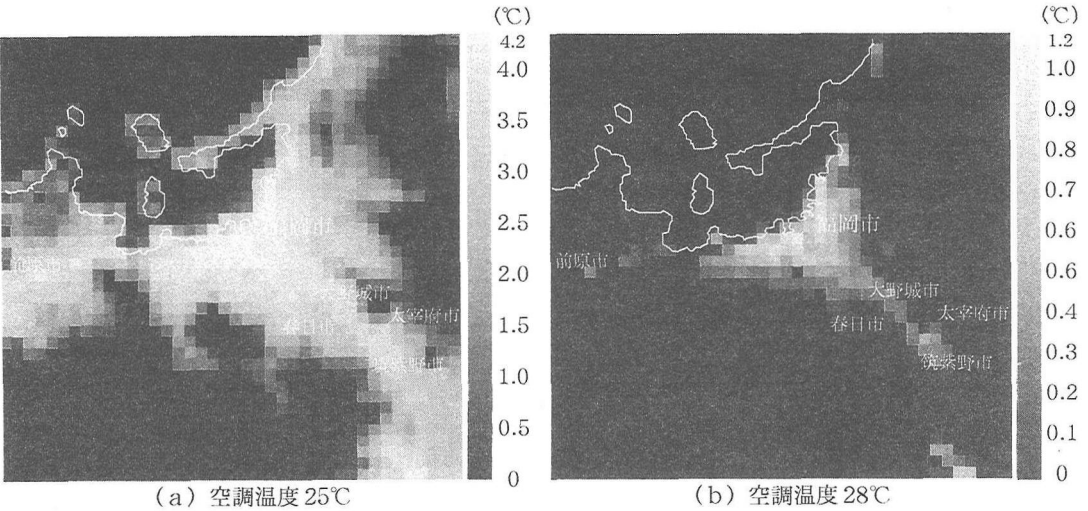


図4 外気温（数値モデルによる計算気温）と空調温度（仮定）との差の分布（午前10時）

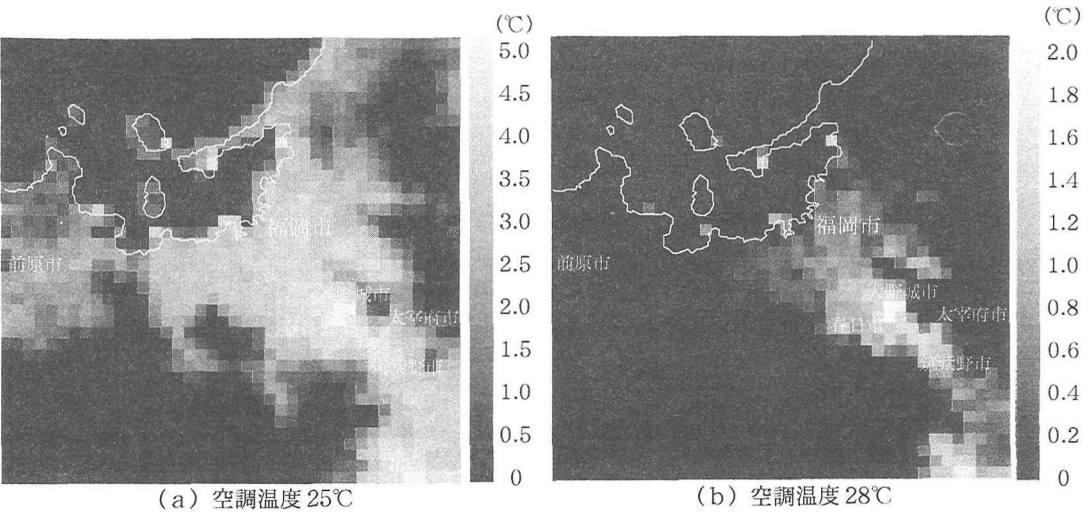


図5 外気温（数値モデルによる計算気温）と空調温度（仮定）との差の分布（正午）

調エネルギーの量または空間的な広さを左右することが良く見て取れる。

同様に、図5は正午の温度差の分布である。数値モデルによる計算結果では、正午の場合は市中心部よりもむしろ内陸部（大野城市付近）に高温域が生じているため、空調温度が25℃のときこの周辺で5.0℃の温度差となる。また、空調温度28℃の場合は午前10時のときと同様に空調が必要な領域はかなり狭まるが、その位置が内陸側に移っていることがわかる。この結果は、当然であるが前報²⁾の数値モデルによる計算結果に対応したものとなっている。数値モデルの計算結果から、福岡市の場合、昼間の時間経過とともに海風が生じ、海岸付近に位置する都心部の高温化が比較的和らいでいるものと思われる。

ここでは午前10時と正午の結果だけを示したが、両者の比較だけでも、時間による気温差の分布形状が随分異なっていることがわかる。

3.2 住宅の空調に必要なエネルギー量（冷房負荷）の分布

図6は、地域メッシュ統計より得られる「世帯数」と「住宅に住む一般世帯の総延べ面積」を数値モデルの計算格子に合わせて比例配分したものである。なお、数値モデルの計算対象年に近い平成2年の国勢調査では、住宅の総床面積に相当する情報が得られないため、平成7年のものを用いた。福岡市では、市の中心部で1格

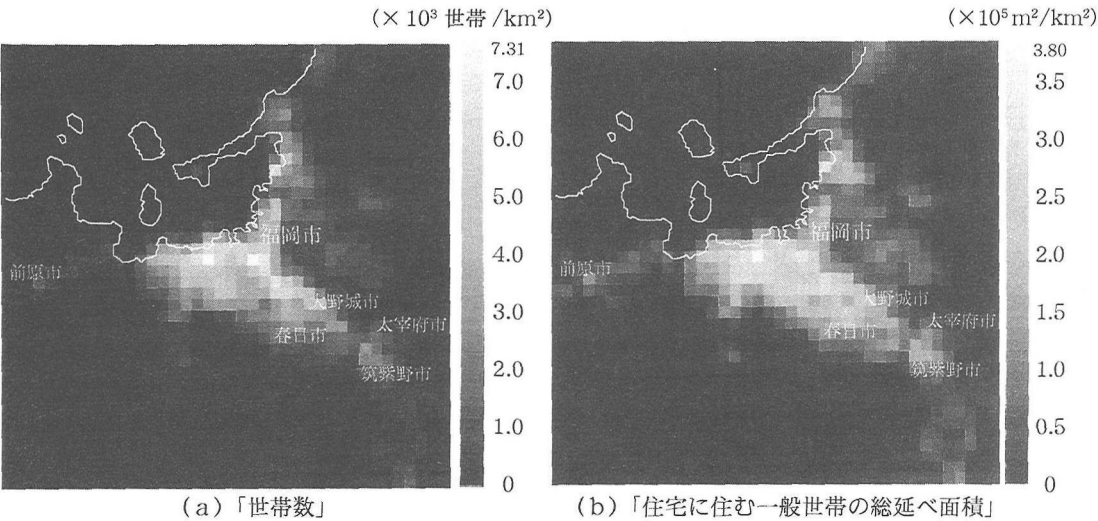


図6 地域メッシュ統計²⁾をもとに作成した1km×1km格子のデータ

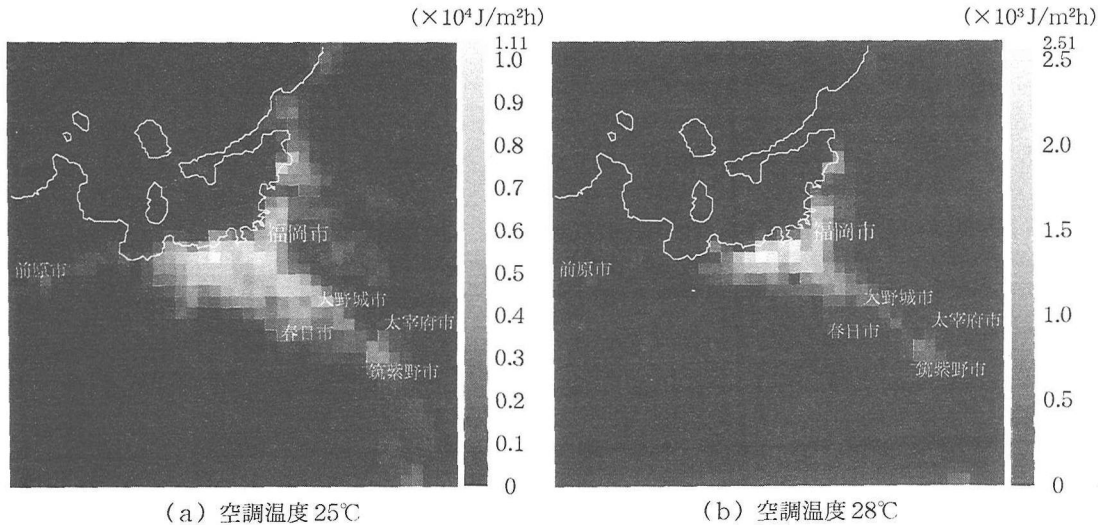


図7 住宅の冷房負荷の分布（午前10時）

子 (1km²) 当たり最大7,311 世帯である。総述べ面積についてもほぼ同様の分布形状で、市中心部で1 格子 (1km²) 当たり最大 $3.80 \times 10^5 \text{m}^2$ である。この両データから1 世帯当たりの平均床面積を求めた。空調する部屋の面積は、前述の通りこの1/5 と仮定している。

図7は、図4で示した温度差から仮定した建築モデル (式 (1)、(2)) を用いて求めた午前10時の住宅の冷房負荷の分布である。なお、計算では格子単位 (1km²) で求めたが、この図では1m² 当たりで示している。冷房負荷は、空調温度25℃の場合、市中心部で最大 $1.11 \times 10^4 \text{J/m}^2\text{h}$ である。一方、28℃の場合は最大でも $2.51 \times 10^3 \text{J/m}^2\text{h}$ であり、25℃の場合の約4分の1程度である。また、その範囲もかなり狭くなっている。

図7と同様に、図8は正午のものである。正午の場合、空調温度25℃で最大 $9.60 \times 10^3 \text{J/m}^2\text{h}$ 、28℃で $2.74 \times 10^3 \text{J/m}^2\text{h}$ である。28℃の場合は、25℃の場合の値の約3分の1である。また、冷房負荷が大きい地点は午前10時に比べて内陸側に移っている。

図9は、住宅の1日の冷房負荷 (量) の分布である。この図は冷房負荷を示しているが、この分布図の値を空調機器の熱効率で除してやれば、福岡市域の空調 (冷房) に必要とされるエネルギー量の分布を概略であるが見積もることが可能である。ただし、この値は全世帯を一律に扱っており、また住居者の在不在を考慮して

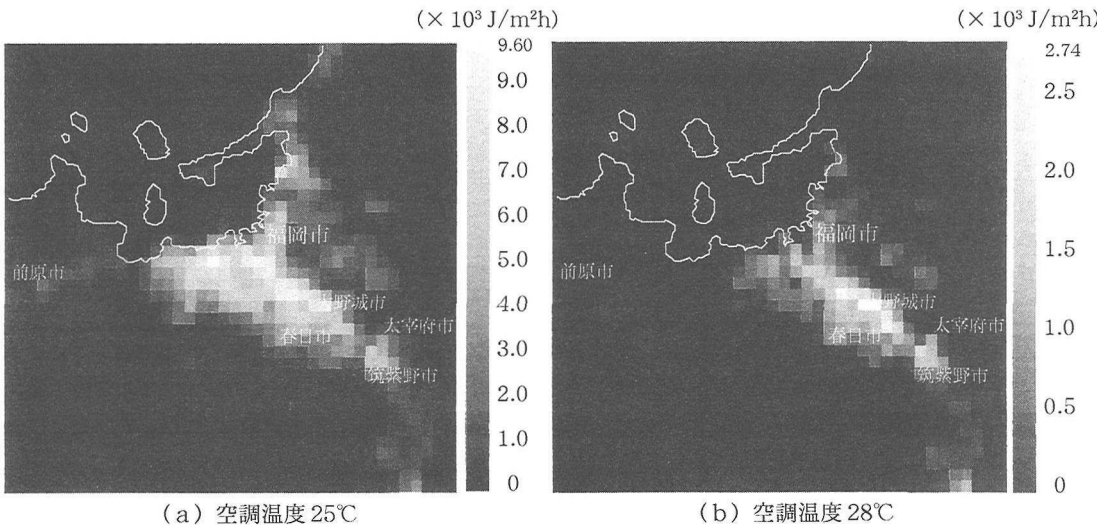


図8 住宅の冷房負荷の分布 (正午)

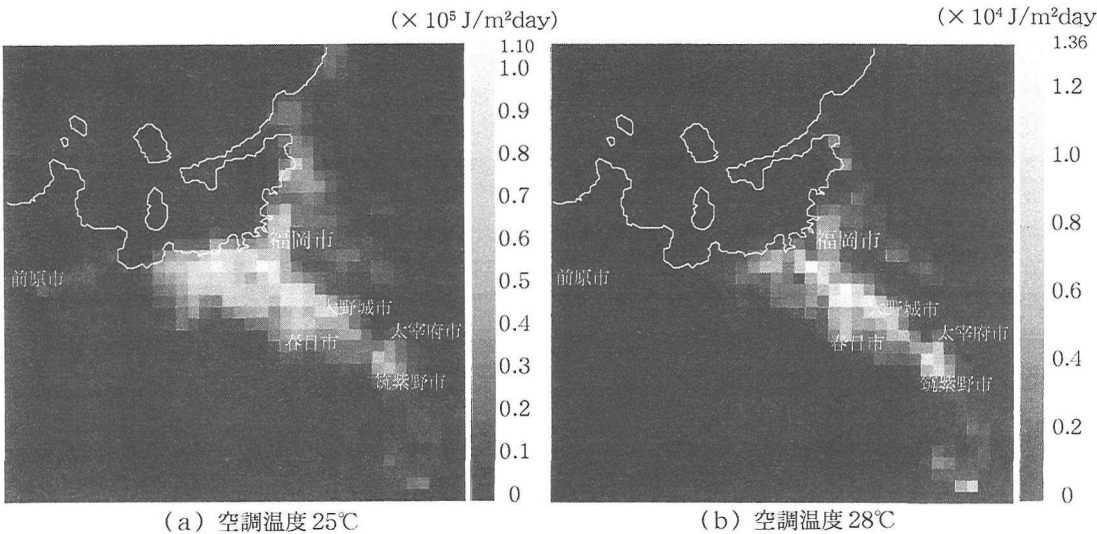


図9 住宅の1日の冷房負荷 (量) の分布

いないため、特に昼間の値が多めに見積もられていると考えられる。また逆に、潜熱負荷を考慮していない分実際の冷房エネルギーよりも小さい値になっていると考えられる。

図9から住宅の1日の冷房負荷の分布を見ると、空調温度を25℃とした場合、最大 $1.10 \times 10^5 \text{ J/m}^2\text{day}$ でその位置は市の中心部よりやや内陸である。また、28℃とした場合では最大 $1.36 \times 10^4 \text{ J/m}^2\text{day}$ で、25℃の場合よりもさらに内陸に位置している。25℃と28℃では最大値に1桁の違いが生じている。1日の冷房負荷の分布形状は、先に示した午前10時と正午の分布と比較すると正午の形状に近い。

4. おわりに

本研究では、福岡市域を対象事例として、数値モデルによる計算気温を外気温として仮定した空調温度との差を求め、この温度差と建築モデルおよび地域メッシュ統計データを用いて空調エネルギー（冷房負荷）量の分布図作成を試みた。これは、空調機器の効率を考えていない値なので、これを空調機器の熱効率で除すことによって空調（冷房）に必要な実際のエネルギー量の分布の概略を推定することができる。本研究で作成した分布図を用いることによって、数値モデルによる計算気温を従来の気温や湿度だけでなく空調用エネルギー需要の空間分布という指標で議論することの可能性を示すことができた。なお、今回の解析では顕熱負荷のみを取り扱っており、潜熱負荷を考慮に入れた場合は空調に必要なエネルギー量はさらに大きな値となる。

現時点では、利用可能な統計情報が限られていること、住宅の空調機器の稼働パターンを考慮していないこと、潜熱負荷を考慮していないこと等の多くの課題が残されている。このため、得られた分布図は実際に消費される空調エネルギーを十分再現しているとは言えないが、改善・改良によって今後の発展が期待できる点も多い。今回の解析では簡単な建築モデルを用いたが、近年のGIS技術の進歩・発展を考えれば今後より詳細なモデルの導入も可能である。また、人の移動やライフスタイル等を考慮して、空調機器の稼働と関連付ければ、現実のエネルギー消費量分布または時間変化に近い結果が得られるものと思われる。

本研究で用いた方法の今後期待される発展、改善および改良の幾つかを次に挙げる。1) 建築物モデルを複数考えることにより、数種類の建築物について別々に議論がすることが可能になる。建築学の分野では既に詳細なモデルが用いられており、この成果を活用すればさらに緻密なものにすることが可能になろう。2) 建築モデルとして事業所を考えれば、住宅だけでなく事業所も含めた空調エネルギーの検討が可能になる。3) 潜熱負荷についても容易に導入可能である。4) 市民の生活パターンを計算に取り入れることにより、ライフスタイルを関連付けた検討が可能になる。5) 現在、GIS技術および情報整備が急速に進んでおり、これを最大限活用すれば精度向上が図れる。6) 都市熱環境をエネルギー量という尺度・指標で捉えることが可能になるため、他の環境問題（特にエネルギー問題）と同レベルで議論できる。7) 色々な計算条件（季節等）の基で空調エネルギー量を検討できる。

《参考文献》

- 1) 大濱隆司、金子慎治、上野賢仁、井村秀文：三次元クロージャーマodelによる都市熱環境構造の解析－福岡市周辺地域への適用－、環境システム研究、Vol.23、pp.214-221、1995。
- 2) 柴田学、三浦孝浩、上野賢仁、井村秀文：モデル計算による都市熱環境の歴史的変化の検討：福岡市の例、環境システム、Vol.26、pp.289-296、1998。
- 3) 上野賢仁、井村秀文：数値モデルによる熊本市の熱環境解析、環境システム、Vol.26、pp.705-710、1998。
- 4) 上野賢仁、井村秀文：都市熱環境解析システムに関する研究－熊本市のケーススタディー－、環境システム研究 Vol.24、pp.569-573、1996。
- 5) 平野勇二郎、茅陽一：都市ヒートアイランド現象の民生用エネルギー消費への影響、環境システム研究 Vol.26、pp.527-531、1998。
- 6) 日本統計協会：国土庁地域メッシュ統計 平成7年国勢調査表67（住宅に住む一般世帯数）、表72（住宅に住む一般世帯の総延べ面積）。
- 7) 松尾陽、村上周三、宮田紀元、鎌田元康、坂本雄三：「現在の気象テクノロジー 7 建築と気象」、pp.17-69（第2章）、朝倉書店、1993。