

(6) 東京における都市気温の時空間分布推定と
その熱環境評価への応用

Estimation of Temperature Distribution and Its Application to
Evaluation of Urban Thermal Environment in Tokyo

平野勇二郎*, 一ノ瀬俊明**, 茅 陽***

Yujiro HIRANO*, Toshiaki ICHINOSE** and Yoichi KAYA***

Abstract; This paper describes a method to estimate the spatio-temporal distribution of urban temperature and its application for evaluation of the urban thermal environment in the Tokyo metropolitan area. First, formulae to estimate the distribution of monthly and hourly mean temperatures were developed through regression analysis, using geographic conditions at meteorological stations, and then mesh temperature data were generated. Second, degree day maps based on mesh temperature data were made and energy consumption for heating and cooling of residential buildings was estimated for each mesh. It was found that energy consumption per family for heating is lower in coastal areas compared to inland. In case of cooling, the energy consumption per family is higher in the central part of Tokyo compared to other areas, because of climatic conditions.

Key words; urban temperature, urban thermal environment, spatio-temporal distribution, Tokyo metropolitan area

1. はじめに

都市における人間活動は快適性や建築設計、空調需要など様々な形で気温に依存する。一方で、気温もまた都市活動に依存することがよく知られており、都市の環境管理において都市気温はきわめて重要な要素である。

このため、都市気温の時空間分布を把握する手法として物理モデルによる数値シミュレーションを行った例は数多く¹⁾²⁾、現象の解明や予測評価という観点からは、きわめて有効な成果が得られているといえる。しかしながら、こうしたシミュレーションは特定の期間・時刻の気象条件を再現・予測する手法であり、長期間の平均値などにより示される地域の気候特性の評価とは区別する必要がある。

気候条件の時空間的な把握や情報整備の方法としては、観測値のメッシュへの内挿が有効である。とくにメソスケールの気温分布に関しては、すでに気候値データベースが作成され³⁾⁴⁾⁵⁾、農業計画や気象災害の予防などに有効な情報を提供している。

こうした気候情報の整備は、人間活動がとくに活発な都市部においてとりわけ重要であると言える。このため、都市のスケールにおいても、メッシュ単位の気温分布推定が行なわれた例があ

* 東京大学 工学系研究科 社会基盤工学専攻 (Department of Civil Engineering, University of Tokyo)

** 国立環境研究所 地球環境研究センター (CGER, National Institute for Environmental Studies)

*** 慶應義塾大学 政策・メディア研究科 (Media and Governance, Keio University)

り⁶⁾、有効な結果が得られている。ただしこれは空調設計に特化した目的で作成されているため、夏季・冬季の日最高・最低気温分布などに限定され、時間変化が示されていないといった問題点もある。このため現時点では必ずしも、空調用エネルギー消費量や快適性の評価などに幅広く活用されているとは言えない。

こうした問題意識から、著者らは気候条件としての都市の気温分布の把握やそのエネルギー消費への影響などについて研究を進めている。文献⁷⁾において著者らは、重回帰分析により都市気温の構造解析を行い、またその重回帰式から気温分布を推定する方法を提案した。本稿ではその気温分布推定を高精度化し、これにより月別・時刻別の気温分布をメッシュ単位で推定する。また、この気温メッシュ推定値の応用例として、暖房・冷房デグリーデーの分布の推定や、それに基づくエネルギー消費原単位の算出など、熱環境評価の一例を示す。

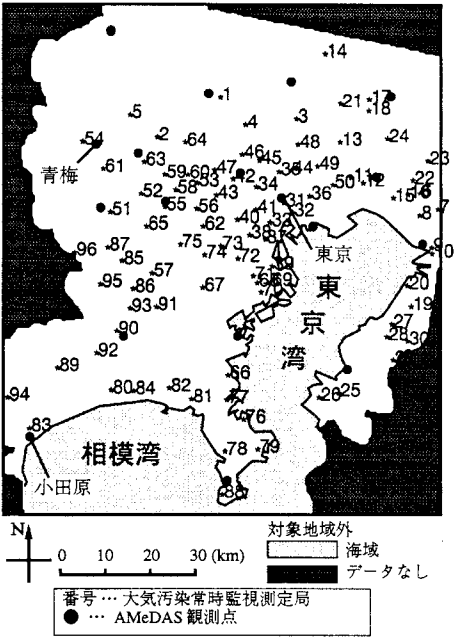


図-1 対象地域と観測点の分布

2. 方法および対象地域、利用データ

本研究では文献⁷⁾と同様に東京およびその周辺地域を解析対象地域として選択した(図-1)。

気温分布の推定方法を図-2に示す。まず、気温への影響が大きいと考えられる様々な地理情報(気候因子)を説明変数、気温を被説明変数とし、観測点周辺の地域条件により観測点における気温を説明する重回帰式を作成する。次にそれぞれの説明変数をメッシュに展開し、この重回帰式を各メッシュに適用することにより、メッシュ単位で気温推定値を得る。さらにこの残差を補正した上で、精度の検証を行なう。

気温観測データは、大気汚染常時監視測定局の1984~1993年の10年間の月別・時刻別の平均値を用いた。これは気温減率0.6(℃/100m)として高度補正してある。観測点には「測定局コード」として8桁の数値が与えられているが、本研究では簡略化するため1~96の通し番号をつけた。さらに、精度検証のために気象庁観測のAMeDASによる気温データを用いた。図-1に、大気汚染常時監視測定局およびAMeDASの観測点の分布をそれぞれ番号および黒丸で示す。

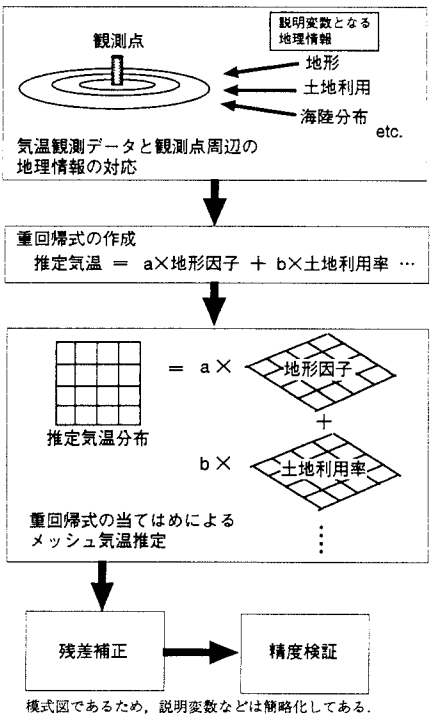


図-2 メッシュ気温推定の方法

本研究で用いた説明変数を表-1に示す。

地形のラプラシアンとは盆地の深さなどを表現するもので、ここでは周辺の平均標高との差を用いた。また、6～8の海岸からの距離の対数は、海風の影響を近似するために用いたものである。NDVIとはリモートセンシングデータを用いて算出する植生の指標である。なお、被説明変数は長期間の平均気温であるため、NDVIおよび10～12の土地利用率は対象期間内に変化している可能性があるが、この影響は無視した。

これらの1～12の説明変数の選択理由や計算方法などに関するさらに詳細な検討は文献7))においてすでに行われている。本稿はこれらの影響評価ではなく、気温の推定値を得ることのみが目的であるため、詳細な説明はここでは省略する。計算方法は文献7))と全く同じである。また、文献7))は気温影響要因の評価が目的であったため多重共線性に関する検討を行ったが、本稿ではこれも省略し、表-1に示した説明変数をすべて用いた。

また、本稿では新たにリモートセンシングによる長波放射の波長帯のデータ（以下、熱赤外バンドとよぶ）を説明変数に加えた。気温は地表面温度の影響を受けていること、熱赤外バンドは大気放射の影響もを受けていることから、熱赤外バンドは気温と強い相関がある⁸⁾。このため、気温推定のみを目的とした場合、これは有力な説明変数であると考えられる^{註1)}。この計算方法等に関して次章で検討する。

3. 熱赤外バンドに関する検討

本研究で用いた熱赤外バンドのデータは、1993年10月28日のLandsatTMのBand6である。本来ならこれは季節変化するため多時期の衛星データを用いることが適切である。しかしながら、対象地域全域に雲が全くないデータは非常に入手困難であるため、本研究では入手可能であった1 時期のデータのみを用いた。

気温はその周辺の地表面の影響を受けるため、観測点を含むメッシュだけでなく、その周辺のメッシュを含む計算値を説明変数とすることが適切である。地表面の気温への影響は、観測点からの距離が遠くなるほど減退すると考えられる。こうした距離による影響の減退は、式(1)のように指数関数で近似できることがすでに示されている⁷⁾⁹⁾。

$$\overline{I_p} = \frac{\sum_m e^{-B \cdot d_{mp}} \cdot I_m}{\sum_m e^{-B \cdot d_{mp}}} \tag{1}$$

$\overline{I_p}$: 観測点 p 周辺の熱赤外バンドの加重平均値
 I_m : 熱赤外バンドの m 番目のメッシュのデータ
 d_{mp} : m 番目のメッシュから観測点 p までの距離 (km)
 B : 影響を受ける地表面の空間規模を設定するパラメータ

これは、熱赤外バンドのデータはメッシュデータであるため、気温観測点周辺の各メッシュからその観測点までの距離により重み係数を決定し、それを用いて観測点ごとに周辺の各メッシュ

表-1 本研究で用いた説明変数

No.	説明変数
1	緯度
2	経度
3	傾斜
4	地形のラプラシアン
5	海岸線からの距離
6	相模湾からの距離(対数)
7	東京湾(西側)からの距離(対数)
8	東京湾(東側)からの距離(対数)
9	NDVI
10	人工被覆率
11	農地率
12	緑被率
13	熱赤外バンド

の値を加重平均するという方法である。ここでは B 値を変化させ、熱赤外バンドと気温の相関係数の変化を調べた(図-3)。対応する気温データは、他の誤差要因をできる限り除去するため 10 年間の平均値ではなく、熱赤外バンドのデータが観測された1993年10月28日9時37分の気温を同日の9時および10時の気温データから内挿して用いた。この結果、相関係数は $B=8$ で最大値($R=0.655$)を得た。この時の散布図を図-4に示す。はずれ値があるが、全体としては関係は直線的である。また、1984~1993年の10月9、10時の平均気温を用い、同様に $B=8$ として熱赤外バンドとの相関係数を計算したところ $R=0.547$ であり、やや低めであるが有意水準1%で有意であった。

以上の検討結果から、 $B=8$ として式(1)により加重平均した熱赤外バンドを説明変数として加えた。

4. 重回帰式による気温の時空間分布推定

表-1に示した説明変数を用い、月別・時刻別の288の重回帰式を作成した。また、この精度を検証するために、それぞれの重回帰式の平均二乗誤差を計算した(図-5)。誤差は冬季の午前と夏季の昼過ぎに大きく $0.4\sim0.5^{\circ}\text{C}$ 程度、夏季の夜間に小さく $0.2\sim0.3^{\circ}\text{C}$ 程度である。なお、年間の平均値は 0.32°C であった。また、文献7)の結果と比較すると平均二乗誤差は冬季日中に最大 0.1°C 程度減少しているため、本稿で行なった検討は有意義であったと言える。

また、気温の日変化パターンについて推定精度を検証するため、観測地点ごとに各月の推定値と実測値を比較した。ここでは、ごく一例であるが、図-6に観測地点1の1月の推定値と実測値の変動パターンを示す。また、96地点・12ヶ月の合計1152事例について相関係数を計算した結果、7割以上が $R=0.998$ を超えた。 $R=0.99$ を下回ったのはわずか32事例であった。相関係数が非常に高いのは、図-5で示した推定誤差と比較して気温の時間的な変動が大きいためであり、重回帰式は時間的な変動パターンに関しては十分によく表現できるものと考えられる。

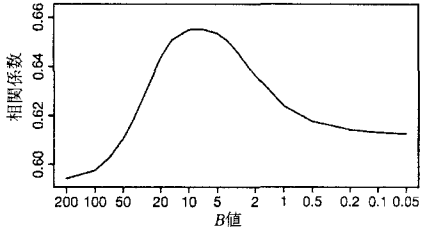


図-3 B 値と相関係数の関係

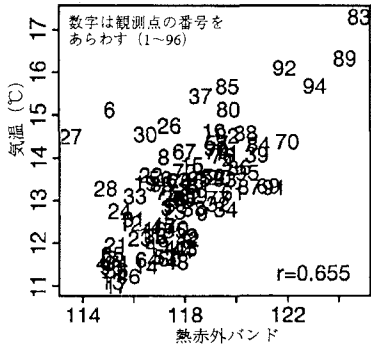


図-4 熱赤外バンドと気温の散布図

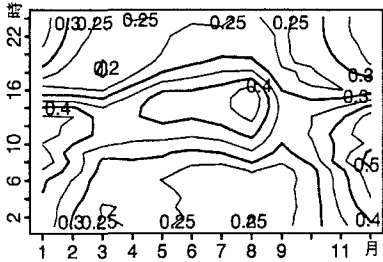


図-5 重回帰式の平均二乗誤差 ($^{\circ}\text{C}$)

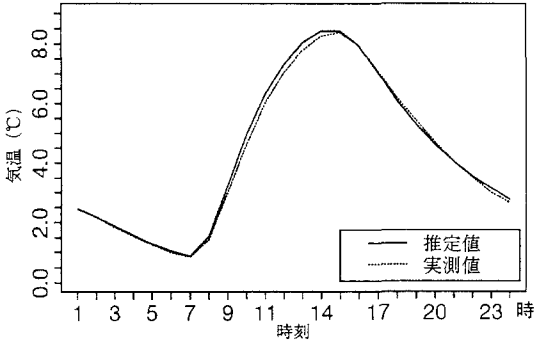


図-6 日変化パターンの推定精度 (1月、観測点1の例)

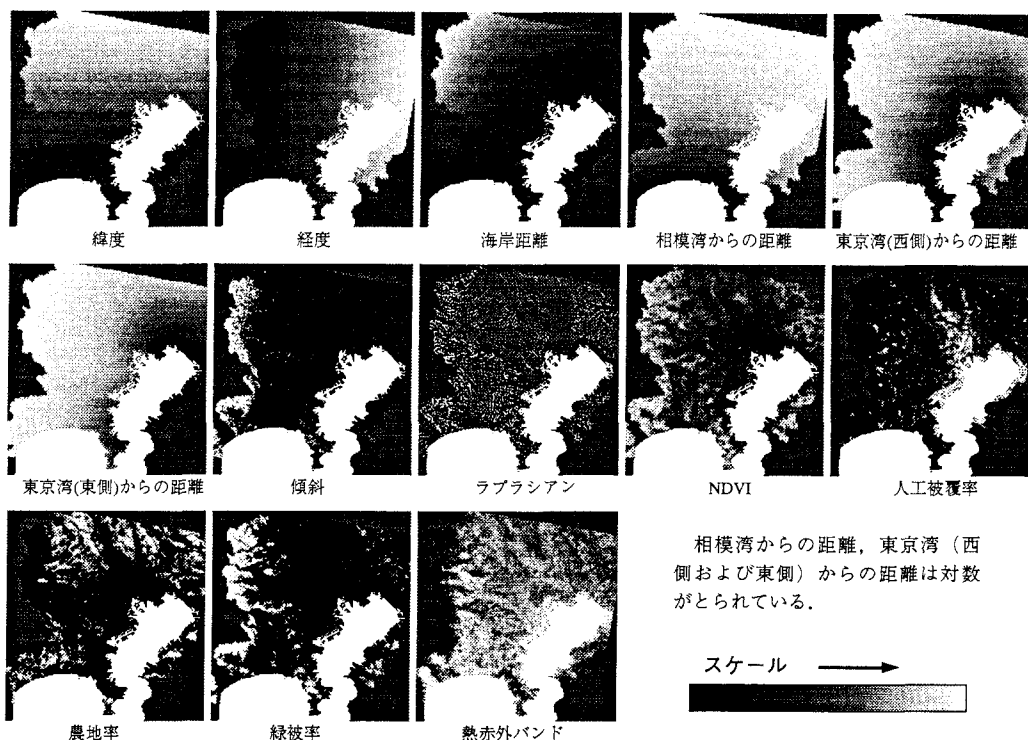


図-7 各説明変数のメッシュデータ

次に、重回帰式作成に用いた説明変数をメッシュに展開した（図-7）。メッシュサイズは文献7）と同様に300mと設定した。熱赤外バンドは、各メッシュの中心から前章において検討した距離による通減関数（式(1)）を与えて計算した。また、表-1の1～12の説明変数のメッシュへの展開は全て文献7）に従った。

その上で、重回帰式をそれぞれ説明変数のメッシュデータに適用することにより、気温をメッシュ単位で推定した。また、得られた気温推定値は前述した通り、高度補正されたものであるため、前述した気温減率により高度の影響を再び付加した。この例として、5月の15時の推定結果を図-8に例示する。

5. 残差の補正

前章で得られた気温分布は重回帰式による推定値であるため、与えた説明変数で説明しきれなかった変動は、重回帰式の残差として生じている。これを補正するためには、残差をメッシュに内挿して気温推定値に足しあわせるという方法が妥当であると考えられる。

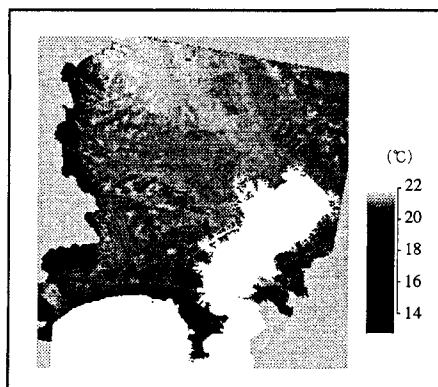


図-8 重回帰式による推定気温分布（5月15時の例）

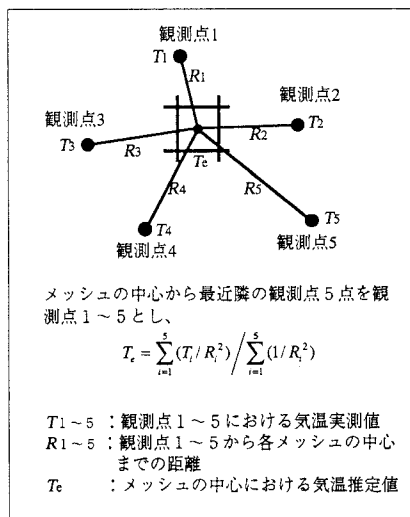


図-9 残差の内挿方法

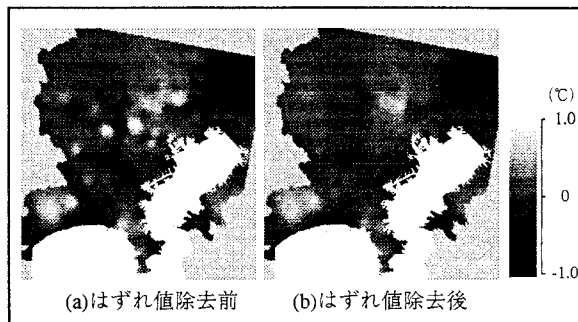


図-10 残差分布

そこでまず、図-9に示す内挿法により月別・時刻別に残差を内挿した。ここでは比較的大きな残差が生じた5月15時の例を図-10(a)に示す。この図から、周囲と比較し、不自然に残差が大きくなっている点があることがわかる。

この残差は観測点の設置状況などによる局所的な変動である可能性が高い。本研究で用いた大気汚染常時監視測定局のデータは、観測点により地上高度や地被の状態が不統一である¹⁰⁾。このため、観測点周辺の局所的な変動が含まれている可能性があり、こうした空間代表性のない残差を前述の方法で補正すると、誤差が拡張される可能性がある。したがって、本来なら極端に観測条件が異なる点を除去する必要があるが、わずかな観測条件の差異は数多くあり、客観的にそれを判断するのは困難である。そこで簡便な方法として、図-11に示す方法により空間分布を考慮した形ではずれ値を除去した(図-10(b))。同様の補正を月別・時刻別の残差分布に関して行い、それを前章で得た気温推定値にメッシュ単位で足し合わせるにより、月別・時刻別の残差補正後の気温のメッシュ推定値を得た(図-12)。

なお、本章の図-9や図-11の手法はいずれも簡便法であるため、本来はまだ検討の余地がある。しかし気温の変動全体の中で残差の変動幅は非常に小さいので、この重要度は低いと判断し、ここでは省略する。この妥当性に関しては次章で検討する。

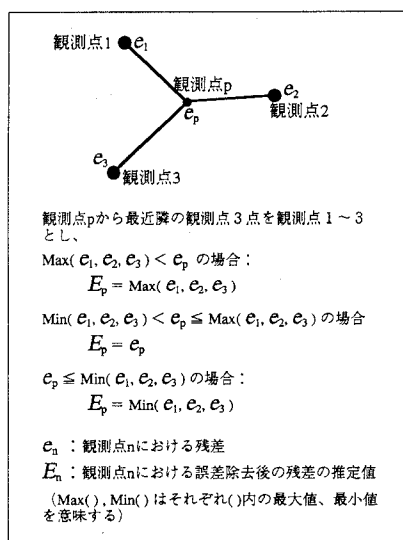


図-11 はずれ値除去の方法

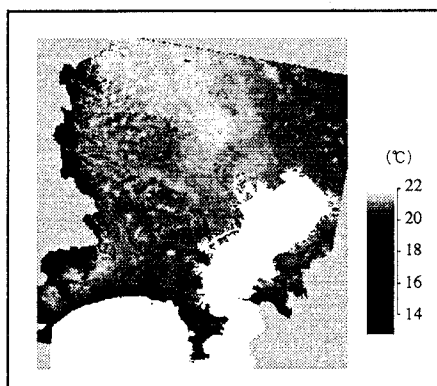


図-12 補正後の気温分布 (5月15時の例)

表-2 平均二乗誤差 (°C)

	2月	5月	8月	11月
補正前	0.536	0.563	0.582	0.585
補正後	0.511	0.563	0.580	0.562

6. 推定精度の検証

次に、この気温の時空間分布の推定精度について検討した。メッシュ推定の精度を検証するためには、推定に用いたデータとは異なる観測点におけるデータを用いる必要がある。そこで、気象庁観測のAMeDAS観測点による気温データを検証用データとして用いた。実際には、AMeDAS観測点は地上の露場に設置されているのに対し、大気汚染常時監視測定局は観測条件が不統一であるが建築物の屋上などに設置されていることが多く、これらと比較することは厳密ではない。しかしながら本研究で対象期間とした10年間の体系的な観測データは、一般に利用できるものは他にないため、このデータ上の制約からAMeDASデータを用いた。そこで、図-1に黒丸で示した18箇所のAMeDAS観測点のデータを用い、2、5、8、11月についてそれぞれ1984～1993年の時刻別の平均値を計算した。また、残差補正前と補正後のそれぞれの気温推定値のメッシュから、AMeDAS観測点が含まれるメッシュの値を抜き出し、これらと比較した。

まず、2、5、8、11月の平均二乗誤差を計算した(表-2)。この結果、残差補正前と補正後の平均二乗誤差を比較すると、補正後の方が小さいため、前章の残差補正の手法は有効であることが示唆される。しかしながらいずれも0.5～0.6°C程度となっており、重回帰式作成時の平均二乗誤差(図-5)と比較すると大きい。これは、気温推定の誤差だけでなく、両データの観測条件の違いによる差が含まれている可能性が高いため、絶対値に関してはこれ以上の詳細な検討は困難であると考えられる。

次に、日変化パターンの推定精度を検証するため、東京(大手町)、青梅、小田原のAMeDASデータと、これらを含むメッシュの2、8月の日変化パターンを比較した(図-13)。この結果からも、残差補正により推定精度が向上していることがわかる。また、図-13と同様に18箇所のAMeDAS観測点における2、5、8、11月のそれぞれの日変化パターンについて、18箇所×4ヶ月の合計72の相関係数を計算した。この結果、残差補正後のメッシュに関しては8割以上に相当する59事例が $R=0.99$ を超えた。したがってこの気温推定結果は、時間的には変動パターンをよく表現していると考えられる。

以上の検討の結果、気温推定値はメッシュデータとして様々

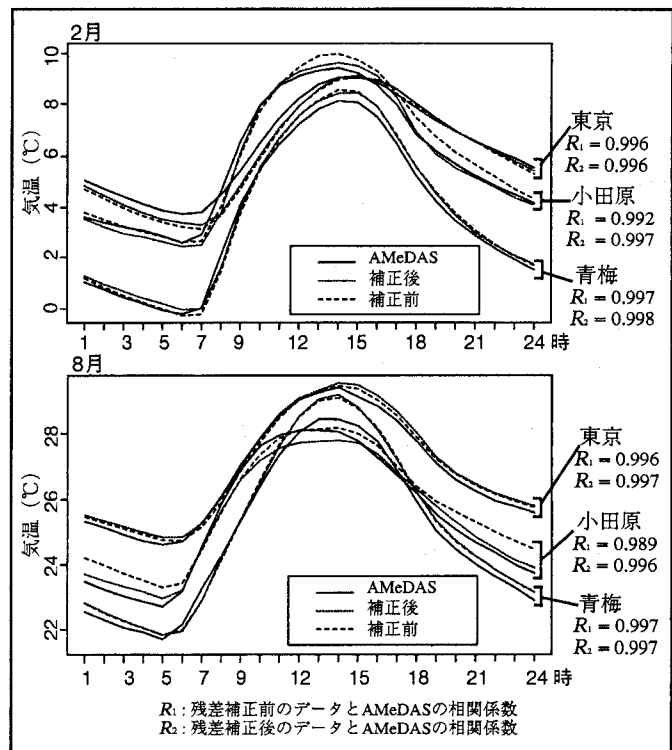


図-13 日変化パターンの精度検証(上段:2月,下段:8月)

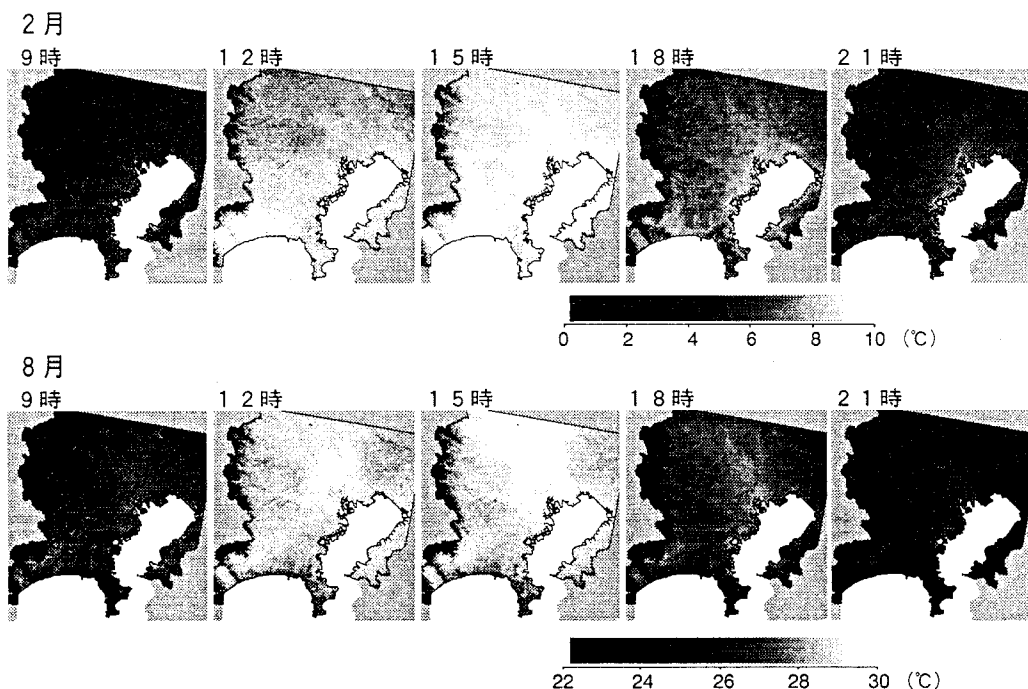


図-14 気温メッシュデータの例

な用途に利用できる可能性が高いと考えられる。ただし、これは観測高度が不均一な大気汚染常時監視測定局のデータに基づくものであり、AMeDASによる地上レベルの気温と比較すると平均二乗誤差 $0.5 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 程度の誤差があることは、データを利用する上で注意する必要がある。

図-14に、2、8月の9、12、15、18、21時のデータを例示する^{註2)}。これらは、藤部¹¹⁾や谷本・石野⁶⁾が示した等温線図と比較してもよく一致していると言える。この図から、夜間に都心部が周囲と比較して高温であることや、夏季日中の海岸部の昇温が遅く、内陸では埼玉県南部まで高温域が広がっていること、冬季は相模湾付近が特に温暖であることなどが読みとれる。

7. デGREEデー分布と空調用エネルギー消費の評価

次に、前章までにおいて作成した気温メッシュ推定値の都市熱環境評価への応用例を示す。

地域の気温条件を評価する上で、空調用エネルギー消費量を推定する指標として、デGREEデーを用いることが有効である¹²⁾。これは地域の寒暖の程度をあらわすため、都市の快適性などとも強い対応関係があると考えられる。そこで、ここでは前述した気温推定値を用い、デGREEデーの分布の推定を試みた。

デGREEデーとは、日平均気温がある基準温度を超えた日の日平均気温と基準温度の温度差の積算値である。これは、通常は日別値を用いて計算するため、本研究で扱った月別・時刻別の平均気温から直接は算出できない。

そこでまず、日別値に基づく通常のデGREEデーと、月別には日平均気温が一定であると仮定

した月別・時刻別平均気温に基づくデGREEデーを全観測点について算出して比較した(図-15)。前者は年間デGREEデーの1984～1993年の平均値であり、後者は1984～1993年の月別・時刻別平均気温に基づくものである。この結果、この両者は値には違いがあるものの、対応関係は直線的であることがわかる。この回帰式は、

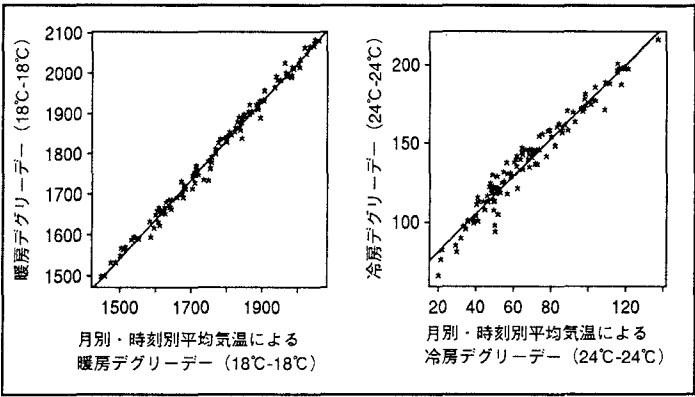


図-15 通常のデGREEデーと平均値によるデGREEデーの関係

$$D_{18-18} = 86.54 + 0.970 Dm_{18-18} \quad (R=0.995)$$

$$D_{24-24} = 57.70 + 1.187 Dm_{24-24} \quad (R=0.978)$$

(2)

D_{18-18} : 日別値による暖房デGREEデー (℃)
 Dm_{18-18} : 月別時刻別平均値による暖房デGREEデー (℃)
 D_{24-24} : 日別値による冷房デGREEデー (℃)
 Dm_{24-24} : 月別時刻別平均値による冷房デGREEデー (℃)

であった。そこで、本研究において作成した気温推定値の各メッシュについて月別・時刻別平均気温に基づくデGREEデーを算出し、式 (2) からデGREEデーの分布をメッシュ単位で推定した(図-16)。

この図から、暖房デGREEデーは沿岸部では低く、内陸部では高いこと、冷房デGREEデーは都心部が高く、郊外は低いことなどが読み取れる。海は熱容量が大きいので夏季は冷却効果、冬季は昇温効果が生じるのに対し、都市域は夏季・冬季とも昇温効果が生じるため、このような分布になったと考えられる。ここで作成したデGREEデー分布図は、地域の立地条件の評価などに有益な情報を提供するものであると考えられる。これは、本研究において作成した気温メッシュ推定値の応用例を示すものであると同時に

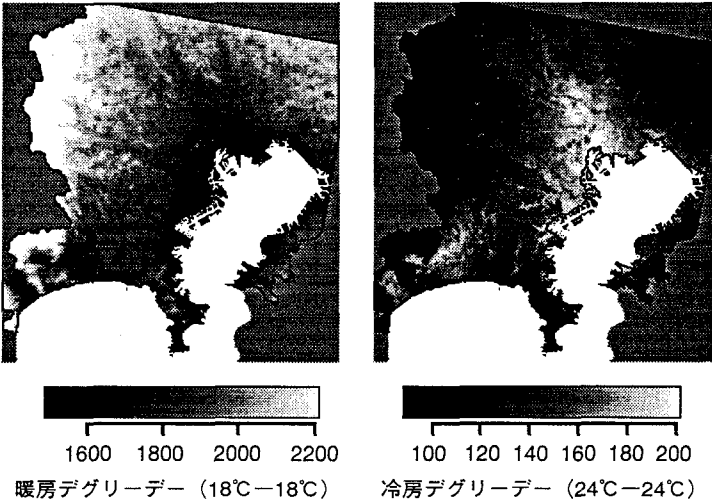


図-16 デGREEデーの分布図

に、本研究における重要な成果の一つでもあると言える。

なお、この気温推定値には前章で述べた通りの誤差が含まれている点に注意する必要がある。ここで気温の誤差を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ として計算すると、暖房デグリーデーは $\pm 7\%$ 程度、冷房デグリーデーは $\pm 35\%$ 程度の変動となる。したがって図-16に示した冷房デグリーデーは、分布形はほぼ妥当であると思われるものの、絶対値としてはやや大きな誤差が含まれる可能性が高い。

次に、このデグリーデー分布を用い、空調用エネルギー消費原単位を概算した例を示す。ここでは、戸建住宅における原単位のデグリーデーによる推定式がすでに示されているので¹²⁾これを用いたが、他の建物用途に関しても推定式が得られれば計算可能である。分布形は図-16 とほぼ同じであるため省略し、ここでは例として品川区、板橋区、八王子市、鎌倉市、小田原市、浦和市、船橋市の6つの地区を選択し、それぞれについて集計した結果を示す(図-17)。この図から、関東平野程度の空間規模でも空調用エネルギー消費は地域により大きく異なることがわかる。これはごく一例であるが、こうした手法は地域の熱環境や立地条件の評価の一環として有効であると考えられる。また、エネルギー消費原単位を人工排熱分布推定に用いた例は多いが¹³⁾¹⁴⁾、空調による排熱に関しては、このように気温分布を反映させることで高精度化できると考えられる。

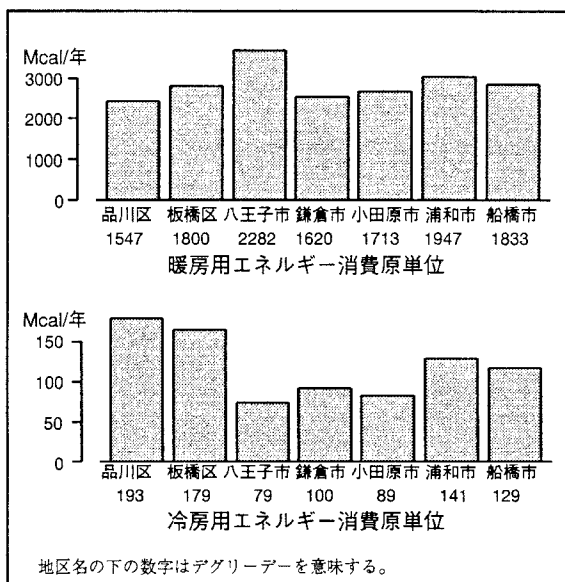


図-17 エネルギー消費原単位

8. まとめ

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 東京大都市圏を対象とし、重回帰式により気温の時空間分布を推定する方法⁷⁾を高精度化し、これにより月別・時刻別平均気温メッシュ推定値を作成した。
- (2) 気温推定の精度について検討した結果、観測条件が不均一であることなどの理由から、平均二乗誤差 $0.5 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 程度の誤差が生じている可能性があることが示された。これはデータを利用する上で注意が必要であるが、気温の時空間的な変動幅の大きさを考慮すれば、変動パターンをよく表現していると言える。したがってこのデータは様々な用途に利用できる可能性が高いと考えられる。
- (3) 本研究で作成した気温分布のメッシュ推定値の熱環境評価への応用例として、冷房・暖房デグリーデーの分布図を作成した。また、このデグリーデー分布に基づくエネルギー消費原単位算出の例を示した。

本研究の成果は、都市熱環境の計画・管理において、立地条件や快適性の評価、建築物の空調負荷計算、エネルギー需要調査などに幅広く貢献できるものであると考えている。

なお、本研究を進めるにあたり、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および柴崎亮介先生、長野県自然保護研究所の浜田 崇先生に適切な御指導をいただいた。また、データの磁気テープからの読み出しに、東京都立大学の増田耕一先生、東京大学の泉 岳樹氏に御協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

なお、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ものであり、AMeDASデータは気象庁により提供を受けたものである。

註

- 1) 文献7) では、気温への影響要因の評価が目的であったため、熱赤外バンドは説明変数として用いていない。土地被覆などの地表面状態により表面温度が決定され、これが顕熱や放射などの形で、気温に影響するというメカニズムを考慮すれば、熱赤外バンドを土地被覆率とは別の影響要因とすることは不適切である。
- 2) コンピュータのディスプレイ上では、これらはアニメーション画像として可視化された。このアニメーションは、
<http://shiba.iis.u-tokyo.ac.jp/hirano/airtemp/>
に公開されている（1999年9月現在）。

参考文献

- 1) 藤野 毅・浅枝 隆・和氣亜紀夫(1996) 夏季の都心部周辺における気温分布特性に関する数値実験, 地理学評論, 69A, No.10, 817-831.
- 2) 川又孝太郎・河原能久・玉井信行(1992) 熱収支モデルによる東京圏の熱環境解析, 土木学会 環境システム研究, 20, 294-298.
- 3) 岡村敏夫(1987) メッシュ気候値—その作成, 利用の現状と将来—, 天気, 34, No.3, 157-174.
- 4) 清野 豁(1993) アメダスデータのメッシュ化について, 農業気象, 48, No.4, 379-383.
- 5) 徳山順一(1986) 岩手県メッシュ気候情報システム, 地理9月増刊, 144-151.
- 6) 谷本 潤・石野久彌(1994) 細密数値情報を用いた東京首都圏における空調設計用外気温度分布特性に関する研究 その2 等温線図の作成, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), 711-712.
- 7) 平野勇二郎・茅 陽一(1998) 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, 6, No.2, 1-10.
- 8) 近藤昭彦・栗原昭子・三上岳彦(1993) ランドサットデータによる関東平野の諸都市のヒートアイランド強度の解析, 日本リモートセンシング学会誌, 13, No.2, 32-42.
- 9) 首藤治久・杉山順史・泉 浩光・岡 建雄(1996) 土地利用形態と気温形成に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.479, 49-56.
- 10) 山添 謙・一ノ瀬俊明(1994) 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, 67A, No.8, 551-560.
- 11) 藤部文昭(1993) 関東平野における春・夏季晴天日の気温分布の日変化, 天気, 40, No.10, 759-767.
- 12) 澤地孝男・坊垣和明・吉野 博・鈴木憲三・赤林伸一・井上 隆・大野秀夫・松原斎樹・林 徹夫・森田 大(1994) 用途別エネルギー消費原単位の算出と推定式の作成 全国的調査に基づく住宅のエネルギー消費とライフスタイルに関する研究(第1報), 日本建築学会 計画系論文集, No.462, 41-48.
- 13) 一ノ瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩 (1994) 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, 263-273.
- 14) 守田 優・竹内友昭(1992) 東京の人工熱排出構造とその時間変動について, 土木学会 環境システム研究, 20, 287-293.