

## 都市のヒートアイランド\*

藤 部 文 昭\*\*

### 1. 都市気候研究の流れ

都市の高温傾向は国外では19世紀から知られていた。日本でも1930年代以降、気象集誌(当時は日本語)などに都市気候に関連する文献が出ている<sup>1,2,3)</sup>。当時の大都市は、鉄道網が郊外へ延びてターミナル駅にデパートができるという近代都市の形態になりつつあり、人口も急増していた(東京市の場合、1930年代に499万人から678万人へ増加)。1943~44年に東京で行われた降水頻度分布の調査は、現在では難しい人海戦術による長期観測であり、都心部の微雨日数の多さを示した図は印象深い<sup>4)</sup>。もっとも、都市霧が多かった当時(東京で年間50日弱)に比べ、今は都市大気の乾燥化が進んだので、微雨の分布は変わったかも知れない。

戦後の高度経済成長につれて、都市域の大気汚染が社会問題になった。汚染物質の移流・拡散の解明を目的の1つとして、1970年ごろから大気境界層や局地循環の研究が盛んになった。都市気候にも関心が向けられ、ヒートアイランドという言葉もよく聞かれるようになった。ヒートアイランドは地上気温分布で見ると晴れて風の弱い夜に最も顕著であり、このような夜間の高温域が当時の研究の主対象だった。1972年に出た「都市気候学」<sup>5)</sup>は、この時代までの知見を集大成したものである。一方、ヒートアイランドによる局地循環(ヒートアイランド循環)についての力学的な研究も行われ、日本では木村竜治先生が一連の理論的・実験的研究を行った<sup>6,7)</sup>。世界的にも大気境界層や都市気候の研究が盛んになり、都市域の気温分布や熱収支の観測があちこちで行われた<sup>8,9,10)</sup>。1979年に出版された「都市の大気環境」<sup>11)</sup>には、前掲書に比べて都市大気の

物理過程に踏み込んだ解説がまとめられており、当時の研究の発展を印象づける。

1980年代になると、大気境界層関連の研究は、気候システムやメソ気象の研究の一分野として組み込まれていき、夜間のヒートアイランドを中心とする従来型の都市気候研究は下火になっていった。その一方、都市の住み心地(アメニティ)という観点から、夏の暑さに対する関心が高まり、そのモデル化や緩和対策に関する研究が盛んになった。夏の暑さが厳しくなるにつれて、ヒートアイランドに対する社会の注目も集まり、現在のブームに至っている。

以下、都市ヒートアイランドに関する最近のトピックや今後の研究課題について紹介する。話が日本国内にとどまっているのは筆者の不勉強のためであることをお許し願いたい。なお、都市の降水については以前に紹介したので<sup>12)</sup>、ここでは紙面の制約もあり、省略した。

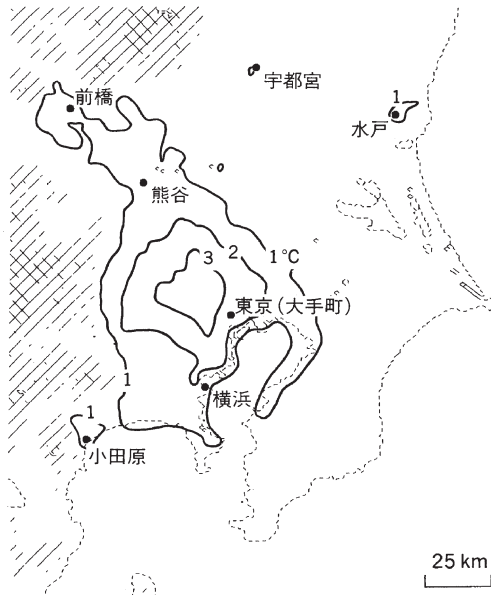
### 2. ヒートアイランドの広域性

都市ヒートアイランドの伝統的なイメージとして、市街地に限局された高温域という観念があり、東京の場合は23区ぐらいがその範囲だという暗黙の了解があった。今でも、世の中の議論は都心部に捉われる傾向がある。しかし、木村富士男氏らが1991年に発表した数値シミュレーション結果<sup>13,14)</sup>によると、夏の午後には東京周辺から関東平野の内陸域に及ぶ広大なヒートアイランドができる(第1図<sup>15)</sup>)。これは、2~4 km 格子の局地循環モデルに土地利用状態のパラメタリゼーションを組み入れて風・気温分布を計算したもので、従来は弱いと思われていた昼間のヒートアイランドが、広範囲の気温偏差を伴うことを示した点で画期的であった。この広域ヒートアイランドは1 km のオーダーの厚さを持ち、0.5 hPa に達する気圧低下を伴う。これによって風系も変化し、東京の内陸側に収

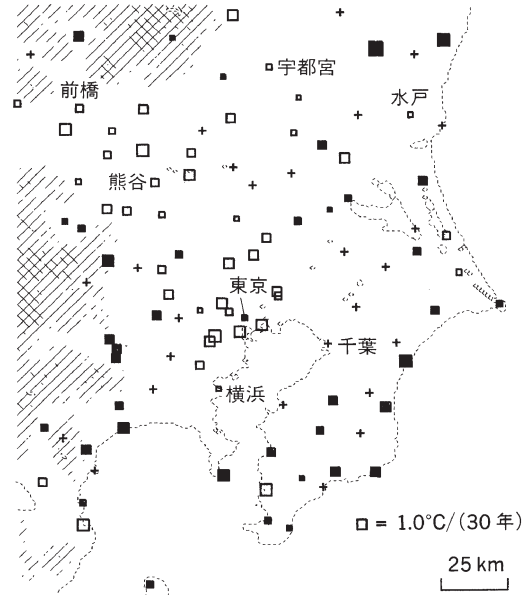
\* The urban heat island.

\*\* Fumiaki FUJIBE, 気象研究所予報研究部。

© 2007 日本気象学会



第1図 首都圏のヒートアイランドの数値シミュレーション結果<sup>14)</sup>。8月の晴天弱風日(晴れて一般風がない日)を対象にして、都市がないと仮定した場合と、都市効果(人工排熱と、市街化による蒸発抑制)を入れた場合との気温分布(15時)をそれぞれ計算し、差をとったもの。斜線部は山岳域。



第2図 7, 8月の日最高気温(筑波山(海拔868 m)の気温との差)の経年変化率(1946~1976年)<sup>15)</sup>。□■の面積が変化率に比例するように描いてあり、□は上昇、■は下降、+は変化率0.2°C/(30年)未満を表す。斜線部は山岳域。

束域ができる。このような変化は、その後他の研究機関のモデルでも示され<sup>16,17)</sup>、濃尾平野でも似た計算結果が得られた<sup>18)</sup>。京阪神地域については、関東・東海地方とは地形や都市域の分布が違い、それを反映した特徴が見出されている<sup>19,20)</sup>。

第2図は、アメダスの前身に当たる区内観測データを使って、夏季の日最高気温の経年変化を調べたものである<sup>15)</sup>。東京周辺から関東の北西部にかけて1°C前後の昇温が見られ、シミュレーション結果と符合する。近年の38°C以上の著しい高温は、主として3大都市圏の内陸側で起きており、その原因の一端が都市化にある可能性がある<sup>21)</sup>。また、これらの地域では昼間の気圧低下量が0.2~0.3 hPa増加し、関東平野中部への収束がやや増す傾向がある<sup>22,23)</sup>。

しかし、今までの数値シミュレーションの多くは、建物空間(都市キャノピー)の複雑な熱収支変化を表現しない「平板モデル」(slab model)で都市の地表面過程を表している。平板モデルは昼間の都市域の加熱を過大評価する傾向があり<sup>24,25,26)</sup>、この点で広域ヒートアイランドの実態についてはなお検証が必要で

ある。また、多くのシミュレーションは夏の晴天弱風日を対象にしているが、冬や春秋の状況、強風日や雨の日のケース、降水への影響、局地風との関わりなど、気象学の面から見ておもしろいテーマはたくさんある。これらを幅広く研究することが、ヒートアイランドに対する理解の厚みを増し、ひいては的確な緩和対策の構築にも結びついていくだろう。メソ気象モデルに精度のいい都市地表面モデルを組み込み、現実的な数値シミュレーションを目指すことが、(すでに一部で始まっているが<sup>27)</sup>)これからの課題である。

### 3. ヒートアイランドの成因とミクロな過程

ヒートアイランドの成因としては、人工排熱、市街化(特に植生の減少)による蒸発散の減少、都市キャノピーの熱収支変化(日射の吸収、建物外壁からの赤外放射、蓄熱効果など)が挙げられている<sup>8,9,10,11)</sup>。これらの元になるのは、建物、道路、自動車……というミクロな構成要素であり、それらが無数に集まった結果がヒートアイランドである。

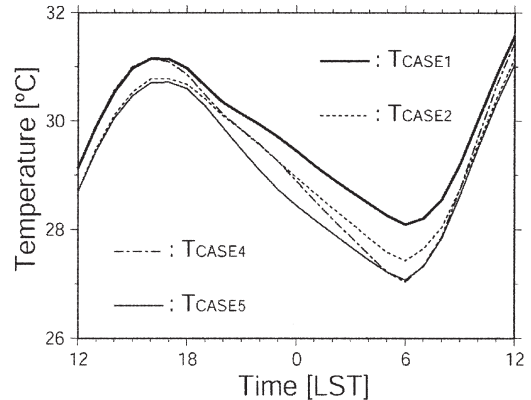
ヒートアイランドの研究が進むにつれ、市街地のミクロな過程や気象状態の実態が明らかになり、関心も

高まってきた。例えば、緑地は周囲の市街地に比べて気温が低い傾向がある<sup>28,29)</sup>。都市内の場所による気温差は、都市内外の気温差と同程度になることもある<sup>29,30)</sup>。もともとヒートアイランドは都市域全体の高温状態を指すマクロな概念であり、その指標として都市内の1地点（例えば気象台）の気温が使われることもあるが、実際にはマイクロな気温分布のモザイクになっていることが伺える。

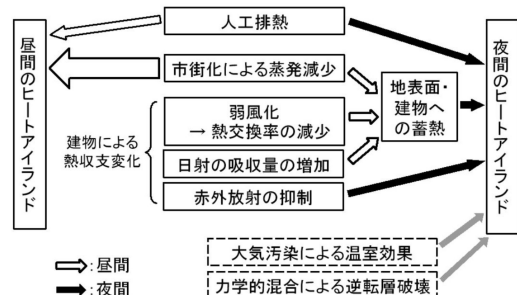
しかし、ヒートアイランドはマイクロな気温分布が単純に寄せ集まったものではない。明治初期の東京（当時、人口100万未満）では $-9.2^{\circ}\text{C}$ という低温が観測されたが、現在ではたとえ緑地の気温が低いとは言っても、都内の公園がこんなに冷え込むことはない。これは、公園の気温が周囲の市街地の影響を受けていることを意味する。その影響とは具体的には何か、言い換えるとマイクロな構成要素の集積によって都市全体としての熱収支がどうなるかを明らかにすることが、ヒートアイランドのメカニズムを理解する鍵になる。

第3図は、都市キャノピーの集積的効果をパラメタライズしたモデル（キャノピーモデル）を使って、都市の気温に与える個別の要因の寄与を評価したものである<sup>25)</sup>。夜間の気温には、人工排熱のほか建物による蓄熱効果や赤外放射の変化が複合的に関わっていることが分かる。一方、夏の昼間の広域ヒートアイランドは、市街化に伴う蒸発散の減少によるところが大きいと考えられる<sup>13,14,16)</sup>。第4図はこれらのメカニズムを図式化したものである。このほか、古くは都市大気汚染による温室効果がヒートアイランドの成因として考えられたことがあり、今でもあり得る要因の1つとして解説書に掲げられている<sup>8,10)</sup>、建物による力学的混合が接地逆転を弱め地上気温を上げるという見方も一部の研究者から出ている<sup>31,32)</sup>。これらについても検証していくべきであろう。

ヒートアイランドについての社会の議論は、その多様な特性のうちのある一面に捉われるような傾向も見られる。的確な緩和対策に向け、ヒートアイランドの形成過程の全体像を見通しよく提示することが気象研究者の役割である。最近では、境界値問題（定常解）という設定ではあるが、水平格子間隔5mの数値モデルによる東京湾岸10km四方の範囲のシミュレーションが地球シミュレータを使って行われている<sup>33)</sup>。このような成果も活用しながら、マイクロな過程とマクロなヒートアイランドとの関連をきちんと評価していくことが望まれる。



第3図 都市キャノピーを組み込んだ2次元数値モデルによる都市の気温の感度実験結果<sup>25)</sup>。Case 1（太実線）は人工排熱・市街化による蒸発抑制・建物の壁からの放射・建物等の蓄熱効果をすべて組み入れた場合、Case 2（点線）は人工排熱を除いた場合、Case 4（鎖線）は人工排熱を除き、かつ蓄熱効果を弱めた（熱容量を60%にした）場合、Case 5（細実線）は人工排熱と建物壁の放射を除いた場合。



第4図 ヒートアイランドの形成要因の模式図。白と黒の矢印が、それぞれ昼間と夜間の過程を表す。大気汚染と力学的混合の効果は、今後の検討課題であるという意味で、灰色の矢印で示した。

#### 4. 地球温暖化問題との関わり、データ充実への期待

ヒートアイランドに対する関心が高まってきたのは、何と言っても夏が暑くなったからである。東京の最高気温や年間真夏日日数の記録更新（2004年に、それぞれ $39.5^{\circ}\text{C}$ と70日）は、それを象徴する。しかし、近年の高温化は全国規模の変化であり、都市だけが暑くなったわけではない<sup>21)</sup>。過去100年間に東京の平均気温は約 $3^{\circ}\text{C}$ 上昇したが、これは10年当たりですれば $0.3^{\circ}\text{C}$ に過ぎず、ここ20年ぐらいの昇温に占める比重は小さい。言い換えると、ヒートアイランド自身は20

年前から今とそう変わらない状態になっていたのであり、そこへ全国規模の高温化が加わって近年の大都市の酷暑がもたらされたと見るべきである。

一方、地球温暖化の実態把握にとっては、観測データに含まれる都市化の影響 (urban bias) が障害になる<sup>34,35)</sup>。日本の気象官署の場合、沿岸や島嶼には良い環境条件のもとで長期間の観測が行われてきた地点があるが、内陸域で都市化の影響がないと確実に言えるところは見当たらず、urban bias をある程度覚悟の上でデータを使わざるを得ないのが現実である。

地球温暖化とヒートアイランドとは、原因もスケールも全く異なり、研究者の層も分かれている。しかし上記のように、一方の実態を調べていくと、もう一方のことも考えなければならなくなることがある。両方も人間活動がもたらした気候変化であることから社会の関心は高く、それぞれの寄与をきちんと評価して正確な情報を提示していくことが求められる。

そのためには、データの充実が欠かせない。気象官署の気温データは、月平均値については観測開始以来のすべての期間についてデジタル化されているが、日・時別値がデジタルで提供されているのは1961年からである。区内観測データもデジタル化されていないので、第2図のような解析は手入力で行わざるを得ない。戦前の中央気象台月報や区内観測原簿に観測データが整然と記載されているのを見ると、これらをもっと有効に利用できないものかという思いに駆られる。

最近になって、気象官署の過去100年間の日降水量が気象庁でデジタル化され、大雨などの長期変動の解明に役立っている<sup>36)</sup>。デジタル化をさらに進めるには多くの資金や労力がかかるが、地球温暖化やヒートアイランド問題の重要性を考えれば、それだけの価値があるのではないかと思う。過去のデータには、測器や観測方法の変更の影響など、注意すべき点も多いが、こうした注意点の情報を含め、多くの研究者がデータを共有できる環境作りが望まれる。

#### 参 考 文 献

- 1) 畠山久尚, 1932: 気象集誌, **10**, 388-393.
- 2) 喜多豊一, 1939: 気象集誌, **17**, 155-161.
- 3) 福井英一郎, 1943: 気象集誌, **21**, 428-434.
- 4) 吉野正敏, 1957: 天気特別号, 日本気象学会創立75年記念論文集, 121-125.
- 5) 大後美保, 長尾 隆, 1972: 都市気候学, 朝倉書店, 214pp.
- 6) Kimura, R., 1975: J. Meteor. Soc. Japan, **53**, 440-457.
- 7) Kimura, R., 1976: J. Meteor. Soc. Japan, **54**, 308-320.
- 8) Oke, T. R., 1987: Boundary Layer Climates, 2nd ed., Methuen, 435pp.
- 9) Oke, T. R., 1982: Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **108**, 1-24.
- 10) Landsberg, H. E., 1981: The Urban Climate, Academic Press, 275pp.
- 11) 河村 武編, 1979: 都市の大気環境, 東京大学出版会, 185pp.
- 12) 藤部文昭, 2004: 天気, **51**, 109-115.
- 13) Kimura, F. and S. Takahashi, 1991: Atmos. Environ., **25B**, 155-164.
- 14) 気象庁, 1994: 異常気象レポートV, 444pp., 303-313.
- 15) 藤部文昭, 1998: 科学, **68**, 238-245.
- 16) 近藤裕昭, 2001: 人間空間の気象学, 朝倉書店, 113-124.
- 17) Kusaka, H. *et al.*, 2000: J. Meteor. Soc. Japan, **78**, 405-420.
- 18) Kitada, T. *et al.*, 1998: J. Appl. Meteor., **37**, 1026-1046.
- 19) Ohashi, Y. and H. Kida, 2002: J. Appl. Meteor., **41**, 30-45.
- 20) Ohashi, Y. and H. Kida, 2002: J. Meteor. Soc. Japan, **80**, 539-560.
- 21) 藤部文昭, 2004: 地理学評論, **77**, 119-132.
- 22) Fujibe, F., 1994: J. Meteor. Soc. Japan, **72**, 785-792.
- 23) Fujibe, F., 2003: J. Meteor. Soc. Japan, **81**, 141-149.
- 24) Kusaka, H. *et al.*, 2001: Bound.-Layer Meteor., **101**, 329-358.
- 25) Kusaka, H. and F. Kimura 2004: J. Appl. Meteor., **43**, 1899-1910.
- 26) Kusaka, H. and F. Kimura, 2004: J. Meteor. Soc. Japan, **82**, 67-80.
- 27) 日下博幸, 2005: 第19回数値流体力学シンポジウム.
- 28) 成田健一ほか, 2004: 地理学評論, **77**, 403-420.
- 29) 菅原広史ほか, 2006: 天気, **53**, 393-404.
- 30) 菅原広史ほか, 2005: 天気, **52**, 119-128.
- 31) 田宮兵衛, 大山秀樹, 1981: 地理学評論, **54**, 1-21.
- 32) 榊原保志, 三枝あかね, 2002: 天気, **49**, 533-540.
- 33) 国土交通省, <http://www.nilim.go.jp/lab/jeg/heat.htm> (2006.11.27閲覧)
- 34) 気象庁, 2005: 異常気象レポート2005, 374pp., 312-323.
- 35) Griffiths, G. M. *et al.*, 2005: Int. J. Climatol., **25**, 1301-1330.
- 36) Fujibe, F. *et al.*, 2006: J. Meteor. Soc. Japan 投稿中.