

## 参 考 文 献

環境省, 2001: 環境省ヒートアイランド対策委員会報告書.  
 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 吉門 洋, 近藤裕昭, 2001: 建築空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発, エネルギー・資源, 22, 235-240.  
 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 大橋唯太, 近藤裕昭, 2003: 電源・空調システムの構成が夏季の都市熱環境に及ぼす影響, 第19回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 69-74.  
 Kondo, H., 1989: Description of NRIPR mesoscale model, Technical Report of the National Research

Institute for Pollution and Resources, (44), 76pp.  
 近藤裕昭, 劉 発華, 1998: 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, 大気環境学会誌, 33, 179-192.  
 Ohashi, Y. and H. Kida, 2002: Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: A numerical study with a mesoscale atmospheric model, J. Appl. Meteor., 41, 30-45.  
 大橋唯太, 平野勇二郎, 玄地 裕, 亀卦川幸浩, 近藤裕昭, 吉門 洋, 2004: 都市気象・ビルエネルギー連成モデルを用いた事務所街区内気温の数値シミュレーション, 土木学会水工学論文集, 48, 印刷中.

109:304:501 (ヒートアイランド; 不均性質)

## 3-1. 観測から見た熱帯夜の形成機構

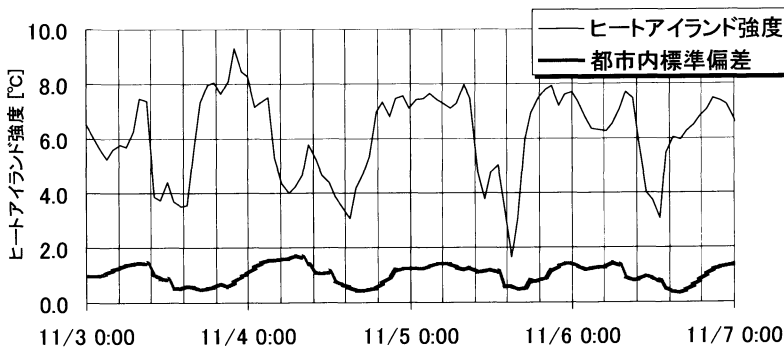
ー現象を理解する上での観測の問題点ー

菅 原 広 史\*

## 1. 気温測定値の空間代表性の問題

本稿では実測をもとにヒートアイランド現象を理解する際の注意点について論じる。

ヒートアイランド強度(都市と郊外での気温差)については数多くの研究が行われている。Oke(1973)によれば、各都市の年最大ヒートアイランド強度はおおよそ1~10°Cである。一方、たとえばNarita(1997)の広島における観測によれば、同じ都市内でも最大2°Cぐらいの気温の分布が存在している。また第1図に示した東京におけるヒートアイランド強度についても、その20%程度の大きさで都市内気温の空間的なばらつきが存在することがわかる。したがって、都市内の気温を何処で測るかによってヒートアイランド強度の絶対値は大きく異なる。同様の問題は郊外においても存在し、このような気温の不均質性は異なる都市



第1図 東京のヒートアイランド強度。比較的晴天弱風の状態が続いた2002年11月3-7日の日変化。東京都環境局による常時監視局のデータを用いた。都市気温は区内20地点の平均値で、その標準偏差も示した。郊外の地点は檜原。

\* 防衛大学地球海洋学科, hiros@nda.ac.jp

間でのヒートアイランド強度の比較を困難にさせる。

この問題について考えられる、あるいは試みられてきた解決方法として次のようなものがある。

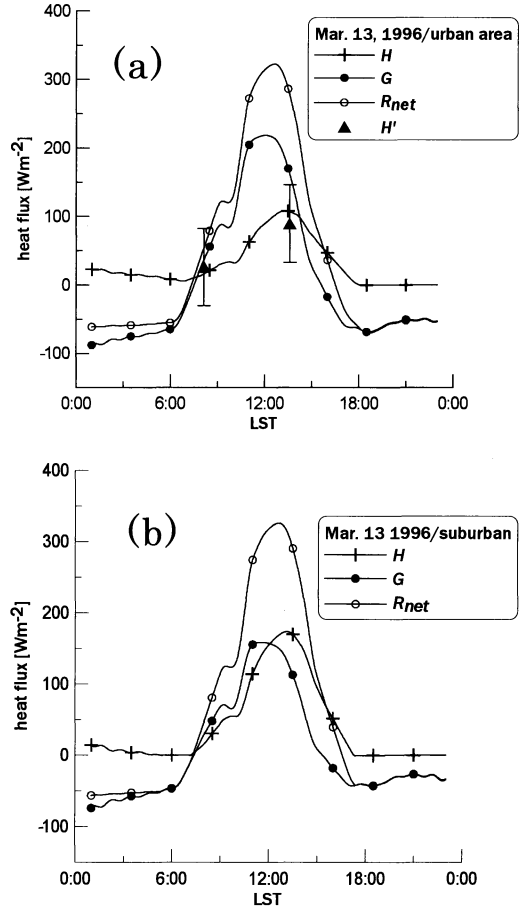
- 1) 複数の地点での測定値を平均することで、空間代表値とする (例えば榊原, 1999),
- 2) 地表付近は気温の不均質性が激しいと考えられるので、屋上、あるいは比較的開けた校庭などで計測された値を代表値とする (山添・一ノ瀬, 1994).
- 3) センサ付近の熱的環境を観測点間で統一する.
- 4) ソースエリア (Horst and Weil, 1994; Schmid, 1994) を用い、測定値が代表するエリアをチェックする.
- 5) 新しい測定原理の測器を使用する.

これらの方法の多くは、その根拠や空間代表性の保証に乏しい点があった。1 番目の方法では統計的有意性を得るために多数の観測点を必要とするが、どの程度の数の観測点を平均すれば空間代表値として十分なのか不明である。それを知るためには気温分布そのものが必要となる。2 番目の方法で測定された気温は都市キャノピー内のものではなく、比較対象となる郊外の地上気温とは質的に異なる。3 番目の方法は常時観測点において、温度計の地上高度や露場の土地被覆を芝生に統一するといった形で行われている。しかしこれは一種の人工的な地表面改変であり、都市そのものの気温を測定することはできない。4 番目のソースエリアは複雑な土地被覆上でのフラックスやスカラー量を考える際に非常に強力であり、多くの研究で利用されている (例えば、神田ほか, 2000; Voogt and Grimmond, 2001)。5 については音響波を用いる方法 (水谷ほか, 1998; Funakoshi *et al.*, 2000; Gerd *et al.*, 2002) や鉛直気圧差と静力学の式から空間平均気温を算出する方法が考えられる。

多くの場合はルーチン観測データを用いてヒートアイランド強度を算出すること、また不均質性は図 1 のように時間変化することから、不均質性の影響を完全に取り除くことは現実には難しい。したがってソースエリアをチェックしたり、観測地点の写真や周辺の土地利用などの情報 (例えば、植松・野口, 2002) を利用しながら観測結果を解釈するのが現段階でも最も有効な方法であろう。

## 2. 都市の熱収支

都市が発展する以前の自然地表面と比較すれば、ヒートアイランド現象の原因は、人工排熱を含めて熱



第2図 都市キャノピーにおける熱フラックスの日変化。a) 東京都心、b) 浦和付近について、▲は大気境界層熱収支からもとめた実測値。実線は地表面温度測定値と熱収支パラメータを元にした計算値 ( $H$ : 顕熱フラックス,  $G$ : 地中伝導熱,  $R_{net}$ : 正味放射量)。都市キャノピーを対象としているので潜熱フラックスはゼロとしている。対象とした都心部は建物が密集し粗度が小さいため、浦和の方が日中の顕熱フラックスは大きいことに注意が必要である。

バランスが変化したことにある (木村, 1992)。このため、都市域における熱収支の観測が数多く行われてきた。これらの研究はスケールから考えて次の2つに分類できる。

### 2.1 構成面の熱収支

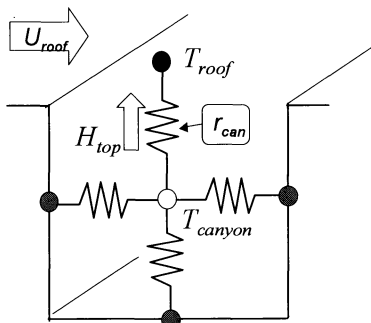
アスファルト面や建物壁面など、いわば都市を構成する部品についての熱収支が研究されてきた。このような熱収支についての知見はヒートアイランド現象に

に対する建築物材質の影響を知るのに必要である。ただし、このスケールでの観測結果には測定地点の局所的な影響が大きく、得られる熱収支はヒートアイランド強度とはすぐには対応しない。

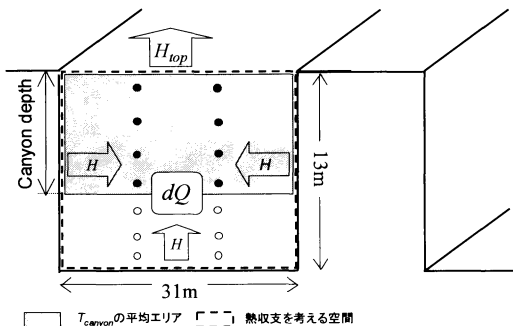
あるいはアスファルト面を都市、芝生面を郊外にみなし、ヒートアイランド現象を解釈する考えもある。この場合、ヒートアイランド現象の主要原因は人工的な不透水地表面による顕熱フラックスの増加と、熱容量の大きい人工材質による貯熱効果であるという結論が導かれている(菅原・近藤, 1995)。

## 2.2 キャンプ全体熱収支

都市全体の熱収支を対象として都市キャンパーと大気との熱交換を測定する研究が行われてきた。都市の幾何形状の規則性を考慮すると、日本の場合は水平スケールを数百メートルから1 kmに設定すれば、個々の建物の形を無視してキャンパーとして扱うことができると考えられる(Sugawara, 2001)。メソスケールモ



第3図 都市キャンパーの熱輸送の模式図。図中の抵抗は熱輸送抵抗を意味する。



第4図 都市キャンパー熱収支の観測模式図。黒丸、白丸が気温測定点で、網掛け部分がキャンパー内気温として平均をとったエリア。

デルにおける都市キャンパーモデル (Kusaka *et al.*, 2001; Masson, 2000) はこのスケールを対象としたものである。

このスケールで都市キャンパーからの顕熱フラックスを測定するには3つの方法が考えられる。①キャンパー上にタワーを設置し、渦相関法などを用いる方法(神田ほか, 1997)、②キャンパー上空の気塊(大気境界層)の熱収支から顕熱フラックスを残差として求める方法(例えばCleugh and Grimmond, 2001; Katayama *et al.*, 1989)、③放射収支を測定し日平均の顕熱フラックスを求める方法(本條ほか, 2000)である。①、②では測定値に人工排熱が陽に含まれるため、気象観測だけでは熱収支は閉じない。人工排熱を量的に見積もるには例えばIchinose *et al.* (1999)や亀卦川(2001)などの方法がある。

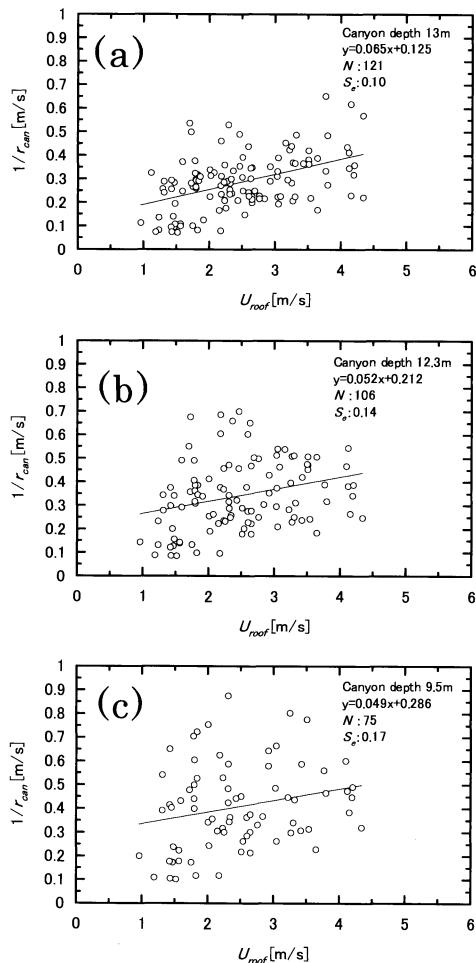
第2図aは②の方法で東京都心において測定した顕熱フラックス( $H'$ , ▲)である(Sugawara, 2001)。実線は地表面温度計測値と熱収支パラメータをもとに計算した値であり、表面温度として上向き長波放射フラックスと等価な温度を用いている。第2図bは同様の方法で浦和付近について計算したものである。この図から都心の方が日中の地中伝導熱 $G$ が大きく、その分夜間の放熱(上向きの $G$ , しいては $H$ )が大きくなることわかる。

ただし、地中伝導熱 $G$ は地表面の熱慣性を表すパラメータ(熱容量と熱伝導率)を用いて計算したもの(Sugawara *et al.*, 2001)であり、厳密には測定値ではない。都市キャンパー全体において地下(建物内部を含む)への貯熱量を測定することはまず不可能であり、このようなパラメータを用いた計算を行わざるを得ない。他に正味放射量 $R_{net}$ との経験式を用いるGrimmond and Oke (1999)の方法がある。

③の方法は日平均値しか求まらないこと、晴天日が続いた日にしか適用できないという制限があるが、観測が比較的容易であるという利点がある。

## 3. メソスケールモデル検証のための観測

数値モデルを使用するうえで実測値との比較検証は重要な作業である。通常メソスケールモデルではキャンパー内の熱交換を陽に扱うわけではないため、キャンパー内気温が計算されるとすればそれは顕熱フラックスに対して有効な気温である。したがって通常測定される地上1.5 mの気温とは必ずしも一致しない。モデルの検証のために気温の測定を行うのであれ



第5図 キャンロピー上端での熱輸送係数  $1/r_{can}$  とキャンロピー上風速  $U_{roof}$  の関係。それぞれの図はキャンロピー内気温の平均エリアを替えて計算したものの。Canyon depth (平均エリア) = 13 m (a), 12.3 m (b), 9.5 m (c)。

ば、モデル内のパラメタリゼーションを考慮し、モデルが予報する位置・平均化時間で観測を行う必要がある。では、顕熱フラックスに対して有効なキャンロピー内気温とはどこの気温であろうか？ 第3, 4図は熱輸送のパラメタリゼーションの一例と、これを考慮して行った観測の模式図である。観測ではキャンロピー上端面フラックス  $H_{top}$  を熱収支残差として求めている(川原, 2002)。

第5図は  $H_{top}$  に対する輸送係数  $1/r_{can}$  をキャンロピー上風速  $U_{roof}$  の関数として見たものである。ここでは次のパラメタリゼーションを使用している。

$$H_{top} = C_p \rho (1/r_{can}) (T_{canyon} - T_{roof}) \quad (1)$$

キャンロピー内の気温  $T_{canyon}$  として、第4図のハッチの領域の平均値を使用した。キャンロピー上部だけではなく、全測定ポイントの平均気温を使用することで、風速に対する輸送係数のバラツキが小さくなることがわかる。すなわち、キャンロピー内の空気塊全体と上空大気とが熱交換を行っており、これは建物高さスケールでの渦によって熱輸送が行われていることを意味する。この場合、顕熱フラックスに有効な気温はキャンロピー内全体の平均気温となる。したがって、メソスケールモデルの検証に使用するキャンロピー内の気温はこの場合キャンロピー内の空間平均気温が適切であり、例えばキャンロピー底面1地点での測定では不十分である。

#### 参考文献

- Cleugh, H. A. and C. S. B. Grimmond, 2001: Modeling regional scale surface energy exchanges and CBL growth in a heterogeneous, urban-rural landscape, *Bound.-Layer Meteor.*, **98**, 1-31.
- Funakoshi, A., K. Mizutani, K. Nagai, K. Harakawa and T. Yokoyama, 2000: Temperature distribution in circular space reconstructed from sampling data at unequal intervals in small numbers using acoustic computerized tomography (A-CT), *Japanese J. Appl. Phys.*, **39**, Part 1, No. 5B, 3107-3111.
- Gerd, T., K. Arnold, A. Raabe and A. Ziemann, 2002: Observations of area averaged near-surface wind and temperature fields in real terrain using acoustic travel time tomography, *Meteorologische Zeitschrift*: **11**, 273-283.
- Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke, 1999: Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model, *J. Appl. Meteor.*, **38**, 922-940.
- 本條 毅, 菅原広史, 三上岳彦, 成田健一, 桑田直也, 2000: 新宿御苑のクールアイランド効果の実測, 第14回環境情報科学論文集, 273-278.
- Horst, T. W. and J. C. Weil, 1994: How far is far enough?: The fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes, *J. Atmos. Oceanic Technology*, **11**, 1018-1025.
- Ichinose, T., K. Shimodozono and K. Hanaki, 1999: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmos. Environ.*, **33**, 3897-3909.
- 神田 学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮, 1997: 銀座オフィスビル街における熱収支特性, 水文・水資源

- 学会誌, 10, 329-336.
- 神田 学, 森脇 亮, 鈴木 譲, マティアス ロート, ティム オーク, 2000: 住宅街の接地境界層における乱流フラックスの実測—シンチロメータの利用—, 天気, 47, 453-462.
- Katayama, J., Tsutsumi, A., Ishii, M. Nishida and M. Hashida, 1989: Observations of heat flux in an urban area with a large Pond by kytoons, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 32, 41-50.
- 川原 誠, 2002: 都市キャニオン上端における熱輸送係数の推定, 防衛大学校修士論文, 148pp.
- 亀卦川幸浩, 2001: 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した都市高温化対策の評価, 東京大学学位論文, 205pp.
- 木村富士男, 1992: 都市の熱汚染, 大気汚染学会誌, 27, A87-A94.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models, Bound.-Layer Meteor., 101, 329-358.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Bound.-Layer Meteorol., 94, 357-397.
- 水谷孝一, 小泉智也, 永井啓之亮, 原川健一, 釜田裕介, 1998: 音響波プローブを用いる空間温度モニタリング, 電気学会論文誌, 118-E, 154-160.
- Narita, K., 1997: Annual observation on the temperature field in Hiroshima city, Proc. the Second Japanese-German Meeting, 243-246.
- Oke, T. R., 1973: City size and the urban heat island, Atmos. Environ., 7, 769-779.
- 榊原保志, 1999: 長野県小布施町におけるヒートアイランド強度と郊外の土地被覆との関係, 天気, 46, 567-575.
- Schmid, H. P., 1994: Source areas for scalars and scalar fluxes, Bound.-Layer Meteor., 67, 293-318.
- 菅原広史, 近藤純正, 1995: 都市における各種地表面温度の敏感度解析, 天気, 12, 813-818.
- Sugawara, H., 2001: Heat exchange between urban structures and the atmospheric boundary layer, Doctoral Dissertation Tohoku Univ., 145pp.
- Sugawara, H., K. Narita and T. Mikami, 2001: Estimation to Effective thermal property parameter on a heterogeneous urban surface, J. Meteor. Soc. Japan, 79, 1169-1181.
- 植松 康, 野口満美, 2002: 東北地方における風観測, 風工学会誌, 92, 55-64.
- 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, 551-560.
- Voogt, J. A. and C. S. B. Grimmond, 2000: Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area, J. Appl. Meteor., 39, 1679-1699.

109: 501 (ヒートアイランド)

## 3-2. 「観測から見た熱帯夜の形成機構」に関するコメント

—都市の大気物理環境把握に向けた3つの試み—

神田 学\*

### 1. はじめに

都市気象は近年大きな社会的関心をよび活発な研究

\* 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻,  
kanda@ide.titech.ac.jp

が行われている。本論では、菅原の観測面から見た研究動向を踏まえて、今後どのような研究が必要であるか、あくまで筆者の私見として前向きな視点に立って3つの提案を行うものである。ただし、熱帯夜に限らず、都市気象全般を対象とする。