

対的割合はどのように変わるのであろうか。地球温暖化による昇温は加速することが予測されている。一方で、都市化による昇温に上限はあるのだろうか。中小都市ではどうだろうか。

今後の気候変化においては全球的な地球温暖化が加速される一方で、都市化の影響が複合的に加わってくるため、都市気候を表現するモデルの導入が温暖化予測研究においても必要であろう。

参 考 文 献

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific

Basis. J. T. Houghton *et al.* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881pp.

環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ, 2001: 地球温暖化の日本への影響2001, 環境省.

気象庁, 2002: 20世紀の日本の気候. 財務省印刷局, 116 pp.

行本誠史, 野田 彰, 2002: 気象研究所気候モデルMRI-CGCM2の気候感度, 日本気象学会2002年秋季大会講演予稿集, C158.

304 (都市気候)

2-1. 都市気象モデルからみた熱帯夜の形成機構

ー都市の凸凹効果の検討ー

日 下 博 幸*・木 村 富士男**

1. はじめに

都市気象モデルを用いた数値実験は都市のヒートアイランド研究の有力な手段の一つと考えられている。本稿では、最初に都市気象モデルをスケール別にメソスケールモデル、都市キャノピーモデル、数値流体力学(CFD)モデルの3種類にまとめ、個々のモデルの特徴を紹介する。次に、筆者らのモデルを用いて、夏季の夜間ヒートアイランド現象の要因を検討する。

2. 都市気象モデル

都市の地表面はアスファルトやコンクリートなどで覆われている。このため蒸発量は減少し、熱容量・熱伝導率は大きくなる。また、都市の地表面はキャニオン(凸凹)構造をもつため、運動量や放射収支にも大きな影響をおよぼしている。このほかにも人工排熱、

大気汚染、地表面の非一様性など都市は郊外と異なる特徴を持つ(第1表)。

数値モデルによって都市の気象を再現するためには、これらの特徴をモデルに取り入れる必要がある。ただし、モデル内での取り扱い方は、そのモデルの取り扱うスケール、とりわけモデルの解像度に大きく依存する(第2表)(日下, 2004)。

(1) メソスケールモデル

都市全体規模のシミュレーションを目的とする場合、運動方程式・質量保存則の式・熱力学第一法則の式・水蒸気の保存式・状態方程式からなる力学コアと放射・乱流・降水・地表面モデルなどの物理モデルによって構成されるメソスケールモデルが広く使われている。メソスケールモデルでは、接地層の相似則、地表面熱収支式、地中の熱伝導方程式から計算されるフラックスが大気モデルの拡散項の下部境界条件として働く。したがって、この計算で使われている粗度、低層スタント数、蒸発効率、アルベド、熱伝導率、熱容量などのパラメータや物性値を都市用に設定することでモデルに都市の効果を反映させることができる

* 電力中央研究所流体科学部,
h-kusaka@criepi.denken.or.jp

** 筑波大学地球科学系・陸域環境研究センター。

© 2004 日本気象学会

(木村・日下, 1998; Kusaka *et al.*, 2000). 格子内に道路や草地といった異なる土地被覆が混在している場合は, 各々の土地被覆から計算されたフラックスをその面積比に従い加重平均することにより, 格子平均フラックスを計算する (例えば, Kimura, 1989).

(2) 都市キャノピーモデル

都市内における局所的なシミュレーションを行う場合, 都市キャノピーモデル (乱流モデル) が使われる (例えば, Uno *et al.*, 1989; 近藤・劉, 1998; Ca *et al.*, 2002). これらのモデルは個々の建物を直接解像しないが, 建物による風速低減効果, 建物の占有体積増加の効果などが詳細にパラメタライズされている. また, 天空率や日陰の効果も考慮されている.

(3) CFD モデル¹⁾

単体の建築物周りの風を計算するモデルはCFDもしくはBluff Bodyモデルと呼ばれている. 基本的には(2)のモデルと同様, 乱流モデルを基礎としているが, 建物を直接解像することによりキャニオン効果をパラメタライズしない点異なる (例えばLaunder and Kato, 1993; Takamura *et al.*, 1993).

(4) その他のモデル

これらのほかにも, 都市キャノピー層を鉛直方向に解像しない単層都市キャノピーモデル (例えばMasson, 2000; Kusaka *et al.*, 2001), 都市のアルベドを推定するモデル (例えばAida and Gotoh, 1982; 中川, 1996), 都市キャノピー内の風速分布を解析的に計算する方法 (例えばMacdonald, 2000) なども提案されている. これらのモデルは基本的には(1)のメソスケールモデルのモジュールとして働く. モデルユーザーは,

¹⁾ CFDモデルとは計算機によって流れを解くモデルの総称であるため, 広い意味では(1)や(2)のモデルもCFDモデルに含まれるが, ここでは狭義のCFDモデルを指す.

第1表 都市化の特徴とヒートアイランドの要因.

*夜間の気温を上昇させる一方で, 日中の気温上昇を抑制する.

都市化の特徴	ヒートアイランドの要因
地表面の改変 (被覆の変化)	蒸発量の減少に伴う顕熱フラックスの増加 熱容量と熱伝導率の増加に伴う蓄熱効果の増大*
地表面の改変 (構造の変化)	風速の低下に伴う地面とキャノピー層での熱交換の低下* 乱流の強化に伴うキャノピー層内外での熱交換の増加 表面積の増加に伴う蓄熱効果の増加* 日射の多重散乱に伴うアルベドの低下 長波放射の吸収・射出に伴う放射冷却の緩和
人間活動の活発化	人工排熱の増加に伴う顕熱・潜熱フラックスの増加 大気汚染物質による日射の遮蔽*, 長波放射の吸収・射出

第2表 都市気象モデル.

種類	対象スケール	水平解像度	鉛直解像度	モデルで計算される地上気温
メソスケールモデル	都市全体 (10 ⁴ ~10 ⁵ m)	10 ³ m	10 ¹ ~10 ² m	接地層の平均気温
キャノピーモデル	街区 (10 ² ~10 ³ m)	10 ¹ m	10 ⁰ m	キャノピー層の平均気温 (鉛直分布)
CFDモデル	ビル周り (10 ¹ m)	10 ⁻¹ m	10 ⁻¹ m	ビル周りの局所的な気温

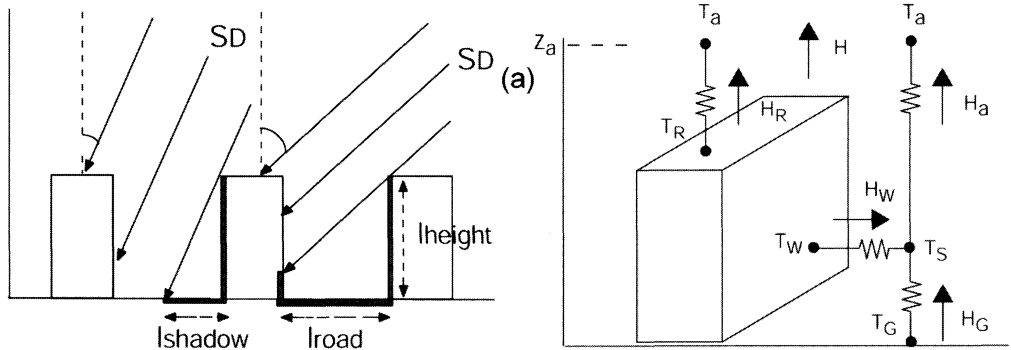
モデルで計算される物理量の意味をよく理解した上で, 各々の目的や対象スケールに適切と思われるモデルを使用する必要がある.

3. ヒートアイランドの数値実験

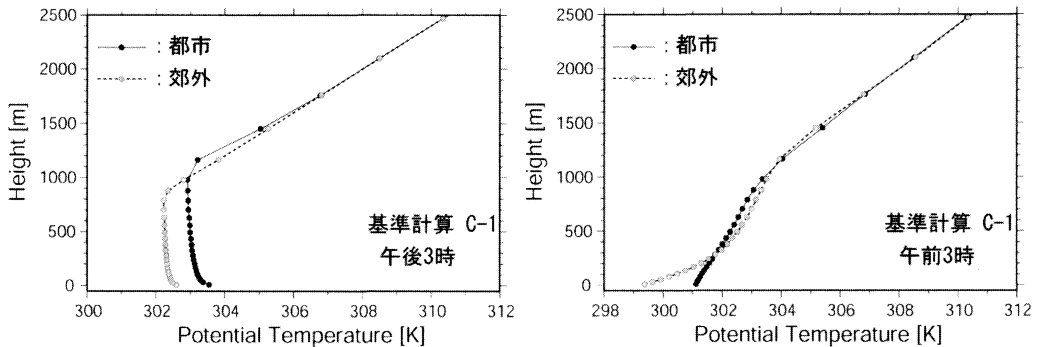
数値実験で用いたモデルはメソスケールモデルに属するが, 都市の単層キャノピーモデルが導入されている (Kusaka and Kimura, 2004). 単層キャノピーモデルでは, (a) 都市のキャニオン効果がパラメタライズされている, (b) キャニオン内での短波・長波放射の反射が計算される, (c) 屋根面, 壁面, 道路面で別々に熱収支と表面温度が計算される, などの特徴を持っている (第1図). したがって, メソスケールモデルにキャノピーモデルを導入することにより, 都市全体規模のヒートアイランドに対する都市のキャニオン効果をより直接的に評価できるようになる.

計算対象日は8月1日で, 気象条件は典型的なヒートアイランドが現れやすい静穏無風に設定した. 実験では, 平坦な300 kmの領域の中央に高さ6 mの建物が並ぶ30 kmの都市をおき, その左右は草地に覆われた郊外と設定するなど計算条件を極力単純化した. このように, 理想化・単純化した実験は目的の現象を強調でき, しかも結果を理解しやすいという長所がある.

(i) $l_{shadow} < l_{road}$ (ii) $l_{shadow} > l_{road}$



第1図 単層都市キャノピーモデルの概念図 Z_a , Z_r , Z_T+d はそれぞれ、参照高度、建物高さ、ゼロ面変位。 T_a , T_r , T_w , T_g , T_s はそれぞれ、参照レベルの温度、屋根面温度、壁面温度、地面温度、フラックス温度。 H はモデルから大気へ受け渡される顕熱フラックス、 H_a , H_r , H_w , H_g はそれぞれ、キャニオン、屋根面、壁面、地面からの顕熱フラックス。 l_{shadow} , l_{road} , l_{height} はそれぞれ影の長さ、道路幅、建物高さ。屋根面、壁面、同路面が受け取る短波・長波放射量は建物形状と天空率を考慮して計算される。



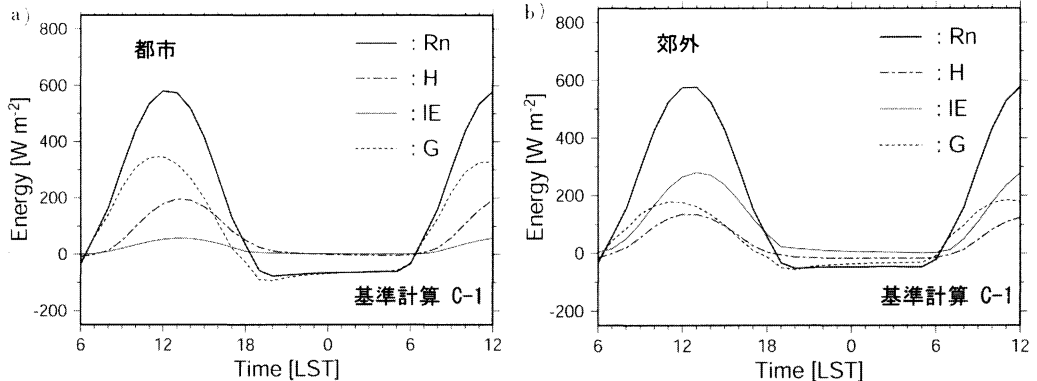
第2図 都市と郊外における温位の鉛直分布 (左図は午後3時、右図は午前3時)。

第2図は基準計算によって得られた午後3時と翌朝の3時の温位分布図である。午後3時では、都市と郊外の加熱量の差により、都市境界層全体にわたってヒートアイランドが認められる。ただし、境界層の上部ではヒートアイランド循環によるクールアイランドが見られる。日没後、郊外では逆転層が形成され始めるが、都市では混合層が存在する。翌朝の3時になると、郊外の逆転層はさらに発達し、都市でも接地逆転が形成され始める。この違いは各々の地表面熱収支を比較することにより容易に理解できる(第3図)。日中、都市の顕熱フラックスは郊外のそれに比べて数 10 W/m^2 多い。これがヒートアイランドとヒートアイランド循環を維持生成している。また、地中熱流量(蓄熱量)も郊外に比べて多い。日没後も顕熱フラックスは正の

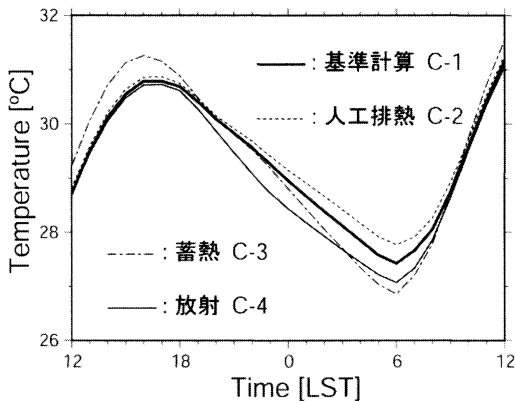
値を持ち、ビル壁面や道路からの加熱が夜間の混合層を維持していることがわかる。

さらに、上記の基準計算の結果(C-1)と、 5 W/m^2 の人工排熱を入れた時の結果(C-2)、都市の熱容量を半分にした時の結果(C-3)、放射に対する壁の効果を除いた時の結果(C-4)を比較すると、夜間のヒートアイランドが、人工排熱、都心と郊外における地表面構成物質の違い、都市キャニオンの熱的效果の複合作用によって引き起こされていることがわかる¹²⁾(第4図)。

¹²⁾ 一般風の影響が比較的大きな場合、都市キャニオンの力学効果、つまり乱流による上からの加熱の効果も重要となる。



第3図 熱収支の日変化 (a) 図は都市, (b) 図は郊外) Rn, H, IE, Gはそれぞれ正味放射量, 顕熱フラックス, 潜熱フラックス, 地中熱流量.



第4図 地上10mの気温の日変化. C-1は基準計算, C-2は基準計算に人工排熱を 5 W/m^2 入れた結果, C-3は熱容量を基準計算の半分 (壁を無視した場合の熱容量に相当) にした結果, C-4は基準計算で放射に対する壁の効果を無視した結果.

4. まとめと今後の課題

都市気象モデルを, スケール別に, メソスケールモデル, 都市キャノピーモデル, CFDモデルの3種類にまとめ, それぞれの特徴を述べた. 単層都市キャノピーモデルを含んだメソスケールモデルを用いた数値実験の結果, 夜間のヒートアイランド現象が人工排熱, 都市心と郊外における地表面構成物質の違い, 都市キャニオンの熱的効果の複合作用によって引き起こされていることが確認された.

都市気象モデルに対しては, いくつかの大きな課題が残されているが, それらの問題の多くは都市における風, 気温, フラックスなどの空間代表性の低さに起因している. 水平一様性が成立しない地表面と大気と

の間での熱・水蒸気・運動量の交換をより精度よく計算するにはどうすればよいのか. モデルの検証を行ううえで, モデルの結果と観測値をどのように解釈すべきなのか. これらの問題を解決するためには, 都市におけるさまざまな規模の現象に着目した都市気象の研究を今後も積み重ねていく必要がある.

参考文献

- Aida, M. and Gotoh, 1982: Urban albedos as a function of the urban structure: A two-dimensional numerical simulation, *Bound.-Layer Meteor.*, **23**, 415-424.
- Ca, V. T., Y. Ashie and T. Asaeda, 2002: A k-eps turbulence closure model for the atmospheric boundary layer including urban canopy, *Bound.-Layer Meteor.*, **102**, 459-490.
- 木村富士男, 日下博幸, 1998: ヒートアイランドのモデリング, 吉野正敏・山下脩二編都市環境学事典, 朝倉書店, 57-76.
- Kimura, F., 1989: Heat flux on mixture of different land-use surface: Test of a new parameterization scheme, *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 848-861.
- 近藤裕昭, 劉発華, 1998: 1次元都市キャノピーモデルにおける都市の熱環境の研究, *大気環境学会誌*, **33**, 179-192.
- Kusaka, H., F. Kimura, H. Hirakuchi and M. Mizutori, 2000: The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island, *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 405-420.
- 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, 329-35.
- Kusaka, H. and F. Kimura, 2004 : Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model : Impact on urban heat island simulation for an idealized case, J. Meteor. Soc. Japan, 82, 000-000.
- 日下博幸, 2004 : 都市の気象, 堀口郁夫・小林哲夫・塚本修・大槻恭一・真木太一編 局地気象学, 森北出版, 改訂中.
- Launder, B. E. and M. Kato 1993 : Modeling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder, ASME Fluid Eng. Conf., 157, 189-200.
- Macdonald, R. W., 2000 : Modeling the mean velocity profile in the urban canopy layer, Bound.-Layer Meteor., 97, 24-45.
- Masson, V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Bound.-Layer Meteor., 94, 357-397.
- 中川清隆, 1996 : 都市地表面アルベドの表面形状依存性に関する数値実験, 地理学評論, 69A, 415-435.
- Takamura, S., Y. Suyama and M. Aoyama, 1993 : Numerical simulation of flow field around buildings in an urban area, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 46/47, 765-771.
- Uno, I., H. Ueda and S. Wakamatsu, 1989 : Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer, Bound.-Layer Meteor., 49, 77-98.

109 : 304 (都市キャノピー ; ビルエネルギー連成モデル ; 冷房排熱)

2-2. 都市気象モデルからみた熱帯夜の形成機構

ー都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルを用いた解析例ー

大橋 唯太*

1. はじめに

日本国内のエネルギー消費量の内訳は、運輸部門24%、産業部門50%、民生部門26% (1996年) となっているが、このうち都市域内では、運輸と民生部門でのエネルギー消費が大部分を占めている。将来的な見通しとして、運輸・産業部門ではエネルギー消費が減少傾向にあるが、民生部門は増加が予測されている。その民生部門におけるエネルギー需要の内訳は、冷暖房などの空調機器、OA 機器や照明などの一般電力、給湯・厨房に大別される。特に近年においては、OA 機器の急速な普及や、都市高温化に伴う冷房需要の増大などが、都市域内のエネルギー消費量の増加につながっている。これらのエネルギー消費は冷房排熱という形で大気中に捨てられており、夏季における都市気温の上昇に大きく寄与している可能性が指摘される。特に

事務所系ビルが集中した街区では、大気に供給される顕熱の多くを空調排熱が占めており、例えば東京都千代田区や中央区においては50~60%がそれに相当すると言われている (環境省, 2001)。

人工排熱の増加に伴う気温上昇は冷房エネルギー消費、即ち空調室外機からの排熱を増大させ、更なる気温上昇が生じることにつながる。この悪循環が、近年の東京や大阪などの大都市中心部での熱環境の急激な悪化を引き起こしている要因の一つと言われている。産業技術総合研究所では、このような相互作用を伴った熱環境の問題を解決するために、建物エネルギー消費に伴う人工排熱と街区内気温の間で起こる相互作用を考慮した、都市熱環境の評価を可能とする数値モデル (都市気象・ビルエネルギー連成モデル) の開発に取り組んでいる。本稿ではそのモデルの概要とともに、我々が行っている具体的な応用研究について紹介を行っていく。

* 産業技術総合研究所, oohashi-y@aist.go.jp

© 2004 日本気象学会