

都市道路網（熱の帯）上の熱対流混合層のLarge Eddy Simulation

——大手町・皇居周辺を例に

Large Eddy Simulation of Convective Boundary Layer over Urban Area with Meshes Fine enough to Resolve Asphalt Roads

神田 学^{*}・日野 幹雄^{**}・稲垣聡^{***}・安部智久^{***}

By Manabu KANDA, Mikio HINO, Satoshi INAGAKI and Motohisa ABE

Large eddy simulations with meshes fine enough to resolve the roads have been performed to investigate the characteristics of convective boundary layer over Otemachi and the Imperial Palace as an example of urban area.

Nondimensional profiles of mean temperature and turbulent intensities agree well with experimental data, and it is shown that the vertical convection and the entrainment are more effective when the ground surface is heated uniformly. It is also shown that many thermals grow up from the asphalt roads while the down stream region are generated around the Imperial Palace.

Keywords: convective layer, LES, heated roads, Otemachi

1. はじめに

日中、地表面からの加熱により熱混合が盛んとなる大気表層部には対流混合層と呼ばれる（夏の正午でせいぜい2～3 km）、温位がほぼ一様な層が形成される。これについては数多くの研究が行われており、平均量・乱流統計量などについてかなり明らかになっている（例えば、Willis & Deardorff(1974)¹⁾）。最近では、浅枝・玉井(1982)²⁾の実験的研究、Schmidt & Schumann(1989)³⁾の数値解析などにより、個々のサーマルと大規模な対流パターンの関係といった乱流構造的な議論も行われつつある。ただし、これらはいずれも底面が一様に加熱された場合の話である。実際の地表面、特に公園緑地やアスファルト道路などが混在する都市域では、それぞれの土地被覆に対応して底面から様々な顕熱フラックスが大気中に与えられるわけであり、そのような加熱の非一様性が対流混合層に及ぼす影響を検討した例は著者らの知る限りない。

一方、都市域の気象シミュレーションも数多く行われているが（例えば、Kimura & Takahashi(1991)⁴⁾；斉藤(1992)⁵⁾）、いわゆる海陸風系スケール（水平スケールで～100 km）の局地循環風を主な対象としている。そのためメッシュスケールが2 km前後となり、道路網、コンクリートなどの土地被覆の違いは平均化されて取り扱われる（Kimura(1989)⁶⁾）。従って、都市全体における流れや温位のパターンは把握でき

^{*} 正会員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科

^{**} 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

^{***} 学生会員 工学部土木工学科

（〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1）

るが、個々のサーマルやそれらが熱混合層の乱流構造に及ぼす影響を検討できるわけではない。環状8号線に沿って形成される雲列などは、路上で生じるサーマルや乱流構造との関連性を想起させるのであるが、そのような観点からの研究は皆無である。

本研究では、広い低熱源としての要素を持つ大規模緑地や(神田ら(1991)⁷⁾)、網目状に張り巡らされた高熱源としての要素を持つアスファルト道路(浅枝ら(1992)⁸⁾)を微細格子(約50m)で解像し、LESモデルで熱対流混合層の計算を行い、加熱の非一様性が対流混合層内の平均量・乱流統計量・乱流構造に及ぼす影響を検討することを目的とする。

2. 数値実験概要

(a) 基礎方程式

基礎方程式は神田・日野(1991)⁹⁾と同じものを使用する。風速(3成分)、圧力、温位、水蒸気量のそれぞれについて格子平均化を施した方程式を解く。通常のスモグリンスキーモデルを使ったLESとは異なり、サブグリッドスケールの乱流エネルギー収支式を連立させることにより浮力によるエネルギー生成などが考慮されている。土壌系についても鉛直一次元的な熱・水移動を解き、地表面温度は大気・土壌の両方の熱・水蒸気フラックスから熱収支式により決定される。大気下層には接地境界層を設け、Monin-Obukhov 相似則を適用している。

(b) 無次元化

本計算は有次元で行なっているが、熱対流混合層に関する既存の実験や観測と比較するため無次元手法について述べる。代表長さは、その時刻の対流混合層高さを z_i とし、鉛直熱フラックスが最低値を示す高度で定義される。次元解析的考察により(例えば、Deardorff(1972)¹⁰⁾)、速度、温度、時間の代表スケール(w^* 、 T^* 、 t^*)はそれぞれ式(1)の様に表せる。

$$w^* = (\beta g z_i H_0 / c_p \rho)^{1/3}, \quad T^* = H_0 / (c_p \rho w^*), \quad t^* = z_i / w^* \quad (1)$$

ここで、 c_p : 定圧比熱(J/g.K)、 ρ : 空気密度(g/m³)、 β : 体積膨張係数(1/K)、 g : 重力加速度(m/s²)、 H_0 : 地表面からの顕熱フラックス(J/s.m²)、をそれぞれ表す。

(c) 計算領域

図-1には今回計算の対象とした大手町・皇居周辺の地形図を示す。この場所を計算例として選定したのは、大規模な緑地帯や堀(水面)というクールアイランド(冷源)としての要素と過密なオフィス街や首都高速道路というヒートアイランド(熱源)としての要素が共存する、気象学的にきわめて特徴的な場所であることを考慮したものである。図-2には図-1の地形図をもとに作成し、今回の計算に使用した地表面のメッシュ図と土地利用分布を示す。計算では、①コンクリート、②緑地、③アスファルト道路、④水面、の4種の土地利用を識別している。今回の計算では、土地の起伏とくにオフィスの凸凹(いわゆる都市キャノピー)の影響を考慮していない(この問題については別途検討中である¹¹⁾)。が、地表面からの加熱の非一様性が乱流統計量や対流層の構造に及ぼす影響を検討するには十分であると考えられる。大気系は、高さ2.4km、水平4km x 4kmの領域を45x45x45のメッシュ数で解像する。土壌系は深さ50(cm)までを10分割、植生系は高さ2mを10分割して計算を行った。

(d) 境界条件

水平方向には周期境界条件を(図-2の地表面土地利用も周期的に設定されている)、大気上端は内部重力波が吸収されるようにダンピング層を設けてある。土壌部下端は温度一定である。

(e) 初期条件

計算は午前10時頃を想定した条件を与える。初期の混合層高さは800mで、ここより下は温位一定、それより上の安定層では温位勾配一定 = 0.0035(K/m)を与える。湿度分布は全層一定で10(g/kg)である。

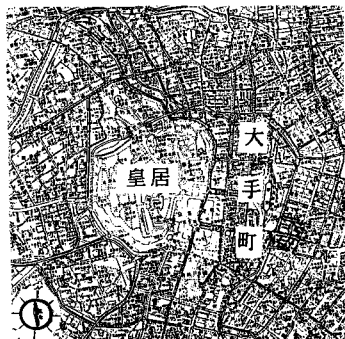


図-1 皇居・大手町周辺

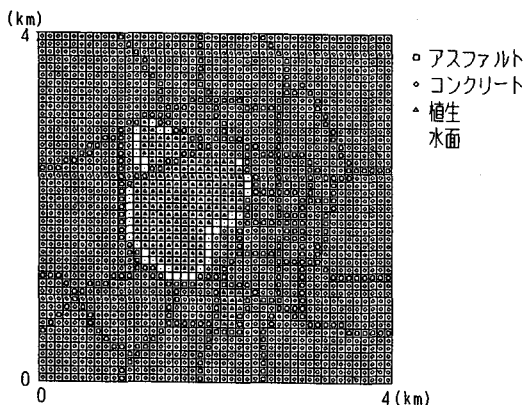


図-2 計算に用いた地表面メッシュ図
土地利用はほぼ図-1に対応

(f)計算諸元

大手町・皇居周辺の気象シミュレーション(ケース1)と同時に、底面が一様に加熱される場合(ケース2)の比較計算を行った。これは、底面の加熱の非一様性が熱対流混合層に及ぼす影響を議論するためのものである。ケース2の地表面以外の条件はすべてケース1と同じにしてある。ケース2の地表面の顕熱・潜熱フラックスは、ケース1の計算結果より求まる積分時間内の平均的な地表面顕熱フラックスおよび潜熱フラックスを全地表面にわたって一定値として与えた。地表面条件と熱フラックスの値を表-1に示す(ケース1については積分時間内の平均値である)。時間刻みは1.25(sec)、で5000 step(実時間で約1hr 45min)まで計算を行った。計算に要したCPUはスーパーコンピュータ-SX-2で1ケース約10hrであった。

表-1 地表面からの熱フラックスの条件

	ケース1	ケース2
加熱法	非一様加熱	一様加熱
算出法	熱収支式より	ケース1の結果より
数値 (W/m ²)	顕熱 潜熱	顕熱 潜熱
	アスファルト 200 0	
	コンクリート 100 0	110.7 10.6
	水面 10 100	
	緑地 50 100	

※ ケース1の数値は平均値

3. 計算結果と考察

3-1 温位平均プロファイル

まず温位の平均プロファイルより計算結果の妥当性を検討する。ここで言う平均値とは一つの水平断面内の全点から求めた空間平均値であり、時系列から求まる一点でのアンサンブル平均値と近似的に等しい(Deardorff (1972)¹⁸⁾)。次に述べる乱れについても同様で一つの水平断面内の全点から求めた空間平均値からのずれとして定義した。図-3には、初期と4000 step後の温位平均プロファイルを示す。但し、横軸、縦軸とも基準値で無次元化されている。底面からの熱フラックスがすべて混合層全体の温位上昇に使われるとすれば、熱量の保存式から、その温位上昇分は $t/t^* = 6.78$ (ここで計算結果より $z_i = 1060$ (m)として算出した)となること

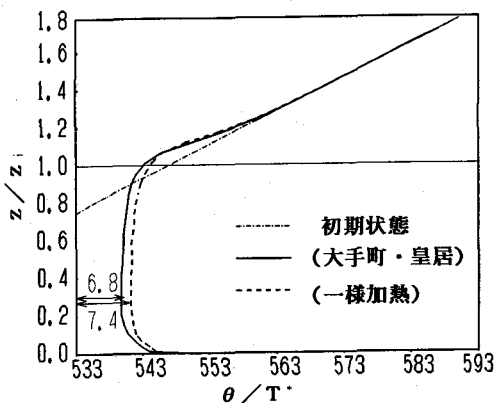


図-3 温位の鉛直分布
縦軸、横軸ともに無次元、 θ は温位

が容易に導かれる。計算結果は、ケース1が約6.8、ケース2が約7.4で、いずれも理論よりわずかに大きい、混合層上部の安定成層から熱の Entrainmentがあることを考慮すれば、妥当な値であると言える。また、一様加熱の方が Entrainment が大きいことを示している。混合層の上部には初期分布より温位が低下するいわゆるオーバーシュート現象が見られる。

3・2 乱流統計量

(a)鉛直風速の乱れ強度

図-4には無次元化された鉛直流速成分の乱れ強度の鉛直分布を示す。比較のため、式(2)で定義される内部フルード数(Fr)が本実験の値(0.12)と近い Willis & Deardorff(1974)¹⁾の室内実験結果($Fr=0.10$)と、一般風がきわめて弱い条件のもとで行われた Lenschow et al. (1980)¹²⁾の航空機による大気混合層観測の結果も同時に示す。

$$Fr = w^* / (N z_i), N = (\beta g \Gamma)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 N :ブルントーパイサラの振動数、 Γ :安定成層の温位勾配をそれぞれ表す。

計算結果は、実測・実験結果とよく一致している。また、一様加熱(ケース2)の方が、非一様加熱(ケース1)よりも鉛直流速の乱れ強度が1割ほど強くなっている点が注目される。このことは、一様に加熱された場合の方が底面から与えられた熱エネルギーが効率よく浮力による上昇と鉛直混合に使われていることを示唆している。

(b)水平風速の乱れ強度

図-5には無次元化された水平風速成分の乱れ強度の鉛直分布を示す。水平風速の乱れ強度も Willis & Deardorff (1974)¹⁾の実験結果とよく一致している。また、Lenschow et al. (1980)¹²⁾の観測が計算より大きめにでているのは、大気中の弱い一般風の影響のためであろう。鉛直風速成分は浮力により直接エネルギーを得るのに対し、水平風速は上昇成分にともなう圧力変動からエネルギーを得るので、水平風速の乱れ強度は、鉛直風速の乱れ強度(図-4)より小さい。ケース1、ケース2を比較すると混合層内では水平風速の乱れ強度に有意な差は認められない。

鉛直風速の乱れ強度とだけ対応させて考えれば一様加熱の水平風速の乱れ強度の方が強くなりそうであるが、場所による温度差=水平圧力勾配がつき易いと言う点では逆に非一様加熱の方が強くなるはずである。混合層内ではこの両方の効果がキャンセルしているのではないだろうか。圏界面及びその上部では、一様加熱(ケース2)の方が乱れ強度が大きくなっており、Entrainmentがより盛んに行われていることを示している。

3・3 温位・鉛直速度の空間分布

(a)混合層内

図-6(a)(b)には、 $z=10$ (m)の水平断面に於ける $t=1250$ (sec)後の温位分布を示す。非一様加熱の場合

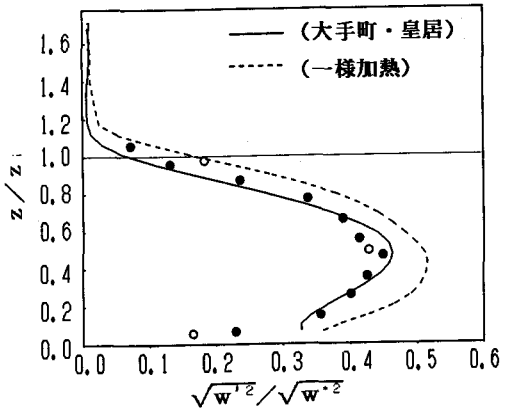


図-4 鉛直風速の乱れ強度鉛直分布
縦軸、横軸ともに無次元

- (●) Willis & Deardorff¹⁾の室内実験
- (○) Lenschowら¹²⁾の航空機観測

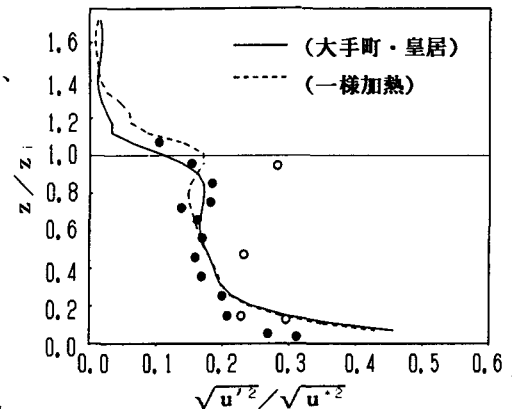


図-5 水平風速の乱れ強度鉛直分布
縦軸、横軸ともに無次元

- (●) Willis & Deardorff¹⁾の室内実験
- (○) Lenschowら¹²⁾の航空機観測

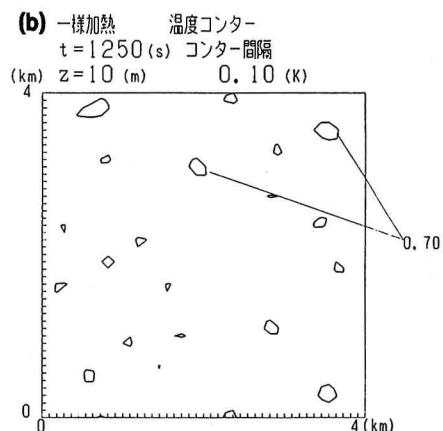
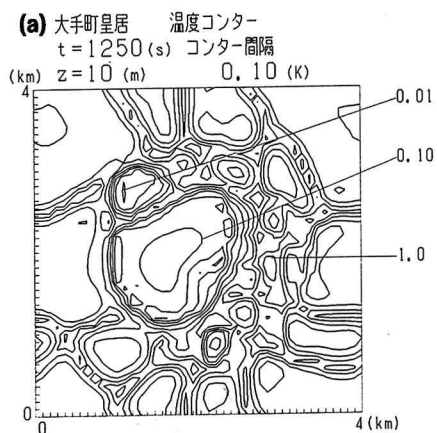


図-6 混合層内の水平断面における温位コンター ($z = 10$ (m), $t = 1250$ (sec))

(a) ケース 1 (b) ケース 2

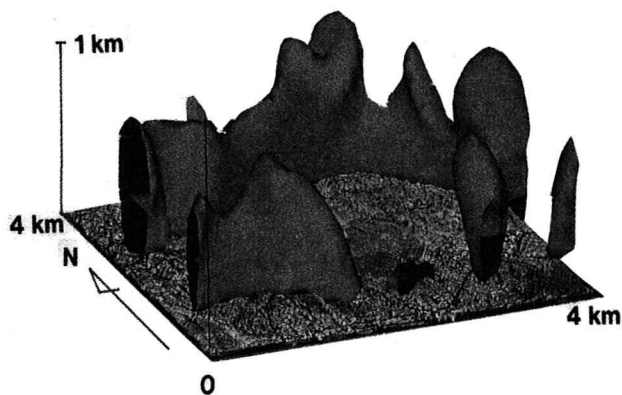


図-7

皇居・大手町上空のサーマル分布
 ケース 1 の結果より
 $w = 1$ (m/s)、 $t = 6250$ (sec)

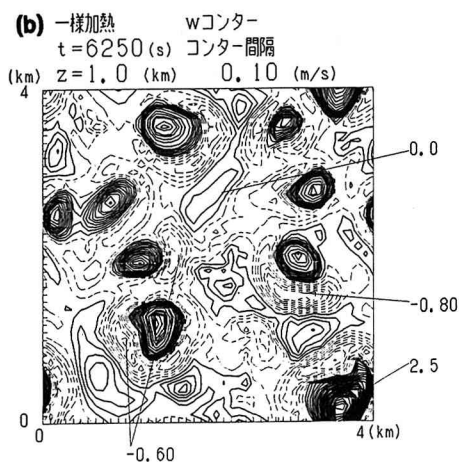
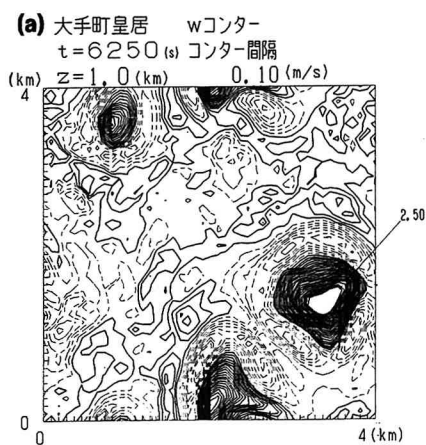


図-8 圏界面付近の水平断面における鉛直速度コンター ($z = 1$ (km), $t = 6250$ (sec))

(a) ケース 1 (b) ケース 2 点線は下降流域を表す

(ケース1)は、アスファルト道路網が高熱源、皇居が大規模な冷源として作用している。一方、一様加熱の場合(ケース2)は、強いサーマルに対応すると思われる高温部がランダムに存在しており、この段階ではまだ水平温度分布に秩序性は見られない。図-7には $t = 6250(\text{sec})$ におけるケース1の上昇流速のパス($w = 1.0\text{m/s}$)を示す。領域中央にある皇居周辺にはほとんどサーマルが見られず、一種のクールアイランドとして大規模な下降流域を形成している。一方、皇居を環状に取り巻くような帯状のサーマル帯があたかもカーテンのようにアスファルト道路に沿って集中的に形成されているのが分かる。

(b) 圈界面近傍

図-8(a)(b)には、 $z = 1\text{km}$ (圈界面近傍)の水平断面に於ける $t = 6250(\text{sec})$ 後の上昇流成分のコンターを示す。混合層内のサーマルの分布に対応して、非一様加熱(ケース1)の場合は上昇流域が集中しているのに対し、一様加熱の場合は(ケース2)は複数の上昇流域が分散している。平均温位や乱流統計量の分布からは、一様加熱の方がより効率的に、熱・運動量の混合や安定成層からのEntrainmentがなされていることが示唆されたが、このことは、一様加熱の場合、混合効率の良い上昇流域の分布形態が自己選択的に形成されることを示している。

謝辞 本研究は、研究委員会「スハ-コンピュターと社会：委員長、矢川元基」の一環として行われたものであり、その際、同会の事務局を務める日建コンサルタントの川崎俊太氏の便宜により、リポートスハ-コンピュター研究所(株)よりSX-2で約100時間のCPU提供を受けました。ここに厚く感謝します。

参考文献

- 1) Willis, G.E. and Deardorff, J.W. (1974): A laboratory model of the unstable planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, vol. 31, pp. 1297-1307.
- 2) 浅枝隆・玉井信行(1982): 熱的外乱により連続成層場に生じる対流の特性について、土木学会論文集, vol. 323, pp. 109-119.
- 3) Schmidt, H. and Schumann, U. (1989): Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulation, *J. Fluid Mech.*, vol. 200, pp. 511-562.
- 4) Kimura, F. & Takahashi, S. (1991): The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area, *Atmos. Environ.*, vol. 25B, pp. 155-164.
- 5) 齊藤武雄(1992): 地球と都市の温暖化、森北出版.
- 6) Kimura, F. (1989): Heat flux on mixtures of different land-use surface; test of new parameterization scheme, *J. Meteor. Soc. Japan*, vol. 67, pp. 401-409.
- 7) 神田学・日野幹雄・稲垣聡(1991): 夏期に森林・水面が果たす気候緩和効果に関する実測とその周辺域への影響伝達に関する数値解析による検討、水工学論文集, vol. 35, pp. 585-590.
- 8) 浅枝隆・永沼崇彦・鈴木水弘・塩崎修男(1991): 都市域の温暖化における舗装の蓄熱効果、水工学論文集, vol. 35, pp. 591-596.
- 9) 神田学・日野幹雄(1991): 大気-土壌系の相互作用に着目した対流性雲の発生・発達に関するLESモデルによる検討、水工学論文集, vol. 35, pp. 27-34.
- 10) Deardorff, J.W. (1972): Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, vol. 29, pp. 91-115.
- 11) 日野幹雄・稲垣聡・神田学(1993): 都市とストリートキャニオンにおける風速場と熱環境に対する街路樹の効果、水工学論文集, vol. 37.
- 12) Lenschow, D.H., Wyngaard, J.C. and Pennell, W.T. (1980): Mean-field and second momentum budgets in a baroclinic, convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, vol. 37, pp. 1313-1326.