

小規模なヒートアイランドにおける力学的混合効果に関する観測

Observational Study on Effect of Dynamical Mixing over Small Scale Heat Island

野林 暁*・林 陽生**

Akira NOBAYASHI* and Yousay HAYASHI**

1 はじめに

都市の気温が郊外に比べて上昇する現象は、ヒートアイランド現象として知られ、風の弱い晴天夜間に顕著になることが知られている (Oke and Maxwell, 1975). 一般に都市域では、人工排熱による加熱効果や建物による空気力学的な混合効果が要因となり、ヒートアイランドが形成される (Roth, 2000). また、晴天夜間には郊外で放射冷却が起こり低温になり接地逆転層が発達することから、放射冷却の強さは風速と同様にヒートアイランド形成要因の一つとして議論されてきた (田宮・武藤, 1974).

都市域を構成する建物群落は、人工排熱源でもあり力学的混合を引き起こす粗度要素でもある。高橋ほか (1981) は、Lettau (1969) が提唱した建物の底面積と平均高度の比から求めた幾何学的粗度長を用いて岐阜県大垣市の粗度長分布を求め、最低気温時のヒートアイランドの中心域と粗度長が大きい地域が一致することを示した。また Myrup (1969) は、都市に熱が蓄積する機構について熱力学的なモデルを考え数値実験を行い、空気力学的粗度が増大すると最低気温が高くなることを示した。一方、林・田口 (1983) は、Lettau (1969) が示した幾何学的な粗度長に関し、風速変化に伴う空気力学的な効果の変化を考慮する重

要性を示した。

こうした研究を背景に、田宮・大山 (1981) は、ヒートアイランド強度と郊外における温位の鉛直勾配の相関が高いことから、力学的混合による逆転層破壊によりヒートアイランドが形成される過程を説明した。また、Uno *et al.* (1988) は、札幌市の上空で乱流輸送を観測し、熱源となる市街域上空の顕熱フラックスの値が正にならない結果を示した。この原因は、人工排熱の効果よりも建物群から発生する乱流が大気成層状態に影響したためと考え、機械的な乱流生成と上空での熱の取り込みがヒートアイランドの形成に関係すると考察した。さらに Uno *et al.* (1989) は、鉛直一次元モデルを用いた解析を行い、上述の現象を検証した。

このように、建物の力学効果による要因の寄与に注目した研究が行われた一方、Kusaka and Kimura (2004) は、単層キャノピーモデルとメソモデルを結合させ、人工排熱による加熱効果や放射冷却の緩和効果について感度実験を行ない、それぞれの効果が支配する代表的時間スケールが異なっている点を指摘した。また Tokairin *et al.* (2006) は、同様のモデル解析を行い、建物表面からの顕熱放出と風速の低下が夜間のヒートアイランドに重要であることを示した。続いて Ohashi *et al.* (2007) は多層キャノピーモデルと建物群エネルギーモデルを結合させ、冷房排熱が

* 三菱電機

** 筑波大学大学院生命環境科学研究科

気温を1～2℃上昇させる効果があり、大都市の気温上昇に重要であることを示した。

熱的要因と機械的要因を分離し、それぞれの寄与の大きさについて明らかにする研究も行われた。Martilli (2002) は、力学的要因・熱的要因・両方の要因が働いた場合および都市が存在しない場合について数値実験を行い、熱的要因と力学的要因を分離する解析を行った。その結果、力学的要因は都市境界層上層の形成に重要な役割を果たし、熱的要因は下層大気の特徴づけていることを示した。田宮・大山 (1981) によると、風速が強い場合には郊外の接地逆転層も破壊され、ヒートアイランドは発生しないことが指摘されている。Martilli (2002) は、数値モデルによる風速の感度実験から、風速 3 ms^{-1} のときに都市上空で乱流熱フラックスの大きな負の値が現れることを示した。しかし広範囲の風速条件下での観測例は少ないため実態は明らかになっていない。

以上に示した研究により、ヒートアイランド形成に関与する力学的混合の重要性が論じられてきた。しかし、力学的混合の効果が風速条件と密接に関係すると考えられるにも関わらず、量的に取り扱った研究は少ない。力学的混合と風速との関係を明らかにするためには、熱的要因の効果が小さな小規模集落を対象とし、多様な風速条件下での観測データを蓄積することが効果的である。そこで本研究では、人工熱の効果が小さな小集落を対象として、集落内外の水平気温分布と鉛直分布の観測を行い、力学的混合の風速依存性とヒートアイランドとの関係を解明する基礎を明らかにすることを目的とした。

II 観測

1. 観測対象地域

観測対象地域は、茨城県土浦市高岡沖の小集落とした。土浦市高岡沖は、茨城県南西部に位置し、筑波大学から東へ約3 kmの場所にある（第

1図、上図）。集落の周囲は水田に囲まれており二階建て以下の民家が密集して分布している。従って、どの風向の風もほぼ均等に小集落を形成する建物群の影響を受けると考えられる。人工排熱の規模が小さい小集落であることに加え、地形的には筑波台地と新治台地の間に存在する平野地形を構成する桜川低地に位置している。こうした立地条件は本研究の目的に適している。

2. 観測方法

観測は、気温分布の季節変化の観測を目的とした長期観測と、係留気球による気温などの鉛直分布の観測を加えた集中観測の2種類を実施した。



第1図 観測対象地域の概要
上図：高岡沖と陸域環境研究センター（△）、下図（高岡沖周辺拡大図）：観測地点の配置。

長期観測の方法は次の通りである。気温計（おんどとり；T&D社製）を集落内外7地点のそれぞれ高さ1.5 mに設置し、10分間隔の気温を測定した。第1図（下図）に、高岡沖集落の拡大図と気温計設置地点を示す。観測期間は、2007年12月15日～2008年6月30日のほぼ6カ月半である。温度計を設置した地点の概略は以下の通りである。すなわち、集落外北側（地点1）、集落内北側境界付近（地点2）、集落内部（地点3～5）、集落内南側境界付近（地点6）、集落外南側（地点7）であり、顕著なヒートアイランドが発現すると考えられる冬期の卓越風向（北西）に沿った直線上に配置した。長期観測期間における風速、風向、日射量は、筑波大学陸域環境研究センターの熱収支・水収支観測圃場における観測データ（URL：<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/database.html>）を利用した。なお、後述する卓越風速と風向の値は高度29.5 mの観測値を、大気の逆転強度は29.5 mと1.6 mの気温差から求めた。

集中観測期間は、2008年10月16日～18日の3日間実施した。地表付近の気温と湿度を測定するために地点1と地点5の高度1.5 mに温湿度計（TR-72U；T&D社製）を設置した。風速計は、3杯式風速計（FC22；牧野応用測器研究所製）を地点1の地上2 mに設置した。

係留気球を用いて風速、気温、相対湿度の鉛直分布を測定した。用いた測器は地上観測のものと同様である。風速計は、気球の下側約50 cmの位置に取り付けた幅50 cmの枠の中心に、回転部分を下にした状態で取り付けた。温度計は風速計を取り付けた基部に固定した。気球による観測高度は0～20 mが2 m間隔、20～30 mが5 m間隔とし、30～40 mが10 m間隔で行なった。一高度に停止させる時間を2分とし、15高度程度を約45分で上下させて測定した。観測中は一定の風が吹き、係留気球が風下側へ流されることから、同時に係留気球のロープの傾きを測定し、

後に補正して測定高度を求めた。

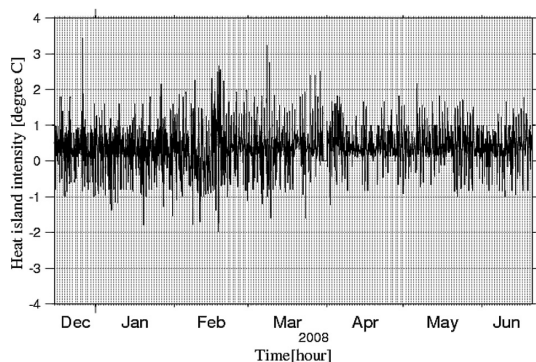
III 結果

1. 長期観測

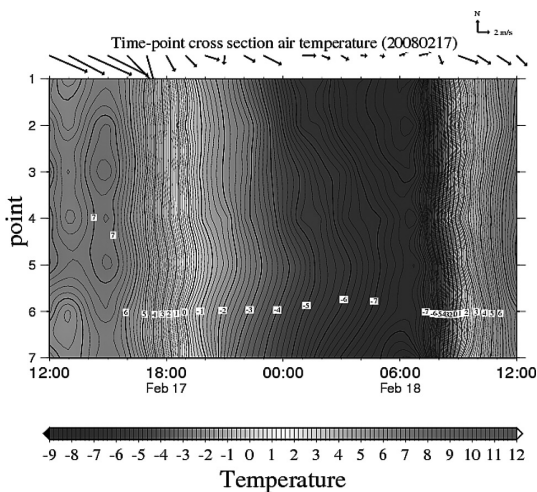
ヒートアイランド現象の強さを表わす指標として、ヒートアイランド強度（HII；都市内外の気温差）がしばしば用いられる。本研究では、全観測期間の平均気温が最も高かった地点（地点5）と集落内で最も低かった地点（地点1）の気温差をHIIとした。10分ごとのHIIを平均して1時間毎のHIIを求めた。

第2図に毎時のヒートアイランド強度の時系列変化を示す。プラスの値は集落内の気温が集落外より気温が高い状態を示す。寒候期の12月から3月にかけてはHIIが大きく変動幅も大きい。HIIが寒候期から暖候期になるに従って縮小する特徴はこれまでも指摘されているが、HII変動幅は毎日の天候状態に依存する。ここで、HIIを求める際の地点1と地点5が北西-南東の基線上にあり、かつ地点1が北西側にあることから、卓越風向に南東側の成分が含まれる場合には地点1が風下になる場合が考えられる。従って、第4章にて長期観測期間の観測値を使用した考察の際には、北西寄りの風向の場合を解析の対象にした。

全期間のうち、ヒートアイランドが最も発達し



第2図 長期間のヒートアイランド強度の時系列変化

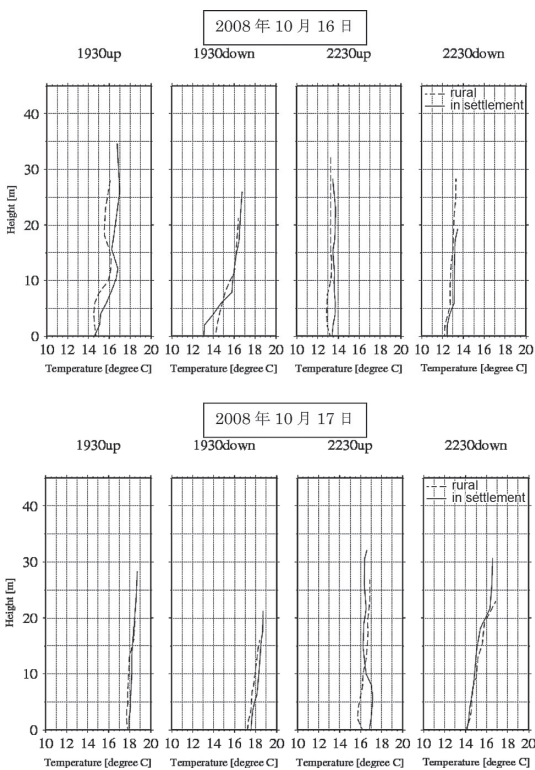


第3図 2008年2月17日から18日の気温の時空間分布

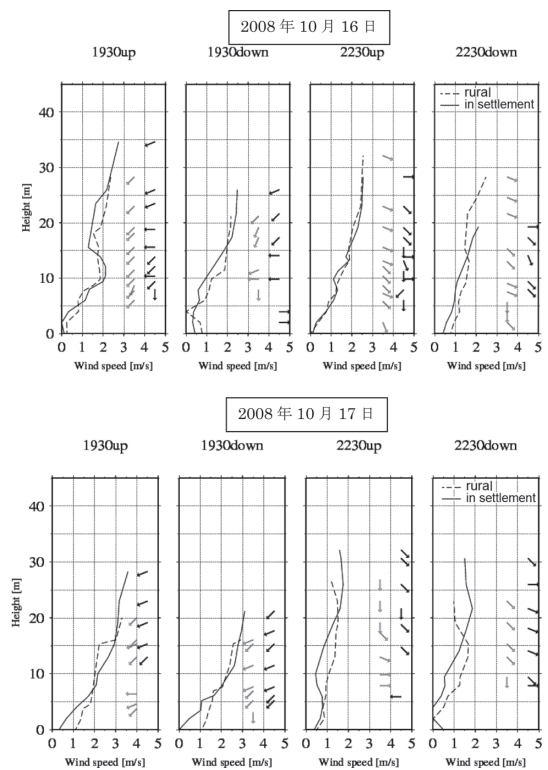
た日である2008年2月17日～18日の気温の時空間分布を第3図に示す。風向はほぼ北西で日中と夜間ともに晴れており、HIIが大きな値になった。特に日中は最高気温出現時に集落内の地点2～5が高温となった。17時頃になると全地点で気温が下がり始め、翌日の6時頃にかけて徐々に低下した。集落内(地点4と5)では下がり方が小さく、日の出前に最低気温になる時刻には、集落内と集落外の気温差が1.9℃と最も拡大した。

2. 集中観測

係留気球による観測結果を第4図(気温鉛直分布)と第5図(風速鉛直分布)に示す。観測期間中はよく晴れて風速は弱かった。いずれも上段が



第4図 2008年10月16日(上図)と17日(下図)の気温の鉛直プロファイル
実線：地点5の気温、破線：地点1の気温。



第5図 2008年10月16日(上図)と17日(下図)の風速鉛直プロファイル
実線：地点5の風速、破線：地点1の風速、黒矢印(右側の矢印)：地点5風向、灰色矢印(左側の矢印)：地点1風向。

2008年10月16日(19:30~22:30), 下段が2008年10月17日(19:30~22:30)の鉛直分布である。それぞれ表示時刻の前後約30分間に、気球上昇時(up)と下降時(down)に測定した。地点1の鉛直分布を破線、地点5を実線で示す。第5図の矢印は卓越風向を表しており、右側の列が地点5の風向を、左側の列が地点1をそれぞれ示す。

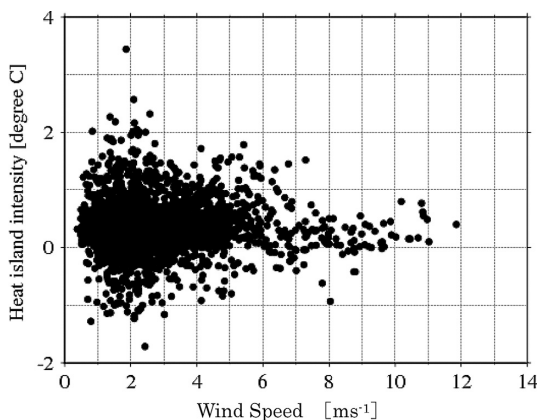
10月16日の気温鉛直分布をみると19:30では高度10m以下で下層ほど明瞭な安定成層となっている。下降時の下層で集落内が集落外より低温になっているが、原因については未解明である。時間の経過とともに下層の冷却が進み、22時半になると観測した約30m以下の層全体で気温が低下している。17日の場合も、時刻の経過とともに全層が冷却する過程が現れている。

風速鉛直分布は気温鉛直分布のように単調ではなく、比較的低い層で風速が大きくなる特徴が現われている。風向は両日とも19:30(up)から22:30(down)にかけて、北東から北西に反時計まわりに変化している。

IV 考察

1. ヒートアイランド強度と風速の関係

長期観測を実施した全期間について、陸域環境

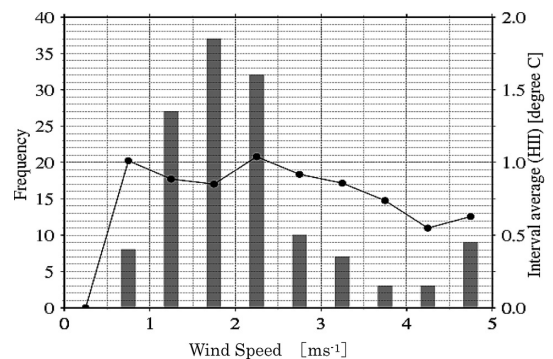


第6図 全期間における風速とヒートアイランド強度の関係

研究センターの高度29.5mにおける風速とHIIの関係を第6図に示す。季節や時刻を区別せずに見ると、HIIはマイナス側にも分布することがわかる。集落内の気温が集落外より高まるプラス側に注目すると、ばらつきはあるものの風速が約 2 ms^{-1} までは風速とともに増大する傾向が現われており、風速が 2 ms^{-1} より強まると徐々に分散が縮小すると同時にHII値は約 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ に収束する傾向が認められる。

風速 2 ms^{-1} 前後でHIIが極大値に近づく特徴について検討を加えるため、以下の解析を行った。すなわち、筑波大学陸域環境研究センターにおける観測値を基準にして、晴れた夜間(夜間の正味放射量が -30 Wm^{-2} 以下)、HIIが $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上、かつ風向が北西寄りの場合に限定し、風速の階級分けを行い、それぞれ風速区間でHIIを平均した。その結果を第7図に示す。発生頻度を棒グラフで、HIIを折れ線グラフで示す。全体の73%が風速 $1.0\text{ ms}^{-1} \sim 2.5\text{ ms}^{-1}$ の範囲に出現している。HII値の区間平均をみると、風速階級が $0.5\text{ ms}^{-1} \sim 1.0\text{ ms}^{-1}$ から $2.0\text{ ms}^{-1} \sim 2.5\text{ ms}^{-1}$ の範囲に $\text{HII}=0.82\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ の大きな値が現われている。また、風速の階級が $2.5\text{ ms}^{-1} \sim 3.0\text{ ms}^{-1}$ 以上となり強まるに従ってHII値は小さくなっている。

このような風速依存性が現れる理由として次のことが考えられる。風速が非常に弱い条件では放

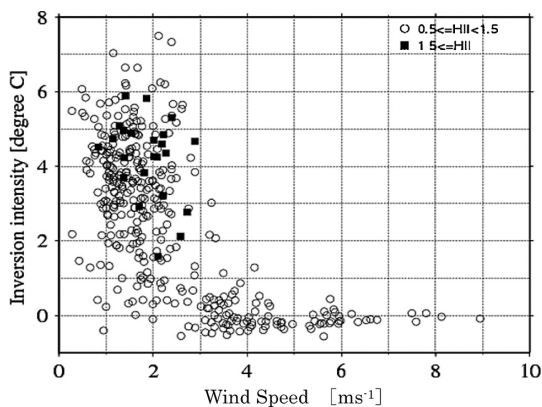


第7図 晴天日、風向北西寄りのヒートアイランド発生時の風速階級の頻度分布とHIIの区間平均

射冷却によって形成された安定層が壊されないため、あまり強い HII は形成されない。風速が $2.0 \text{ ms}^{-1} \sim 2.5 \text{ ms}^{-1}$ になる過程では、集落の力学的混合効果が働いて集落の地表付近の気温が相対的に高まる。この結果、郊外との気温差が大きくなることが考えられる。さらに、風速が 3 ms^{-1} 以上になると、集落と郊外の両方で鉛直方向の混合効果が働き、HII 値が小さくなると思われる。

2. 逆転層強度とヒートアイランド強度の関係

鉛直方向の逆転強度との関係をもとに、前節で述べた HII の風速依存性の要因を検証する。接地逆転層とヒートアイランドには密接な関係があることが過去の研究で示されている（田宮・大山, 1981）。逆転層の規模の指標として筑波大学陸域環境研究センターの高度 29.5 m の気温から 1.6 m の気温を引いた値を逆転強度として用いた。HII が $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上に該当する日時を抽出し、大気逆転強度の風速依存性を第 8 図に示す。図中の○はヒートアイランド強度が $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の中程度の場合を、■は $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上の強い場合を表す。これによると、風速が約 3 ms^{-1} 以下では逆転強度の値が分散する一方、約 4 ms^{-1} 以上では逆転層が消滅し中立状態に近づく特徴が示されている。



第 8 図 ヒートアイランド強度 (HII) 別にみた風速と逆転強度の関係
○ : $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{HII} < 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ■ : $1.5 \leq \text{HII}$

もう一つの特徴は、HII が大きい場合（図中の■）は、風速 3 ms^{-1} 以下の比較的強い逆転強度の範囲に現われている。

以上のことから、第 6 図に現れた風速が約 3 ms^{-1} 以下の領域で相対的に HII 値が大きくなるという水平的な特徴が、第 8 図に示された鉛直方向の逆転強度が強い成層状態のもとで発生していることがわかる。また、第 6 図において風速が約 3 ms^{-1} 以上の条件で徐々に HII が小さくなる過程では、大気成層状態がほぼ中立となっていることが考えられる。さらに、人工排熱の効果が加わる大都市の場合には、風速には依存しない加熱の効果と風速に依存する力学的混合の効果が相乗して現れると考えられる。

V 結論

ヒートアイランド形成への空気力学的な粗度により発生する機械的鉛直混合の役割を解析するため、人工熱の発生が無視できる小集落を対象とした観測を行った。その結果、郊外における高度 1.5 m の風速が約 3.0 ms^{-1} でヒートアイランド強度に極大値が現れた。この現象は、一般に知られている力学的混合の効果が、地表面粗度が小さい郊外と大きい集落で異なる風速依存性を示すことを意味している。すなわち、集落外の接地気層の逆転強度およびヒートアイランド強度と風速との関係には、風速が約 3 ms^{-1} 以下の条件で集落外では接地逆転層が維持される一方、集落内では力学的混合により地上付近の気温が上昇してヒートアイランド強度が増大することが明らかになった。

こうした現象を一般の都市（熱の供給がある都市）に適用できるか否かは、さらに観測と解析が必要である。

謝辞

本研究は生命環境科学研究科環境科学専攻の修

士論文の一部である。研究を進めるにあたり、筑波大学生命環境科学研究科大気科学分野の皆さまに多くの貴重な助言を頂きました。御礼申し上げます。

また観測では、生命環境科学研究科の院生諸氏および第一学群自然科学類の学群生諸氏に協力を頂きました。さらに高岡沖地区長の萩原氏、前地区長の野口氏、高岡沖集落の住民の皆さまには快く観測場所を提供していただきました。これらの方々のご協力によって、本研究を実施することができました。重ねて、心より感謝申し上げます。

文献

- 高橋百之・関根 清・岩田知子・小坂祐子・福脇左千江 (1981)：大垣市のラフネスパラメータについて。地理学評論, **54**, 579-594.
- 田宮兵衛・大山秀樹 (1981)：小集落に夜間発生するヒートアイランドの実態と成因について。地理学評論, **54**, 1-21.
- 田宮兵衛・武藤禎夫 (1974)：住宅団地において夜間観測される高温域について。気象研究ノート, **119**, 196-205.
- 林 陽生・田口厚志 (1983)：筑波大学建物群地域の粗度について。筑波の環境研究, **7**, 187-194.
- Kusaka, H. and Kimura, F. (2004): Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 1899-1910.
- Lettau, H. (1969): Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *Journal of Applied Meteorology*, **8**, 828-832.
- Martilli, A. (2002): Numerical study of urban impact on boundary layer structure: sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture. *Journal of Applied Meteorology*, **41**, 1247-1266.
- Myrup, L.O.(1969): A numerical model of the urban heat island. *Journal of Applied Meteorology*, **8**, 908-918.
- Ohashi, Y., Genchi, Y., Kondo, H., Kikegawa, Y., Yoshikado, H. and Hirano, Y. (2007): Influence of air conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **46**, 66-81.
- Oke, T.R. and Maxwell, G.B. (1975): Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, **9**, 191-200.
- Roth, M. (2000): Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **126**, 1941-1990.
- Tokairin, T., Kondo, H., Yoshikado, H., Genchi, Y., Ihara, T., Kikegawa, Y., Hirano, Y. and Asahi, K. (2006): Numerical study on the effect of buildings on temperature variation in urban and suburban areas in Tokyo. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **84**, 921-937.
- Uno, I., Ueda, H. and Wakamatsu, S. (1989): Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **49**, 77-98.
- Uno, I., Wakamatsu, S., Ueda, H. and Nakamura, A. (1988): An observational study of the structure of the nocturnal urban boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **45**, 59-82.
- (2009年6月11日受付, 2009年10月31日受理)

