

複雑地形が都市熱環境に及ぼす影響について

—琵琶湖周辺部における解析—

Analyses of the Thermal Environment in Urban Area and Surrounding

藤野 毅¹・浅枝 隆¹

Takeshi FUJINO and Takashi ASAEDA

ABSTRACT; Meteorological field observations were conducted at a small urban area in the lakeshore basin environment in summer. During the daytime of a clear, calm day, about 2000m height of the mixing layer were developed by the thermally induced circulation over the basin. The maximum of air temperature around the lake shore were recorded after 1500 LST, and at 1800 LST for the urban area. It is conjectured that the mechanism of a continuation of high temperature in urban area is mainly due to the complex factors such as the downward wind which brings high temperature of air mass by the circulations, the relatively high temperature of paved ground and roof surfaces, and the improved mass and heat exchange within and above the urban canopy layer. Numerical simulation was conducted to evaluate these convection and urban effects by a three-dimensional turbulent closure model. The results were in good agreement with observed value of air temperature, mixing ratio, and wind profiles. The large circulation also reproduced well, and it brought warm and dry air mass to the ground over the lake.

KEYWORDS; Urban Climate, Basin Area, Convection, Field Observation, Numerical Analysis

1. はじめに

都市のヒートアイランド現象の研究は古くから行われてきており、都市の気温分布に関する実測例や、人工排熱、都市キャニオン内の貯熱効果などの発生要因に関する研究についても多くの成果が得られている(例えば、Lars et. al, 1985; Yinka, 1990; Kimura and Takahashi, 1990)。この現象は、都市そのものの熱環境特性を表すという性質があるだけでなく、その評価が周囲の条件によって異なるという大きな特徴を持っている(例えば、Munn et. al, 1969; 藤野ら, 1996)。すなわち、都市そのものの規模や、建物の密集度など都市の構造の違い、その都市の立地条件によって現象は大きく異なる。一つの例として都市のヒートアイランド現象を評価する代表的なパラメーターとして、都市と郊外の温度差により定義されているヒートアイランド強度がある。Oke and Maxwell(1975)によると、その強度は静穏で晴れた日の日没後の3～4時間後にその最大値を記録することが示されており、都市と周辺部との間の地表面熱収支の違いや夜間の放射冷却特性の違い等に起因するものとして観測や数値計算によって示されている。しかしながら、そこを取り巻く気候特性が特異な場合、例えば、海岸における海風等、局地風が卓越するような場であったり、盆地のように大規模な混合層が形成されるような場では、地表面の違いやキャノピーの有無による熱収支特性の違いだけでは現象を十分に説明することはできず、周辺地域を含めた広い領域に生ずる大気の局地循環に影響を受けている。

このように、ヒートアイランド現象は地域性があるため、都市域の熱環境を解析する際にも、都市域だけでなくそれを取り巻く周囲の環境も含めた解析を行う必要がある。ここでは、こうした周辺地域を含めた大気の局地循環がヒートアイランドに強く影響している例を示しその解析を行う。

¹ 埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 浦和市中大久保 255
Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Urawa, Saitama, 338-8570



Fig. 1 長浜市周辺と観測点

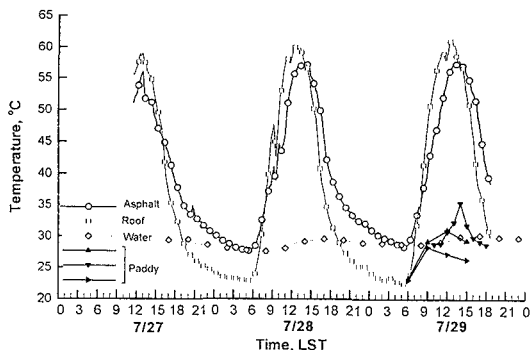


Fig. 2 各種地表面温度の日変化

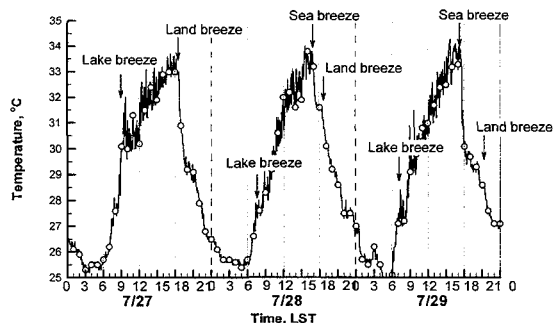


Fig.3 気温の日変化

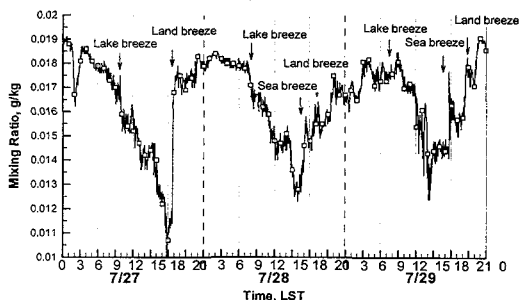


Fig. 4 比湿の日変化

2. 観測方法

観測は、盆地状の地形である琵琶湖岸に位置する長浜市周辺(35° 22' N, 136° 18' E)において行った。観測日は1996年7月27日から29日までの3日間である。観測対象とする市街地の建物密集区域は5km²程度の規模であり、市街地内の建物は、2階建ての瓦屋根の一般住宅が半数以上を占めており、都市キャノピーの平均高さは7m程度である。周囲は水田で囲まれており、都市域との間に明瞭な土地利用の対比を示す。観測項目は、地上気温、高さ58mまでの気温および相対湿度、アスファルト道路表面温度、瓦屋根面温度、全天日射量、大気放射量、地上および高さ58mにおける風向・風速、近隣の町でのゾンデ観測などである。Fig. 1は、長浜市周辺の土地利用と観測地点を示す。観測期間中の総観場の気象は太平洋高気圧が日本付近を覆っており、輪島や潮岬における高度5kmの風速は10m以下であった。

3. 観測結果

各種地表面温度、NTT鉄塔での高さ58mにおける気温、比湿の日変化をそれぞれFigs. 2~4に示す。日中の瓦屋根面とアスファルト道路表面の温度は3日間とも55°C以上に達し、草地、水田、および琵琶湖水面下50cmの水温と比較して20°C程度も高く、都市部の気温場を形成する大きな熱源になっている。ここで、表面温度の最高値は、瓦屋根では12時頃に、アスファルト道路では13時頃にそれぞれ記録され、それ以降、日射量が弱くなるに従い低下しており、物性の違いによって日較差やピーク時刻が異なるものの、日射の変化に対応する変化となっている。これに対し、地上の気温は、13時以降も上昇を続け、最高値に近い高温状態は夕方18時ごろまで継続し、風向きが湖風から変化するまで維持された。昇温に使われる熱が地面からの乱流輸送のみによって生ずるものとすれば、気温は通常14時前後にピークを迎え、それ以降は地面の温度の低下とともに気温も下降するはずである。ここではこうした関係はみられない。この関係を都市上空の風向きと比べると、1)湖風は午前8時から10時の間に発生し、この間は気温は上昇し続けた。2)27日と28日では、19時頃風向が陸面

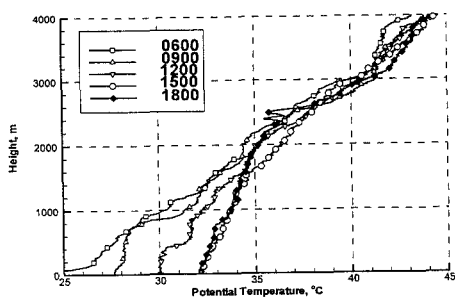


Fig. 5 温位のプロファイル

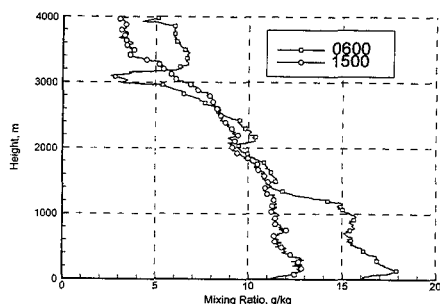


Fig. 6 比湿のプロファイル

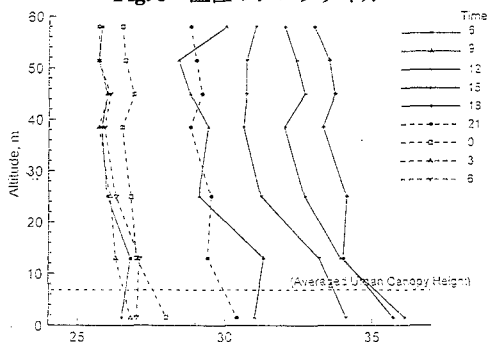


Fig. 7 都市キャノピー内外の気温プロファイル

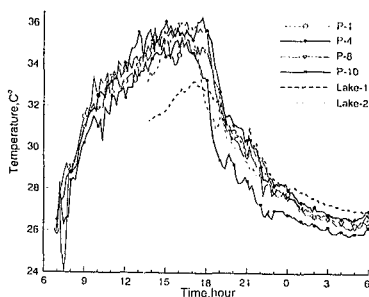


Fig. 8 市街地内外地上気温の日変化(7月28日)

から湖面に向かう東よりの風に、また、29日では22時頃に東よりの風に変わり、これと同時に気温の低下が生じた。3)比湿は、湖風が吹き始めると低下し、東よりの風に変わると急激に上昇したことがわかった。

このように、気温や水蒸気の日変化パターンは、より大規模な風系に支配されていることが考えられる。Fig. 5, 6に、7月29日に15km北方の木ノ本町で放球されたゾンデによる温位および比湿のプロファイルを示す。温位は正午において2段の混合層が形成されており、それが15時頃にはその上段と下段が合体しているものの、地上から2000m程度の高さまで安定度の弱い成層が18時ごろまで形成されている。これは、局地循環によって加熱された準混合層と乱流による地表面から発達する混合層が組合わさったものと考えられる(Kuwagata and Kimura, 1995)。同様に、比湿についても、1200mまでの高さにおいて、15時には6時に比較して大幅に減少しており、これも局地循環の影響と考えられる様相を示していた。これらのことから、地上の高温が夕方まで継続した理由はこうした琵琶湖上空に蓄積した顕熱が局地循環によって下降し続けたことに原因があることが推測される。また、夕刻時には、風系が陸域よりに変わった直後から1時間の間に4℃程度も下降しており、明らかにそれまでと異なった風が生じたことが考えられる。これには、若狭湾からの海風の影響(枝川, 1992)なども考えられるが(28日)、主たる理由として、これまで局地循環を引き起こす役割を果たしていた伊吹山系の山の斜面が冷却し、冷気が山風となって市街地に侵入したものと推測される。そのため、この時間帯の市街地の気温場はこの移流の効果が支配的となる。

次に、27日における高さ58mまでの気温の鉛直プロファイルの日変化をFig. 7に示す。夜間および午前6時では、地上1.5mから58mまで大気はほぼ中立状態であるが、9時には平均的な屋根面高さのおよそ2倍程度の観測点において高温となり、それ以上の高さとの間には気温のギャップが認められる。これは、屋根面がより早く加熱されるために、先に顕熱輸送量が増加するものと考えられ、その後、道路面の温度が上がり、より下層の大気が加熱される。風向が変化するまでは水田の表面温度はほぼ大気と同じであり、実際に都市化によって気温の上昇分はこの顕熱輸送分に相当している。風向きが変化した後は、この程度の厚さの層全体

が主として背後の山脈からの低温の密度流に覆われ一様な温度分布となる。

こうした変化は都市のヒートアイランド強度に顕著に影響する。Fig. 8は、湖から内陸方向に道路に沿って測った気温の分布の日変化であるが、日中湖風の吹いている間は都市域に入ったとたんにキャノピー内が加熱されるために気温が上昇するものの、背後の水田地帯に抜けても僅かに気温が低下するだけである。ところが、夕方から夜間にかけて背後から冷気流が進入する場合には、冷気が都市域内で受ける顕熱と徐々に温度の低下する冷気流が都市域に達するまでの時間差のために都市内外で大きな温度差を生ずる。特に、冷気流の温度が低下している途上においてはより差が大きくなりヒートアイランド強度が強くなっている。

4. 数値解析による検証

こうして得られた観測結果から推測される機構をより明らかにするためには、数値解析による再現が必要である。ところが、Fig. 1に示されるような都市域における局所的な状況を再現するためには、周辺部のバックグラウンドとなる気温分布の再現が必要である。そのため、全体としてはFig. 9に示されるような対象領域を選定し、その中のごく1部である都市についてより詳細な解析を行うために、メッシュの分解能を2 km、1 km、250mの3段階に分けたnested grid systemを用いて計算を行った。鉛直方向は5300mまで不等間隔で40層に分割した。ここで、250mのメッシュにおいては都市キャノピーの効果を取り入れている(浅枝ら, 1997)。計算法としては、Vu et. al (1998)に示される、k-ε法を用いた。計算の初期時刻は深夜0時であり、鉛直方向の条件はゾンデ等の観測値を参考に与えた。

5. 解析結果

Fig. 10に、15時の地上レベルの気温・風ベクトルの分布を示す。盆地状地形で考えられる局所循環の風のパターンである琵琶湖中心部で下降し地上に沿って発散する風系が再現されており、昼間の局所循環の存在を表している。この風について琵琶湖中心部を東西方向に鉛直断面で示した温位、比湿分布の結果がFigs. 11, 12である。これより、高さ1000m以下の顕熱の蓄積、また下降流に伴う上空の乾いた空気の地上への下降が読みとれる。Fig. 13は、温位プロファイルの日変化であるが、混合層は18時になっても発達し続けており、観測結果と概ね一致している。ここで、1000m付近の発達は地表からの乱流によるものではなく、山岳からの顕熱がこの大きな対流に乗ってきた結果であり、上層の加熱された空気が下降流によって地上に到達する。こうしたバックグラウンドの気温の分布の元で、都市域の部分を拡大してみる。Fig. 14は、15時における地上3mの気温の水平分布である。湖風が都市域を通過時に加熱されるために、陸域に入って徐々に高温の境界層を発達させていき、都市を通過後の水田にも高温域が広がっている。これは、Fig. 8で示した地上気温の結果をよく再現しており、水田地域でも高温が観測されたのはこうした顕熱の移流であることがわかる。Fig. 15に、地表面温度と地上3mの気温の日変化を示す。これより、地表面温度は正午を境に下がるものの、気温は下がらず、夕刻まで都市の高温が維持されることが再現されている。Fig. 16に地上の比湿の日変化を示す。循環流により、湖風の吹く昼間は比湿が下がり続け、それが陸風時に湿った空気が移流によって急激に増加し、観測結果と同様な結果を得ている。最後に、Fig. 17,18は、それぞれ日中の15時と、夜間、背後の山脈から冷気流が吹き込んでいる22時における断面内気温分布である。観測では、都市域が背後の水田地域よりも、特に夜間に気温が高くなっていたが、計算結果にもそれがよく現れている。しかも、この時間帯では、冷気流は先に水田地域を通過するため、都市内と水田地域とで大きな温度差ができていのがわかる。

6. まとめ

都市のヒートアイランドの特性は周辺地域の地理的条件によって大きく異なる。盆地内に立地する都市もその一つで、昼間は周辺の山脈と盆地内との間に生ずる局地循環によって盆地内自体の気温を上昇させてその上に都市の効果が加算された形で現れ、また、夜間は山脈からの冷気流のために急激に冷やされる。そのため、

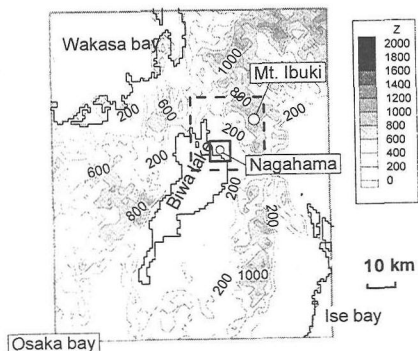


Fig.9 解析対象領域(点線:1km;実線:250mメッシュ)

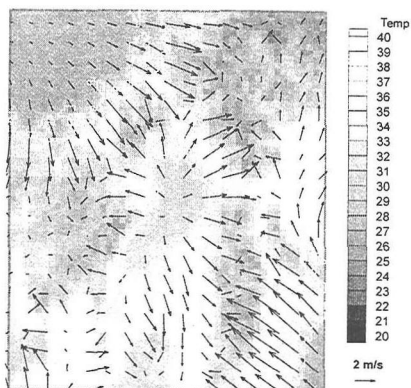


Fig. 10 地上気温・風ベクトル水平分布(15時)

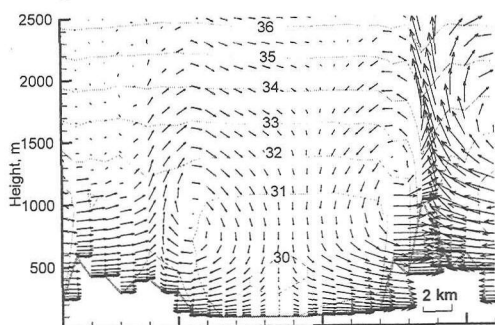


Fig. 11 気流と温位の断面図(15時)

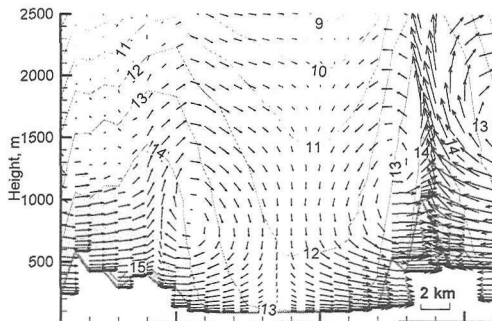


Fig. 12 気流と比湿の断面図(15時)

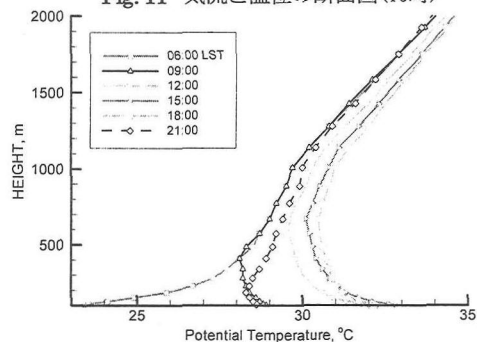


Fig. 13 温位の鉛直プロファイルの計算値

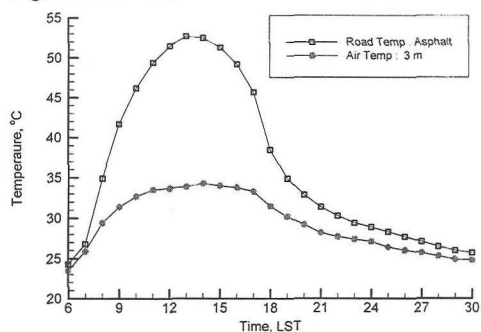


Fig. 15 地表面温度と気温の日変化の計算値

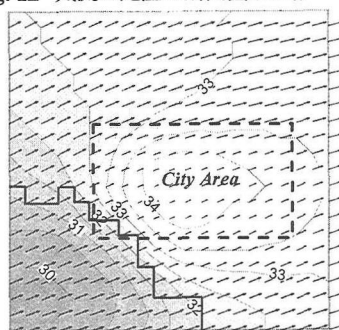


Fig. 16 市街地周辺部の気温と風ベクトル(15時)

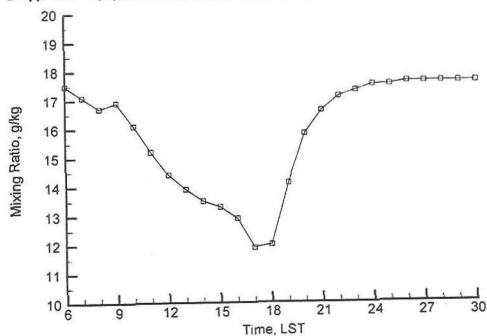


Fig. 14 比湿の日変化の計算値

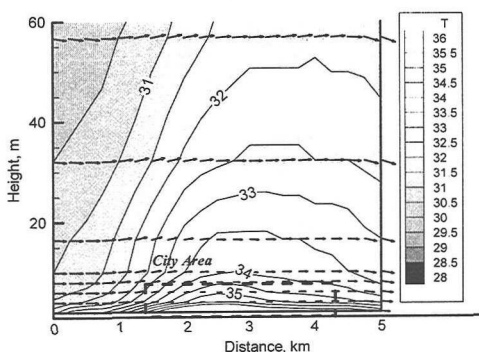


Fig.17 鉛直断面図(15時)

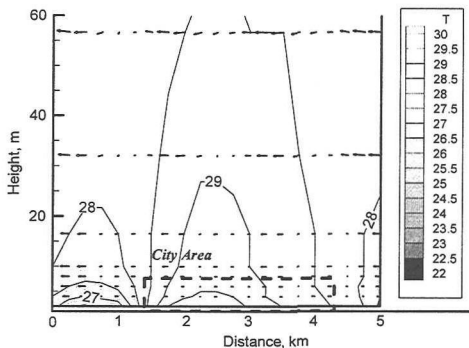


Fig.18 鉛直断面図(22時)

都市域の熱環境の解析においても、まずこうした背景となる熱環境の解析を行い、それに都市の効果を加えあわせなければならず、より複雑な過程が必要になることが示された。

参考文献

- 1) Kimura, F. and T.Kuwagata(1995): Horizontal heat fluxes over complex terrain computed using a simple mixed-layer model and a numerical model, *J. Applied Meteorology*, 34, pp.549-558.
- 2) Kimura, F. and S.Takahashi(1991):The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment, *Atmospheric Environment*, 25B, pp.155-164.
- 3) Lars B., Jan O.M., and Sven L.(1985):Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmo, Sweden, *J. Climatology*, 5, pp.433-444.
- 4) Munn, R.E., M.S.Hirt, and B.F.Findlay(1969): A climatological study of the urban temperature anomaly in the lakeshore environment at Toronto, *J. Applied Meteorology*, 8, pp.411-422.
- 5) Oke, T.R.(1981):Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations, *J. Climatology*, 1, pp.237-254.
- 6) Oke, T.R. and G.B.Maxwell(1975):Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver, *Atmospheric Environment*, 9, pp.191.
- 7) Vu, T.C., T. Asaeda, and Y. Ashie(1998): Development of a numerical model for the evaluation of the urban thermal environment, *Int. workshop on CFD for wind climate in cities*, pp.153-162.
- 8) Yinka,R.A.(1990):Aspects of the variation in some characteristics of radiation budget within the urban canopy of Ibandan, *Atmospheric Environment*, 24B, pp.9-17.
- 9) 浅枝隆・藤野毅・ヴァンカ・足永靖信(1997):都市キャノピーモデルの街区スケールへの適用, 水文・水資源学会誌, 10, pp.308-318.
- 10) 枝川尚資(1992):琵琶湖北部流域における夕刻の局地 風について, 地理学評論, 65A, pp.735-746.
- 11) 藤野毅・浅枝隆・和氣亜紀夫(1996):夏季の都心部周辺における気温分布特性に関する数値実験, 地理学評論, 69A, pp.817-831.