

ヒートアイランド強度算定のための都市気温分布の検討

—ソウル(韓国)の例—

菅原 広史*・池 東 旭**・遠 峰 菊 郎**

要 旨

ソウルを例にヒートアイランド強度(都市と郊外の気温差)および都市の代表気温について検討した。屋根面高さの気温分布ではソウルの中央部に高温域、北部に低温域が存在していた。両地域間の気温差はヒートアイランド強度と同程度の大きさであった。またこれらの地域における気温の空間的な標準偏差もヒートアイランド強度の数十%にもなる。都市内の気温偏差はヒートアイランド強度の算定において無視できない大きさであった。

このような都市内気温偏差の原因のひとつとして人工排熱があることが、平日・休日間の差を解析することにより明らかになった。ソウルの典型的なオフィスビル街(Seo-Cho)と典型的な住宅団地(Kang-nam)での日平均気温差は4年平均で平日が 0.45°C 、休日が 0.37°C でいずれもSeo-Choの方が高温であった。これら地点間気温差の平日・休日の差は危険率5%で統計的に有意であった。

1. はじめに

ヒートアイランド現象はすでに世界中の様々な都市において調査され(例えば朴, 1987; 野口, 1994; Gallo *et al.*, 1993), 人口の対数とヒートアイランド強度(都市と郊外の気温差)が比例することが知られている(Oke, 1973)。日本の都市ではこの比例関係について、人口30万人を境に回帰線が折れ曲がり、高人口側ほど傾きが急になるという指摘(朴, 1987)がある。一方で、これは観測地点の選定方法の違いで生じるとする追試結果(榊原・北原, 2003)や、気温データの時間平均のとり方によっては見られないとする報告(Fujibe, 1995)もある。

また、これまでの都市気候研究を概観すると、特定の都市についての気温観測結果は数多く報告されているが、都市間での比較、あるいはケーススタディを統合した一般的な議論は非常に少ない。

このような状況の背景として、ヒートアイランド強度の算出方法が研究ごとに異なり、一般的な定義が確

立されていないことがあげられる。これは以下の3つの点が解決できていないからであろう。a) 熱的に不均質な都市域において、都市の代表気温をどのように定義し測定するか、b) ある都市に対して比較対象となる郊外をどこに選定するか、c) どの季節、どの時刻の気温差(都市と郊外の気温差)を時間的な代表性のあるヒートアイランド強度とするか。bについてはすでに榊原(1994)やGrimmond *et al.* (1993)などが指摘しており、榊原・北原(2003)ではその地域の典型的な郊外の土地被覆の地点を選択すべきとしている。また日本の多くの都市が立地する海岸域においては海風が気温分布の形成に大きく影響している。したがって沿岸都市に対して比較対象となる郊外地点は、海からの距離が都市と同程度になるよう選択する必要がある。c)について、一般にヒートアイランド強度は冬季の弱風晴天夜間に最大になることが知られている。しかしこのような、その時々気象状態に敏感な極値をヒートアイランド強度として採用するには、十分なサンプル数を確保する必要がある。

a)について、都市域は建物や道路、公園など非常に多種多様な土地被覆から構成されており、またビルキャノピーにより幾何学的にも複雑である。このため、都市内には大きな温度偏差が存在する。例えばNarita

* 防衛大学地球海洋学科, hiros@nda.ac.jp

** 防衛大学地球海洋学科。

—2004年5月11日受領—

—2004年10月26日受理—

(1997) や大橋ほか (2003) は間近の街路どうしても日向日陰や交通量の違いにより最大約2~3°Cの気温差が生じることを報告している。このように温度むらのある都市内において、代表気温を決める方法として次の4つが考えられる。i) 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)。ii) 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)。iii) 都市内の気温の最高値を代表気温とする(Oke, 1978)。iv) 空間平均気温を直接測定する測定方法を用いる(Sugawara *et al.*, 2004; Funakoshi *et al.*, 2000)。iの方法では必要な観測点数を決めるために、あらかじめ気温分布そのものを調べる必要がある。iiの方法でもやはり、都市内のどのエリアでの測定値を使うか検討する必要がある。iiiは定義は明確であるが、極値を用いるため、測定空間分解能や観測地点の配置に非常に敏感である。

いずれにせよこの問題については、アメダスなど既存のルーチン観測地点のデータを使用する場合は決定的な解決方法が存在せず、多くの研究では都市の代表値として1地点だけの観測値を用いている(例えばKim and Baik, 2002; Morris *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2000)。この場合、次善策の例として、空間的により密な観測を実施して、1地点だけの観測データが都市気温をどの程度代表できるか、その誤差はどの程度かを把握する必要がある。

また、そもそもこのような都市内の気温分布を形成する要因についての検討も必要であろう。気温分布の成因が具体的に明らかになれば物理的に意味のあるヒートアイランド強度が算出でき、cの測定時刻の問題についてもより適切な解決策が見出せると思われる。木村(1992)に述べられているヒートアイランド現象の成因を参考にすると、都市内気温差の原因として、i) 人工排熱、ii) アスファルトなどの不透水面(潜熱フラックスの減少に伴う顕熱フラックスの増加)、iii) 天空率に代表されるビルキャノピーの幾何構造が考えられる。iの人工排熱については、建築・土木の分野で発生量の定量的な見積り(Ichinose *et al.*, 1999)や長期変化への影響評価(足立, 1997)がある。気温分布への影響についてはFujibe(1987, 1988a, 1988b)が日本の都市について平日と休日の気温差を用いて議論している。iiについては、例えば朴(1986)はソウルにおける地域的な気温偏差が不透水面面積比

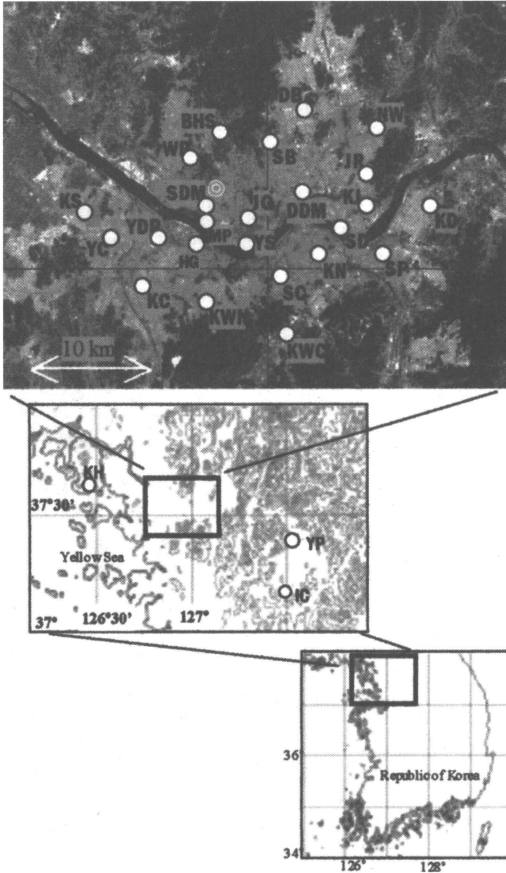
と相関を持つことを示している。菅原・近藤(1995)も敏感度解析により、地表面熱収支は蒸発効率に強く依存することを指摘している。iiiについては、都市キャニオン内における夜間の気温低下は、そのエリアの天空率に強く影響されることが知られている(Oke *et al.*, 1991)。

また、これらの要因から考えて都市内の気温分布は次の2つの空間スケールに分類できよう。①ストリートキャニオン内あるいは都市内緑地付近の気温分布のように直近(10~100 m)の土地被覆により影響される気温分布(キャニオンスケール)。②ストリートキャニオンが複数個集まったキャノピーにより形成され、そのエリアの天空率や緑被率に影響される気温分布。あるいは住宅地、高層ビル街など比較的まとまった土地被覆を単位とした気温分布(サブ都市スケール)。距離にすると100~1000 m、大都市では数kmに及ぶこともある。①については成田ほか(2004)や丸田(1972)が緑地周辺の気温分布を調査している。またNakamura and Oke(1988)がストリートキャニオン内の気温分布を実測しており、実測を中心として研究の積み重ねがなされている。一方②については下山(1996)による海風の侵入に伴う東京の気温分布の変化や鈴木ほか(2001)による気温分布の主成分分析などが研究されている他は、気温分布の成因についての議論は比較的手薄である。

以上の背景から本研究ではサブ都市スケールの気温分布に着目し、特に人工排熱に焦点をあて、以下の3点について論じる。1) ソウルを対象に都市内の気温分布を把握し、ソウルという都市の特徴を的確に表すヒートアイランド強度の算出を試みる。これは前述の問題a, bについての解決方法を、ソウルを例にとり検討するものである。2) 都市内の空間的な気温偏差を調べ、ヒートアイランド強度への誤差を評価する。3) 都市内気温偏差の原因として人工排熱を取り上げ、その影響を検討する。この2と3の解析は問題aの解決へ寄与すると考える。

2. 対象地域およびデータ

本研究の目的からすれば、用いる気温のデータは設置場所の局所的な影響(たとえば設置地点ピンポイントのみた天空率や日向日陰)を受けず、かつ都市内のある程度の広がりをもった地域を代表する必要がある。本研究ではそのような気温として、ソウル市内に設置されている自動気象観測(Automatic Weather



第1図 ソウルおよび近郊におけるAWSの配置(白丸)。最上図中央部の川は漢江、二重丸は旧韓国気象庁。中図の白丸はKH(Kang-Hwa), YP(Yang-Pyoung), IC(I-Cheon)。

第1表 本研究で用いたAWSの一覧。高度は測器の高度。

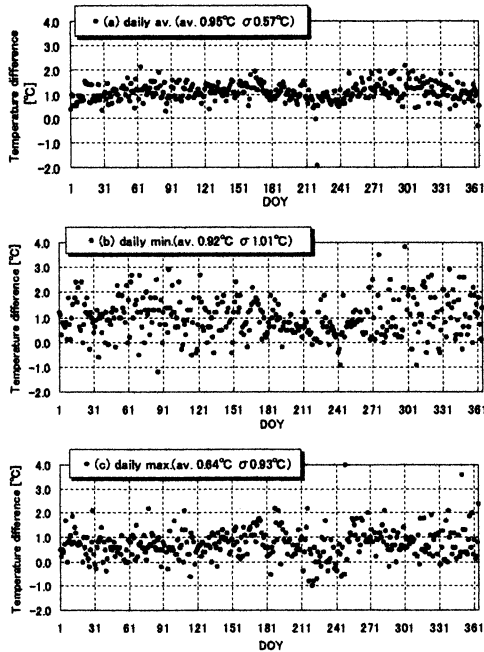
地点名	略称	位置	海拔高度(m)
江南(Kang-Nam)	KN	小学校屋上	85
瑞草(Seo-Cho)	SC	Sam-Rung ソウル教育大学校屋上	43
江東(Kang-Dong)	KD	総合職業学校屋上	67
松坡(Song-Pa)	SP	商業施設屋上	60
江西(Kang-Seo)	KS	Jeong-Su 技能大学屋上	86
陽川(Yang-Chun)	YC	Moku-Dong 駐車場屋上	14
道峰(Do-Bong)	DB	Do-Bong 小学校屋上	75
蘆原(No-Won)	NW	陸軍士官学校屋上	25
東大門(Dong-Dae-Moon)	DDM	Cheong-Ryang-Ri 駅屋上	35
中浪(Joong-Rang)	JR	Myun-Dong 小学校屋上	87
麻浦(Ma-Po)	MP	第2雨水ポンプ場屋上	15
西大門(Seo-Dae-Moon)	SDM	Yon-Sei 大学校校庭	55
廣津(Kwang-Jin)	KJ	Keon-Kook 大学校屋上	35
城北(Seong-Buk)	SB	Kook-Min 大学校屋上	96
龍山(Yong-San)	YS	Sin-Yong-San 小学校屋上	17
恩平(Wun-Pyoung)	WP	環境研究院屋上	53
衿川(Kum-Cheon)	KC	Dok-San 小学校屋上	22
漢江(Han-Gang)	HG	船乗り場屋上	5
中区(Joong-Gu)	JG	建物屋上	262
北韓山(Buk-Han-San)	BHS	寺院の庭	460
城東(Seong-Dong)	SD	Seong-Su 中学校屋上	38
冠岳(Kwan-Ak)	KWN	ソウル大学校校庭	120
永登浦(Young-Dung-Po)	YDP	Young-Dong 小学校屋上	10
果川(Kwa-Chun)	KWC	Kwa-Cheon 市役所屋上	59

写真および筆者による現地視察で確認した限りでは、温度計の周辺に空調設備の室外機などではなく、設置場所も屋上面の端であったことから、屋上面の直接の影響は小さいと考えられる。気温の絶対値はともかく、少なくとも本研究後半の主要な解析である平日と休日の差には影響はない。なお、毎時データにおいて欠測が1回でもあった日はデータ解析から除外した。解析に使用した1997~2001年において欠測とした日数は、年ごとに見ると約10~1%で年々減少していた。欠測とした日が減少しているのは、ソウル市内のAWSのほとんどが1994年末に設置されたばかりのものであるためと考えられる。また、気温は観測機器の海拔高度を基準として気温減率0.65°C/100mを用いて高度補正を行った。

韓国の首都であるソウルには2002年時点で韓国の全人口の21%に値する1026万人が生活している。その面積は606 km²で東京都23区の面積とほぼ等しい。地形的には盆地地形の中央に位置しており、市街地のほぼ中央には川(漢江, Han River)が流れている。1970年代からは人口分散政策によって特に近郊の城南(Sung-nam)市や果川(Kwa-Cheon)市がベッドタウンとして開発されている。

一般にヒートアイランド強度は地上(ビルキャノピー層内)の気温を用いて算出されることが多い。そこで地上と屋上で気温の比較を第2図に示す。旧韓

Station, 以下AWS)による建物屋上レベルでの測定値を用いる。ソウル市内におけるAWSによる観測は韓国気象庁により1987年から行われており、2001年の時点で市内計25箇所にAWSが設置されている。本研究で用いたAWSは上記25箇所のうち欠測の多い2箇所を除き、代わりに市の境界付近に位置する1地点を加えた計24箇所である。地点一覧を第1表に、配置図を第1図に示す。以後、地点名は第1表および第1図の略称で表記する。AWSは24箇所中21箇所が建物の屋上に設置されている。また地上に設置されている3つの観測地点も、学校のグラウンドなど開けた場所に設置されている。温度計の屋上からの高度は1.5mに統一されており、温度計直下の屋上面の熱的影響が気温データに含まれていることが考えられる。しかし、



第2図 地上（ビルキャノピー内）と屋上での気温の比較。地上は韓国気象庁，屋上はSDM，いずれも $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の減率で海拔 0m へ高度補正した値について差（地上－屋上）をとった。2000年。上から日平均気温，日最低気温，日最高気温。横軸はDay of Year (DOY)である。

国気象庁舎（第1図の二重丸）における地上気象観測とこれに最も近いAWS（SDM）との比較を行った。両地点の水平距離は約 2km である。特に日最低気温と日平均気温で地上の方が高温になっていた。ヒートアイランド現象の原因の一つとしてビルキャノピーによる放射冷却効果の減少があることを考えれば，本研究でのヒートアイランド強度は屋上での気温を用いたために，他研究のものと比較して 1°C 程度小さめにしている可能性がある。

3. ソウルの気温分布

第3図はAWSデータを元に描いた日最低気温及び日平均気温の年平均値（2000年）の空間分布である。両図とも中央部には高温域，北部に低温域が分布している。高温地域は東西に長い楕円形に分布しており，南北間の等温線間隔の方が東西間の間隔より狭い。これは盆地地形の影響，および中央部に位置する市街地が東西に長く分布しているためと考えられる。また南

北それぞれの山岳と平野との境界に相当する大きな気温勾配に加えて，DDMやJR地点付近でも気温が急変している。観測地点周辺の土地利用について2003年に筆者らが現地調査したところ，北部の低温域に属する地点の周辺は主に住宅地であった。一方，中央部の高温域には高層ビル街も存在する。そこで，以下，Oke (1978)にならい中心部の高温域をurban地域，北部の低温域をsuburban地域と呼ぶことにする。両地域間の気温差は日最低気温で一番大きく，日最高気温では小さかった。

4. 都市内の気温偏差とヒートアイランド強度の比較

前述した気温分布が，都市の代表気温を求めヒートアイランド強度を評価する際に問題となる。そこでこのurban地域とsuburban地域間の気温差 (Inner Seoul Deviation, 以下ISD) について，時間変化を調べた。地域間気温差ISDはurban地域の5地点平均気温 (KN, SC, YC, SP, YDP) からsuburban地域の5地点平均気温 (DB, WP, SDM, SB, NW) を引いたものとした。ここでは気温分布上で比較のまとまっている地点をできる限り多く，かつurban地域とsuburban地域で同数になるように選びそれぞれ5地点とした。

地域間気温差ISDについて検討する際，比較対象が必要となるが，ここではヒートアイランド強度 (Heat Island Intensity, 以下HII) を用いることとする。本論文ではヒートアイランド強度を正しく求めるために地域間気温差を検討しているわけではあるが，現段階でソウルの特徴を最もよく表すヒートアイランド強度を以下のように求めた。

a) ヒートアイランド強度における都市代表気温の定義

前節でみた気温分布をもとに，ソウルはurban地域とsuburban地域から成り立っていると考え，都市代表気温をurban地域とsuburban地域の平均気温とした。採用したAWSはISDを算出したのと同じ10地点である。気温を平均する際に両地域の面積の重みを付けることも考えられるが，1地点で測定された気温がどれくらいの面積を代表するものなのか不明であるため，ここでは面積の重みについては考慮しなかった。また地域内の気温の最高値を都市気温として採用する方法もあるが (Oke, 1978)，ここではヒートアイランド強度の空間的な代表性を考慮するために，平均値の方を採用した。なお先に述べたように，ほとんどの観

測地点が屋上にあるため、ここでは屋上レベルでの都市代表気温を求めていることになる。

b) ヒートアイランド強度における郊外代表気温の検討

都市に対して比較対象となる郊外地域の選択も重要である。郊外地点の条件として以下のものが考えられる。

1) 都市化されていないこと。具体的には土地被覆や気温の長期変化を用いて判断する方法が考えられる (Kim and Baik, 2002)。

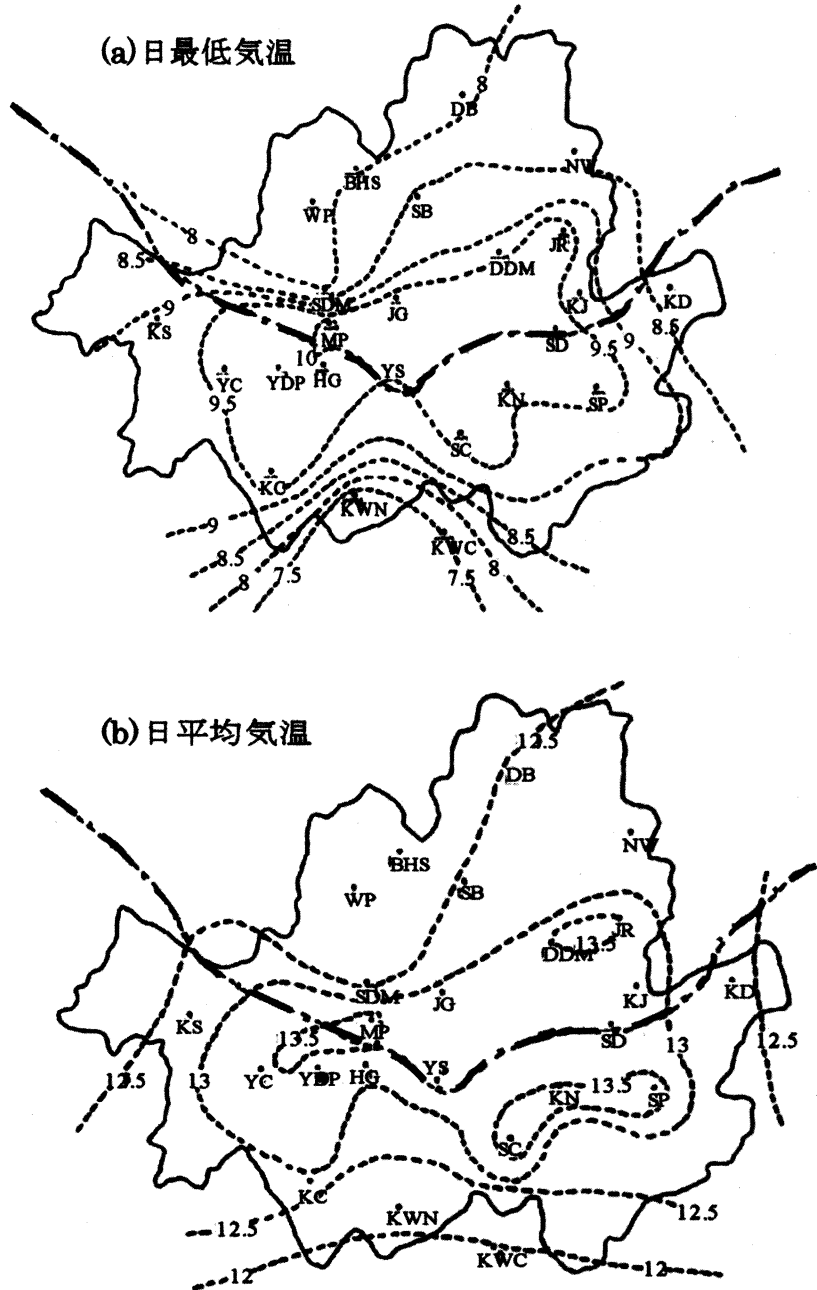
2) 都市を含んだその地域の代表的な土地被覆を有している (榊原, 2003)。

3) メソスケールで見ても都市と同じ気候帯に属すること。例えば都市と郊外で海岸からの距離が同程度になるよう選ぶ。

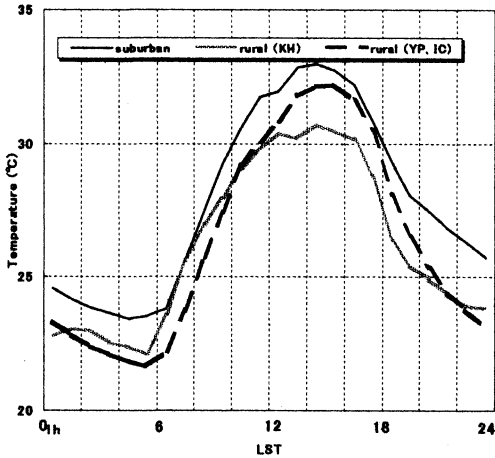
本研究では郊外として、ソウルから東方向に約34 km 離れている YP および IC を選定し、2 地点の平均気温を郊外気温とした。2 地点の平均としたのは観測地点ごく近傍の局地的な影響を除くためである。筆者が2003年に行った現地調査では YP, IC 地点の周辺は典型的な郊外の土地被覆 (畑, 森林) であった。Kim and Baik (2002) では YP を郊外として採用している。また海岸からの距離に

についても検討を行った。第4図に2000年8月の晴天日8日間における各地点での時別平均気温を示す。海岸近くの KH は正午前に気温上昇率が小さくなっており、これは海風の影響と推察される。ソウルの subur-

ban 地域および IC, YP にはそのような現象は見られない。suburban 地域の気温日変化傾向はむしろ IC, YP のそれに近い。したがって、ソウルの気温に対して海風による移流効果はほとんどなく、ソウルのヒート



第3図 日最低気温 (a) と日平均気温 (b) 年平均の分布。2000年の年平均値。等温線 (点線) 間隔は0.5°C, 黒丸は AWS, 一点鎖線は漢江を示す。外郭の実線はソウル市の境界を示す。



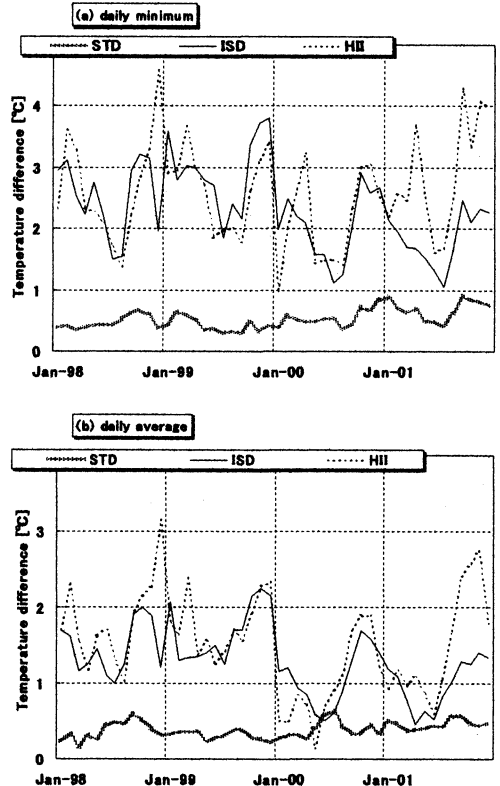
第4図 夏季晴天日における気温の日変化。2000年8月の晴天日8日間のコンボジット平均。ソウルのsuburban地域(細実線)、内陸郊外のICおよびYPの平均値(破線)、海岸郊外のKH(太実線)について示した。

アイランド強度を考える際の郊外地点としてソウルよりも内陸側のYP、IC地点をとることが適切であると考えられる。

以上の検討からヒートアイランド強度HIIは、urban地域(KN, SC, YC, SP, YDP)とsuburban地域(DB, WP, SDM, SB, NW)の平均気温から郊外(YP, IC)を引いたものと定義した。定義を整理するため、地域間気温差ISDについて確認すると、ISDはurban地域(KN, SC, YC, SP, YDP)の平均気温からsuburban地域(DB, WP, SDM, SB, NW)の平均気温を引いたものとした。すなわち、ISDの計算に用いた計10地点すべての平均気温がHIIの都市気温となっている。

c) 都市内の地域間気温差とヒートアイランド強度の比較

第5図は(a)日最低気温及び(b)日平均気温におけるISD, HIIの季節変化を示したもので、月平均値をプロットしている。都市気温の標準偏差STDは先の10地点での標準偏差である。日最低気温におけるISD及びHIIは概ね同程度である。その季節変化傾向も類似しており、両者共に秋と冬に大きく、夏に小さくなっている。このことから、ヒートアイランドを発生させる要因がソウル内におけるurban地域とsuburban地域間にも同じく働いて地域間気温差ISDが生じていると思われる。日平均気温も同様の性質を持



第5図 日最低気温(a)、日平均気温(b)における地域間気温差(ISD)、ヒートアイランド強度(HII)の変化傾向。都市気温の空間的な標準偏差(STD)についても示した。

ち、図には示さないが日最高気温についてはHII, ISD, STDの3つがほぼ同じ大きさであった。都市気温の標準偏差もヒートアイランド強度の20% (日最低気温の場合) にもなり、このような都市内の気温偏差がヒートアイランド強度を評価する上で数10~100% (0.5~2°C)程度の誤差を生むことがわかる。朴(1987)の結果から読み取ると、日本や韓国の都市ではヒートアイランド強度がおよそ1~6°Cであり、都市間の比較をするのにこの誤差は無視できない。なお本研究とは算出方法(測定高度)が異なるが、朴(1986)およびKim and Baik(2002)で示されたソウルのヒートアイランド強度はそれぞれ7.1°C(1982年)、3.4°C(1973-1996年)であった。本研究でのヒートアイランド強度2.6°C(1998-2001年)はこれらより小さいが、数°Cの都市内の気温偏差が無視できないという結論には変わらない。

5. 都市内の気温偏差と人工排熱の関係

ソウル市内における地域間の気温差 ISD はヒートアイランド現象と同様の原因で生じていることが、その時間変化傾向から示唆された。第1節で述べたようにヒートアイランド現象の主要な原因としては人工排熱、不透水面、建物によるキャノピー構造が考えられる。ここでは ISD に対する人工排熱の影響について検討した。地域間の気温差 ISD に対する人工排熱の影響を、ISD の平日と休日間の差を用いて検討した。1998~2001年までの日平均値をもとに平日、休日ごとに ISD を計算した。韓国では土曜日はいわゆる半ドンであるので平日として扱った。平日の ISD と休日の ISD との差は 0.0007°C で、わずかに平日の方が大きい。統計的検定では有意とはいえない結果であった。したがって、この地域間気温差 ISD については人工排熱以外の寄与、例えば緑被率の違い、が大きいと考えられる。

次に、より小さなスケールの気温差について人工排熱の影響を同様に検討する。urban (第1図中、KN, SC, YC, SP, YDP), suburban (WP, DB, SDM, SB, NW), 郊外地域 (YP と IC の平均気温) 間の55ケースの組み合わせを対象に2地点間気温差について平日と休日の差を調べた。さらに、平日の気温差が休日の気温差より大きいケースについては統計的検定を行った。55ケースの地点間気温差の中で10ケースをランダムに選び、その度数分布を調べたところ、いずれも正規分布とみなせる分布であった。加えてデータ数は100個以上であることから、地点間気温差の平日と休日での差は標準正規分布に従うと考えられるので、Z検定を用いた。

第2表はその解析結果を示したものである。月~土の6つの平日気温差中に1つでも休日気温差より小さい値がある場合は×とした。Z検定の結果、平日・休日の差が統計的に有意な場合は○、有意とはいえない場合は△とした。表中左下の値は○、△のケースにおける平日と休日の差 ($^{\circ}\text{C}$) である。平日気温差が休日気温差より大きい結果は全体55ケースの中で23ケースであった。これは SC, NW を含んだ組み合わせについて特に多くみられた。人工排熱の影響は比較的小さい空間スケールでは出現するが、先ほどの ISD のような10 km スケールでは認められなかった。この理由としては、人工排熱の発生源が SC 地点付近に特に局在していること、それ以外の地域では NW を除いておよそ一様な排熱分布をしていること、が推察される。この点

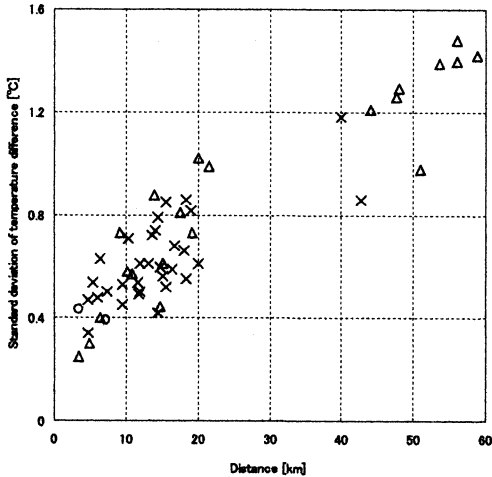
第2表 2地域間気温差の平日・休日での違い。1998-2001年までの4年平均値。○：休日気温差が平日気温差より小さく、統計的に有意な場合。△：休日気温差が平日気温差より小さいが、統計的に有意とはいえない場合。×：休日気温差が平日気温差より小さい傾向が現れない場合。対角線より左下の値は○、△のケースにおける平日と休日の差 ($^{\circ}\text{C}$)。横軸地点マイナス縦軸地点。

	Urban					Suburban				Rural	
	KN	SC	YC	SP	YDP	WP	DB	SDM	SB	NW	YP/IC
KN		○	×	×	×	×	×	×	×	×	△
SC	-0.08		×	○	△	△	△	△	△	△	△
YC				×	△	×	×	×	×	△	△
SP		0.10			×	×	×	×	×	×	×
YDP		0.04	-0.02			×	×	×	×	△	△
WP		0.04					×	△	×	△	△
DB		0.03						×	×	△	△
SDM		0.05				0.03			×	×	△
SB		0.03								△	△
NW		0.09	0.04		0.04	0.05	0.05			0.04	×
YP/IC	0.05	0.13	0.07		0.06	0.08	0.07	0.04	0.08		

については建物用途や交通量データなどをもとに今後検討する必要がある。

さらに23ケース中で2ケースについては平日・休日の差が危険率5%以下で統計的に有意であった。この2ケースは典型的な業務地域 (SC) と典型的な住居地域 (KN, SP 地点) 間の気温差であった。SC 地点と KN 地点では平日における日平均気温差の4年平均値が 0.45°C 、休日では 0.37°C であった。統計に用いたデータ数は約200個 (休日)、1200個 (平日) であり、気温センサーの精度を $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ とすれば、これらの気温差は観測精度からみても十分有意であると考えられる。仮に地点間気温差がいくつかの原因の線形和であるとすれば、KN と SC の気温差に対する人工排熱による影響は少なくとも18% ($= (0.45 - 0.37) / 0.45$) であるといえる。また、SC 地点と SP 地点は平日での気温差が 0.23°C 、休日での気温差が 0.13°C であり、人工排熱の影響は少なくとも44%であった。このように都市内部の気温偏差は人工排熱に20~40%程度影響される場合がある。解析対象は全く異なるが Fujibe (1987) による東京の平日と休日の気温差は昼間の平均で約 0.2°C であり、人工排熱が地上気温の分布に数10%の影響を与えていることは十分に想像できる。

なお、ここでいうところの人工排熱の影響は、ある地点の気温に対する影響ではなく、地点間気温差に対する影響であることに注意が必要である。例えば住宅地 (KN, SP) での人工排熱は平日よりも休日の方が



第6図 第2表に示した地点について距離と地点間気温差（日平均）の標準偏差の関係。図中の記号の意味は第2表と同一。1998-2001年のデータを使用。

大きいことが予想されるが、ここではその影響も含めて地点間気温差について評価している。また、日最低気温について同様の検定を行ったところ、差が有意な地点の組み合わせはひとつもなかった。一般に夜間は大気が安定になるため人工排熱の影響が現れやすいことからすると、この結果は解釈しがたい。一方日本の都市の場合、夜間のエネルギー消費は日中より小さい (Ichinose *et al.*, 1999) ことから、ソウルでも夜間の方が人工排熱量は小さくこのような結果になった可能性がある。大気安定度や排熱量の算定は本研究の域を越えており、これ以上の検討はここでは行わない。

ここで第6図は、第2表の地点間における距離と、地点間気温差の標準偏差間の関係を示したものである。図中の記号は第2表と同じである。距離と標準偏差とは明確な相関を持っており、距離の増加に伴って標準偏差も増加する。これは距離が遠くなるとその時々気象条件の差異が地点間気温差に強く影響することを意味する。平日-休日での差が統計的に有意であるケースは地点間距離が比較的小さい場合に限られていたことがわかる。土地被覆は明確に異なるが距離は遠い組み合わせ（ソウル市内と郊外地点）では平日と休日の差は統計的に有意とは言えない結果であった。また前節のヒートアイランド強度についても平日と休日の差を検討したが、統計的に有意とは言えない結果であった。

先のソウル内の地域間気温差 ISD は地点間距離が

およそ10 kmのスケールであり、標準偏差が大きいことも平日・休日の差が有意とは言えない結果であった原因のひとつである。つまり統計的検定の意味のとおりであるが、本研究の結果は、有意な差がなかった地点間についても人工排熱の影響を全く否定するものではない。逆にこのように平日と休日の差を用いて人工排熱の影響を検出するには、距離の近い地点を選ぶ必要があることがわかる。

6. 結論

ソウルを例にヒートアイランド強度および都市代表気温について検討した。屋根面レベルの気温分布ではソウルの中央部に高温域、北部に低温域が存在しており、両地域間の気温差はヒートアイランド強度と同程度の大きさであった。またこれらの地域における気温の空間的な標準偏差は日平均気温ではヒートアイランド強度の数十%、日最高気温ではヒートアイランド強度と同程度にもなる。都市内の気温偏差はヒートアイランド強度の算定において無視できない大きさである。

都市内気温偏差の原因のひとつとして人工排熱があることが、平日・休日間の差を解析することにより明らかになった。ソウルの典型的なオフィスビル街 (Seo-Cho) と典型的な住宅団地 (Kang-nam) での日平均気温差は平日が0.45°C、休日が0.37°Cであり、この地点間気温差の平日-休日差は危険率5%以下で統計的に有意であった。ただしソウル中央部の高温域、北部の低温域の気温差に対しては人工排熱の影響は認められなかった。Seo-Cho と Kang-nam のように距離が比較的近い地点間については有意な差がみられたことから、ソウルの場合人工排熱は比較的小さい（数km）スケールの気温分布に特に影響を与えていると考えられる。なお今回の検討は屋根面レベルの気温分布について行った。ビルキャノピー内の気温分布についてはキャノピーの幾何構造（天空率）が強く影響することから別途検討する必要がある。

本研究の結果をもとに都市代表気温の算定方法について考えてみる。観測地点がある程度自由に選択できる場合は、最も高温となりそうな場所、あるいは人工排熱や建物形状でみてその都市の代表的なエリアを測定対象に含めるようにする。既存のルーチン観測データを用いる場合、都市内の代表気温として選択できる地点は限られている。したがって、別途気温分布を測定するか、人工排熱（建物用途から算定できる）や建

物形状のデータなどから空間的な気温分布を推定し、代表気温の誤差を評価する必要がある。以上のような作業は、異なる都市間でのヒートアイランド強度の比較を行う際に必須である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、韓国気象庁から観測データの提供を受けました。厳 香姫博士（韓国気象庁）には原稿に対して有意義なコメントをいただきました。また防衛大学校地球海洋学科の諸先生方、特に中西幹郎博士、丸山清志博士には論文の内容について貴重なコメントをいただきました。科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（代表：神田 学）から財政的支援を受けました。

参 考 文 献

足立アホロ, 1997: 経済活動が都市温度に及ぼす影響—名古屋市を例として—, 天気, **44**, 621-629.

Fujibe F., 1987: Weekday-weekend difference of urban climates Part 1: Temporal variation of air temperature and other meteorological parameter in the central part of Tokyo, J. Meteor. Soc. Japan, **65**, 923-929.

Fujibe F., 1988a: Weekday-weekend difference of urban climates Part 2: Detection of temperature difference for medium- and small-sized cities, J. Meteor. Soc. Japan, **66**, 373-376.

Fujibe, F., 1988b: Weekday-weekend difference of urban climates Part 3: Temperature and wind field around Tokyo and Osaka, J. Meteor. Soc. Japan, **66**, 377-385.

Fujibe, F., 1995: Temperature rising trends at Japanese cities during the last hundred years and their relationships with population, population increasing rates and daily temperature ranges, Pap. Meteor. Geophys., **46**, 35-55.

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), Jpn. J. Appl. Phys., **39**, 3107-3111.

Gallo, K. P., A. L. McNab, T. R. Karl, J. F. Brown, J. J. Hood and J. D. Tarpley, 1993: The Use of NOAA AVHRR Data for Assessment of the Urban Heat Island Effect, J. Appl. Meteor., **32**, 899-908.

Grimmond C. S. B., T. R. Oke and H. A. Cleugh,

1993: The role of "rural" in comparisons of observed suburban-rural flux differences, IAHS Publ. No 212; 165-174.

Ichinose, T., K. Shimodozono and K. Hanaki, 1999: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Atmos. Environ., **33**, 3897-3909.

Kim, K. H., B. J. Kim, J. H. Oh, W. T. Kwon and H. J. Baik, 2000: Detection of urbanization effect in the air temperature change of Korea, J. Korean Meteor. Soc., **36**, 519-526. (韓国語英文要旨付).

Kim, Y. H. and J. J. Baik, 2002: Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul, J. Appl. Meteor., **41**, 651-659.

木村富士男, 1992: 都市の熱汚染, 大気汚染学会誌, **27** (6), 87-94.

丸田頼一, 1972: 公園緑地の都市自然環境におよぼす影響, 都市計画, **69-70**, 49-77.

Morris, C. J. G., I. Simmonds and N. Plummer, 2001: Quantification of the Influences of Wind and Cloud on the Nocturnal Urban Heat Island of a Large City, J. Appl. Meteor., **40**, 169-182.

Nakamura, Y. and T. R. Oke, 1988: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon, Atmos. Environ., **22**, 2691-2700.

Narita, K., 1997: Annual observation on the temperature field in Hiroshima city, Proc. Second Japanese-German Meeting, 243-246.

成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本條 毅, 木村圭司, 桑田直也, 2004: 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象, 地理学評論, **77**, 403-420.

野口泰生, 1994: 日最高・最低気温の永年変化に与える都市化の影響, 天気, **41**, 123-135.

大橋唯太, 玄地 裕, 亀卦川幸浩, 2003: 東京都心の街区内気温の空間分布とその形成要因について, 環境情報科学論文集, (17), 59-64.

Oke, T. R., 1973: City size and the urban heat island, Atmos. Environ., **7**, 769-779.

Oke, T. R., 1978: Boundary Layer Climates, Methuen & CO LTD, London, 372pp.

Oke, T. R., G. T. Johnson, D. G. Steyn and I. D. Watson, 1991: Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night Part II: Diagnosis of causation, Bound.-Layer. Meteor., **56**, 339-358.

朴 惠淑, 1986: ソウル市およびその周辺地域における夏季のヒートアイランドの気候学的考察, 地理学評論, **59**, 689-705.

朴 惠淑, 1987: 日本と韓国の諸都市における都市規模とヒートアイランド強度, 地理学評論, **60**, 238-250.

榊原保志, 1994: 越谷市に見られるヒートアイランド強

- 度—郊外が水田の場合—, 天気, 41, 515-523.
- 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.
- 榊原保志, 北原祐一, 2003: 日本の諸都市における人口とヒートアイランド強度の関係, 天気, 50, 625-633.
- 下山 宏, 1996: 東京都内における晴天日中の気温分布特性, 東京都立大学卒業論文, 32pp.
- 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, 42, 813-818.
- Sugawara, H., K. Narita and T. Mikami, 2004: Representative air temperature of thermally heterogeneous urban areas using the measured pressure gradient, *J. Appl. Meteor.*, 43, 1168-1179.
- 鈴木知道, 玄地 裕, 飯塚悦功, 小宮山 宏, 2001: 真夏の東京の気温日変化パターンの抽出, 天気, 48, 383-391.
- 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.

Re-examination of City Air Temperature for Heat Island Intensity Evaluation -Case Study in Seoul, Korea-

Hirofumi SUGAWARA*, Dong Wook JI** and Kikuro TOMINE**

* (Corresponding author) Dept. Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy of Japan.
1-10-20 Hashirimizu Yokosuka, Kanagawa 239-8686 Japan. E-mail: hiros@nda.ac.jp.

** Dept. Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy of Japan.

(Received 11 May 2004 ; Accepted 26 October 2004)

Abstract

In this study we clarified the temperature variation in Seoul, Korea and discussed the city representative air temperature. We used data of 24 AWS in Seoul, which are located above building roofs. The temperature distribution in Seoul is divided into two parts ; warm core at the center of city and cool area to the north of the city center. The temperature difference between them is comparable to the heat island intensity of Seoul. The standard deviation of temperature in Seoul could reach several tens percents of the heat island intensity. The inner city temperature variation is not negligible in evaluating the heat island intensity.

The air temperature variance in the urban area depends on a day of the week. This analysis indicates the anthropogenic heat as a source of temperature variation. Temperature difference between Seo-Cho district, which is a typical office area, and residential Kang-nam district is 0.45°C for weekday and 0.37°C for holidays, those area four years average. The difference between Seo-Cho and Kang-nam is statistically significant where the significance level is 5%.