

岡山市を対象とした細密な気象観測による ヒートアイランド強度の解析

重田 祥範*・大橋 唯太**

要 旨

都市気象観測に十分対応可能な精度をもつ気温・湿度測定器を開発し、岡山市を対象にした細密な気象観測をおこなった。観測の結果、夏季の日中には都市部で郊外よりも最大で約1.5°C低温な環境になる、いわゆる「クールアイランド」構造が認められた。夜間には、夏季、冬季ともに等温線が同心円状に広がる明瞭なヒートアイランド現象が出現したが、高温域の中心が夏季は住宅街に、冬季は都市部に位置し、季節の違いによって約4 kmのずれが生じることがわかった。ヒートアイランド強度は、冬季の方が夏季に比べて1°C大きく約4°Cであり、最大になる時刻や継続時間も夏季と冬季で異なっていた。また、ヒートアイランド現象の日変化パターンの特徴をより明らかにするため、24地点の測定値に対して主成分分析をおこなった。その結果、夏季と冬季の岡山平野における1日の気温からは、ヒートアイランド現象（第1主成分）とクールアイランド現象（第2主成分）が異なる成分として抽出された。

1. 研究の背景と目的

都市域でみられる特徴的な気象現象の1つとして、都市部の大気が郊外に比べて高温になるヒートアイランド現象が挙げられる。ヒートアイランドは、都市規模や建物の密集度など都市構造の違いのほかに、都市が立地する周辺郊外の環境によっても特徴が大きく異なり、地域性が強い現象とされる。都市のヒートアイランド現象を評価するパラメータとして、都市と郊外の気温差によって定義されるヒートアイランド強度(ΔT_{u-r})がよく用いられる(たとえば、Oke 1973)。以降、このヒートアイランド強度という言葉をもとに HII (Heat Island Intensity) と略す。Mitchell (1961) は、アメリカの都市部で冬季よりも夏季に HII が大きくなる特徴を指摘しており、また、河村 (1977) は東京における当時までの観測結果から、HII は冬季に

大きく、夏季に小さいことを示した。一方で、関口 (1970) によって、多くの都市で日の出前後に HII が最大になることが報告されているが、酒井ほか (2007) は京都市の観測結果から、HII が最大になる時刻が、1年を通して日没の2~3時間後であることも報告している。このように HII に関する知見には異なる結果がいくつか存在しており、その地域ごとの特徴が現れるようである。

近年多くの研究者がヒートアイランド現象の実態解明に取り組んでいるが、都市域内で気温データを入手できる場所としては、気象官署や自治体による大気汚染常時監視測定局などの公的機関によって運営されている観測点に限られる。特に、既存の気象観測資料は、観測地点が必ずしもヒートアイランド研究に都合のよい場所にあるとは限らない。また、測定器の設置場所の高さや地覆状態が不統一であり、データを解析するうえでは無視できない問題となり得る。このような欠点を解決するため、代わりに自動車などを使った移動型観測がしばしば利用される(たとえば、佐橋 1983; 榊原・北原 2003; 重田・大橋 2006)。ヒートアイランド研究の方法としてこの移動型観測は大変有

* 岡山理科大学大学院総合情報研究科 (現 岡山大学大学院自然科学研究科)。

** 岡山理科大学総合情報学部。

—2007年8月27日受領—

—2009年2月14日受理—

効な手段ではあるが、時刻補正による新たな誤差の発生や、観測地点での取得データが連続的でないという理由から、ヒートアイランドの時間的な変化が捕らえにくいという欠点も含んでいる。ヒートアイランド現象の正確な実態把握や、数値モデルなどを用いてヒートアイランド対策の効果を定量的に予測する場合には、都市内外を含む多地点での細密な気象観測をおこなうことによって、上述の問題点を解決できる（たとえば、三上 2004；酒井ほか 2007）。

さらに、都市の気温は小数の桁まで議論を要する場合も多くあり、精度については定量的な解釈をするうえでも決して無視できない。田宮（1979）は、移動型観測の測定精度は約 0.5°C であることを述べており、ヒートアイランド研究の多くが 0.5°C 以上の差によって都市の気温分布を議論している（たとえば、三上 1996；菅原ほか 2005）。しかし、既存研究では、測定精度を十分に検討していない場合も多くあり、この点は注意が必要とされる。

以上のような課題を踏まえて、本研究では、都市気象観測に十分対応可能な気温・湿度測定器を開発し、面的・時間的にも密な HII の情報を取得する。その対象地域には、過去にもヒートアイランド現象が確認されている岡山市を選択した。岡山市（人口約70万人）は瀬戸内海沿岸に位置し、2009年度に政令指定都市へ移行した都市である。

また、観測によって得られた細密な気象データに対して主成分分析による統計的な解析をおこない、岡山平野における気温と湿度（比湿）の日変化パターンの特徴を明らかにしていく。

2. 気温・湿度測定器の開発

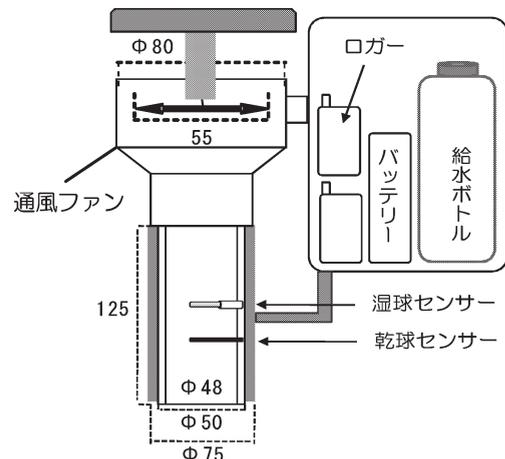
実際の野外測定では、電源の確保が困難であることに加えて、多くの設置場所と測定方法の工夫が必要となる。そのうえ、1地点へのコストを最低限に抑えながら、都市気温の時空間的変動を把握できる高い測定精度も確保しておかなければならない。もし、測定センサーが直に太陽放射を受けると、気温や湿度を正確に測定することができない。したがって、測定に対して価格面、精度や応答性などのスペックを総合的に満たしたシェルターが必要となる。

シェルター内の通風方式には、一般に強制通風式と自然通風式の2種類がある。強制通風式は、通風速度が一定であるため、自然通風式よりも測定精度が良いとされており（田中ほか 1997）、本研究でも強制通風

式のシェルターを開発した。その強制通風式シェルターには、円筒形の塩化ビニル管を2重にして使用した。入射する散乱光や反射光がシェルター内で乱反射して温度センサに当たらないように、シェルター内部を黒色に塗装した。また、アルミ箔と発泡ポリエチレン製の断熱材を塩化ビニル管に巻くことで、日射をできる限り反射させるような工夫もおこなっている。第1図に、本研究で開発した強制通風式シェルターの構造図を示す。通風ファンに使用したモーターは、マップチモーターRE-140（ 1.5 V 、 5400 r/min 、 550 mA 、通風速度 3 m/s ）である。通風ファンは、単一電池1本で約20時間連続稼働するので、単一電池2本を並列回路として使用することで40時間以上の連続測定が可能である。

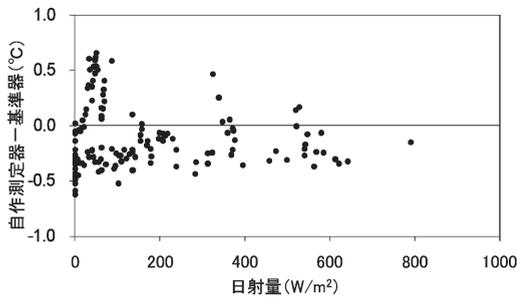
測定項目は乾球温度と湿球温度とし、データロガー付で、測定精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、時定数15秒のサーミスタ温度計（おんどとり Jr.RTR-52；T&D社）を使用した。ここで、湿球温度計には綿100%のガーゼを巻いて、給水ボトル（250 ml）から連続的に補水できるようにした。

測定器の実用性を定量的に確認するため、観測を実施する前後に、観測時と同様の気象条件下で検定をおこなった。アスマン通風乾湿計 SK-RHG（佐藤計量機器製作所；気象庁検定付き）をもとに較正を施した強制通風式の総合気象観測システム（DAVIS社製）を、検定の基準器（アスマン通風乾湿計とのバイアスは $+0.1^{\circ}\text{C}$ ）として用い、同時に風速、風向、日

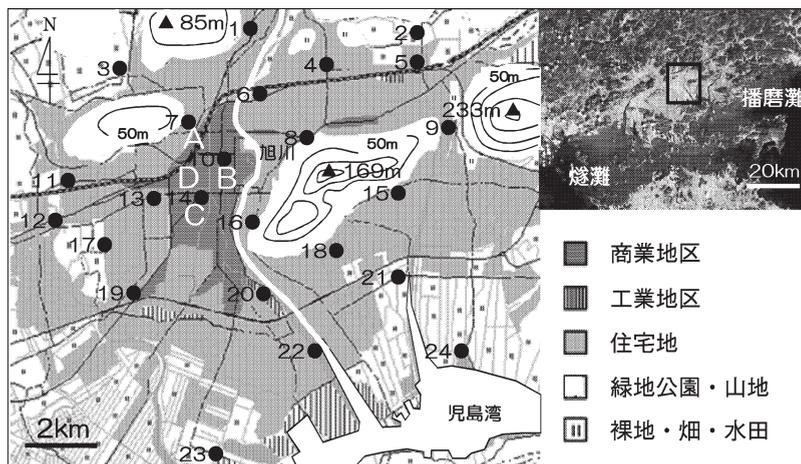


第1図 観測に用いた測定器の構造図（数字の単位はmm）。

射量も測定した。データの抽出は15秒毎におこない、解析時にはその5分平均値を用いた。ここでは、2007年冬季におこなった検定結果について述べる。開発したシェルターを取り付けた場合、器差は風速、日射量との相関が見られなかった（第2図；ただし風速については図省略）。過去におこなった夏季の検定結果も考慮すると、 $-2.0\sim 35.0^{\circ}\text{C}$ の温度帯で器差はセンサ自体の誤差を含めても $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内（シェルターが無い場合は $+2.0^{\circ}\text{C}$ 以上）と、ほぼ一定であった。これは、開発した自作シェルターが、太陽からの放射を十分に遮断できていることを意味し、自作測器間の器差も $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ に収まっていた。また、比湿の測定誤差は最大でも 0.2 g/kg であり、観測される比湿の差を議論するうえでは無視できる数値と考える。この検定結果をもとに、観測された乾球温度と湿球温度の数値をそれぞれ補正した。



第2図 基準器との測定誤差（乾球温度）と日射量の関係。



第3図 観測対象地域の土地利用形態と測定地点。A：JR岡山駅，B：岡山県庁，C：岡山市役所，D：岡山地方気象台。図中の黒丸は観測地点，数値は地点番号を示す。

3. 観測方法

3.1 観測対象地域

本研究の対象地域である岡山市は、日照時間の平年値が2009.8時間で東京都の1847.2時間に比べても多く、日本国内では晴天日が多い地域として知られている。そのため岡山市では、ヒートアイランド現象が頻繁に出現することが推測される。岡山市のヒートアイランド現象については、これまでいくつか研究がされてきている。たとえば、佐橋（1983）による1980年冬季の観測では岡山市のHIIが約 3°C 、藤井（2001）の観測では冬季の夜間に最大 5°C のHIIが確認されている。しかし、これまでの研究ではHIIの定義が異なっており、また、測定範囲や時間も限られた移動型観測であったため、一概に岡山市のHIIの特徴を整理することはできない。本研究では高精度の測定器を多地点に、かつ長期間にわたって設置することで、時間的にも空間的にも詳細な連続データの取得が期待できる。

本研究の観測対象地域は、岡山市街地を中心とする東西約13 km、南北12 kmの地域である（第3図）。岡山市は瀬戸内海から約15 km以上離れた平野に位置しており、一級河川の旭川が南北に流れている。JR岡山駅（第3図A）から岡山県庁（同図B）、岡山市役所（同図C）に囲まれた地域は、市内で最も高い建物が密集している。市街地の北側には標高300 m前後の山地が広がっており、西側と南側は平野で住宅地と田畑が広がっている。

JR岡山駅から約4 km東には標高約150 mの丘陵地があり、麓には住宅地（地点15・18周辺）と水田（地点21周辺）が広がっている。

3.2 観測日と測定方法

太平洋高気圧に覆われて晴天日が続いた2006年8月23～30日と、典型的な冬型の気圧配置で晴天日が続いた2007年1月7～15日の期間に、連続的に観測を実施した。

岡山平野内に計24地点（ 6.5 km^2 内に1地点の密度）の測定点を設け（第3

図), 街路上の葉が生い茂っていない若木の広葉樹や三脚などを利用して測定器を設置した。測定地点には, 樹木や建物等の局所的な影響をできる限り受けないように細心の注意を払い, 標高10 m以下, 天空率0.4以上(測定器を設置した位置から魚眼レンズを用いて撮影)の平坦な環境を選択した。また, 測定器は南向き, 地上高1.5 mという設置条件にすべてを統一した。測定値のサンプリング間隔は30秒毎で, 乾球温度と湿球温度を各地点で取得した。この乾球・湿球温度から湿度計方程式によって計算された水蒸気圧と, 岡山地方気象台(第3図D)の現地気圧を用いて比湿を算出した。その後, 気温, 比湿ともに5分平均値を正時毎に求め, その数値を解析に用いることにした。

4. ヒートアイランド強度(HII)の算出法

ヒートアイランド出現の指標として, 従来のヒートアイランド研究と同様に「ヒートアイランド強度(HII)」を用いる。Oke(1973)によると, HII (ΔT_{u-r})は都市と郊外の最大気温差として定義され, 次式で示される。

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r \quad (1)$$

ここで, T_u は都市部で最も高い気温, T_r は郊外で最も低い気温をあらわす。菅原ほか(2006)では, 都市と郊外それぞれの測定地点の選択や統計の取り方によって異なったHIIが計算されてしまうことが指摘されている。したがってHIIは, その数値だけから議論することは危険であり, 測定環境の状況を明確にしておく必要がある。藤野・浅枝(1999)は, 都市部

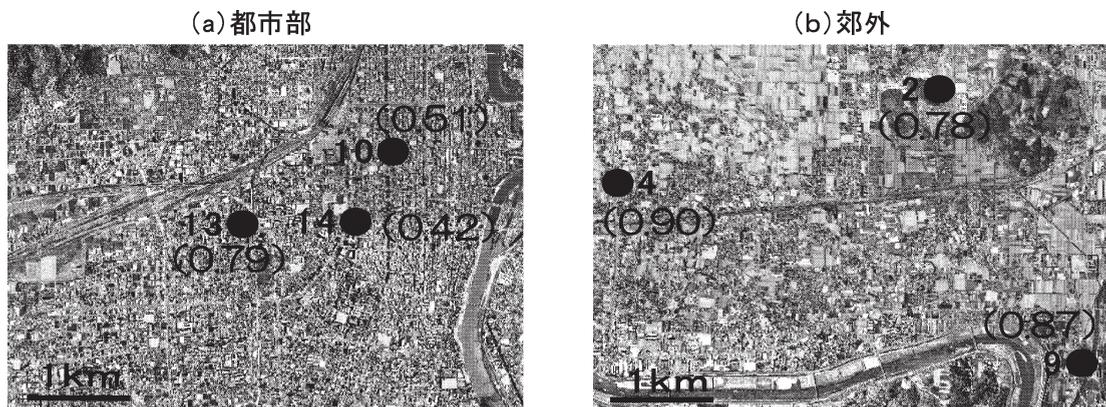
の最高気温と郊外の最低気温を示す1地点ずつの比較によって, HIIを求めている。これに対して榊原ほか(1998)は, 都市部と郊外それぞれ数地点の平均気温の差をHIIとみなしている。本研究では, 測定地点の選定には十分な注意を払っているが, 道路に近い測定地点では自動車排熱など局所的な影響を受けている可能性もある。このような理由から, 測定気温の空間的な代表性を確保するため, 都市部と郊外の観測地点からそれぞれ3地点を選択し, その平均値を用いてHIIを計算した。この方法で得られたHIIは, Oke(1973)による式(1)の方法で得られる値よりも小さくなることが予想される。

HIIを算出するうえで都市部と郊外を代表する地点の選択方法が問題となるが, 都市の地点には建物が集中する地域を選択し, 一方で郊外の地点には比較的大規模な水田, 畑, 果樹園, 裸地などが分布する地域を選択するのが一般的とされる。本研究では, 交通量が多く, 建物が密集する地点10, 13, 14の平均気温を都市部の代表気温, 低層住宅・裸地が混在する地点2, 4, 9の平均気温を郊外の代表気温として, HIIを算出することにした(第4図)。なお, 近辺にある他の地点の平均気温を用いても, HIIの定性的な結論を変えるほどの差はなかった。

5. 観測結果

5.1 夏季における気温と比湿の水平分布

典型的な夏季の特徴をもった, 2006年8月23日9~21時における気温と比湿の空間偏差の水平分布図を第5図に示す。本研究で水平分布図を描く際の空間内



第4図 HIIの計算に用いた(a)都市部と(b)郊外それぞれの観測地点(航空写真は, おかやま全県統合型GISより引用)。数値は地点番号, 括弧内の数値は測定場所の天空率をあらわす。

挿法には、Kriging 法を用いた。観測期間中の昼前後には、JR 岡山駅を中心とした都市部が郊外に比べて低温な環境になる、いわゆる「クールアイランド現象」が確認された（第 5 図 a, b 上）。一般にクールアイランドという言葉は、都市部の中に大規模な緑地が存在するとき、その緑地帯を中心に低温な環境が形成される状況を指すことが多い（菅原ほか 2006）。しかし、ここでは緑地に関係なく、周囲よりも気温が低くなる領域という意味で、あえてクールアイランドという言葉を用いる。また、クールアイランド発生時刻の地表面温度を地球観測衛星 Terra に搭載されている MODIS データ (MOD11) から調べた。その結果、観測期間中の地表面温度は、クールアイランド発生域が約 30°C、その外れの住宅街（地点17周辺）では 35°C 以上となっており、少なくとも 5°C 以上の差が認められた。

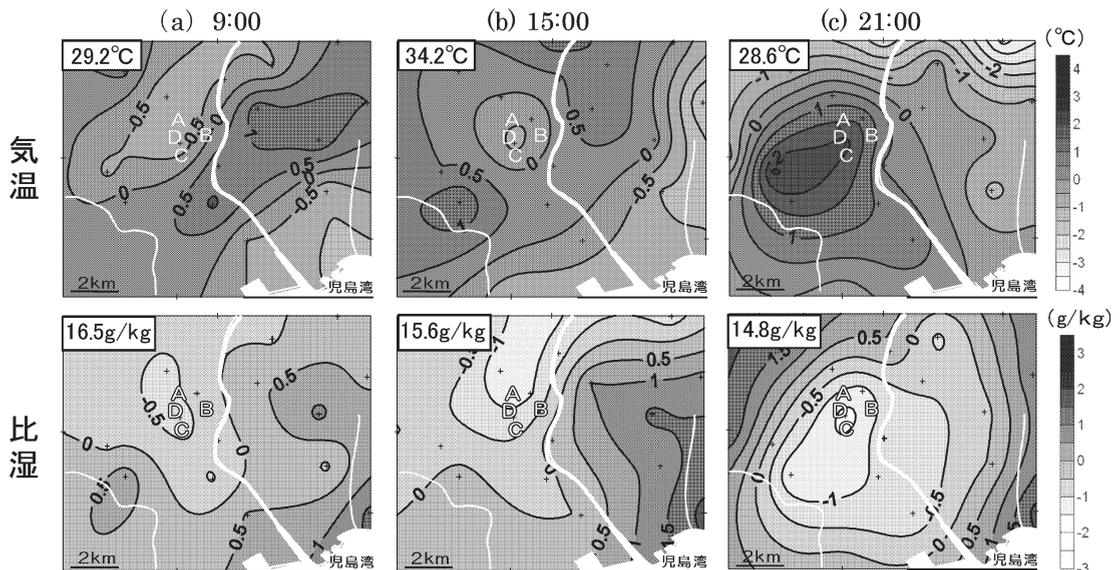
2007年の夏季にも岡山市で同様の長期的な連続観測をおこなった。測定地点は2006年と同様の領域内で均等に52ヶ所設けた。さらに都市部と郊外で測定場所の条件をより厳密に統一化させるため、全ての測定地点には天空率0.5以上かつ地表面が裸地である公園を選択した。解析の結果、この2007年の観測でも明瞭なクールアイランド現象を確認することができた。つまり、岡山市街地のクールアイランド現象は、局所的に点在したクールスポットのように発生しているのでは

なく、都市全体の水平スケール（約 2～3 km）で形成されていることを意味し、今後、都市の気候形成メカニズムを考えるうえで重要な示唆を与える調査結果と言える。

一方、夜間には、JR 岡山駅（第 5 図 A）から南西約 4 km に位置する住宅街を中心とした、同心円状のヒートアイランド現象が発生した。北寄りの陸風風向となり始めた日没直後からヒートアイランド現象は出現し、20～22時にかけて最も顕著になり、その時の HII は約 3～4°C であった（第 5 図 c 上）。その後、明け方にかけてヒートアイランド現象は徐々に不明瞭となっていく。また、都市中心部から西部にかけて、日中、夜間ともに比湿の低い乾燥領域が広がっており、都市部（地点14）と郊外（地点24）の間で 4.0 g/kg を超える差が生じていた（第 5 図 c 下）。

5.2 冬季における気温と比湿の水平分布

典型的な冬季の特徴をもった、2007年1月10日9～24時における気温と比湿の空間偏差の水平分布を、第 6 図に示す。冬季の日中は、気温と比湿ともに地域による差がほとんどなく、夏季に出現していた都市中心部のクールアイランド現象も、あまり明瞭ではない（第 6 図 b 上）。一方、夜間には、JR 岡山駅の東側にヒートアイランド現象が発生し、これは夏季とは異なる位置である。HII は 23時～1時頃に最大となり、4



第 5 図 夏季の地上気温と比湿の偏差分布。2006年8月23日 (a) 9時, (b) 15時, (c) 21時の結果。各図の左上の数値は全観測地点での平均値、白線は河川、+は観測地点を示す。

～5°C程度であった(第6図c上)。その後、明け方までHIIはほぼ定常であり、ヒートアイランド現象は9時頃まで出現していた。

このように、夏季と冬季でヒートアイランド現象の発生時刻とHII、さらに高温域の位置が大きく異なっている点は特筆すべき特徴と言える。

比湿の分布は、夏季に比べて地域差が小さく、観測領域内で比湿の最大差は0.5g/kg以下であった。また、夏季と冬季において比湿の平均値に対する偏差を比較したところ、夏季は平均値14.8g/kgに対して偏差の大きさが27%を占め、冬季は平均値3.2g/kgに対して偏差の大きさが16%であった。したがって、冬季の比湿で見られる偏差は夏季に比べても小さいことがわかり、観測領域内で特徴的な地域差は見られない(第6図c下)。

6. 考察

6.1 HIIの時間変化

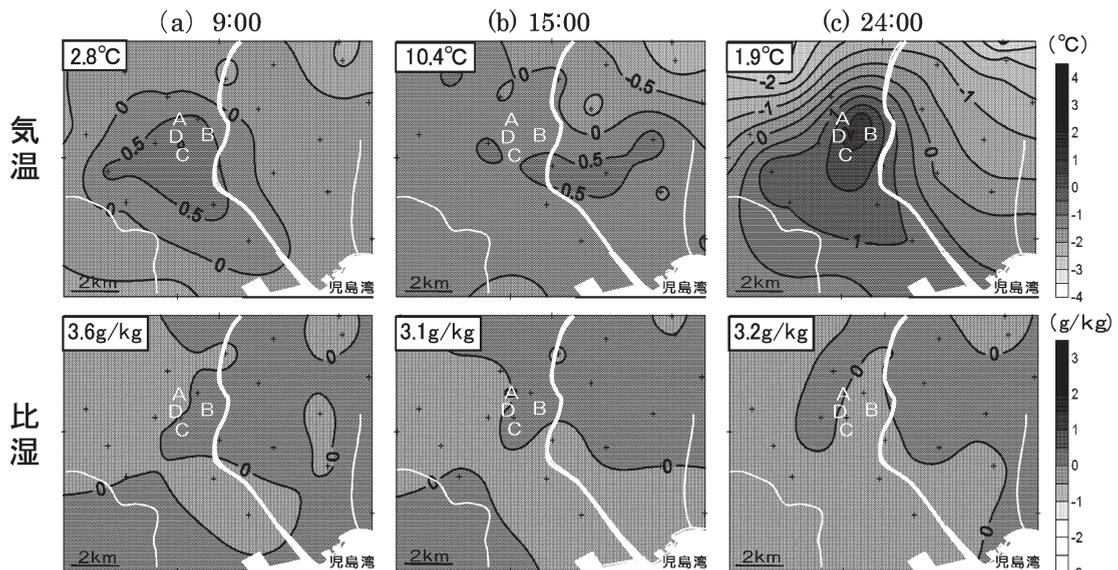
6.1.1 都市部のクールアイランド現象

夏季と冬季それぞれ5日間におけるHIIの時間変化を、第7図に示す。HIIは、夏季、冬季ともに日の出から日中にかけて小さく、日没以降には大きくなる傾向をもつ。特に、日中を中心として前述のクールアイランド現象が現れており、夏季は10時頃に最大約

1.5°C(地点14と地点2の気温差)、冬季は夏季よりも出現時間帯が遅く、かつ明瞭でなくなり、12時頃に最大0.8°C、それぞれ都市部が郊外に比べて低温となっている。冬季の0.8°Cという数値は、第2章で述べた測器の精度である0.5°Cよりも大きいため、有意と言える。

日中のHIIについては、以下のような既存研究が報告されている。たとえば、関口(1970)は、盆地内にある長野市で詳しい気象観測をおこなった結果、HIIは日中でも夜間と同程度であったことを述べている。榊原(1994)による越谷市の移動型観測では、夏季の昼間に都市部が郊外に比べて約4°C高くなっていた。一方、Ludwig(1968)は、アメリカ合衆国テキサス州の北部に位置するダラス市において、夏季晴天の日中に都市中心部が郊外に比べて約0.5°C低温になる現象を報告している。

このように、日中の都市部の高温化には今まで多くの知見があるが、都市部の中に存在する公園などの緑地ではなく、建物が密集する都市部において、本研究で確認されたような数kmの水平スケールで明瞭なクールアイランド現象が現れる報告例はほとんどない。近藤・開発(1995)や先述のLudwig(1968)では、都市中心部が郊外よりも相対的に低温域になることが確認されているが、観測された低温部の水平スケールは1km未満で、郊外の高温部との差は1.0°C以下で



第6図 冬季の地上気温と比湿の偏差分布。2007年1月10日(a)9時、(b)15時、(c)24時の結果。各図の左上の数値は全観測地点での平均値、白線は河川、+は観測地点を示す。

あった。また、本研究で確認された岡山市のクールアイランドは、海風が都市部に侵入してくる時間よりも前から発生しているため、東京や大阪などで観測されている海風侵入による気温の抑制効果（たとえば、三上 1996）とは性質を異にするものと考えられる。

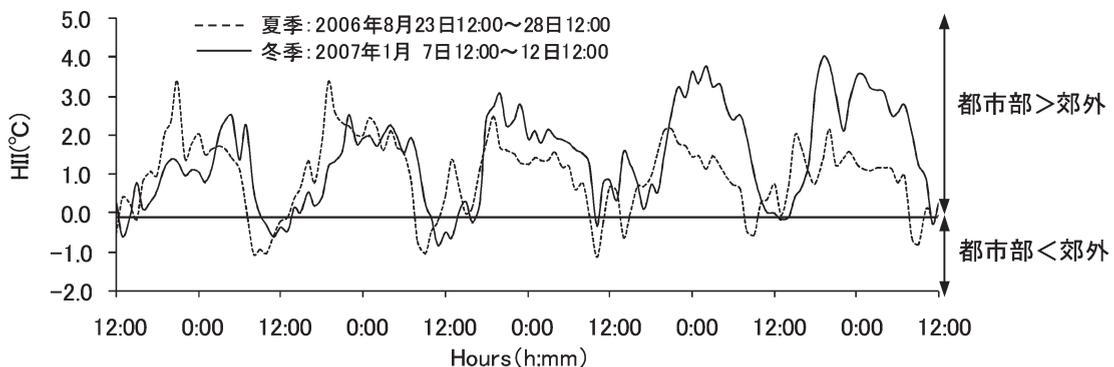
移流の影響を考えなければ、都市部のクールアイランドの発生には、都市部と郊外の建物1棟あたりの熱容量の違いが関与していることが予想される。都市部と郊外を構成する代表的な物質の比熱は都市部の方が郊外よりも1.5～2倍ほど大きい（近藤 1994）。ここで、都市部と郊外それぞれの観測地点から半径500 m以内において、建物ポリゴンデータ（株）ゼンリン電子地図 Z Professional3とデジタウン）より観測街区の形状を示す平均建物幅、平均道路幅、平均建物高度をそれぞれ算出した。クールアイランドが発生している都市部（地点10周辺）の平均建物幅は15.4 m、平均道路幅6.9 m、平均建物高度10.0 mであった。一方、クールアイランドの発生地域から南西約4 kmにあり、低層住宅と田畑が混在した地点17周辺を郊外の地点として選択した。この地域は比熱が郊外の中でも比較的大きいと推測され、平均建物幅は13.8 m、平均道路幅17.1 m、平均建物高度4.0 mであった。したがって、これらの数値から計算される1棟あたりの平均建物表面積は、クールアイランド地域（都市部）が853.2 m²、郊外では411.2 m²となり、クールアイランドが発生している地域は郊外に比べて2倍以上大きい。このため都市部では高層建物の影響によって住宅街よりも日射を受ける表面積が大きく、結果として、都市部の熱容量の総和も郊外に比べてより大きくなる。実際に、都市部では郊外よりも最高気温を記録す

る時刻が約2時間遅れていた。また、建物高度が高くなると、ビルキャニオンでの日射量は少なくなることが考えられる。近藤・劉（1998）は、都市キャノピーモデルを用いてビルキャニオンの地上気温を計算している。その結果、そこでは昼間の日射量がビルキャニオンで少なくなり、建物の高さによって気温の上昇率が変わることを報告している。

以上のことから、都市部では日中の気温上昇率が郊外よりも小さくなり、その結果としてクールアイランドが形成された可能性が高い。

6.1.2 夜間のヒートアイランド現象

第7図より、HIIが大きくなる時間帯は、夏季、冬季ともに日没以降であるが、夏季は日没直後に最大値をとる。一方、冬季では、関口（1970）の報告と同じく深夜から未明にかけてHIIが最大となる。HIIは冬季の方が夏季よりも1°C程度大きくなっており、夏季と冬季の間でHIIの最大値とヒートアイランド現象の継続時間も異なっている。留意すべき特徴は、夏季には18～21時に各観測点で急激な気温低下が認められる点である（第8図a）。このために、HIIは短時間に2°C以上も大きくなっている。このようなHIIの増加は、カナダのバンクーバーについて検討したOke（1981）や、盆地内にある湖岸の小都市のヒートアイランド特性を調べた藤野・浅枝（1999）による報告などと類似している。また、酒井ほか（2007）は、都市部で発生する夜間のヒートアイランドが熱慣性（地表面を構成する物質の比熱と熱伝導率の積の平方根）の違いに起因すると考え、熱慣性の大きさが郊外の2倍を超えるような都市では日没後数時間でヒートアイランド循環が励起されて、郊外の冷気が都市に流



第7図 HIIの時間変化（夏季・冬季それぞれ連続5日間のデータ）。都市部（第3図地点10, 13, 14）と郊外（第3図地点2, 4, 9）それぞれ3地点の平均値を示す。

入し、都市大気を冷却する可能性を示唆している。

ここで、この HII の変化と最大値の出現過程をより詳細に検討するため、観測地点のうち、HII が最大値に達する時刻までの南北 4 地点（第 3 図地点 1, 6, 10, 23）の代表的な気温変化を第 8 図に示す。夏季（第 8 図 a）においては、 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上も気温が急低下する時間帯を確認できる。一方、冬季（第 8 図 b）にはこの現象は確認できない。都市部の風上になる観測点（第 3 図地点 6）で気温の低下量が最も大きく $-0.12^{\circ}\text{C}/\text{min}$ であり、20~30 分間も気温の低下が継続していた。都市部を通過して南下するにしたがい気温の低下量は小さくなり、 $-0.09^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の割合で 10 分間程継続した（第 3 図地点 10, 23）。これは、観測領域内において冷気を伴う山風の前線部分が、北側の山地から都市部に向かって通過した様子を捉えたものと考えられる。特に、山風前線が郊外を通過して都市部に到達する直前の時刻に HII は最大となっており、都市部の通過後には HII が減少していく。つまり、単純に気温差だけで HII を判断すると冷気の侵入という局地風の影響まで含んでしまい、都市の影響のみで発生する HII を過大評価してしまう恐れがある。岡山市において HII が日没後数時間で最大となる特徴は、都市部に侵入する山風の影響が顕著に現われた夏季特有の現象であると考えられる。

6.2 主成分分析

6.2.1 解析概要

ヒートアイランド現象の発生要因に関しては、数値モデルを用いた検証や統計的手法による解析など、さまざまな視点から研究がされてきている。統計学的なアプローチとして、たとえば、鈴木ほか（2001）は、

東京都で発生するヒートアイランド現象に対して主成分分析をおこない、東京 23 区内における気温の時空間パターンを明らかにしている。また、武市（2002）は、高知県南国市で観測した気温に対して主成分分析をおこない、得られた因子や主成分と地表被覆形態・人口密度など人為的要因の関係を検討している。

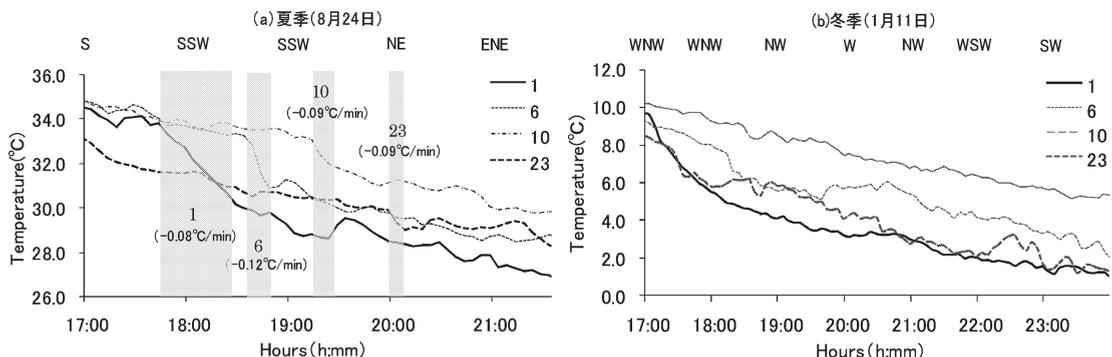
本研究でも同様に主成分分析を適用し、前節までに述べたヒートアイランド現象と乾燥領域の時空間パターンを統計的に説明することに主眼をおく。これまでの既存研究で主成分分析が使われた際には、地点に対して負荷を求める場合が多かったが、本解析では時刻に対して負荷を求めてみる。また、夏季と冬季それぞれに対して主成分分析をおこない、各々で抽出された主成分に類似した特徴が得られるかについても検討した。

解析に使用したデータは、夏季、冬季ともに第 7 図に示した期間と同一である。データ数は、連続的に測定値が得られた 24(地点)×24(時間)×5(日)である。解析対象の気温と比湿は、「観測地点」、「時刻」、「日」によって変化する。そこで、1 日の気温と比湿を時刻に関する 24 次元の多変量データとみなしたうえで「時刻」について固有ベクトルを求め、「地点」と「日」に対して主成分得点を求めることにした。また、出版行列には相関行列を用いた。

6.2.2 解析結果

1) 気温

気温に対する主成分は、第 5 主成分まで求めた。第 1 表に、主成分分析の結果を示す。寄与率の大きさから、夏季、冬季ともに固有値が 1.0 以上、寄与率が 5.0% 以上の主成分までを取り上げて解析することと



第 8 図 ヒートアイランド発生時までの気温の時間変化。4 地点（第 3 図地点 1, 6, 10, 23）の代表的な観測事例であり、陰影部分は気温が各地点で急低下した時間帯、グラフ上の風向は岡山地方気象台で観測された 1 時間毎の 16 方位を示す。

判断した（鈴木ほか 2001）。

第1主成分：第1主成分の固有ベクトルは、夏季で8～9時、冬季では10～16時を除いたすべての時刻で正の値を示し、夏季、冬季とも18時から7時までの夜間には0.2以上の高い値を示している（第9図の実線）。ここで、主成分得点（5日間の平均値）の空間分布を第11図に示す。第1主成分得点が最も高い地域は、夏季には都市部から南西方向の住宅街にかけて、冬季はJR岡山駅東側の都市部に分布している（第11図a）。共通の特徴として、周囲の郊外に向かって徐々に主成分得点が低くなっており、最も低い地域は観測領域の北東側から北側の山沿いにかけて分布している。都市部では、日中に郊外よりも気温が低くなる特徴が見られたが、これは第1主成分の固有ベクトルが小さい値を示す時刻と一致している。一方の夜間は、夏季には南西の住宅街、冬季は都市部で高温域が出現しており、固有ベクトルが大きな正の値を示す時間帯（第9図の実線）と地域（第11図）に一致していることがわかる。以上の結果から、第1主成分はヒートアイランド、すなわち夜間の気温分布を説明しているものと判断できる。

第2主成分：第2主成分の固有ベクトルは、夏季では、正の値を示す7時から18時までと、負の値を示す19時から6時までの2つの時間帯に分けられ、冬季には日中を中心に正の値のみを示している（第9図の破線）。この特徴は、第1主成分の固有ベクトルとは逆の関係にある。第11図bからわかるように、第2主成分得点が高い地域は、岡山市東部の郊外に集中している。一方、主成分得点が低い地域は、都市部と沿岸部に分布する。また、都市部が郊外よりも低温になる時刻は、第2主成分の固有ベクトルが最大をとる時刻とほぼ一致していた。一方、この特徴が現れない時間帯の固有ベクトルは、夏季に負の値、冬季ではほぼ0に近い。以上の結果から、第2主成分は日中に都市部

で発生するクールアイランドと海風の影響を受けている沿岸部の低温領域、すなわち日中の気温分布を説明していると判断できる。

第3主成分：第3主成分の固有ベクトルは、夏季は9時頃に負の値をとり、その後午後にかけて著しく上昇し、夕刻から20時の間に正の値になる。冬季は正の値を示す12時から18時までと、ほぼ0に近い定常状態である19時から7時まで、そして負の値を示す7時から11時までの3つの時間帯に分けられる（第9図の淡実線）。

このような固有ベクトルの急激な増減が夏季、冬季とも朝夕に確認でき、これは気温の上昇と低下の時間変化率に深く関係していると考えられる。ここで、第11図cからわかるように、固有ベクトルが高い地域は、他の地域よりも1日を通して気温差（最高気温と最低気温の差）が小さい地域に一致する。以上の結果から、第3主成分は気温の日較差を説明していると判断できる。

2) 比湿

第1主成分：第1主成分の固有ベクトルは、すべての時刻で正の値を示し、定常に近い（第10図の実線）。ここで、第1主成分の主成分得点（5日間の平均値）の空間分布を第12図aに示す。第1主成分得点が最も高い地域は、夏季では観測領域の南東から南側にかけて、冬季は観測領域の東部に分布している。一方、主成分得点が最も低い地域は、夏季、冬季とも都市部から北西側にかけて分布している。特に夏季は、都市部から沿岸部に向かって徐々に主成分得点が高く特異な分布をしている。都市部は一日を通して比湿が低く、また比湿の偏差分布と主成分得点の分布もよく一致している。以上の結果から、第1主成分は日平均比湿を説明していると判断できる。

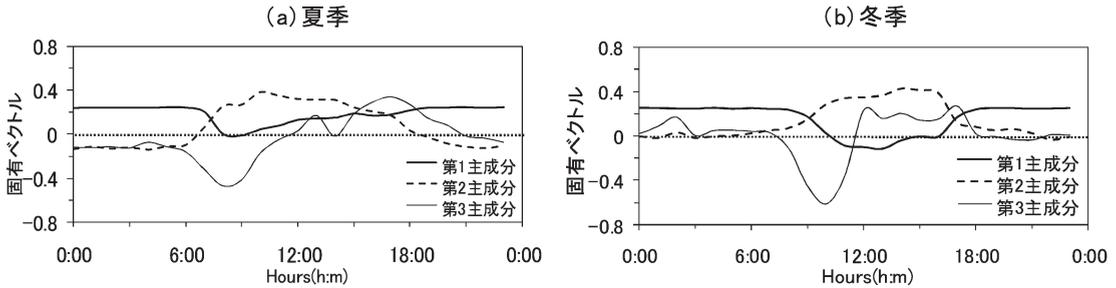
第2主成分：第2主成分の固有ベクトルは、夏季では、正の値を示す10時から20時までと、負の値を示す

第1表 主成分分析の結果。枠で囲った数値は、解析対象とした主成分を示す。

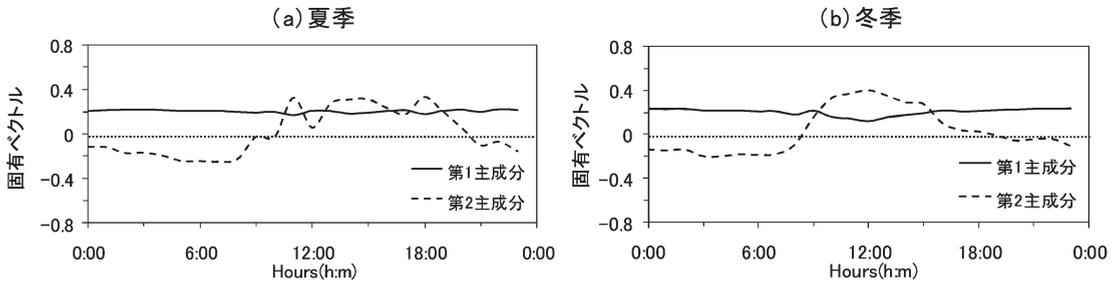
主成分	固有値				寄与率 (%)				累積寄与率 (%)			
	夏季		冬季		夏季		冬季		夏季		冬季	
	気温	比湿	気温	比湿	気温	比湿	気温	比湿	気温	比湿	気温	比湿
第1主成分	14.4	18.8	15.3	16.2	59.8	78.5	63.6	67.7	59.8	78.5	63.6	67.7
第2主成分	4.9	2.2	4.8	4.3	20.4	9.2	20.0	18.0	80.2	87.7	83.6	85.7
第3主成分	2.6	0.8	1.5	1.5	11.0	3.3	6.3	6.2	91.2	91.0	89.9	91.8
第4主成分	0.7	0.5	0.7	0.5	3.0	2.2	2.8	2.1	94.3	93.2	92.7	93.9
第5主成分	0.5	0.5	0.5	0.4	1.9	2.1	2.1	1.7	96.2	95.3	94.8	95.6

21時から9時までの時間帯に分けられる。一方、冬季は9時から18時まで正の値を示すが、夏季よりも3時

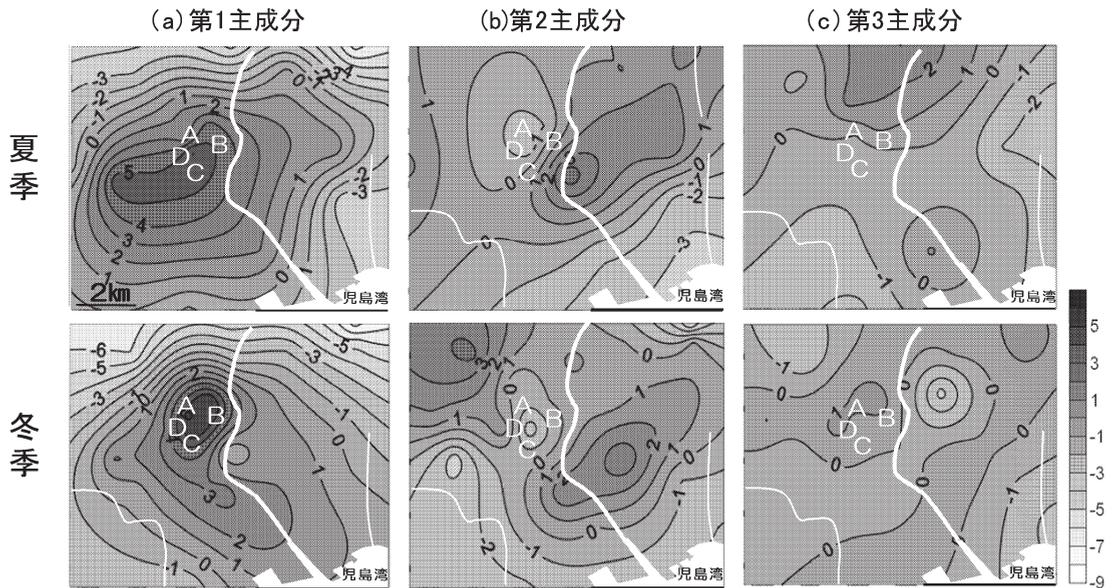
間程短くなっている（第10図の破線）。夏季と冬季の共通する特徴として、固有ベクトルが日中に正の値、



第9図 気温に対する主成分分析から得られた (a) 夏季, (b) 冬季における固有ベクトル (5日間の平均値) の時間変化。



第10図 比湿に対する主成分分析から得られた (a) 夏季, (b) 冬季における固有ベクトル (5日間の平均値) の時間変化。



第11図 気温に対する主成分得点の地理的分布。上段は夏季, 下段は冬季の結果であり, 数値は主成分得点 (5日間の平均値) を示す。

夜間には負の値を示すことがあげられる。ここで、岡山地方気象台（第3図D）における夏季と冬季それぞれの風向変化を解析したところ（図省略）、風向の日変化と固有ベクトルの特徴が類似しており、観測領域で卓越していた南寄りの海風が内陸からの陸風へと変化する時刻と、冬季は夏季に比べて海風卓越時間が短くなる特徴が一致している。また、第2主成分得点が最も高い地域は、観測領域の郊外を中心に分布しており（第12図b）、固有ベクトルが最大となる時刻と郊外において比湿が上昇する時間帯とが一致している。一方、夏季、冬季ともに夜間の比湿の時間変化率は小さく、固有ベクトルも負の値となっている（第10図の破線）。以上の結果から、第2主成分は、比湿の日較差を説明していると判断できる。

7. まとめ

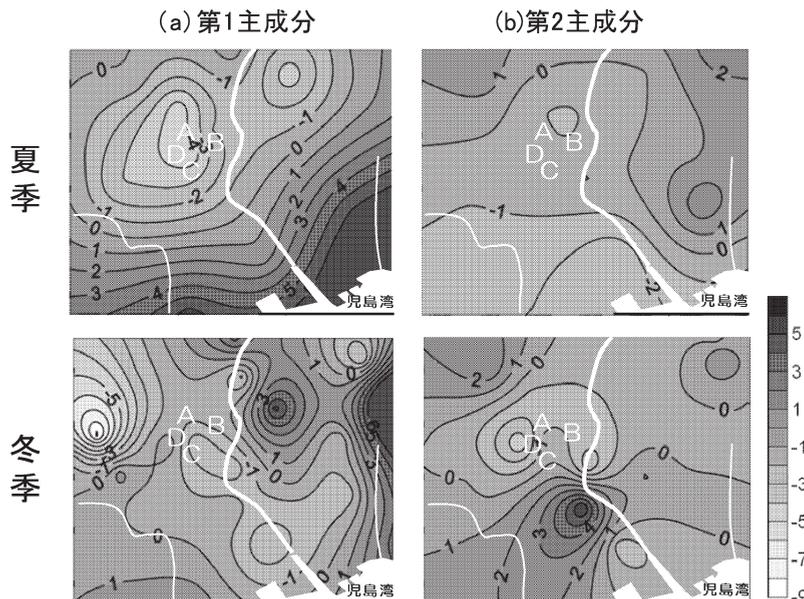
都市気象観測に十分対応可能な精度をもつ気温・湿度測定器を開発し、岡山市を対象にした細密な気象観測をおこなった。

開発した測定器と基準器との温度差は、風速、日射量との相関が認められず、 $-2\sim 35^{\circ}\text{C}$ の温度帯でセンサ自体の誤差を含めても $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内と、ほぼ定常であり、また測器間の器差も約 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ に収まっていた。

観測の結果、夏季の日中には都市部で郊外よりも最大 1.5°C 低温な環境が形成される「クールアイランド」構造が認められた。夜間は、夏季と冬季ともに同心円状に広がる明瞭なヒートアイランド現象が出現したが、高温域の中心が夏季は住宅街に、冬季は都市部に位置し、季節の違いによって約4kmのずれが生じることがわかった。

ヒートアイランド強度は、冬季の方が夏季に比べて 1°C 大きく約 4°C であり、最大になる時刻や継続時間も夏季と冬季で異なっていた。

また、ヒートアイランド現象の日変化パターンの特徴をより明らかにするため、24地点の測定値に対して主成分分析をおこなった。気温と比湿の日変化パターンを表す、以下のような夏季と冬季共通の特徴を持った主成分が抽出された。気温が3つの主成分（第1主成分：夜間の気温分布（ヒートアイランド）、第2主成分：日中の気温分布（クールアイランド）、第3主成分：気温の日較差）、比湿が2つの主成分（第1主成分：平均比湿、第2主成分：比湿の日較差）で示され、これらによって1日の気温と比湿の90%を説明することができる。このように、岡山市における1日の気温からは、ヒートアイランド現象（第1主成分）とクールアイランド現象（第2主成分）が異なる成分として統計的に抽出されたことは非常に興味深い。



第12図 比湿に対する主成分得点の地理的分布。上段は夏季、下段は冬季の結果であり、数値は主成分得点（5日間の平均値）を示す。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重な観測データを提供して頂きました気象庁、並びに定点型観測点の設置場所と航空写真を提供して頂きました岡山市役所、国土交通省岡山維持出張所の方々に心より謝意を表します。衛星データについて、ご指導頂きました岡山大学大学院環境学研究科の吉川俊作氏に感謝致します。また、本論文をまとめるにあたり、査読者の方々ならびに編集委員には多くの有益なご意見、ご指摘を頂きましたことに心より感謝致し

ます。

本研究の一部は、文部科学省平成18年度科学研究費補助金(課題番号:18790409)の援助を受けたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 藤井清香, 2001: 岡山市におけるヒートアイランドの水平分布に関する研究. 岡山大学理学部地球科学科平成12年度修士論文, 25 pp.
- 藤野 毅, 浅枝 隆, 1999: 盆地内における湖岸の小都市ヒートアイランド特性について. 天気, **46**, 317-326.
- 河村 武, 1977: 都市気候分布の実態. 都市気候に関する最近の展望, 気象研究ノート, (133), 26-47.
- 近藤昭彦, 開発一郎, 1995: 広島市市街地におけるランドサットデータによる輝度温度と気温および都市キャノピー層の構造との対応関係. 地学雑誌, **104**, 225-238.
- 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.
- 近藤純正, 1994: 水環境の気象学. 朝倉書店, 150-159.
- Ludwig, F. L., 1968: Urban temperature fields. Brussel symposium print.
- 三上岳彦, 1996: 東京におけるヒートアイランドの時空間構造とその長期変動. 総合都市研究, **60**, 77-85.
- 三上岳彦, 2004: ヒートアイランド研究の今後と政策へのかかわり. 天気, **51**, 118-122.
- Mitchell, J. M., 1961: The temperature of cities. Weatherwise, **14**, 224-229.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island. Atmos. Environ., **7**, 769-779.
- Oke, T.R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island. Comparison of scale model and field observations. J. Climatol., **1**, 237-254.
- 佐橋 謙, 1983: 自動車による気温の移動観測における観測誤差—特に自動車の影響を中心に—. 天気, **30**, 509-514.
- 酒井 敏, 飯澤 功, 梅谷和弘, 伊藤 文, 矢島 新, 小野耕作, 大西将徳, 鈴木尚起, 2007: 夜間のヒートアイランド強度とヒートアイランド循環. 日本気象学会2007年度春季大会講演予稿集, 163.
- 榎原保志, 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.
- 榎原保志, 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.
- 榎原保志, 田中 忍, 伊藤由香, 1998: 長野市における夜間ヒートアイランド強度に対する風速と接地逆転の強さの関係. 天気, **45**, 119-126.
- 関口 武, 1970: 都市気候学. 天気, **17**, 89-96.
- 重田祥範, 大橋唯太, 2006: 中規模都市における大気熱環境の広域的な細密調査—岡山市街地で発生するヒートアイランド現象—. 環境情報科学論文集, **20**, 7-12.
- 菅原広史, 池東 旭, 遠峰菊郎, 2005: 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—. 天気, **52**, 119-127.
- 菅原広史, 成田健一, 三上岳彦, 本條 毅, 石井康一郎, 2006: 都市内緑地におけるクールアイランド強度の季節変化と気象条件への依存性. 天気, **53**, 393-404.
- 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抽出—統計手法によるヒートアイランド現象の把握—. 天気, **48**, 383-391.
- 武市伸幸, 2002: 高知県南国市のヒートアイランドと形成要因. 天気, **49**, 47-56.
- 田宮兵衛, 1979: 小気候・局地気象—特に移動観測の方法について—. 天気, **26**, 633-640.
- 田中博春, 浜田 崇, 牛山素行, 藤野 毅, 柳下和之, 鈴木智恵子, 1997: 簡易気温観測手法の精度について(3). 日本気象学会1997年度春季大会講演予稿集, 218.

Analysis of Heat Island Intensity from Meteorological Observation Network in Okayama City

Yoshinori SHIGETA* and Yukitaka OHASHI**

* Faculty of Informatics, Okayama University of Science (Present affiliation: Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University).

** Faculty of Informatics, Okayama University of Science.

(Received 27 August 2007; Accepted 14 February 2009)