

夏季の岐阜市における気温と湿度の時空間変化とヒートアイランド現象

小倉啓史・勝田長貴・増田仙一・川上紳一
岐阜大学教育学部

Spatio-temporal variability in air-temperature and humidity of Gifu City in summer season and its relations to heat island phenomena

Hirofumi Ogura, Nagayoshi Katsuta, Sen-ichi Masuda and Shin-ichi Kawakami
Faculty of Education, Gifu University, Gifu, 501-1193, Japan

要旨

2010年9月において岐阜市周辺の9つの小中学校に臨時観測点を設け、気象観測を実施した。これら9地点と岐阜大学ならびに岐阜地方気象台の定点観測点の気温と湿度の観測データの解析を行った。昼間においては長良川に沿った低温域が出現し、夜間には都市部に同心円状の明瞭な高温域が認められた。高温域の中心は、日没から0時にかけて都市部南東に存在し、1時から日出にかけては都市部の北部と南部に2つに分かれて生じた。郊外の気温に対する都市部の気温差で定義されるヒートアイランド強度は、気温の日変化と整合し、昼間に比べて夜間に高く、昼間に一時的に負の値となり、夜間で最大となる。湿度は気温に対して時間的空間的に逆相関分布を示し、これは飽和水蒸気圧の温度依存性に因る。また、気温と湿度の日変化の要因を解明するために主成分分析を行った。気温については、ヒートアイランド現象(第1主成分)と昼間の気温(第2主成分)が抽出され、これらの主成分で気温全体の83.5%を説明できることが示された。

【キーワード】：気温, 湿度, 逆相関, ヒートアイランド現象, 長良川, 主成分分析

1. はじめに

近年、都市部において、エネルギーの消費や土地の人工被覆の増加により、都市部の気温が郊外に比べて高くなるヒートアイランド現象が、都市特有の環境問題として注目されている。ヒートアイランド現象は、年間を通して発生しており、このうち、夏季のヒートアイランドは、熱帯夜の増加や昼間の高温化が生活上の不快感を増大させ、不眠症や熱中症などの深刻な健康被害をもたらす原因と考えられている(気象庁, 2009)。また、ヒートアイランドによる気温の上昇は、エアコンなどのエネルギー消費量を増加させ、都市部の高温化を一層促進させるという悪循環を引き起こしている。こうした悪循環を断ち切り、快適な生活環境を確保するために、環境省による「ヒートアイランド対策に関する調査」(環境省, 2004)など様々な施策がとられており、国をあげてヒートアイランド現象の対策に取り組むようになってきている。

これまで、ヒートアイランド現象に関する研

究は、気象観測や数値シミュレーションなどにより、数多く行われてきた。しかし、その多くは、大都市もしくは平野スケールを対象とするものであり(例えば、気象庁, 2009, 鈴木ほか, 2001)、中小都市の観測事例や都市レベルの観測データを増やすことが、ヒートアイランド現象の実態を理解する上での課題のひとつとされている(藤部, 2007)。現在までに地方都市で研究が行われているのは、岡山市(重田ほか, 2009)、熊本市(齊藤ほか, 2007)、高知県・南国市(武市, 2002)、長野県・白馬村(榊原・森田, 2002)などである。いずれの地域においても、ヒートアイランド現象の発生は確認されているものの、その出現時刻や空間分布(形状、強度や規模及び範囲)は、地理的地形的条件の違いで大きく異なる結果となっている。

岐阜市における都市レベルでの気象観測については、これまでに全く行われてこなかった。そこで本研究では、岐阜市のヒートアイランド現象の実態とその要因を把握することを目的と

し、市内全域を網羅するように観測点を設け、気温と湿度の分布を面的に観測した。本稿では、2010年9月の観測値の解析結果を示すとともに、主成分分析によりその時間的空間的変動パターンの原因を考察する。

2. 観測方法

2.1. 観測点

岐阜県岐阜市は、濃尾平野の最北端に位置し、北部には山林、中心部から南東部にかけては市街地が広がっている。市内には、北東から南西にかけて長良川が流下し、市街地の北東部には金華山がそびえる（図1）。市街地中心は、JR岐阜駅周辺にあたり、そこから郊外に向かうにつれて人工被覆率は低下傾向を示す。

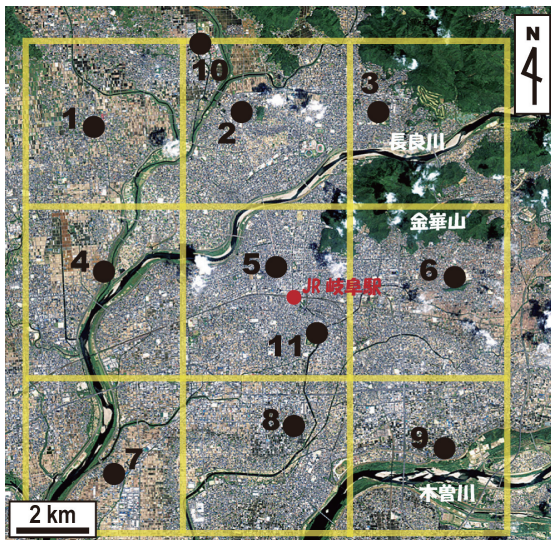


図1. 観測地点（1七郷小、2青山中、3東長良中、4合渡小、5徹明小、6長森中、7且格小、8茜部小、9下羽栗小、10岐阜大、11岐阜地方気象台）。衛星写真は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）で提供されている陸域観測技術衛星「だいち」の画像データである。

本研究では、こうした構造的・地形的特色を有する岐阜市全体を網羅するように9つの臨時観測点を設けた。その選定については、岐阜駅を中心とした周囲7.2キロメートル四方を等間隔に9つのメッシュで区分し、各メッシュの中心付近にある小中学校1校を選び、これを観測点とした（図1）。解析においては、これらの観測点データに加え、常時観測点の岐阜大学教育学部インターネット百葉箱と岐阜気象台アメダスのデータを使用した。

2.2. 観測機器

本研究で使用した気象観測機器は、モヒカン・デバイス製のデータロガー付き温度計、湿度計および放射温度計である（酒井ほか，2009）。温度計は、センサー部にサーミスタ抵抗が使用されており、温度による抵抗値の変化を利用して、温度に応じた電圧を出力する仕組みとなっている。一方、湿度計においては、湿度に応じた電気抵抗が変化する素子を使用され、湿度0%に対して0V、100%に対して1Vの直線的な出力がなされるようになっている。温度計と湿度計から出力された電圧値は、次の換算式に基づき、気温と湿度に変換される：

$$\text{温度} : T (^{\circ}\text{C}) = 0.0432 \cdot D_T - 28.777, \quad (1)$$

$$\text{湿度} : H (\%) = D_H / 20. \quad (2)$$

D_T (mV) と D_H (V) は、出力された電圧値である。



図2. 合渡小学校における観測機器の設置例（1温度計、2湿度計、3放射温度計、4観測防水ケース付データロガー）。

温度と湿度の測定器については、図2に示すように、一般的な気象観測規則に基づき、地上から1.2～1.5メートルの高さに設置した。設置の際には、自然通風ラジエーションシールドに測定器を納めて、風雨や太陽の輻射熱から保護するようにした。また、いずれの観測点においても、建物輻射熱や室外機の排熱の影響が少ない校内の立木を選定した。測定器は、1秒間隔で計測できるようになっており、本研究では、2分間の観測値を平均して出力するように設定

した。データロガーの時計については、測定開始時にパソコンの時計で設定するようになっている。計測したデータは、データロガーをRS232Cケーブルによりパソコンに接続し、データ転送ソフトウェアMartiniを用いて回収することができる。測定誤差は、温度計が±0.1℃以内、湿度計が±5%である。測定終了時に確認した各地点間の時計の誤差は、±30秒以内であった。

2.3. 期間

観測期間は、2010年9月4日から22日の18日間である。この期間において、一部の観測点で、風雨などにより機器が破損し、観測値がデータロガーに記録されない不具合が生じた。欠損の生じた観測点と観測項目は、長森中学校の温度と湿度、下羽栗小学校の湿度である。

3. 分析方法

3.1. 解析データ

解析には、観測期間から晴天弱風日の3日間を選び、それらの時系列を毎時平均により平滑化したものを使用した。これは、局所的に生じる不規則な天候の変化の影響を最小限に抑えるためである。選び出した期間は、2010年9月9日から11日の3日間である。なお、これら3日間が晴天日であることは、岐阜地方気象台の気象統計情報とともに放射温度で確認した。

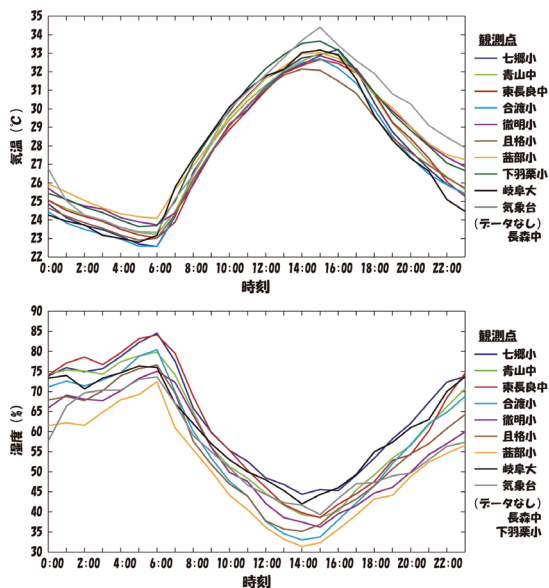


図3. 岐阜市周辺の(a) 気温、(b) 湿度の時間変化。図中のデータは、2010年9月9日～11日の3日間を毎時平均したものである。

3.2. ヒートアイランド強度

ヒートアイランド現象の出現指標には、これまでのヒートアイランド研究で使用されているヒートアイランド強度 (Heat Island Intensity, 略称HIIで記述) を用いた。HII (ΔT_{u-r}) は、都市部と郊外の最大気温差として定義され (Oke, 1973), 次のように示される:

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r. \quad (4)$$

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表わす。

HIIは、 T_u と T_r の選び方により大きく異なった値を示す。そこで、本研究では、重田・大橋 (2009) に従って、複数の地点の平均値で T_u と T_r を与えた。すなわち、交通量が多く建物が集中する地点5, 11の気温の平均値で T_u を与え、水田、田畑や低層住宅からなる地点1, 10の気温の平均値を T_r として、HIIを求めた。

4. 岐阜市周辺の気温と湿度

図3に、夏季の岐阜市周辺における気温と湿度の日変化を示す。気温と湿度の変動は、明瞭な逆相関を示す。すなわち、湿度は、昼間の気温が上昇する時間帯に低下し、夜間の気温低下時に上昇する (図3)。空間分布パターンについても、時間変化と同様の逆相関分布が認められる。図4に、気温と湿度の空間分布の日平均を示す。市街地から南東部の高温域では低湿度域に、北東部から南西部の低温域では高湿度域となっていることが分かる。

図5は、2時、8時、22時の気温と湿度の空

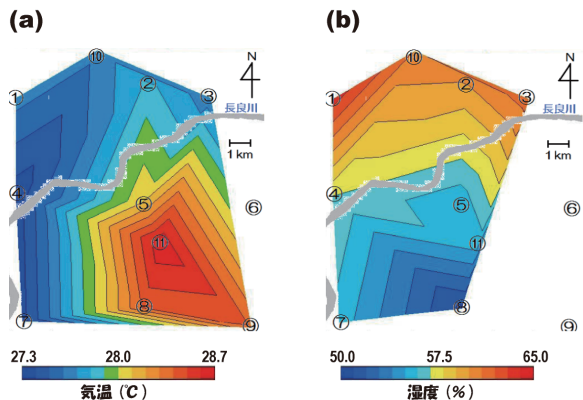


図4. 岐阜市における日平均の (a) 気温と (a) 湿度の空間分布。日平均は、図3から算出したものである。

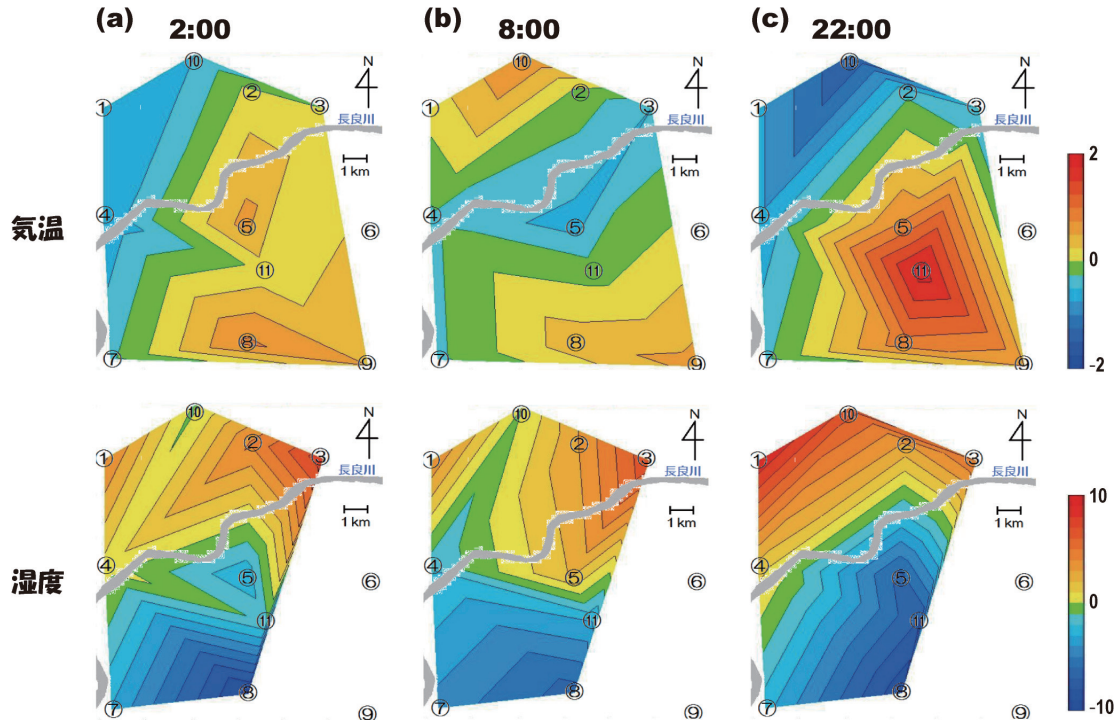


図5. 夏季（9月）の岐阜市周辺における (a) 2:00, (b) 8:00, (c) 22:00の気温偏差（上図）と湿度偏差（下図）の空間分布

間偏差の水平分布である。これらの図から、気温と湿度の空間パターンの逆相関関係は、昼夜に関わらず一日を通して生じていることが分かる。さらには、夕方から明け方にかけて、都市部を中心として同心円状に高温環境となるヒートアイランド現象が見られる。その中心は、日没後から0時にかけてはJR岐阜駅の南部にあり、1時から明け方にはJR岐阜駅北部と岐阜市南部

に存在する。一方、昼間（8時）においては、市内中心部で長良川に沿った冷温域が見られる。こうした気温の日変化は、ヒートアイランド強度（HII）でも認められる（図6）。18～0時ではHIIは1.4～2.5℃、1～5時では0.7～1.2℃であるのに対して、昼間は負の値（-0.7から-0.2℃）を示す。

図5に示す夜間の気温偏差（22時）の空間分布は、図3の日平均気温の空間分布と極めてよく一致している。このことは、夏季における岐阜市周辺の日平均気温は、夜間の気温で決まっていることを意味する。

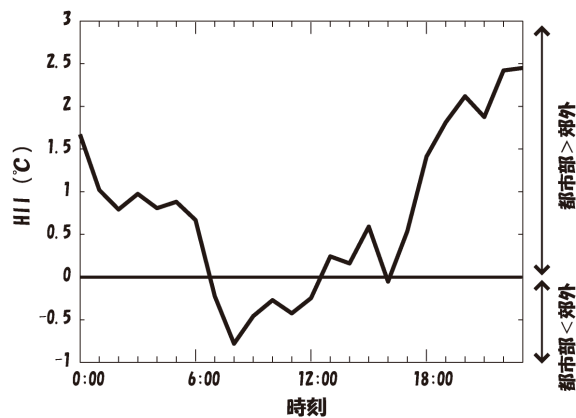


図6. 岐阜市におけるHIIの時間変化。図中のデータは、2010年9月9日～11日の日平均を示す。都市部の気温を地点5, 11（図1）の平均値、郊外の気温を地点1, 10の平均値としてHIIを算出した。

5. 気温と湿度の時空間分布

5.1. 主成分分析

岐阜市周辺で気象観測した11地点における時系列の変動パターンの類似性を明らかにするために、重田・大橋（2009）の方法に基づき主成分分析を行った。各観測点で得られた気温と湿度のデータは、観測点と時刻の違いで変化する。こうした時空間分布の変化に含まれる共通の成分を多地点の観測データから抽出するために、1日の気温と湿度を時刻に関する24次元の多変

表 1. 気温と湿度の主成分寄与率。下線部分は、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(%)	
	気温	湿度	気温	湿度	気温	湿度
第 1 主成分	<u>13.8</u>	<u>17.9</u>	<u>57.6</u>	<u>74.8</u>	<u>57.6</u>	<u>74.8</u>
第 2 主成分	<u>6.2</u>	<u>3.2</u>	<u>26.0</u>	<u>13.6</u>	<u>83.5</u>	<u>88.3</u>
第 3 主成分	<u>2.4</u>	1.9	<u>9.9</u>	7.9	<u>93.3</u>	96.3
第 4 主成分	0.9	0.4	3.5	1.7	96.7	98.0
第 5 主成分	0.4	0.2	1.8	0.9	98.6	98.9

量データとみなし、時刻を関数とした固有ベクトルと、地点を関数とした主成分得点を求めた。解析に使用したデータは、3.1章で述べた3日間を毎時平均した24時間分であり、データ数は、(欠測点を除く)観測点×(3日間の毎時平均した)24時間分である。本研究では、出発行列に相関行列を用い、主成分分析の解析には、多変量解析用ソフト「多変量解析 for Excel」(長谷川, 2002)を使用した。

5.2 解析結果

表 1 に、気温と湿度の主成分分析の結果をまとめる。気温においては、第 3 主成分までで時空間分布全体の93.5%を、湿度については、第 2 主成分までで88.4%を説明できることが明らかとなった。本研究では、これまでのヒートアイランド研究と同様に、寄与率の大きさから、寄与

率の大きさが10%以上、もしくは固有値が1.0以上の主成分を取り上げて解析することにした(重田・大橋 2009, 鈴木ほか 2001)。

5.3 得られた各主成分の意味

5.3.1 気温

1) 第 1 主成分

第 1 主成分の固有ベクトルは、すべての時刻において正の値を示し、6~13時と16~17時を除く時間帯では0.2以上の値を持つ(図 7 aの赤線)。図 8 aに、第 1 主成分得点の空間分布を示す。主成分得点が高い値を示す地域は、JR岐阜駅南部にあり、その値は周辺部に向かって同心円状に減少傾向を示す。このような傾向は、日平均気温(図 4)や夜間の気温偏差(図 5)とよく一致している。4章で述べたように、日平均気温の空間分布は、夜間の気温偏差の空間分布を反映することから、第 1 主成分は、岐阜市のヒートアイランド、すなわち夜間の気温分布を説明していると判断することができる。このことは、固有ベクトルの時間変化(図 7 a)が、HIIの変動(図 6)と類似するパターンであることから支持される。

2) 第 2 主成分

第 2 主成分の固有ベクトルは、7~16時にかけて負の値を示し、とくに8~12時にかけては-0.2以下の低い値を持つ(図 7 aの青線)。主成分得点の空間分布(図 8 b)については、北西部や南東部で低く、北東部から南西部にかけて高い値を示す。この主成分得点が高い地域は、主として、長良川流域に集中しており、さらには、8時の気温偏差の空間分布(図 5を参照のこと)とよく一致している。以上の結果から、第 2 主成分は、日中の気温分布を説明していると判断

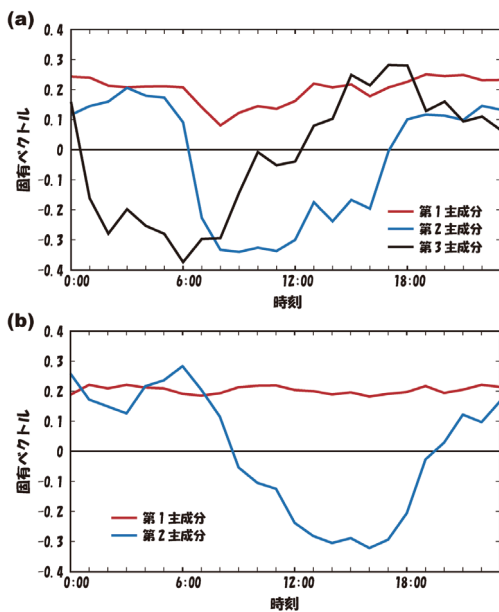


図 7. (a) 気温と (b) 湿度に対する主成分分析で得られた固有ベクトルの時間変化。

される。

3) 第3主成分

第3主成分の固有ベクトルは、6時ごろに最小となり、そののち上昇し17~18時の夕方ごろに最大となる(図7aの黒線)。これらの時間帯は、図3aに見られるように、日出と日没の前後にあたり、第3主成分の固有ベクトルが急激な気温の上昇と下降に深く関係している。また、これらの結果をもとに、17時と6時の気温差の空間分布を求めたところ、主成分得点の空間分布とよい一致を示した。以上の結果から、第3主成分は、日出と日没時の気温差を説明していると思なされる。

5.3.2 湿度

1) 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、ほぼ一定の値(0.2前後)を推移する(図7bの赤線)。主成分得点の空間分布を見ると(図9a)、岐阜市南部や都市部で低い値を、北部で高い値をそれぞれ示す。この傾向は、図4の湿度の空間分布と良く一致していることから、第1主成分は日平均湿度を説明して

いると思なすことができる。

2) 第2主成分

第2主成分の固有ベクトルは、6時ごろに最大となり、そののち低下し16~17時にかけて最小となる。この傾向は、気温の第3主成分の固有ベクトルと逆パターンであり、このことは気温と湿度が時間的空間的に逆相関関係にあることから理解することができる。すなわち、湿度の第2主成分は、日出と日没時の湿度差を説明していると思なされる。また、この解釈の妥当性を確認するために、17時と6時の湿度差を求めたところ、その空間分布は第2主成分得点とよい一致を示した。

6. 考察

6-1. ヒートアイランドの形状

岐阜市周辺の夏季気温の第1主成分得点分布(夜間の気温の指標、図8a)を見ると、ヒートアイランドは、都市部(JR岐阜駅付近)を中心とした同心円状に局所的に生じるのではなく、岐阜市中心部から都市部から南東部にかけて広域にわたり分布している。このようなヒートア

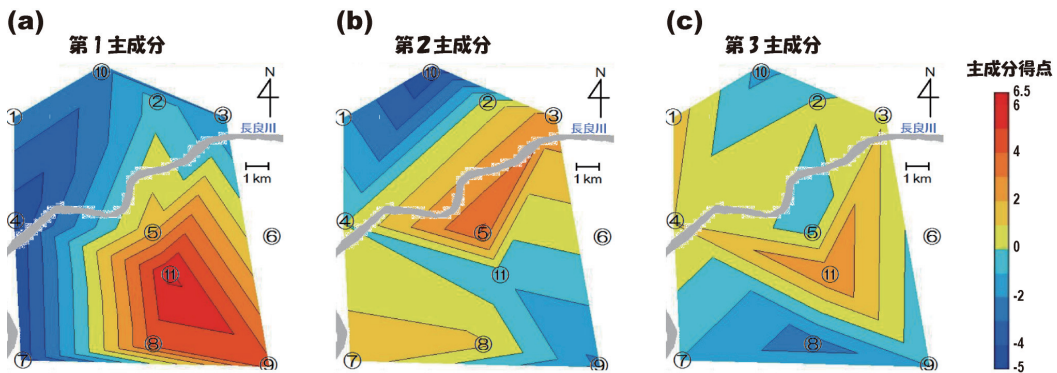


図8. 気温に対する主成分分析得点の空間分布

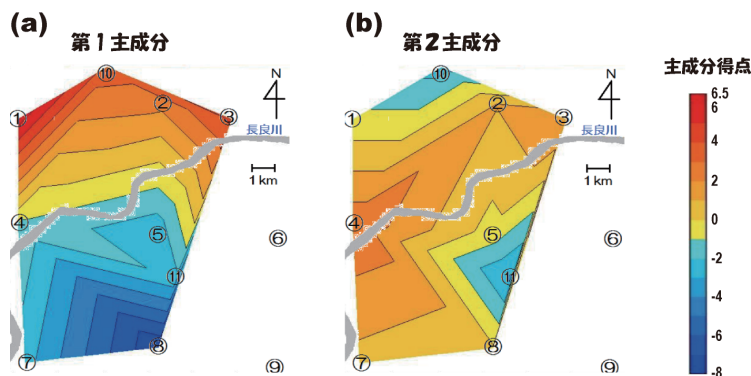


図9. 湿度に対する主成分分析得点の空間分布

アイランドの形状は、名古屋市から岐阜市に連続的に広がる人工土地被覆の減少によるものと考えられる(図10)。



図10. 名古屋市から岐阜市にかけての衛星写真。画像は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)で提供されている陸域観測技術衛星「だいち」のデータである。

濃尾平野におけるヒートアイランド現象は、気象庁で実施された数値シミュレーションによる気候モデル計算により調べられている(気象庁2009)。この計算では、「都市がある場合」と「都市がない場合(都市部を仮想的に草地に置き換えたもの)」における濃尾平野の気温分布を算出し、これら2つの場合の気温差から「都市の効果」を求めている。その結果によると、夏季の濃尾平野では、名古屋市を中心としてヒートアイランド現象が同心円状に平野全域に及ぶことが示されている。特筆すべき点は、平野全体で最も顕著な地域が名古屋市から岐阜市の範囲であること(上昇温度は1~2°C)、昼夜に関わらず1日を通して発生していること、である(気象庁2009の図2.4を参照のこと)。

さらに、気象庁(2009)では、都市化による高温化の要因とされる人工排熱、土地利用(緑地から人工地表面への変換など)、建築物(高密度化)の3つの効果が気温上昇に与える影響も検討されている。その解析結果によると、日中では土地利用、次いで建築物の効果で、日没後

は建築物の効果で気温上昇が生じること、人工排熱の効果については、土地利用や建築物の効果に比べて小さいものの、日没前や夜間でその影響が大きくなることが示されている。以上のことから、岐阜市のヒートアイランドの形状(気温の第1主成分得点の空間分布)は、名古屋市から岐阜市にかけて連続的な都市化の影響によるものと推察される。

6-2. 湿度分布

気温の第1主成分得点の空間分布(図8a)は、湿度の第1主成分得点(図9a, 1日の湿度分布の指標)と逆相関関係にある。こうした関係は、図3~5に示すように、時刻によらず常時出現しており、この要因は、飽和水蒸気圧の温度依存性により説明することができる。つまり、相対湿度は、飽和水蒸気圧に対する空気中の水蒸気圧の割合と定義されるので、気温上昇に伴い飽和水蒸気圧が上昇すると、相対湿度が低下し乾燥化することになる。

6-3. 長良川の冷温効果

第2主成分得点(昼間の気温分布の指標, 図8b)に見られるように、夏季における岐阜市の日中においては、長良川に沿った冷温域が発生している。この冷温域の出現は、8時ごろに最大となり(図5b)、その気温偏差は約-0.6°Cである。こうした結果は、長良川が夏季の岐阜市街における冷源として作用していることを意味するものと思われる。

河川が市街地の気温に及ぼす効果は、これまでにいくつかの都市で研究されている。例えば、夏季における広島市街地の気象観測では、市内を流れる京橋川と太田川の水体が冷源として作用し、周辺地域の温熱環境に影響を及ぼしていることが示唆されている(村川ほか, 1986, 1988)。福岡市博多の観測からは、市街地を流下する那珂川が海風の通り道として気温低下を生じさせることが示されている(片山ほか, 1989)。その一方で、これらの研究結果からは、河川に直交する方向の気温に対する効果については、広範囲に及ぶものではなく、広島市の場合は水際から10メートル程度、博多の場合は河川からの気温変化は明確に現れない、との報告がなされている。

現段階では、本研究で得た観測結果から、長良川の冷温効果の影響を、水際もしくは堤防からの距離の関数として、現状のデータから量的に議論することは困難である。また、長良川の冷温効果が、水体によるものか、(山からの)通風によるものか、を判断することも難しい。その一方で、本観測により明らかとなった夏季の冷源としての長良川の効果は、岐阜市固有の自然現象の効果である。したがって、今後、風向や風速を含めた長良川周辺の細密な気象観測を行い、市街地への冷温効果の影響を定量的に説明することが、快適な都市環境づくりを進める上で重要になるとと思われる。

7. まとめ

本研究は、夏季の岐阜市周辺の気温と湿度の日変化を時間的・空間的に把握するために、9つの小中学校に臨時観測点を設け、気象観測を実施した。これら9つの観測値と、岐阜大学ならびに岐阜地方気象台の定点観測点の観測データを解析した結果、次のようなことが明らかとなった：(1) 日中の都市部では、長良川に沿った冷温な環境が出現する；(2) 日没後から0時にかけて岐阜市の南東部を中心とした明瞭なヒートアイランド現象が生じる；(3) 1時から日出においては、ヒートアイランドの中心は南北方向に2つに分かれて起こる。

また、気温と湿度の日変化の時空間変動の要因を明らかにするために、データの得られた10地点の気温と9地点の湿度の測定値に対して、主成分分析を行った。結果、気温については3つの主成分(第1主成分：夜間の気温分布、第2主成分：昼間の気温、第3主成分：日出と日没時の気温差)により約93%を、湿度は2つの主成分(第1主成分：日平均湿度、第2主成分：日出と日没時の湿度差)により約88%をそれぞれ説明できることがわかった。

謝辞

解析結果の二次元グラフの表示には、フリーソフトQuick Graphが用いられた。岐阜市、笠松町の教育委員会の方々、七郷小学校、青山中学校、東長良中学校、合渡小学校、徹明小学校、

長森中学校、且格小学校、茜部小学校、下羽栗小学校の学校長ならびに教職員の皆様には、観測場所を提供していただくとともに、観測に関してご理解とご協力いただきました。ここに記して、厚く御礼を申し上げます。本稿は、小倉が2010年度に卒業研究として行った成果の一部を再解析しまとめたものである。

引用文献

- 藤部文昭 (2007) 年のヒートアイランド, 天気, 304, 9-12.
- 気象庁 (2009) ヒートアイランド監視報告(平成20年—東海地方), 29 pp.
- 長谷川勝也 (2002) Excelで楽に学ぶ これならわかる多変量解析, 技術評論社, 555 pp.
- 片山忠久・林徹夫・塩月義隆・北山広樹・高山和宏・大黒雅之・堤純一郎・石井昭夫・西田勝 (2002) 夏季の都市熱環境における河川と海風の冷却効果に関する実測調査, 九州大学総合理工学研究科報告, 11, 223-231.
- 環境省 (2004) ヒートアイランド対策網, 18 pp.
- 村川三郎・関根毅・成田健一・西名大作 (1986) 都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究：その1. 観測概要と夏季の測定結果, 日本建築学会中国支部研究報告集, 13, 253-256.
- 村川三郎・関根毅・成田健一・西名大作 (1988) 都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告書, 393, 25-34.
- Oke, T. R. (1973) City size and the urban heat island. Atmos. Environ. 7, 769-779.
- 齊藤郁雄・久保隆太郎・酒井孝司・石原修 (2007) 熊本市における気温・湿度分布の長期定点観測：第1報中規模都市のヒートアイランド現象に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 611, 59-66.
- 酒井敏・梅谷和弘・飯澤功・伊藤文・小野耕作・矢島新・鈴村尚起・森永修司 (2009) 都市熱環境観測システムの開発研究, 天気, 56, 337-351.
- 榊原保志・森田昭範 (2002) 長野県白馬村におけるヒートアイランドの日変化・季節変化, 天気, 49, 901-911.
- 重田祥範・大橋唯太 (2009) 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, 天気, 56, 443-454.
- 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—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.