

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—

鈴木 知道*・玄 地 裕**・飯塚 悦功*・小宮山 宏*

要 旨

東京都で発生しているヒートアイランド現象に対し、統計解析的アプローチをとることによって、真夏の東京都の気温が地域と時刻によってどのように変化するかを明らかにした。着目したのは気温日変化パターンであり、解析には東京都各所100地点において観測された1時間間隔のデータを4日分用いた。統計解析手法の一つである主成分分析をこのデータに適用した結果、気温日変化パターンの変動を代表する特性値である3つの主成分が得られた。3つの主成分の吟味から、これらは気温レベル、気温の日較差、気温変化の緩急を表しているといえる。そして観測された100地点に対し、主成分分析の解析結果をもとにグループ化を行った。その結果、観測地域をそれぞれ特徴を持つ7つのグループに分類できた。また、同時期のアメダスのデータを用いて解析の妥当性を検証した。

1. はじめに

近年、都市機能や人口の集中によるエネルギー消費の増大に伴い、都市部の環境の変化が問題になっている。その中でも人工廃熱などの影響によって熱環境に変化が現れるというヒートアイランド現象が注目されている。ヒートアイランド現象の問題点の一つとして、気温上昇による電力消費の増加が挙げられる。特に夏場においては、冷房による電力消費が増加しそれがさらなる気温上昇を招くという悪循環が生じると言われている。

ヒートアイランド現象の解明および対策案に関しては、マクロ的およびミクロ的な見地からいくつもの研究がなされてきている。数値モデルを構築することによって東京あるいは関東平野の気温の再現に関する研究には藤野ほか(1996)や三上ほか(1997a, b)がある。また藤部(1993)はAMeDASのデータを用いて東京の風系と気温分布の関係を明らかにした。そして山岳部を除く東京都全域の気温の計測が100地点で行

われ伊藤ほか(1994)によって報告された。

本研究は、真夏の晴天日に山岳部を除く東京都全域で測定された気温のデータを用いて、その気温データを利用して統計的なアプローチを適用することによって、首都圏で起こっているヒートアイランド現象を解明することを目的とする。具体的には、第一に東京都の気温日変化パターンの特徴を抽出すること、第二にそれらの特徴が地域によってどのように現れているのかを明確にすること、が主眼である。

第2章では、解析対象データの説明と、解析方針に関する説明を行う。第3章では、気温日変化パターンの抽出について述べる。第4章では、抽出された気温日変化パターンによる地域的な特徴付けおよびグルーピングを行う。第5章で考察を行い、第6章で結論を述べる。

2. 解析対象データおよび解析方針

2.1 解析対象データ

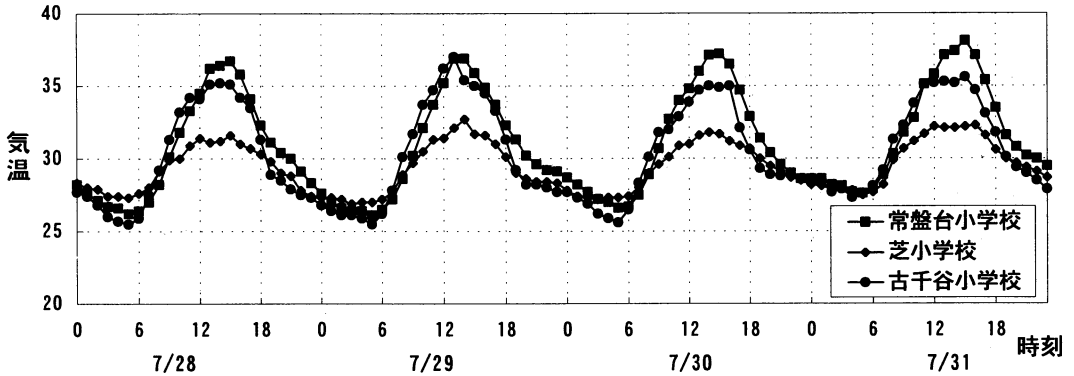
本研究では、東京都環境科学研究所が1992年から1993年にかけて行った山岳部を除く東京都内100か所の気温観測データを用いる(伊藤ほか, 1994)。観測地点は、都心部では2.5キロ四方あたり1か所、郊外では5キロ四方あたり1か所の割合で選ばれている。測定期間は約1年であり、気温は15分おきに記録されてい

* 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻。

** 産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター。

—1999年5月6日受領—

—2001年5月1日受理—



第1図 対象データの時系列プロットの例。

る。

解析に用いたデータは、真夏の晴天日の気温データである。真夏の晴天日を取り上げたのは、もともと暑い夏において、都市効果によるさらなる気温上昇が注目されるからである。ほぼ同じ天気の日を複数取り上げ、対象とした日によって気温変化の仕方が大きく異なるかを点検することとした。生データを吟味した結果、1992年の7月28日から7月31日までの4日間のデータを用いるのが良いと判断した。用いたデータの間隔は、気温日変化の特徴が十分把握できるように1時間に1点のデータを用いることとした。

したがって解析に用いたデータ数は、100地点×24時間×4日間の合計9600のデータということになる。

2.2 解析方針

解析対象である気温データは、「時刻」「観測地点」「日」によって変化する。本解析の第一の目的は、気温日変化パターンの特徴を抽出することである。すなわち、「時刻」によって気温がどのように変わるかを統計的に求めたいのである。「観測地点」に関しては、「時刻」ごとに測定されているデータセットが「観測地点」の数だけあると捉える。すなわち、「観測地点」はサンプルである。「日」に関しては、対象とする日を複数日とりあげたのは、解析の対象とした「日」によって気温変化の仕方が異なるかを確認するためである。したがって「日」もサンプルであるとみなす。

まとめると、この解析対象データは24個の変数「時刻」に対して、4日×100か所の合計400個のサンプルがあるとして解析を行っていくということである。すなわち、本研究では1日の気温データを時刻に関する24次元の多変量データとみなし、その多変量データの特徴を抽出する解析を行う。このような多変量データ

の要約には、伊藤ほか(1994)、朴ほか(1994)、日下ほか(1998)などにも見られるように、主成分分析が適している。本研究においても解析手法に主成分分析を用いる。

3. 解析結果

3.1 予備解析

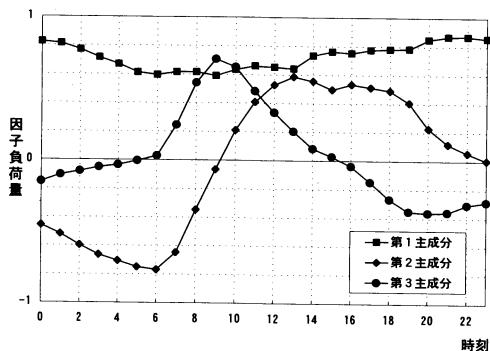
対象としてとりあげたデータがどのような挙動を示しているのかを調査するために、まず最初に生データの解析を行った。観測地点100か所すべてについて、4日間の気温の時系列プロットを作成した。例を第1図に示す。第1図の観測地点、常盤台小学校、芝小学校、古千谷小学校の位置はそれぞれ、第10図の座標で5B、4D、3Aである。

時系列プロットを吟味することによって、いくつかのことが分かった。第1に、データに異常値などがなく、時間変化が滑らかであることである。第2に、ある観測地点における気温の変化の仕方が日によって大きく変わらないことである。そして第3に、気温の日較差、日中最高気温のピークの鋭さ、日没から明け方にかけての気温の下降速度などが、観測地点によって異なることである。

この予備解析の結果から、日内気温の変化パターンを抽出するために、解析対象データを24次元の多変量データとみなして主成分分析を行うことが妥当であるといえる。

3.2 主成分分析結果

解析対象データに対し、主成分分析を行った。出発行列は相関係数行列を用いた。その結果、元々は24個あった変数のばらつきを、少数の主成分でその大部分を説明できることが分かった。抽出された主成分のう



第2図 解析の結果得られた各主成分の因子負荷量を時刻に対してプロットしたものの。

ち、第1主成分で気温日変化全体の約54%が、第2主成分までで約78%が、第3主成分までで約88%が、第4主成分までで約91%が、第5主成分までで約94%説明できることがわかった。この寄与率の大きさから、第3主成分までを取り上げて解析するのが妥当であると判断した。各主成分の因子負荷量のグラフを第2図に示す。

この、因子負荷量のグラフから得られた主成分の解釈を行う。

3.3 得られた主成分の解釈

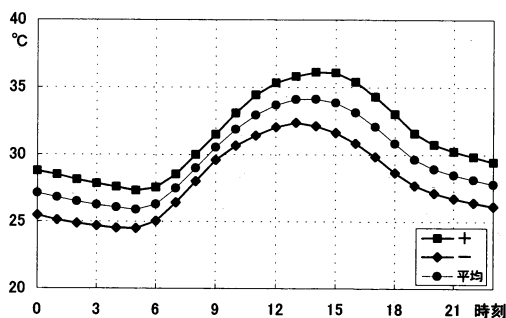
3.3.1 第1主成分

第1主成分の因子負荷量は、すべての時刻において正の値をとっている。そしてその値は、20時から1時にかけては0.8以上と主に深夜において高い値をとっている。これから、第1主成分は1日の気温の累計値あるいは平均値と高い相関があることが分かる。特に、気温が低く比較的安定している深夜において、因子負荷量の値が大きい。したがって第1主成分は平均気温あるいは最低気温に代表される、気温のレベルを表している変数であると考えることができる。

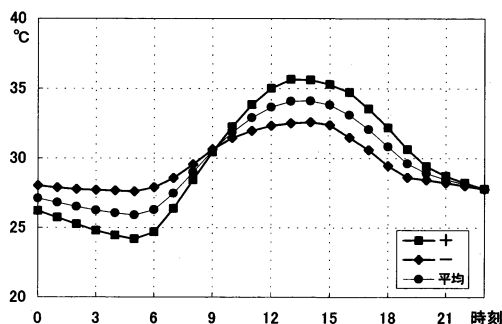
第1主成分の値による違いが実際の気温の変化にどのように現れるのかをグラフ化した。これを第3図に示す。第3図は、第1主成分の値だけが異なる場合に、気温日変化のパターンがどのように異なってくるのかを計算してグラフ化したものである。第3図からも、第1主成分が気温のレベルを表していることが読みとれる。

3.3.2 第2主成分

第2主成分の因子負荷量は、各時刻において正の値をとっている時間帯と負の値をとっている時間帯に分



第3図 全域平均の日変化に対する、第1主成分の得点の値だけが2点変わる場合の気温変化。



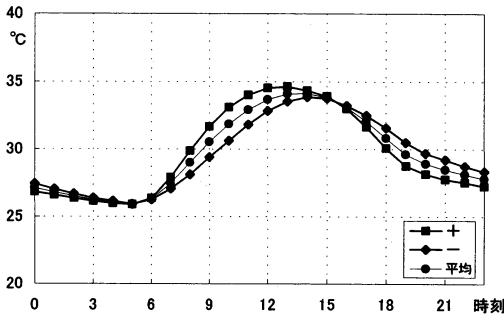
第4図 全域平均の日変化に対する、第2主成分の得点の値だけが2点変わる場合の気温変化。

かれる。因子負荷量の変化は、8時ごろから11時ごろまでに急激に増加して、18時ごろから明け方にかけては緩やかに減少している。6時に負の最大値をとり、13時に正の最大値を取っている。気温が一番低い明け方と一番高い正午過ぎにおいて、因子負荷量の符号が逆であることから、第2主成分は1日の中の最高気温と最低気温の差を表しているといえる。

第1主成分の場合と同様の手順で、第2主成分が気温日変化パターンに与える影響を視覚化した。これを第4図に示す。第4図からも、第2主成分の値が異なることによって1日の気温の変化幅が異なってくるということが読みとれる。

3.3.3 第3主成分

第3主成分は、9時に因子負荷量の最大値を持っている。このピークは比較的鋭い。また、20時ごろに逆の符号にピークがあるが、こちらのピークはかなり穏



第5図 全域平均の日変化に対する、第3主成分の得点の値だけが2点変わる場合の気温変化。

やかである。午前のピークの9時という時刻は、1日のうちで最も気温が低い9時ごろから3時間、また午後のピークの20時という時刻は、1日のうちで最も気温が高くなる14時ごろからは6時間、それぞれ時間的にずれがある。これから1日の最低気温後、最高気温後の気温の変化を表す指標であると解釈できる。第3主成分の値の変化は、気温が上昇し始めてから、あるいは下降し始めてからの気温の値に影響を与えることになる。すなわち、結果的に気温変化の緩急を表している変数であると解釈することができる。

第3主成分に関しても、気温日変化パターンに与える影響を視覚化したグラフを作成した。これを第5図に示す。第5図からも、第3主成分の値の違いが、気温変化の緩急を表していることが読みとれる。特に、第3主成分が負の値をとる時には、夕方から夜にかけての気温の下降が非常にゆるやかになり、しかも気温のピークもゆるやかなものとなって来る。

3.3.4 主成分の解釈まとめ

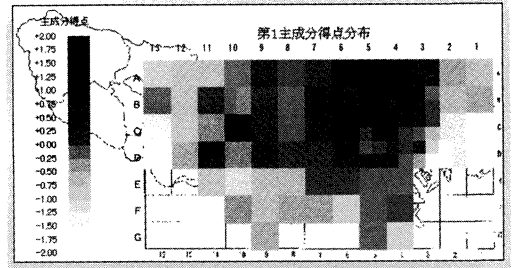
この解析の結果、気温日変化パターンを表すものとして以下の特徴を持った主成分

- 第1主成分：気温レベル
- 第2主成分：最大気温差
- 第3主成分：気温変化の緩急

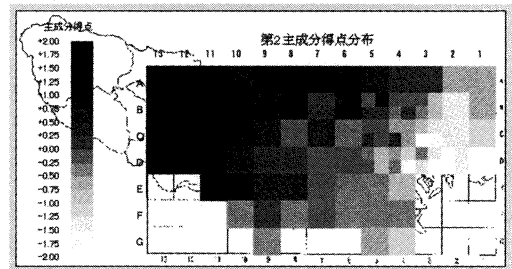
が抽出された。そしてこの3つの主成分で、元々は24個あった変数のばらつきの約9割を説明することができることが分かった。

4. 気温日変化パターンの分布

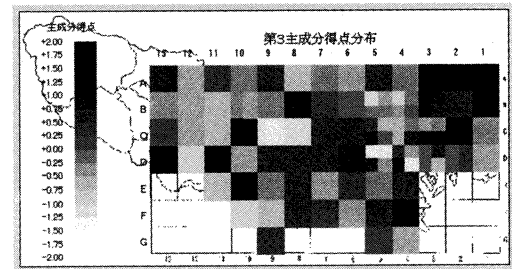
解析に用いた各サンプルの主成分得点を求め、観測地点による気温変化の特徴が抽出された主成分によ



第6図 第1主成分得点の地理的な分布。



第7図 第2主成分得点の地理的な分布。



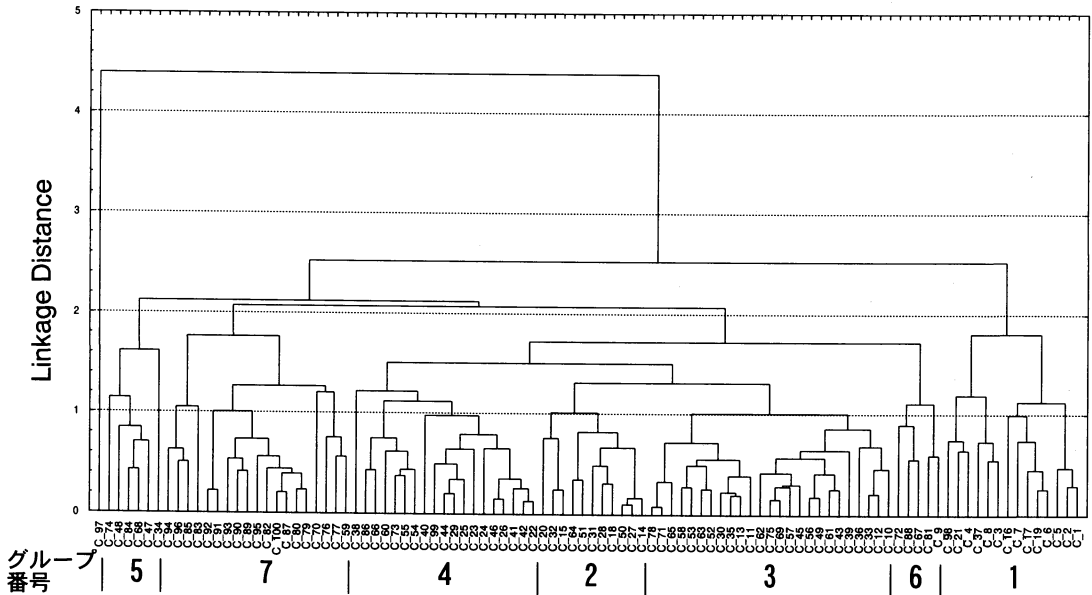
第8図 第3主成分得点の地理的な分布。

てどのように表されるのかを検討した。計算された400サンプルの主成分得点を比較検討したところ、同じ観測地点ごとの4日分の4サンプルは似たような値をとっている。そこで、4日間分の主成分得点の平均を計算してその値を各地点の代表値として解析した。

4.1 各主成分得点の分布

各主成分ごとの主成分得点の地理的分布の検討を行った。分布の状況を視覚化したものを第6図から第8図に示す。

第6図から第1主成分得点が高い地域は、座標5Aを中心とする地域にある。都心(座標3C, 3D, 4C,



第9図 クラスター分析の結果得られるデンドログラム。

4D)の北側、北西側にあることが分かる。そして高得点の地域は都心、および都心から西側に分布している。また、第1主成分得点が低い地域は地図上左端の多摩地区、そして右端の荒川沿いに分布している。この結果は、山、海が涼しく、都市部が暑いという常識とも一致し、よって第1主成分の解釈が妥当であるといえる。

第7図から、第2主成分得点の分布は座標2Dを中心とする沿岸部で最も低く、また山側で最も高くなっていることがわかる。これは海に近い都市部では気温の日較差が小さく、山側においては、気温の日較差が大きいという知見と一致し、これから第2主成分の解釈が妥当であるといえる。

第8図から第3主成分得点が低い地域は、都心部と山側に多く分布していることが分かる。また、第3主成分得点が高い地域は東京都北東部の荒川沿いに集中している。それ以外の高得点は地図上に点在しているが、座標4Fを中心とする、都心から南にかけての地域は第3主成分の得点が高い傾向にある。都心部を除く比較的海に近い地域、すなわち夜間の気温が下がる地域で第3主成分の得点が高い、という事実から第3主成分の解釈が妥当であるといえる。

4.2 観測地点のグルーピング

各観測地点ごとに求められた3つの主成分得点の平均値を用いてクラスター分析(例えば、奥野ほか, 1981)

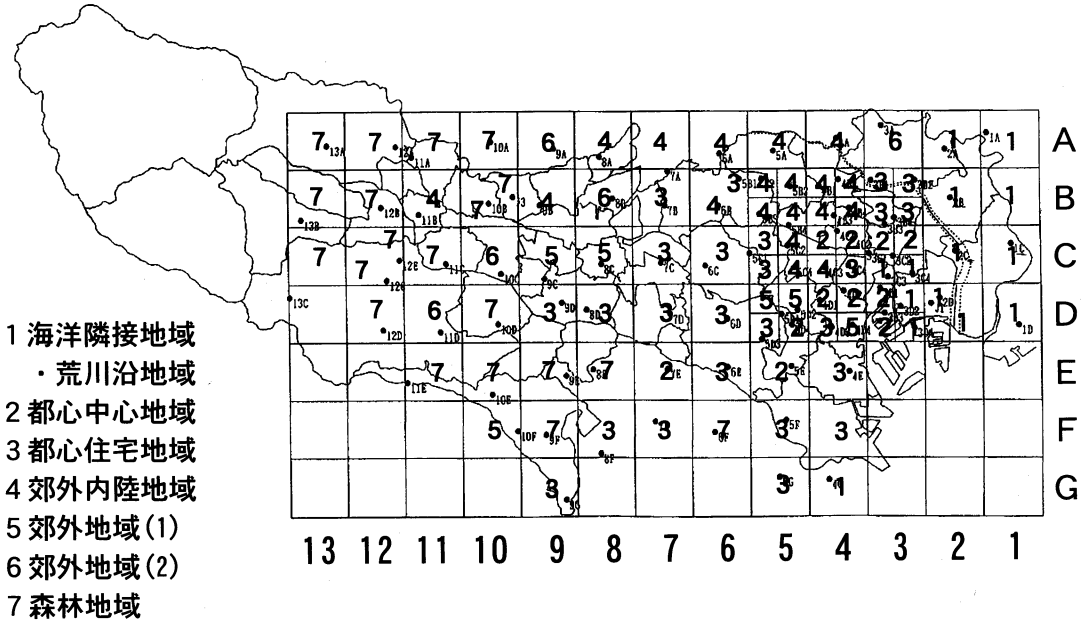
により、測定場所のグルーピングを行うこととした。サンプル間距離にはユークリッド距離を、クラスター間距離には群平均距離を用い、グループ間平均連結法によりクラスター分析を実行した。結果のデンドログラムを第9図に示す。第9図をもとに観測地点のグルーピングを行った。グルーピングした結果を地図上に表したものを第10図に示す。全部で7つのグループに分けることができた。以下このグループに関して述べる。

●第1グループ：海洋隣接地域・荒川沿地域

分布している場所は、文字通り東京湾の海岸線から近い場所と、都心の東にある荒川と江戸川沿いに集中している。この地域の主成分得点の正負をみると、第1主成分、第2主成分ともに負であるものがほとんどであり、1日中気温の変化が大きくなり涼しい地域であるといえる。

●第2グループ：都心中心地域

分布している場所はほとんどが都心部の中央である山手線内である。このグループは主成分得点の正負が第1主成分から第3主成分の順に正、負、負となっているものが多い。この地域では、基本的に1日中暑く、気温の変化が非常に小さい。また、気温が一番安定していると考えられる日の出直前であっても、気温低下の傾向が止まっていないようにみえる。



第10図 クラスター分析の結果をもとに得られたグルーピングの結果を地理的に表示したもの。

●第3グループ：都心住宅地域

分布している場所は、都心部から西および南西の地域、都心部から北東に地域分布している。この地域は世田谷区、大田区、荒川区などの住宅地域である。主成分得点の正負は第1主成分から順に正、負、正の値をとっているものが多い。第2グループと似たような特徴があるが、夜間には気温が下がる傾向にある。

●第4グループ：郊外内陸地域

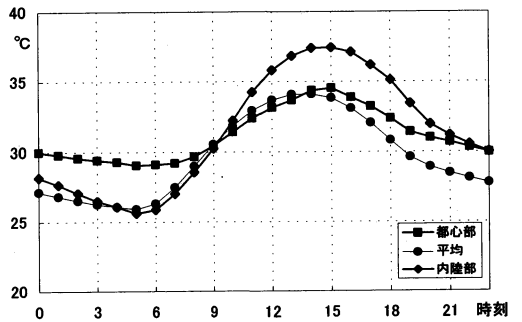
分布している場所は、都心から北、北西の地域であり、北区や練馬区から埼玉県境が主に含まれる。主成分得点の正負をみると、第1主成分から順に正、正、負の値をとっている地点が多い。この地域も基本的に暑い。昼間の気温も全体の中でも最も高いグループである。しかも夕方から夜にかけて気温の下がり方が非常に遅い。

●第5グループ：郊外地域(1)

分布している地域は、都心部の中の西部と都心からはなれた西の府中市あたりに分布している。このグループの特徴は、海からは遠いものの比較的気温日変化幅が小さいということである。

●第6グループ：郊外地域(2)

都心からはなれた地点に点在している。このグループの特徴は昼の気温はかなり高いが、夜間はある程度気温が下がるということである。



第11図 都心部および内陸部の典型的な気温変化パターンをグラフ化したもの。

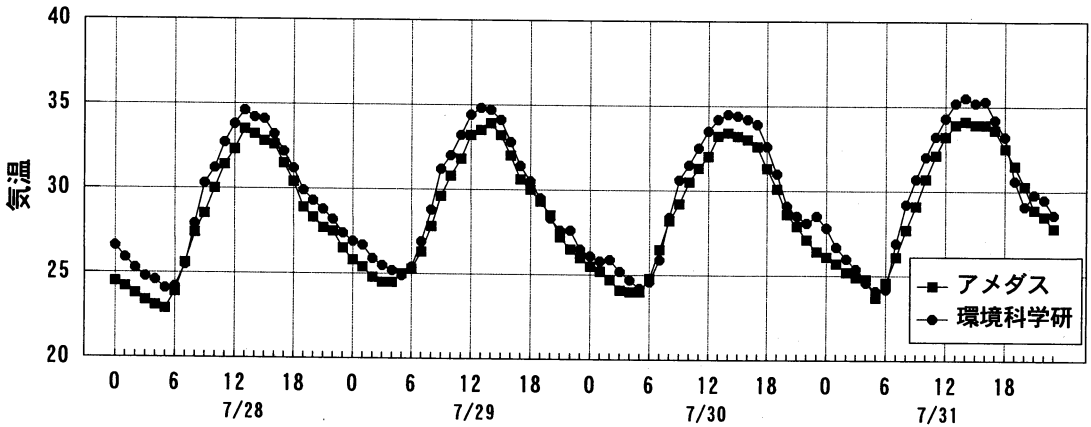
●第7グループ：森林地域

八王子市を中心に自然が残っている東京都西側に分布している。第1主成分が負、第2主成分が正の地域であるものがほとんどである。気温日較差が最も大きい地域である。昼の気温はそれなりに高くなるものの明け方はかなり涼しくなる。

5. 考察

5.1 解析結果の考察

解析の結果より東京都内の真夏の晴天日の気温日変化パターンを抽出し、その解釈を行うことができた。



第12図 観測地点青梅における気温（環境科学研およびアメダス）のグラフ。

また、東京都内という比較的限られた範囲の中にもかかわらず、気温日変化パターンの違いにより、グルーピングを行いその特徴を抽出することができた。

その中でも注目される点が、都心部の気温日変化パターンである。都心部の観測地点はその多くが第2グループにグループ分けされた。第2グループにおいて1日の中の気温変化が少なく明け方になっても気温が下がらないことである。都心部の典型的な気温日変化パターンを第11図に示す。第11図は各時刻における全観測地点の気温の平均値に対し、第2グループのほとんどの地点と同じく第1主成分が正、第2および第3主成分が負である場合を計算してグラフ化したものである。都心部において、このように昼間の気温がそれほど高くはないが夜間に気温がなかなか下がらないという特徴が、主成分分析により抽出できたのは興味深い。この特徴を吟味することにより、その背景にある要因の調査・検討を支援することができる。その例として、ビルの蓄熱、人工廃熱の影響などが考えられる。

そしてもう1つ注目される点が、都心から北、北西の内陸部の気温日変化パターンである。内陸部の観測地点はそのほとんどが第4グループにグループ分けされた。その主成分は第1および第2主成分が正、第3主成分が負であるものがほとんどであった。内陸部の気温日変化パターンについても都心部と同様に計算した。これを第11図に示す。都心部、観測地点全体の平均に比べて日中の気温が非常に高いのが特徴である。

また、最高気温となる時刻が観測地点全体の平均に比べて遅い。都心部に比べて人工廃熱が多いとはいえない地域で、このような現象が起こっている。この理由としては、Yoshikado (1992) が述べているような海

風のからんだ現象である可能性がある。

このように、観測された気温データに含まれる情報を引き出し、気温日変化パターンの抽出および観測地点のグルーピングという観点で整理された結果が得られた。この結果は、現実にはどのようなヒートアイランド現象が起こっているのかの把握、どのような原因でこの現象が起こっているのかという追求を、容易にするとともに支援するものとして意義があると考えられる。

5.2 気温データの地域代表性

本研究の解析の各測定地点は2.5キロ四方あるいは5キロ四方の区画あたり1点だけである。そこで観測した気温が近隣の建物や局地的な地形の影響を受けていないのか、すなわち各測定地点は本当に各地域の気温日変化パターンを代表しているといえるのだろうか。これを検討した。

主成分得点の地理的分布に大きければつきがなくなめらかであったので、局地的な影響は少ないと考えられるが、実際に各測定地点の気温データが当該地域の特徴をどのくらい表しているかを調査した。調査方法は、本解析で対象とした地域に含まれるアメダスの観測地点6か所に対し、距離的にもっとも近い観測地点との主成分得点の比較検討である。とりあげたアメダス観測地点は、青梅(13A)、練馬(5B)、八王子(12C)、府中(9C)、東京(3C)、新木場(3D)である。地点名のあとの括弧内は第10図の座標で表した位置を示す。

6か所のアメダス観測地点のうち、青梅市の水源管理事務所は共通の観測地点であった。今回用いたデータとアメダスのデータを並べて描いたグラフを第12図に示す。これから、同一地点の観測であっても気温そ

第1表 アメダス観測地点とそれに最も近い環境科学研の観測地点との主成分得点の比較.

観測地点	第1主成分	第2主成分	第3主成分
青梅	-1.274	1.271	-1.268
水質管理事務所(0)	-0.186	1.287	-0.337
練馬	0.787	0.380	0.004
豊玉第二小学校(1)	0.843	0.185	-0.423
八王子	-0.338	1.423	-0.484
松枝小学校(3)	-0.897	1.860	-0.592
府中	-0.483	0.417	-0.145
第七小学校(1)	0.382	0.553	-1.626
東京	0.074	-0.993	-0.306
湯島小学校(2)	0.690	-0.783	-0.567
新木場	-3.342	-1.917	-0.513
第二辰巳小学校(2)	-2.027	-1.982	-0.770

上段：アメダス観測地点

下段：最も近い環境科学研の観測地点

(括弧内は観測地点間の距離 (km))

のものは異なることが分かる。しかし、気温の変化パターンに着目すれば非常に似ていることがわかる。

アメダス観測地点6か所について、主成分得点を計算し、最も距離が近い観測地点との比較検討を行った。結果を第1表に示す。各観測地点での3つの主成分得点に関しては、2つ以上の主成分に関して得点が1以上異なることはなかった。しかしながら、得点の差が1以上になったものが第1表の中に3か所見られた。例えば、青梅であるがこれは同じ観測地点である。第12図からも見た目には非常に似ている。それにもかかわらず、主成分得点に差が現れた。第1主成分の得点異なるのは第12図においてアメダスデータの方が全体的に気温が低いからである。そして第3主成分の得点異なるのは、全体的にはアメダスデータの気温が低いにも関わらず夕方18時前後の気温はそれほど変わらない、すなわちアメダスデータの夕方気温の下降が緩やかであった結果だと考えられる。このように同一観測地点の気温が異なる原因として、敷地内の測定器設置場所の違い、測定の精度、などが考えられる。今回解析対象としたデータには、この程度の大きさの誤差が混入しうることを示している。

各観測地点においては、以上で述べたような誤差が混入し得るにもかかわらず、観測地点を全体的にとらえた第6図から第8図に見られたように主成分得点の分布がなめらかであった。そして第1表にみられるように主成分得点の差が、(少なくとも青梅と比較して)小さい。この結果からも、今回解析に用いたデータは地域を代表していると考えてよいといえる。

6. まとめ

実際に観測された気温データに対して、統計的なアプローチをとることにより、都内近郊各所の気温日変化パターンを抽出することができた。そして、抽出された主成分を用いて、地域的な気温日変化パターンに基づいて都内の地域的なグルーピングを行い、グループによる気温日変化の特徴をまとめた。このように、気温データだけを用いてどのようなヒートアイランド現象が起こっているかについての知見を得ることは類似の場面に応用できよう。また、本研究の結果は気象モデルをあてはめた解析の妥当性の検証のためにも有効に活用できる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、審査員の方々および編集委員には多くの有益なご意見、ご指摘をいただいた。また、青山和弘君には図の作成を手伝っていただいた。これらの各位に対し心から感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 藤部文昭, 1993: 関東平野における春・夏季晴天日の気温分布の日変化, 天気, 40, 759-767.
- 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, 817-831.
- 伊藤政志, 宇田川 満, 三上岳彦, 1994: 東京都内の気温分布について(その1), 東京都環境科学研究所年報1994, 35-46.
- 日下博幸, 西森基貴, 安成哲三, 1998: 最高・最低気温偏差の季節性を利用した都市化に伴う気温上昇率の推定, 天気, 45, 369-378.
- 三上岳彦, 若林明子, 宇田川 満, 伊藤政志, 1997a: 東京のヒートアイランドに関する研究(その1)—数値モデルの作成と現況再現シミュレーション—, 東京都環境科学研究所年報1997, 38-48.
- 三上岳彦, 若林明子, 宇田川 満, 伊藤政志, 1997b: 東京のヒートアイランドに関する研究(その2)—ヒートアイランド改善対策とその効果—, 東京都環境科学研究所年報1997, 49-56.
- 奥野忠一, 芳賀敏郎, 久米 均, 吉澤 正, 1981: 多変量解析法<改訂版>; 日科技連出版社, 391-411.
- 朴 恵淑, 安成哲三, 山根理子, 尾田敏範, 1994: 地上気温変動の季節性に着目した都市気候成分の解析, 地理学評論, 67A, 561-574.
- Yoshikado, H., 1992: Numerical study of the daytime

urban effect and its interaction with the sea breeze,

J. Appl. Meteor., 31, 1146-1164.

Extracting Diurnal Temperature Changing Patterns of Tokyo in Mid-summer
—Grasping Heat Island Phenomena by means of Statistical Methods—

Tomomichi Suzuki*, Yutaka Genchi***, Yoshinori Iizuka**
and Hiroshi Komiyama**

* (*Corresponding author*) *Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan.*
E-mail : suzuki@tqm.t.u-tokyo.ac.jp

** *Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo.*

*** *Research Center for Life Cycle Assessment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.*

(Received 6 May 1999 ; Accepted 1 May 2001)

Abstract

Statistical approaches were applied to the heat island phenomena occurring in urban and suburban Tokyo areas in order to clarify how the temperatures change according to time and locations. Analyses were focused on temperature changing patterns within a day. Temperature data that were measured every hour at 100 locations in mid-summer were used. Principal component analysis was applied to the data and three principal components were obtained. Close examination on the components revealed their meanings as daily average temperature, daily temperature range, and speed in temperature changes. 100 measuring locations were grouped into 7 groups each of which had own characteristics. Also, the validity of the analyses was checked using AMeDAS data of the same period.
