

気候変動の季節性に着目した都市気候成分の検出について

—都市化による気温上昇量推定の新しい試み—

安 成 哲 三 (筑波大学地球科学系)

山 根 理 子 (東京大学理学部地球物理学教室)

1. はじめに

現在、地球の温暖化が、炭酸ガスなどの温室効果ガスの大気中での確実な増加傾向と関連させて、人類活動による地球環境の改変のひとつの現れとして、大きな問題となっている。この温暖化の証拠として示されているのが、北半球或は全球で平均された過去約 100 年の地上気温の長期傾向である (Jones et al., 1986 ; Hansen and Lebedeff, 1987 ; Vinnikov et al., 1988 ; Yamamoto et al., 1980 等)。これらのデータは、程度の差はあれ、いずれも今世紀初めからの気温の長期的な上昇傾向を示している。特に 1970 年代以降の全球的な昇温傾向は、過去 100 年の中でも、最も顕著なものとなっている。

しかしながら、この半球規模、あるいは全球規模での気温の変動を求める時に、大きな問題となっているのが、もとになる世界各地の観測地点における都市化の影響である (Karl and Jones, 1989)。都市化に伴う人口の集中、建物の増加、舗装道路の増加、さらに熱エネルギー放出量増大などは、都市の周辺の大気を暖め、ヒートアイランドと呼ばれる暖気塊をローカルに形成することが知られている (Oke, 1979)。このヒートアイランド効果の強さは、都市のサイズに大きく依存しており、したがって同じ都市でも、都市化の進展と共に大きく、より顕著に現れる (Park, 1987 など)。この都市化による都市域の気温の上昇は、全世界的に見て、近年ほど著しくなっており、もしこの影響が半球または全球の平均気温算定に大きく寄与しているならば、上述したような気温の長期傾向は、いわば“見せかけの地球温暖化”を示していることになってしまう。

Karl et al. (1988) や Jones et al. (1989) は、この問題に北米大陸での地上気温データを用いて取り組み、過去 80 年 (1901-1984) における都市化による昇温は、全米平均で、 $0.06-0.09^{\circ}\text{C}$ 程度であり、北半球全体の平均でも、この期間で 0.1°C 以上になることはない、としている。いっぽう Kukla et al. (1986) は、やはり北米での過去 40 年 (1941-80) の都市化による昇温として、10 年につき 0.12°C というかなり大きな値を出し、北半球平均の気温上昇は、この都市化の影響を反映したものではないか、という疑問を投げかけている。

これらの研究ではいずれも、都市化による気温変化を、都市内と、都市の郊外に位置する小さな町における観測点の気温差を指標にして、求めている。この方法は、ヒートアイランド強度として、都市気候の研究で広く用いられているものである。しかし、この方法の問題点は、都市化

の影響のない、或は非常に小さいと仮定した地点との、あくまで相対値として都市化による気温変化を算定していることである。したがって、比較する地点の取り方によっては、この気温差の値は、大きく変わりうる。特に最近の先進各国においては、ある地域全体が、都市化しつつあり、二つの地点のペアにおける気温差が、必ずしも都市化による気温変化を反映していない可能性もあろう。

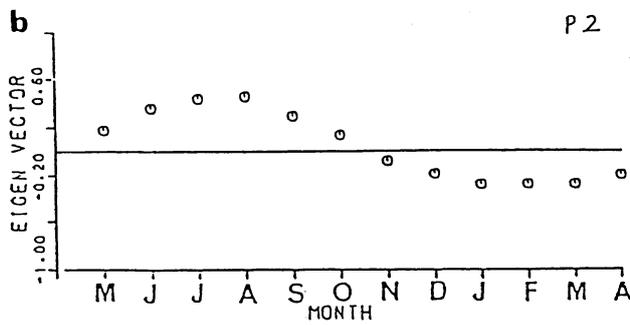
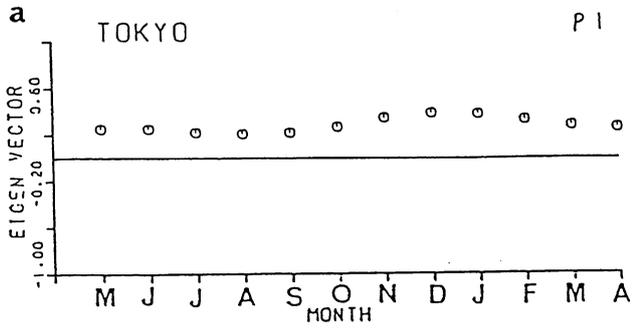
さらに、ヒートアイランド強度と、例えば人口を指標とした都市の大きさとの比例関係は、その都市の性質や、おかれた気候条件、地形条件などにより、大きく異っている (Park, 1987) ため、都市化による気温変化量を、限られたパラメータにより一般化された回帰式で表すことは、今のところ不可能に近い。したがって、現在の半球スケール以上での地球の平均気温の算定には、大都市の気温データをはじめから除かなければならない、という計算上の大きな問題点も含まれている。

本研究では、これらの問題を解決するために、都市化に伴う気温変化の絶対量を、一地点の気温偏差の季節性から抽出するという、まったく新しい原理に基づいて求める試みをおこなった。その予備的な結果をここでは報告したい。

2. 季節サイクルに現れた気候変化

安成 (1986) は、気候変動のシグナルを取り出す一つの有効な手法として、気候要素の経年変動成分 (平年偏差) の、季節サイクルにおける特徴的な現れかたを系統的に調べることににより、それぞれ物理機構 (或は外力) の異なる気候変動を分離して取り出しうる可能性を指摘した。山根 (1987) は、この原理を実際に過去約 80 年間 (1901-1984) の日本及び北半球 50 地点の月平均気温の変動に適用し、この手法の有効性を示した。具体的には、各地点の月平均気温の平年偏差の値を 5 月から翌年 4 月を 1 年として並べ、この 12 ヶ月を 1 ケースとして、主成分分析を行い、偏差に現れた卓越するいくつかの季節変化パターンとその時間係数 (factor score) の特徴的な様相から、それぞれメカニズムの異なる気候変動のシグナルとして議論したものである。山根 (1987) は、日本の地点に現れた第一主成分が、都市化に伴う気温変化をあらわしている可能性を指摘しているが、本論文ではこのことを更に検証してみる。

図 1 は、東京における第一、第二主成分の固有ベクトル分布と、それぞれの時間係数を示している。第一主成分は、総分散の約 50 % を占める。一年を通じて正の固有ベクトル値を示し、特に冬季に大きな値を示している。時間係数は 1900 年代の初めから、小さな年々の変動はあるものの、ほぼ一方的な増加傾向を示している。即ち、一年を通じて気温が年々上昇する傾向があり、その傾向は特に冬に強いという気温の変動モードが、非常に卓越して存在していることを、この第一主成分は示している。これは、都市化に伴うヒートアイランド効果が、一般的には一年を通じて在るものの、冬季に最も顕著に現れるというこれまでの研究の指摘 (河村, 1977 等) と符合するものである。この固有ベクトルの基本パターンは、全国 30 地点のどの地点においても、第一主成



TOKYO

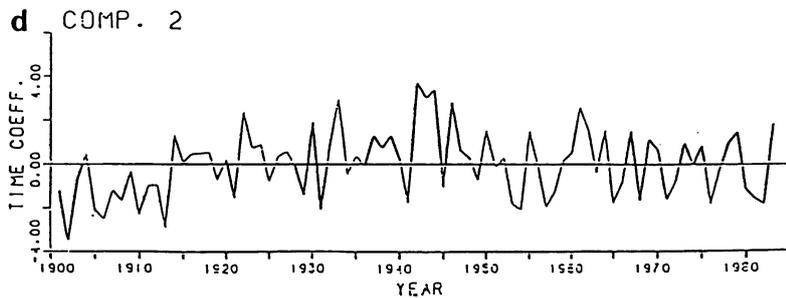
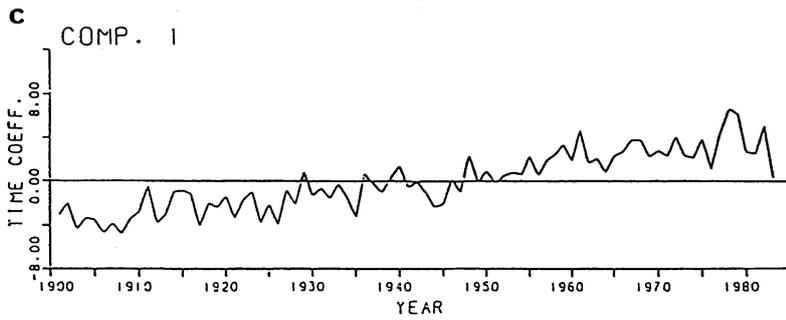


図1 東京における気温平年偏差の季節変化パターンの主成分

- (a) 第一主成分の固有ベクトル (b) 第二主成分の固有ベクトル
 (c) 第一主成分の時間係数 (d) 第二主成分の時間係数

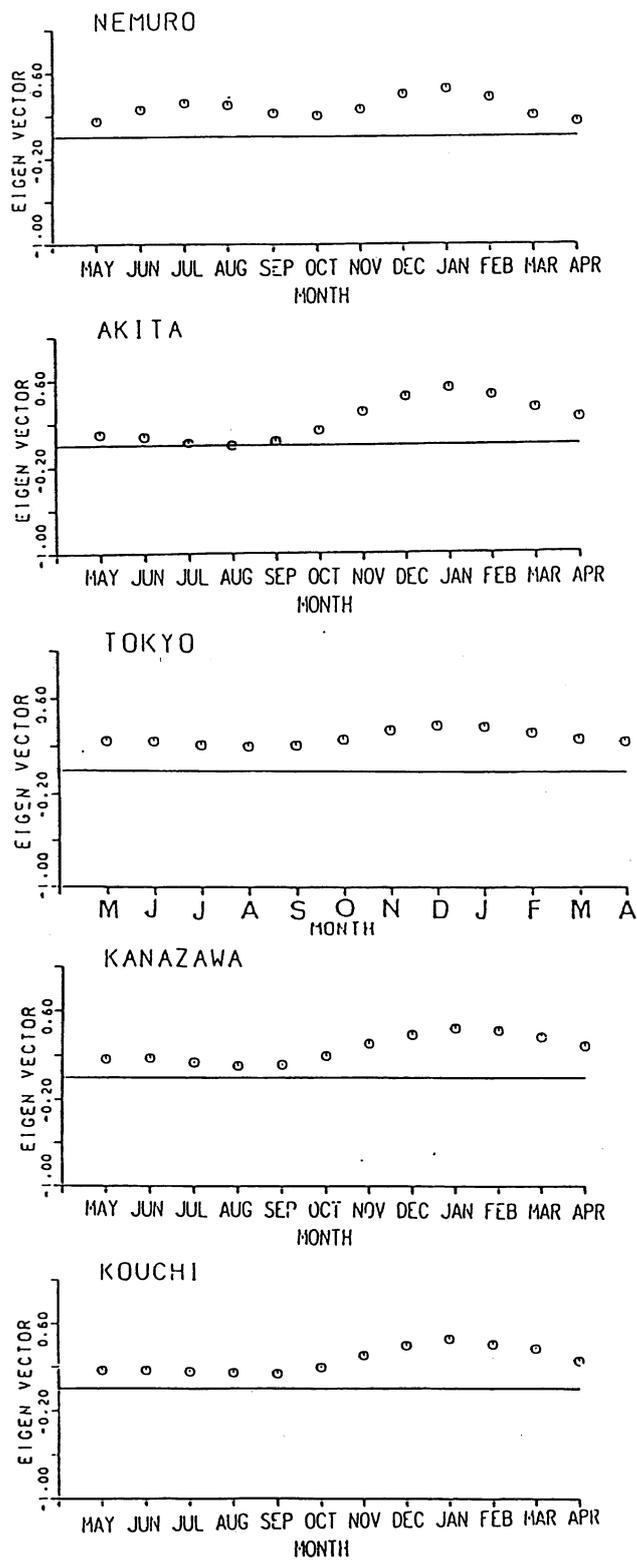


図2 各地における第一主成分の固有ベクトルの分布

分として認められ、時間係数の単調増加的傾向も、程度の差はあるものの、認められる。図2に、固有ベクトルパターンの例を、いくつか示す。即ち、この主成分は、基本的には都市化に伴う気温上昇をあらわしたモードと判定することができる。ちなみに第二主成分は、夏季と冬季とで、固有ベクトルの値が正負反転したパターンを示し、時間係数も長期的なトレンドはなく、むしろ数年周期の変動が卓越している。これは、暑夏（冷夏）と寒冬（暖冬）が組み合わせられて起こる経年変動のモードを示し、ENSO（エル・ニーニョ/南方振動）と密接に関連した気温変動であることが示されている（山根，1987）。

3. 都市化に伴う気温増加率の算定

この主成分分析は、気温偏差の共分散行列に基づいており、第*i*主成分による気温の偏差は、以下の式で求めることができる。

$$\Delta T_i(m, Y) = E_i(m) \times C_i(Y)$$

ここに、 ΔT_i はある月*m*のある年の*i*成分の気温変化量、 $E_i(m)$ は月*m*の固有ベクトル値、 $C_i(Y)$ は年*Y*における（規格化されていない）時間係数である。

したがって、第一主成分、即ち都市化に伴う（と推定される）年平均気温偏差は、

$$\overline{\Delta T_1(Y)} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} E_1(m) \times C_1(Y)$$

となる。この気温偏差の過去84年(1901-1984)に於ける平均的な変化量を、直線回帰式($\Delta T(Y) = aY + b$)の傾き*a*として全国16地点で求め、地図にプロットして示したのが、図3である。東京の値が0.27と、ずば抜けて大きく、大阪、長崎、旭川といった大都市がその後が続いている。寿都や名瀬といった、海岸部の小都市ないしは町村では、これに対し、非常に小さい値になっており、この成分の変動が、基本的には都市化に伴う気温上昇であることを示している。このことを更にはっきりと示すために、近似的に都市化の大きさを示す指標として便宜的によく用いられる各都市の人口(1985年現在)の対数と ΔT_1 の関係を求めたのが、図4である。Y軸は過去84年間の気温の増加量なので、X軸も同じ期間の人口増加量とすべきであろうが、この増加量は現在の人口で十分代表できることが、多くの研究で指摘されている(Karl et al, 1988など)。2, 3の例外的な都市を除き、かなり良い線形関係が両者にあることが分かり(相関係数=0.80)、この成分を都市化による気温上昇量と判定することの妥当性を支持している。

この図に示された人口と過去80年間における気温増加量との関係は、Karl et al. (1988)によるほぼ同じ期間の合衆国における結果と比べると、どの人口帯においても、約0.05 C/decade程度、多めの増加率となっているが、人口 vs. 気温増加量の相対的な関係は、おおむねよく一致している。増加率の違いの理由としては、Karlらの結果があくまで近くの小都市（または町）との気温差で、都市化による気温増加量を求めているため、参照した小都市の都市効果を、原理的に

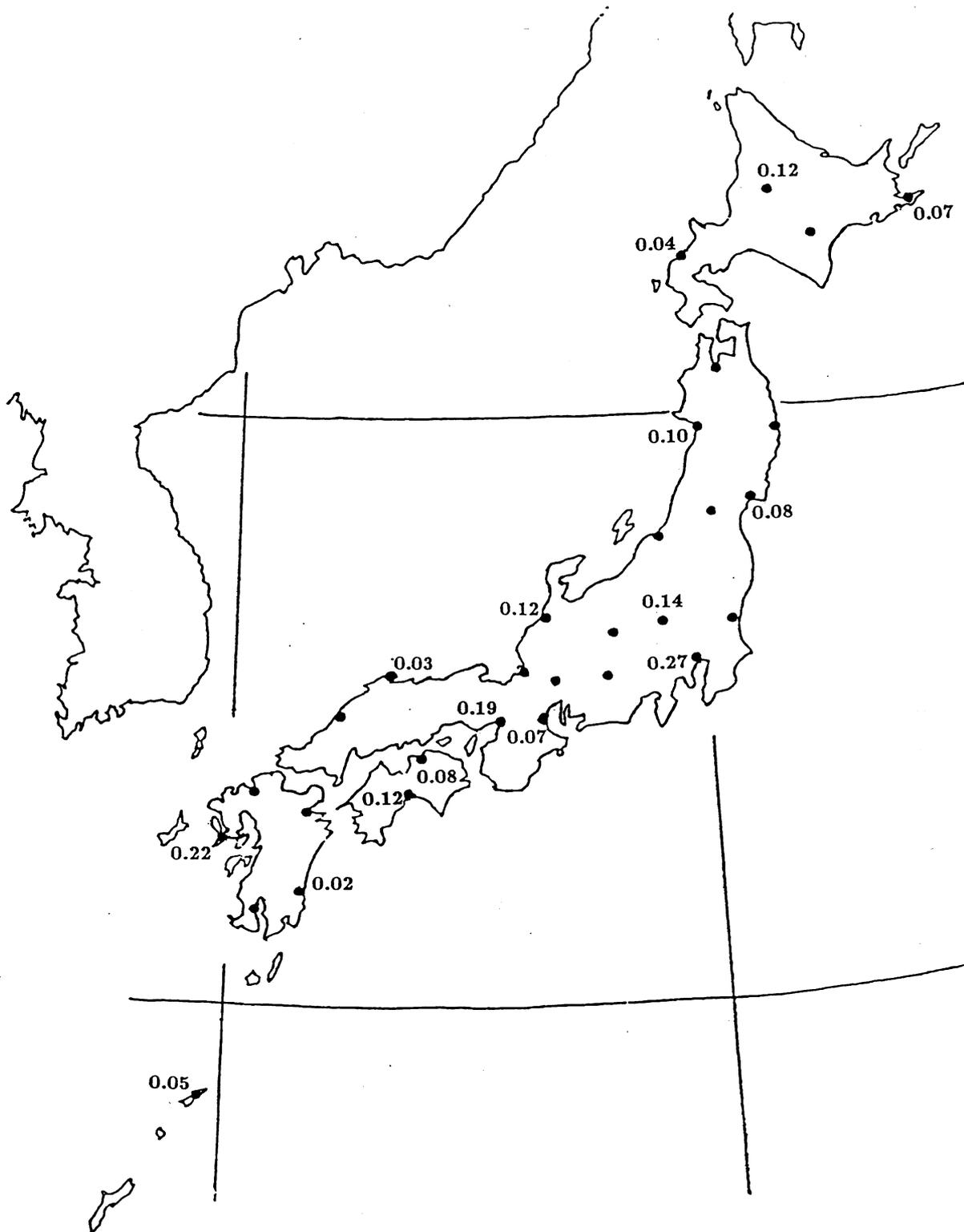


図3 各地の第一主成分から推定した, 1901-1984年間の都市化による年平均気温の線形増加率 単位は $10^{-1}^{\circ}\text{C}/\text{year}$.

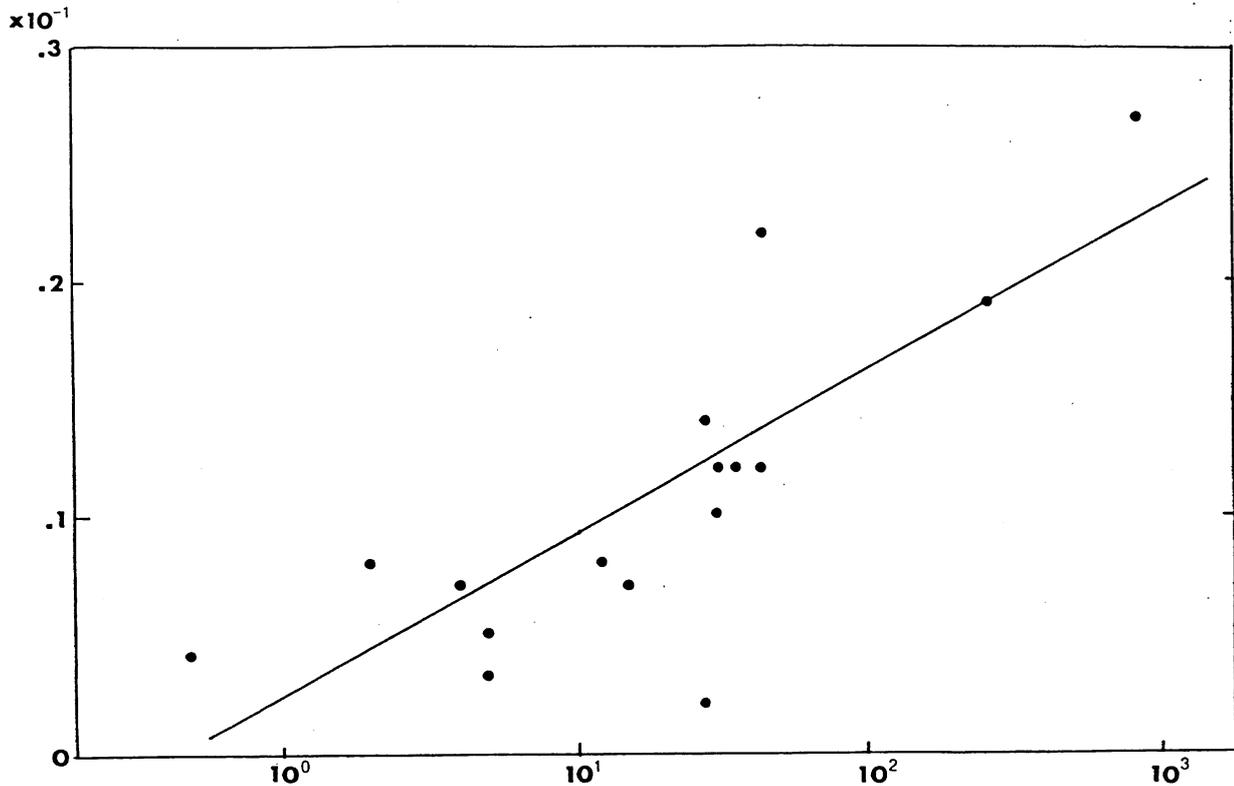


図4 都市化による年平均気温線形増加率 (1901-1984) と人口 (1985 年) の対数との関係

評価することができず、少な目に見積られている可能性がある一方、この方法でも、もし全く同じ季節パターンを示す気温変動を示す気候変動があれば、そのシグナルも併せて多めに評価されている可能性も含まれる。

4. 考察とまとめ

一地点の気温の年平均偏差の季節変化パターンの主成分分析を行うことにより、都市気候成分(都市化に伴う気温変化量)を取り出す試みを日本の16地点について行い、非常によい結果を得た。

この手法の大きな利点は、都市気候成分を、一点の資料から、絶対値として推定できることである。従来の手法では、近接する(都市気候の影響がないとした)小都市(町村)との相対値としてのみ、この成分を取り出し、定義したが、絶対値として評価することが、原理的に不可能であった。特に、近年の先進諸国や、発展途上国の首都周辺のように、いわゆるメガロポリス的に、都市が巨大化して発展していく状況では、大小二つの都市のペアを決定すること自体、困難で、しかも問題を含むことが多いと思われる。また、最近大きな問題となっている、グローバルな温暖化を正確に評価する場合、これまでの方法では、より精確でしかも長期間の気温観測資料のある大都市を大部分除外せざるを得なかったが、本研究の手法を適用して推定された都市効果の絶

対値を補正することにより、これらの多くの大都市のデータをグローバルな気温変動の推定に組み入れることが可能となる。

この手法の問題点としては、図2に示したような気温偏差の季節変化パターンが、都市化以外の大規模な気候変動にないかどうか、ということであろう。これは、今後に残された大きな問題の一つであるが、温室効果による温暖化成分が既にあったとしても、必ずしもこのパターンで示されるとは限らないことは、ここで付け加えておく必要がある。全球的な温室効果は、大気大循環におけるプラネタリー波の変動・調節を伴うはずであり、とすると、かならずこのスケールの地域的、季節的な気象要素の変化として現れ、“地球の温暖化”は、全(半)球の積分値としてのみ、現れるはずである。したがって、温室効果に伴う気温変化が、全球的に同じ季節パターンとして現れる可能性は、むしろ小さいとも推測される。これに対し、図2に示されたパターンを基本とする季節変化のモードが、全球的にどの地点にも現れるとすると、このパターンは、むしろ都市効果というローカルな現象に因るものと判定することが出来よう。その意味からも、今後、この手法を、地球上の様々な地理的、気候的、社会的条件下にある多くの都市に適用して、この手法の有効性を検証していく必要がある。

参考文献

- Hansen, J. and S. Lebedeff, 1987 : Global trends of measured surface air temperature. *J. Geophys. Res.*, 92, 13, 345-13, 372.
- Jones, P. D., S. C. B. Raper, R. S. Bradley, H. F. Diaz, P. M. Kelly and T. M. L. Wigley, 1986 : Northern hemisphere surface air temperature variations : 1851-1984. *J. Climate. Appl. Meteor.*, 25, 161-179.
- Karl, T. R., H. F. Diaz and G. Kukla, 1988 : Urbanization : Its detection in the United States climate record. *J. Climate*, 1, 1099-1123.
- Karl, T. R. and P. D. Jones, 1989 : Urban bias in area-averaged surface air temperature trends. *Bull. Ame. Meter. Soc.*, 70, 265-270.
- Kukla, G., J. Gavin and T. R. Karl, 1986 : Urban warming. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 1625-1670.
- 河村 武, 1977 : 都市気候の分布の実態. 気象研究ノート, 133号, 26-47.
- Oke, T.R., 1979 : Review of urban climatology 1973-76. WMO Tech. Note, 169, 100p.
- Park, H. S., 1987 : Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments. *Environ. Res. Center Papers, Univ. of Tsukuba*, No. 11, 79p.
- 山根理子, 1987 : 季節サイクルからみた気候変動—北半球の地上気温に関して—筑波大学自然科学類地球科学専攻卒業論文, 64頁.
- Yamamoto, R. and M. Hoshiai, 1980 : Fluctuations of the northern hemisphere near surface

air temperature during recent 100 years, estimated by optimum interpolation. J. Meteor. Soc. Japan, 58, 187-193.

安成哲三, 1986: 気候変動の時空間スケールに関する一考察. “気候変動の周期性と地域性” (河村武編) (古今書院), 27-40.