

40. 都市化が大気の熱環境に与える影響とその要因分析

EFFECTS OF URBANIZATION ON ATMOSPHERIC ENVIRONMENT

中辻啓二* ・ 南博高** ・ 佐藤歩** ・ 村岡浩爾* ・ 山路昭彦***

Keiji NAKATSUJI, Hirotaka MINAMI, Ayumu SATO, Kouji MURAOKA, Akihiko YAMAJI

ABSTRACT; The heat island phenomenon has become of major interest in recent years. The temperature observed in urban areas has increased in comparison with that in the suburbs. The increase in temperature is induced by urbanization such as energy consumption and human activities. The ratio is found to be larger than that induced by global green-house effects. In the present study, the changes in temperature in the Kansai District are examined by the analysis of AMeDAS data during recent 15 years. The remarkable heat island phenomenon can be observed near Sanda New Town in Hyogo Prefecture under construction, where the daily minimum temperature in January becomes 4°C higher than that observed in former 15 years. The increase in temperature of 4°C is a surprisingly large value. The mechanism of heat island phenomenon is examined on the basis of heat balance at ground surface in terms of the change of utilization and energy consumption.

KEYWORDS; Urbanization, Local Meteorology, Heat Island, Land Utilization, Energy Consumption

1. はじめに

近代の都市は経済活動の効率の追求を軸にして、古くは大量生産を可能とする工場生産の巨大化と交通・流通の技術革新によって支えられて発展してきた。都市に立地した多様な機能の集積や労働力としての人口集中、最近では情報や知識等の付加価値や文化的事業が、都市の魅力をなお一層高め、都市は膨張し続けている。我が国にあっては都市人口はこの20年間で15%も増大しており、すでに全人口の約70%にも及んでいる。都市化は先進諸国に限ったことではない。発展途上国においても見られる。ただし、都市化が加速度的であるが故に、発展途上国における都市の拡大や膨張が深刻な都市環境問題を惹起している。

都市化によって生じる環境問題は様々である。都市域の拡大は土地利用の変化、緑地の減少や道路舗装等の地表面の性状改変、都市構造物による地表面形状の変化、また構造物の構成材料の変化などをもたらす。さらに、都市での人間の産業や生活活動は大量の熱エネルギーの放出をともしなう。その結果、都市域での気候に変化が顕在するようになってきた。ヒート・アイランドはその一例である。「熱の島・ヒートアイランド」は地表面での温度分布を描いた時に、都市域周辺が高温の孤立した分布形になることに由来している。

本研究では、アメダス・データを用いて関西圏における大気の熱環境の変化の解析を行った。アメダスでは通常毎正時の気象量が観測されており、これらの観測値を使って気象量の経年変化を求めた。土地利用等の変化が地温分布に与える影響を熱収支式から算定し、ヒートアイランド現象をもたらす要因を考察した。さらに、大阪市におけるエネルギー消費量の経年変化との関連性に関しても定量的に検討した。

*; 大阪大学工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Osaka University, **; 大阪大学大学院 Graduate School of Osaka University, ***; (財) 日本気象協会 Japan Weather Association.

2. 最近100年間の関西圏での気温の変化

都市気候による気温の変化と地球規模での気候変化とを比べたのが、表-1と表-2である。地球規模および関西圏各地での年平均気温の100年当りの上昇割合を示している。IPCC報告(1991)によれば、地球全体の温暖化は100年でおおよそ0.60℃の気温上昇があり、地球の存続に係わる問題として大きく取り上げられている。これに対して、鈴木・山路(1994)が関西圏の気象データを整理した表-2によれば、大阪では3.37℃の上昇、京都や神戸でもそれぞれ2.58℃、1.88℃である。すなわち、都市の温暖化は地地規模の温暖化とは比べものにならないほどの速さで進行していることが分かる。

こうした都市の温暖化現象は夜間に顕著に見られ、日最低気温の増大や熱帯夜数の増加を引き起こしてきた。図-1と図-2はそれぞれ大阪市の日最低気温および熱帯夜数の110年間の経年変化を示している。これらの図からも大阪市の顕著な気温上昇が認められる。100年間に日最低気温は約2.5℃上昇している。また、大阪の熱帯夜の発生日数は1985年に40回にものぼり、なお増加傾向にある。

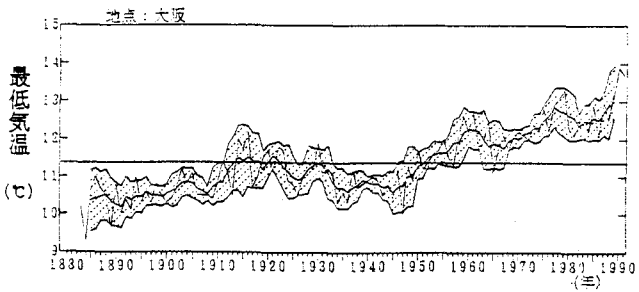


図-1 大阪での日最低気温の経年変化

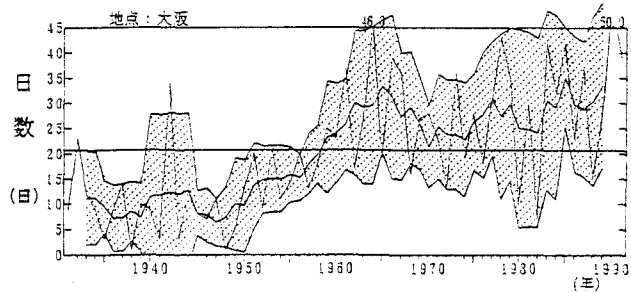


図-2 大阪での熱帯夜数の経年変化

3. 最近15年間の関西圏における熱環境の変化

ヒート・アイランド現象は最低気温において顕著に現れることが知られている。1991年から1993年までの日最低気温の3年平均値の地表面分布を図-3に示す。同図より大阪を核としたヒート・アイランド現象が生じているのが認められる。さらに、前述の等温線では範囲が大きいので、大阪周辺を詳細に調べてみたのが図-4である。つまり、図-3の太線で囲んだ地域を対象にして温度分布の広がりを検討した。大阪周辺24観測所の1980～1982年の最低気温3年平均値と1991～1993年最低気温の3年平均値との差を求めて、年平均最低気温の変化量を示した。なお、等温線の間隔は0.2℃である。気温は全体的に上昇傾向にあり、大阪では最低気温で1.0℃の上昇となっている。生駒山では、0.2℃程度の上昇となっており、大阪と比べると上昇率は小さい。ここで注目したいのは、三田での気温上昇が目立つことである。最低気温では2℃以上の上昇がみられ、最低気温の上昇率では大阪をしのいでいる。

そこで、1月の最低気温の等温線を図-5に示す。三田市周辺に注目すると、1月の最低気温では4℃も上昇している。ヒートアイランド現象は冬の最低気温において顕著に現れるという報告があるが、その傾向と一致している。また、わずか10年あまりで4℃もの気温上昇が認められるのは驚くべき現象である。

表-1 平均地上気温のトレンド(℃/100年)

(出典：IPCC報告(1991))

範 囲	1950-1988年
全 球	0.60
北 半 球	0.54
南 半 球	0.75
北 ア ジ ア	1.34

表-2 年平均気温のトレンド(℃/100年)

(出典：鈴木・山路(1994))

地 点 名	1962-1992年
京 都	2.58
大 阪	3.37
神 戸	1.88
潮 岬	1.46
洲 本	-0.24

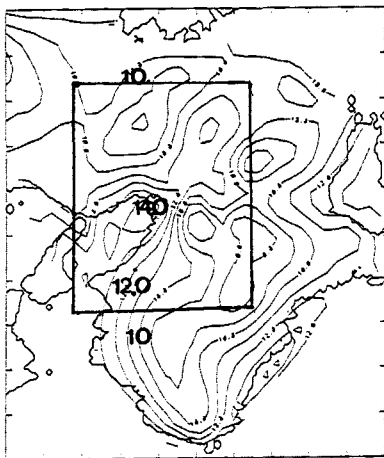


図-3 年平均最低気温の等温線
(1991-1993)

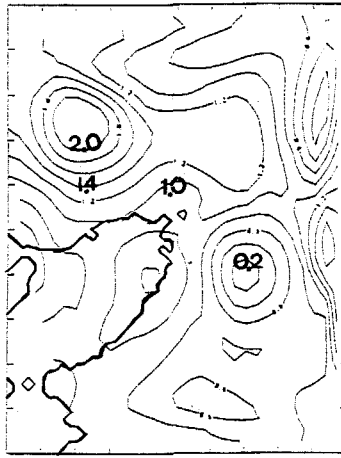


図-4 年平均最低気温の変化量
(1980-1982から1991-1993)

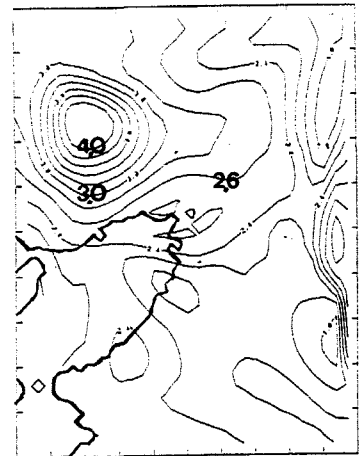


図-5 1月の最低気温の変化量
(1980-1982から1991-1993)

4. 都市化と熱環境変化との相関性

4.1 大阪市の土地利用変化にともなう地表面温度の変化

気温上昇がここ15年間で顕著に見られる大阪市について、土地利用の変化が地表面温度にどのような影響を与えてきたかを検討するために、大阪市の各年ごとの熱収支を算定して地表面温度の変化量を求めた。5年毎の大阪市の土地利用の変化を円グラフで図-6に示す。住宅地に関しては1965年から1975年までの間に5%も増加しているが、それ以降はほぼ一定となっている。また、交通用地は増加傾向にあるが、農用地は減少している。これらの土地利用データから大阪市の地表面アルベドと蒸発比(尾島・森山(1978))の経年変化を求め、次項に示す熱収支モデルを用いて、地表面温度の経年変化をを算出した。

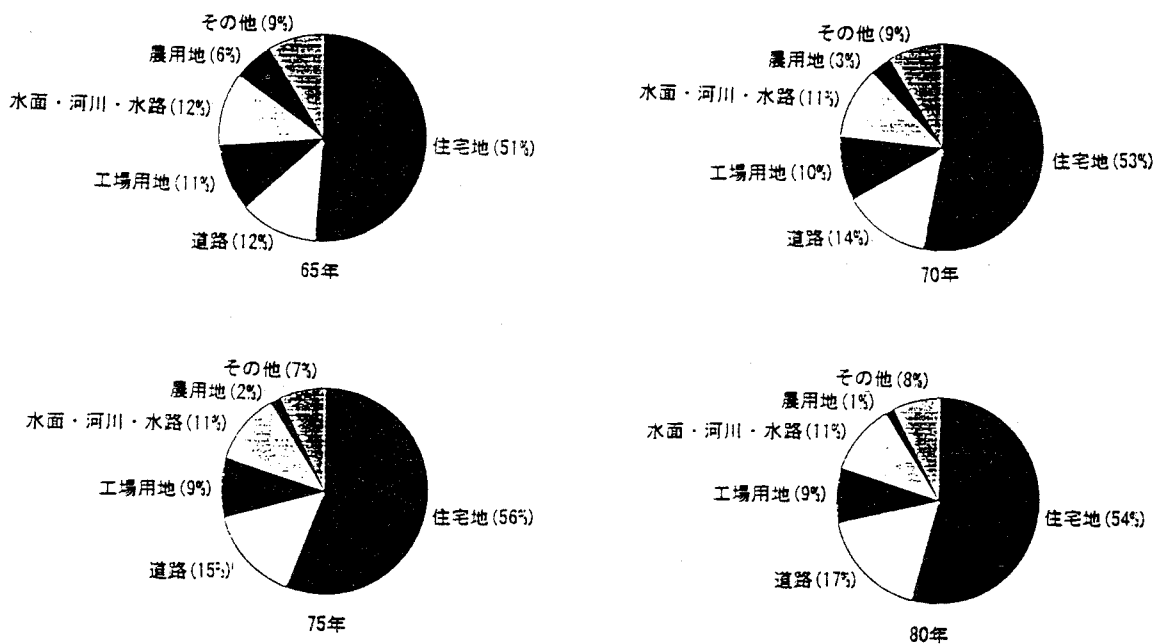


図-6 大阪市の土地利用の変化

(1) 熱収支モデルの概要

熱収支のモデルの概念図を図-7に示す。 $S\downarrow$ は太陽から直接到達する短波放射； $R_{L\downarrow}$ は大気から地表面に入射してくる放射量； $R_{L\uparrow}$ は地表面から大気へ放出される放射量； $R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}$ が長波放射量；短波放射量と長波放射量の合計は正味放射量である。

H は顕熱であり、地表の温度と大気の温度の差および風速によって決まる量である。通常上向きを正にとって表現する、顕熱は地表面の温度を下げ大気を暖める役割を担っている。 LE は潜熱であり、地表の水蒸気の量と大気の水蒸気の量の差および風速によって決まる量である。通常上向きを正にとる。潜熱は顕熱と異なり、温度の上昇には寄与せず、凝結、昇華、蒸発など相の変化に寄与する物理量である。 G_0 は地中への伝導熱を表し、地中に輸送される量を表している。

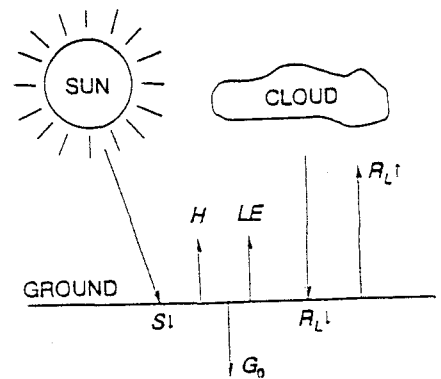


図-7 地表面での熱収支モデルの概念図

この熱収支モデルを用いて熱収支の算定を行った。地表面における正味放射量は様々な成分からなり、地表面に入る放射と地表面から出る放射の差に等しい。よって、正味放射量 R_n は次のように表現できる。

$$R_n = (S\downarrow + L\downarrow) - (rS\downarrow + \sigma T_s^4) \quad (1)$$

ここに、 R_n ：正味放射量、 $S\downarrow$ ：全天日射量、 $L\downarrow$ ：下向きの大気放射量、 r ：地表面アルベド、 σ ：ステファン・ボルツマン定数、 T_s ：地表面温度である。

R_n は地表面で顕熱 H 、蒸発の潜熱 LE 、地中伝導熱 G に変換される。日平均でみた場合、地中伝導熱 G は日中と夜で+、-となり、微小項となり日単位の熱収支成分への変換式は次式で表される。(砂田・長島(1991))

$$\langle R_n \rangle = \langle H \rangle + \langle LE \rangle \quad (2)$$

ここに、 H ：顕熱、 E ：蒸発量、 L ：単位質量当たりの水の気化熱、 $\langle \rangle$ ：日平均状態を表す

また、顕熱、潜熱はそれぞれ次式で求められる。(尾島・森山(1978))

$$H = \alpha_c (T_s - T) \quad (3)$$

$$LE = Lk_q (q_s - q) \quad (4)$$

ここに、 α_c ：対流熱伝導率、 K_q ：物質移動係数、 q_s 、 q ：地表面温度に対する飽和比湿と空気の比湿である。

さらに、一般に用いられる近似式を導入することにより、地表面温度は次式より算出できる。

$$T_s - T = \frac{((1-r)S\downarrow + L\downarrow - \sigma T^4) - Lk_q(1-h)q_{sat}(T)}{4\sigma T^3 + \alpha_c + Lk_q\Delta} \quad (5)$$

ここに、 h ：大気の相対湿度($0 \leq h \leq 1$)、 $q_{sat}(T)$ ：気温 T における飽和比湿、 $\Delta = dq_{sat}(T)/dT$ である。

(2) 計算結果と考察

前述した計算に加えて、大阪市の土地利用が1965年以降には変化がないと仮定した場合の熱収支の算定を行った。この場合には地表面アルベド・蒸発比を1965年の値で一定に与えている。土地利用を考慮した場合と不変と仮定した場合の熱収支算定の結果を図-8に示す。同図より地表面温度は15年間で約1℃上昇していることがわかる。また、図-8より土地利用を考慮した場合と不変と仮定した場合の地表面温度の差を示したのが図-9である。1975年まで両者の差は増加しているが、1975年以降ほぼ一定となっている。図-9より土地利用の変化によって生じる地表面温度の変化は15年間で0.18℃上昇であることがわかる。すなわち、地表面温度上昇(1℃)の約18%が地表面性状改変によるものと考えられる。

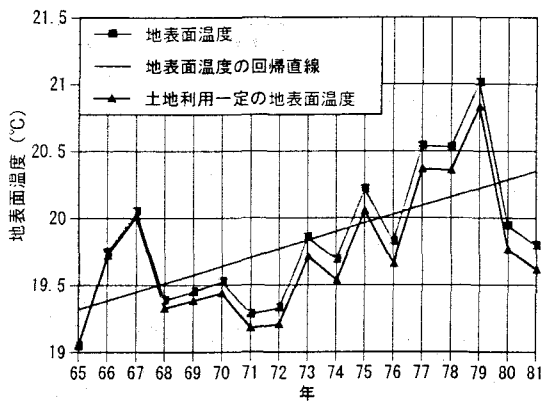


図-8 大阪市の地表面温度

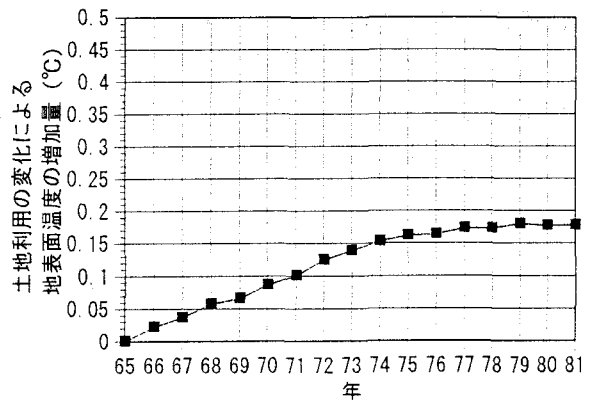


図-9 大阪市の地表面温度の増加量

4.2 三田市の土地利用変化にともなう地表面温度の変化

つぎに、ここ10年あまりで気温上昇が顕著に現れている三田市周辺について、同様に熱収支の算定を行った。対象とする三田市は国際公園都市を謳い文句に宅地造成、宅地開発を実施している。その開発データおよびアメダスデータをもとにして、1979年から1994年までの期間で熱収支の算定を行った。また、土地利用を1979年の値を一定として与えた場合の熱収支の算定を行い、土地利用の変化が地表面温度にどのように影響を及ぼすのか調べた。その結果を図-10と図-11に示す。開発は粗造成、整造成と行われていくが、三田市の整造成が行われはじめた1985年頃から地表面温度の差は急増していることが図-11より分かる。三田市においては15年間に1.64°Cの気温上昇をしている。図-10に示す地表面温度の上昇量は15年間でおよそ2.37°Cである。そのなかの1.64°C、つまり69%が土地利用の変化による地表面性状改変によるものと考えられる。大阪市での値1.8%と比較して、この69%はかなり大きな値となっている。この原因として、対象とした地域が“神戸三田”国際公園都市の三田市域であり、かつてほとんどが森であったところが開発により建設用地、交通用地に変わった地域であるということが指摘できる。また、対象とする地域はいまだ開発中であり、人工熱はそれほど発生しておらず、地表面性状の改変が気温上昇に大きく関与しているとも考えられる。したがって、今後さらに人工熱が増大し、それに伴い気温も上昇する恐れがあるといえる。

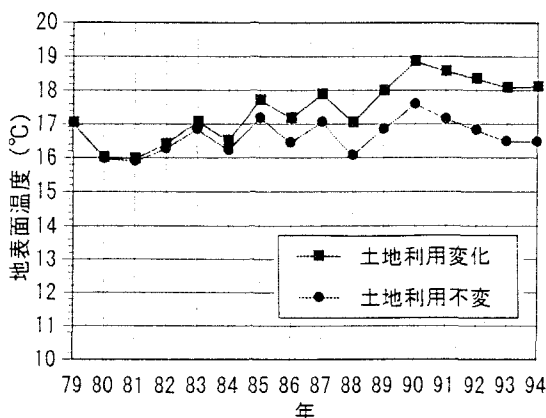


図-10 三田市の地表面温度

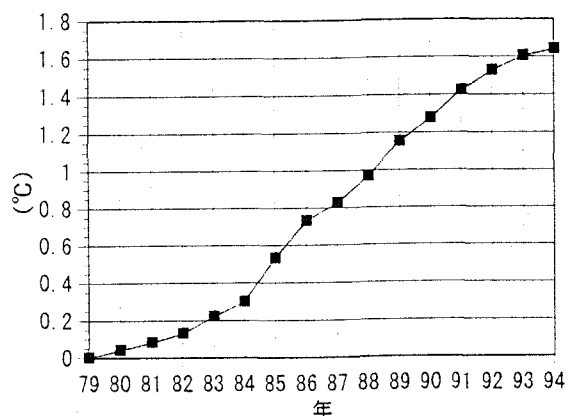


図-11 三田市の地表面温度の増加量

4. エネルギー消費量と最低気温の変化との関連性

図-12は大阪市のエネルギー消費量の変化と最低気温の経年変化を示したものである。最低気温の変化には地球規模的な変化も含まれている。それを取り除くために、大阪の最低気温から近年の気温上昇がみら

れない潮岬の最低気温を差し引いたものを用いている。エネルギー消費量は1964年に一時減少しているが、1955年から1973年までの期間では増加傾向にある。一方、最低気温の差も1955年から増加しており、1978年までは全体的に増加傾向を示している。そして、1973年からのエネルギー消費量の減少に対し、気温差の増加傾向は緩やかになり、やがて減少していく。しかし、1986年から両者とも増加傾向となっている。こうしたことから、エネルギー消費量と気温差には有意な相関があるといえる。しかし、エネルギー消費量の急激な減少が気温差には顕著に現れていない期間もある。また、時期によっては両者の増減に相違が生じている。その原因としては地球規模的な気温変化を取り除くために大阪の気温から潮岬の気温を差し引いた気温差を用いているが、潮岬においてもエネルギー消費による気温上昇が多少生じていると予想され、今の手法では地球規模的な変化を完全に取り除くことは困難であるということがあげられる。また、他の原因として、都市の温度形成は複雑でありエネルギー消費量だけに支配されるものではないことも考えられる。しかし、全体的にみると大阪市のエネルギー消費量の増加に呼応して気温も増加傾向にあることは疑いのない事実である。

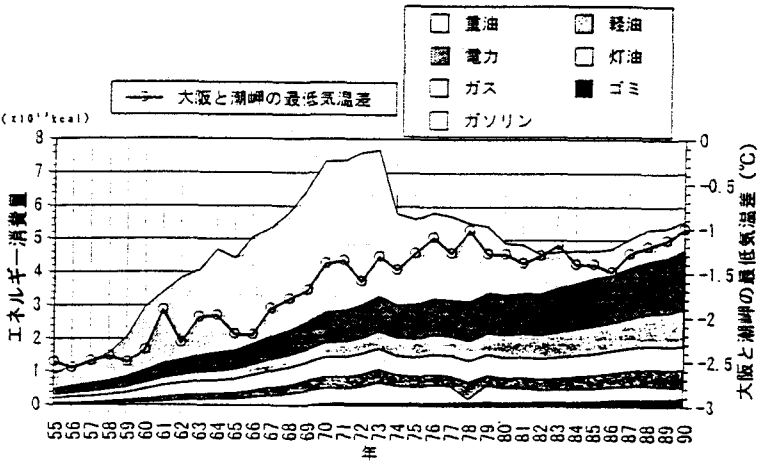


図-1 2 大阪市のエネルギー消費量と最低気温差の経年変化

6. まとめ

ヒートアイランド現象の原因の1つと考えられる土地利用の変化が地表面気温といかに関係しているかを、近年の気温上昇が顕著な大阪市、三田市について調べた。その結果、建設用地や交通用地の面積が増大し、且つ地表面性状が土からアスファルト、コンクリートへと変化していくにつれ、地面が熱を蓄熱しやすくなり、気温上昇をもたらしていることが分かった。大阪市においてはこの地表面性状の改変が15年間にわたり温度上昇の18%を占めていた。しかし、それにも増して、三田市周辺については69%も占めることが分かった。三田市が大阪市よりも大きな値になったのは、三田市で近年大規模に地表面性状の改変の影響が現れたものと推察できる。

さらに、気温上昇のもう1つの原因と考えられるエネルギー消費量の増大について大阪市に着目し、エネルギー消費量と気温差との関係を調べた。その結果、エネルギー消費量の変化と最低気温変化には因果関係があることがわかった。しかし、大阪市だけではそれらの相関を完全に明らかにすることは困難である。今後、他の都市においても同様な分析を行いたい、エネルギー源や土地利用等に関して行政のデータ管理が十分に把握されていない状況でありなかなか難しい。

参考文献

鈴木善光・山路昭彦(1994)：土木学会関西支部調査研究報告書「21世紀の沿岸都市域の水災害と水環境の展望と問題点」, pp. 163-168.
 IPCC報告(1990): Climate Change, Island Press, 274pp.
 砂田憲吾・長島欣司(1991)：水文・水資源学会1991年研究発表会要旨集, pp. 264-267.
 尾島俊雄・森山正和(1978)：日本建築学会論文報告集, 第265号, pp. 93-102.