

急激な都市化に伴う都市気候の変化

—中国深圳市を例として—

顧

衛*・早川 誠 而**・李

寧*・馬

楠*

要 旨

中国深圳市における急激な都市化が都市気候に与える影響を調べるために、深圳と深圳から東に約135 km離れた汕尾の平均気温・最低気温・相対湿度を比較することによって都市効果（都市気候への影響度合）を抽出し、都市規模、土地被覆の変化、人間活動などとの関係を検討した。その結果、次のことが分かった。1979～1997年の19年間では深圳の年平均気温は $0.040^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、年平均最低気温は $0.074^{\circ}\text{C}/\text{年}$ の割合で上昇し、年平均相対湿度は $-0.199\%/\text{年}$ の割合で低下している。都市効果の季節変化を見ると、平均気温と最低気温は乾涼期（10～4月）における上昇率が湿熱期（5～9月）より大きく、相対湿度は乾涼期における低下率が湿熱期より小さい。都市効果と都市規模の関係を調べると、平均気温・日最低気温・相対湿度に現れる都市効果は、人口と都市面積との間に高い相関が見られ、人口30万人付近に気温上昇量、相対湿度低下量に不連続が見られた。この不連続は都市面積にも現れた。都市規模の拡大に伴う土地被覆特性の変化が、広範囲にわたる地表面アルベドの変動をもたらし、都市気温を上昇させる要因の1つとなっていることが考えられる。都市における人間活動は都市気温の上昇、相対湿度の低下に大きな影響を与え、特に、道路面積は都市気温・湿度の都市効果と有意な相関関係がある。

1. はじめに

中国は経済発展を図るため、1979年に経済改革開放政策をとり、その一環として香港に隣接する深(Shen-Zhen)という町を1980年に経済特別区に指定し、積極的に外資の導入を図った。これをきっかけとして、深圳では急激に都市化が進行し、1997年までの僅か19年の間に、人口が約2万の小都市から379.64万人の大都市に生まれ変わった。このような急激な都市化は中国国内にのみならず、世界においてもあまり他に例を見ないものである。1979年以前に比べ、深圳市の自然環境は元の農村型環境から都市型環境に大きく変わり、地形、植生、河川など視覚に捕らえられる環境要素の変化だけではなく、気候への影響も大きいと考えられる。

都市化が気象要素に及ぼす影響を、特に気温、湿度

から推定した研究が数多くなされている。例えば、小元・鱧谷(1979, 1980, 1982)は市街地に位置する気象台の観測データと都市の影響がないと考えられる郊外1地点もしくは複数地点の観測データの差を用いて都市効果(都市化の都市の気候への影響度合)を推定し、安成・山根(1990)、野口(1994)や日下ほか(1998)等は、幾つか地点の気象官署データをもとに主成分分析により都市化の影響を検出した。研究の対象域については、日本国内では札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、福岡などの大都市が重点的に取り扱われたが(例えば吉野, 1977; 杉本・近藤, 1994; 足立, 1997; 玄地ほか, 1998)、中小都市の長崎(森ほか, 1997)、長野(榎原ほか, 1998)、長浜(藤野・浅枝, 1999)、高松(山地ほか, 1999)なども取り扱われている。海外ではアメリカ東部(吉野, 1977)や韓国のヒートアイランド現象(朴, 1987)に関する研究が報告され、カナダ、ドイツ、ハンガリー、スウェーデンなどの国における都市気候に関する研究結果も紹介されている(一ノ瀬, 1997)。

こうした都市気候—特にヒートアイランド形成のメ

* 中国北京師範大学資源科学研究所・教育部環境変化と自然災害重点実験室、** 山口大学農学部。

—2000年2月22日受領—

—2001年5月1日受理—

カニズムに関する研究も少なくない。例えば、Oke (1973), 河村 (1977), 朴 (1987) は人口の多い都市ほど都市温度が高く, 同一の都市においても人口増加と共に都市温度が上昇すると指摘しており, 福岡ほか (1993) は都市規模の増大に応じて都市高温域が広がったと報告している。一ノ瀬ほか (1997) は地理情報にもとづき都市気候の数値シミュレーションを行い, 人口排熱が都市温度の上昇に影響を与えると発言しており, 足立 (1997) は経済活動の指標である景気と都市温度の関係性を調べ, 経済活動が活発なときには都市温度が上昇し, 不活発なときには下降する傾向があることを示している。

しかしながら, ヒートアイランド現象は都市規模の大きさ, 都市構造の違い, 都市における人間活動の強さなどによって異なる他に, 都市の立地条件によっても大きく変化するという地域性が強い特徴を持っている。これまでの研究は主に温帯における都市を研究例としてなされているが, 熱帯または亜熱帯における都市のヒートアイランド現象に関する研究報告はほとんど見られない。気候帯によって都市気候にどのような相違が現れるかはまだ不明である。また, 都市気候を大きく左右する都市における人間の活動の影響については, 都市人口と都市規模以外に, 都市の土地被覆変化や経済活動などの角度から十分に議論されたとは言えない。

そこで本研究は, 南亜熱帯における中国の深圳市を研究例とし, 1979年以降の急激な都市化に伴う都市気候の変化特性を明らかにし, この変化に関わる人口, 土地利用, 人間活動などの要因との関係性を検討することを目的とする。

2. 深圳市の概況と解析方法

2.1 深圳市の概況

深圳市は中国南部の広東省沿海部にあり, 都市域は北緯 $22^{\circ}26'59'' \sim 22^{\circ}51'49''$, 東経 $113^{\circ}45'44'' \sim 114^{\circ}37'21''$ に位置する。東側と西側は南中国海に面し, 南側は香港特別行政区に隣接する。深圳市の面積は 2020.5 km^2 であり, 行政的には福田区, 羅湖区, 南山区, 宝安区, 竜岡区の5つの区に分けられ, その中の福田区, 羅湖区, 南山区の3区が経済特別区(以下, 特区と略称)と呼ばれる。特区の面積は 142.8 km^2 であり, 中国の改革開放政策の実施と急速な経済成長はここからスタートしている(第1図を参照)。

深圳市は南亜熱帯海洋性モンスーン気候に属してい

る。年平均気温は 22.1°C , 年降水量は 1876.6 mm である(深圳气象台, 1961~1990年)。モンスーンの影響を強く受けるため, 気候的には5月から9月までの間は高温で多雨の「湿熱期」, 10月から翌年の4月までの間は温和で少雨の「乾涼期」に区分される(深圳自然資源と経済開発編集委員会, 1996)。

1978年の深圳は, 人口が2万人, 都市域の面積が 2.9 km^2 の小さな町であり, 産業としては農業と漁業が主であった。1979年7月, 中国政府が深圳で「経済特別区を試験的に実施する」と決定し, 1980年8月, 深圳経済特別区が中国で真っ先に成立した。これを機に, 深圳では大規模な都市作りが急速に展開された。道路と建物建設, 市政インフラ建設, 企業進出, 産業創出, 経済発展, 人口増加などに伴い深圳市は急速に巨大化し, 1997年には特区の面積は当初の約50倍に拡大し, 域内総生産GDP (Gross Domestic Product) で見ると, 経済規模が約300倍の成長を遂げ, 上海, 大連, 天津と並んで中国沿海地域の大都市として位置づけられている。

2.2 解析方法

本研究は, 深圳の気象データから都市化の影響を推定するため, 小元・體谷 (1982) の方法を用い, 以下の式で都市気候の解析を行った。

深圳气象台における*i*年の観測値 $M(S)_i$ は都市化の影響(以下に都市効果と記す) $M_m(S)_i$ と, そこに都市がなければ観測されるであろう想定値(以下に自然値と呼ぶ) $M_n(S)_i$ の和で表わされるものとする。すなわち,

$$M(S)_i = M_m(S)_i + M_n(S)_i \quad (1)$$

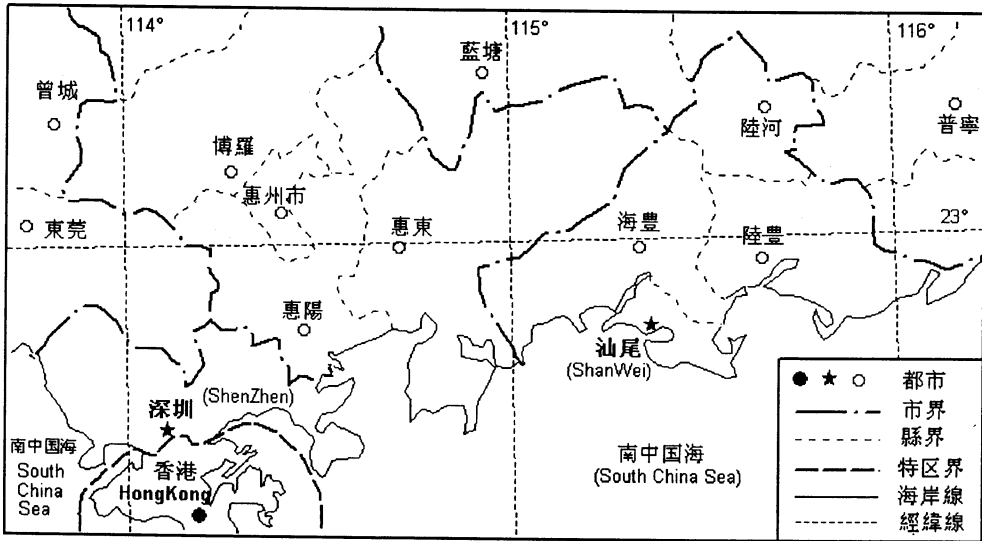
自然値 $M_n(S)_i$ は次式から求められる。

$$M_n(S)_i = M(S)_i + \frac{\alpha(S, C)_{(\mu)}^{30} + \overline{M(C)_i^5}}{-\overline{M(S)_i^5}} \quad (2)$$

ここで $M(C)_i$ は都市効果をほとんど受けていない対比観測点Cにおける*i*年の観測値, $\overline{M(C)_i^5}$ と $\overline{M(S)_i^5}$ は対比観測点Cと深圳における*i*年の観測値を中心とする5年平均値, $\alpha(S, C)_{(\mu)}^{30}$ は深圳と対比観測点Cのデータが利用できる最初の年(μ , 深圳の場合 $\mu = 1953$) から30年(深圳の場合は1953~1982年)の平均値の差である。すなわち,

$$\alpha(S, C)_{(\mu)}^{30} = \overline{M(S)_{(\mu)}^{30}} - \overline{M(C)_{(\mu)}^{30}} \quad (3)$$

である。(2)式を(1)式に代入すると, 都市効果 $M_m(S)_i$



第1図 深圳と汕尾の地理的位置。

は次の(4)式から求められる。

$$M_m(S)_i = -\alpha(S, C)_{(\mu)}^{30} - M(C)_i^5 + M(S)_i^5 \quad (4)$$

ここでは次の2つの仮定を設定した。仮定1、深圳における気象観測値データの最初の年(μ)から30年までの平均の都市効果はゼロである。仮定2、この期間における深圳と対比観測点Cにおける気象観測値の平均値の差は、都市効果がなければ全期間を通して一定である。

2.3 対比観測点の選択

上記の解析方法と仮定によって、深圳の都市効果を算出するため、対比観測点を選ぶ必要がある。深圳気象台は市街地に位置し、郊外には長年にわたって地上気象観測を行ってきた気象台はない。隣接した他の気象台の所在地は、深圳と同じように1980年代から相当な都市化が進んでおり、対比観測点としては適当ではない。これらの実態を考慮して、深圳の東に約135 kmを離れた汕尾(ShanWei)気象台を選んだ。汕尾を選んだ理由は3つある。

① 都市の立地条件及び自然環境が深圳に類似すること。汕尾は深圳と同じように南中国海に面して海岸に立地している(第1図)。地形・土壌・植生等の自然環境が同様であり、気候も南亜熱帯海洋性モンスーンに属する(第1表)。

② 気候的に深圳とほぼ同じであること。都市化進行

第1表 深圳と汕尾の地理条件及び自然環境の比較。深圳自然資源と経済開発編集委員会(1996)による。

	深圳	汕尾	
気象官署地理位置	北緯	22°33'	22°48'
	東経	114°06'	115°22'
	標高	18.2 m	17.3 m
自然環境特性	地形	台地・丘陵	台地・丘陵
	土壌	赤土	赤土
	植生	常緑季雨林	常緑季雨林
	気候	南亜熱帯海洋性モンスーン	南亜熱帯海洋性モンスーン
都市の立地条件	海岸沿い	海岸沿い	

以前(1980年以前)の汕尾と深圳における主な気候値を比較すると、その差が非常に小さく(第2表)、月別変化も似ている(第2図)。

③ 都市化の影響が少ないこと。1979年以前には汕尾は深圳と同じように農業と漁業を主とする小さな町であり、都市化があまり進んでいないと考えられる。1979年から深圳の都市化が急速に進んだが、一方、1987年までは汕尾は相変わらず農業の町であった。1988年に汕尾市が設立しているが、都市化の程度は深圳ほどではない(第3表)。

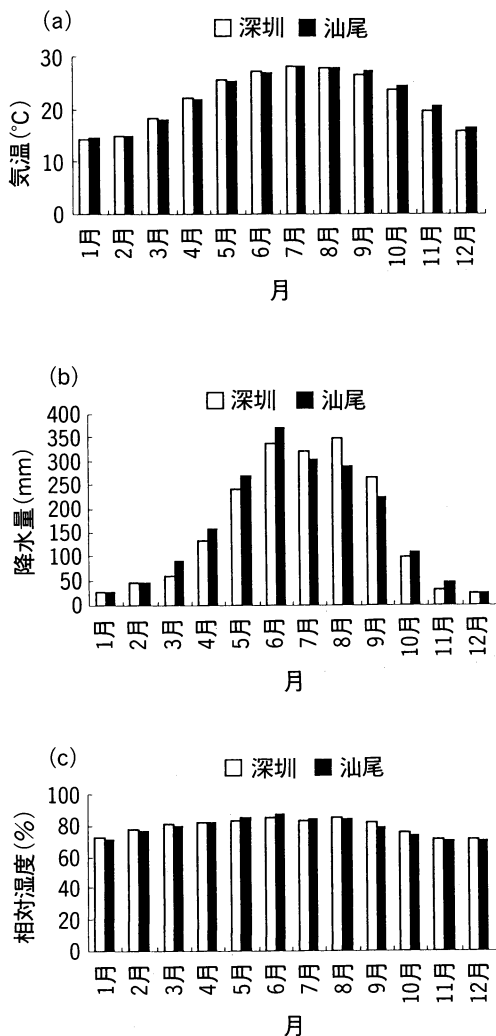
2.4 解析に用いたデータ

気象データは、深圳気象台と汕尾気象台における気象観測が開始された1953年から1997年までの月別累年

第2表 深圳と汕尾における気候値の比較.

	年平均 気温 (°C)	年降 水量 (mm)	年蒸 発量 (mm)	年相対 湿度 (%)	年日照 時間 (h)	年平均 風速 (m/s)
深圳	22.0	1926.4	1759.1	79	2201.1	2.6
汕尾	22.1	1953.8	1780.4	79	2221.0	3.2

注1) 気候値は1953~1980年の28年平均値, 深圳気象台と汕尾気象台の気候データによる統計.
 2) 汕尾の年蒸発量は1953~1966年, 1974~1980年の平均値.



第2図 深圳と汕尾における月平均気温 (a)・月降水量 (b)・月平均相対湿度 (c) の年変化 (1961~1990年の平均値).

第3表 深圳と汕尾における都市化程度の比較.

	1979年		1988年		1997年	
	深圳経済 特別区	汕尾 市区	深圳経済 特別区	汕尾 市区	深圳経済 特別区	汕尾 市区
人口(万人)	2	不明	78.4	32.2	175.1	40.7
都市部面積 (km ²)	2.9	不明	61	4	101	10
域内総生産 GDP (億中 国元)	1.9	不明	115.6	4.1	950.4	19.3

注1) 人口・面積・域内総生産は深圳統計年鑑と広東省統計年鑑 (1980~1998年) による.
 2) 深圳経済特別区の総面積は142.8 km², 汕尾市の総面積は401 km².
 3) 都市部面積は深圳経済特別区と汕尾市における都市部分の面積.

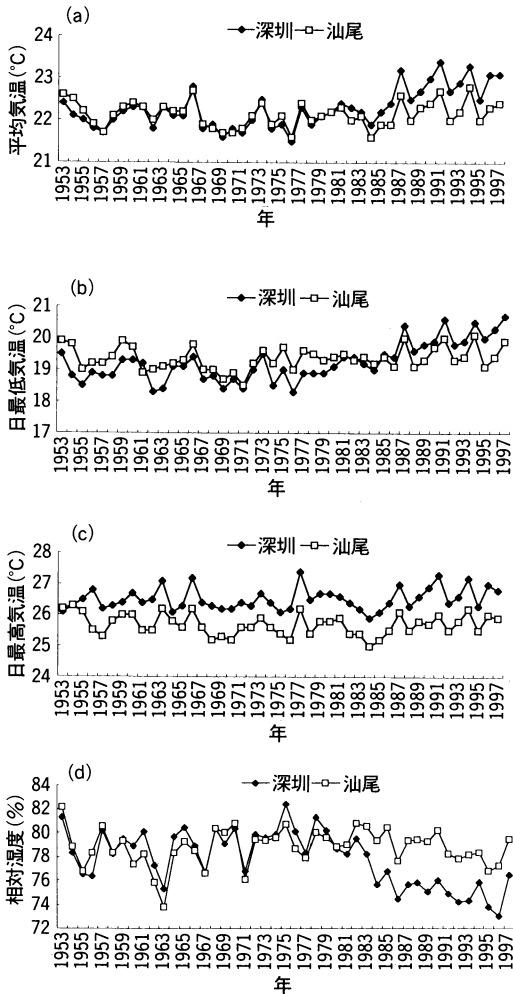
値を使用した. 都市関連データは, 深圳統計年鑑 (中国統計出版社, 深圳市統計局編集, 1980~1999年) から引用した. また, 深圳の都市化が1979年から始まったことを考慮し, $\alpha(S, C)_{(w)}^{30}$ の計算については, 1953~1982年の30年間の平均値ではなく, 1953~1979年の27年間の平均値を使用した.

3. 解析結果

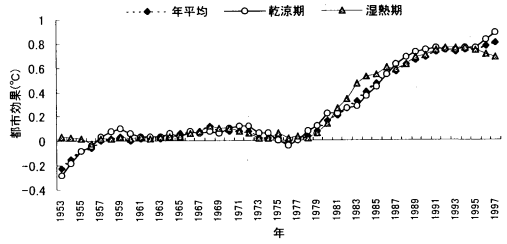
深圳と汕尾における月別気象データから年平均値を算出し, 気温・日最低気温・日最高気温・相対湿度について経年変化の特徴と都市化の影響を解析した.

3.1 気温・日最低気温・日最高気温・相対湿度の経年変化の特徴

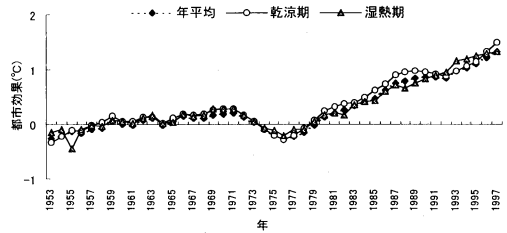
深圳と汕尾における平均気温・日最低気温・日最高気温・相対湿度の年平均値の経年変化を第3図 a, b, c, d に示す. 両地点における気温と相対湿度の変化は1953年から1979年までほぼ同様の経年変化を示すが, 1980年から差が現れ, 深圳は汕尾より平均気温は上昇し, 相対湿度は低下する. この変動の分岐点はちょうど深圳において都市化が開始した時期と一致しており, この時期から深圳における気温と相対湿度は都市化の影響を受け始めたことを示唆している. 日最低気温の経年変化については, 1953~1979年の間は1961年を除けば, 深圳の日最低気温が汕尾より低く, 平均すると-0.42°Cの差があったが, 1980年からその差が次第に小さくなり, 1985年から逆転して, 深圳の日最低気温が汕尾より高くなった. これは都市化の影響によって深圳の日最低気温が上昇したことを示唆している. 日最高気温の経年変化については, 1953~1979年



第3図 深圳と汕尾における平均気温 (a)・日最低気温 (b)・日最高気温 (c)・相対湿度 (d) の経年変化。



第4図 深圳における平均気温に現われた都市効果の経年変化。



第5図 深圳における日最低気温に現われた都市効果の経年変化。

市効果については、経年変化から都市化の影響が見られなかったため、ここでは省略した。

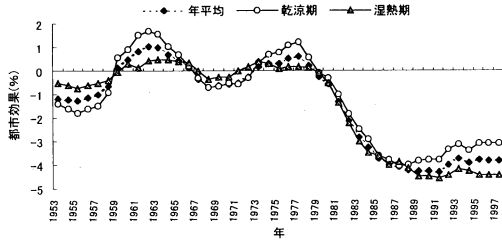
第4図～第6図は深圳における平均気温・日最低気温・相対湿度についての都市効果の経年変化を示す。1953年から1979年までの間に、年平均気温・年平均日最低気温・年平均相対湿度に現れた都市効果は 0°C 前後で緩やかに変化し、この期間の都市効果はほとんどなかったと考えられる。ところが、平均気温に現れる都市効果は1979年を境にして1991年まで急上昇する傾向を示し、その後、昇温の傾向が一時止まり、1992年以後は平均気温の都市効果は $0.7\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ の小幅で推移している(第4図)。日最低気温の都市効果は1980年から1997年まではほぼ直線的に上昇している(第5図)。相対湿度の都市効果は1979年から1987年まで急降下、1988年以後はほぼ -4% で一定している(第6図)。平均気温と相対湿度の都市効果に現れた急上昇(急降下)の後ほぼ一定で推移する変化のパターンは都市化の進行過程と関連があり、これについては、後で論述する。

1979～1997年間の深圳における平均気温・日最低気温・相対湿度に現れた都市効果の平均変化率を年平均・乾涼期・湿熱期について計算した(第4表)。乾涼期と湿熱期の都市効果変化率を比較すると、乾涼期における平均気温・日最低気温の上昇率は湿熱期より大

の間、深圳と汕尾が同じように上下しているが、1953年と1954年を除けば、深の日最高気温は汕尾の日最高気温より高く経過した。また、1980年代からは平均気温・日最低気温・相対湿度のような明確な変化が見られない。深圳における都市化は日最高気温に余り影響していないと考えられ、野口(1994)の「日最高・最低気温の永年変化に与える都市化の影響」における結果と一致した。

3.2 都市効果の経年変化

(4)式を使い、深圳における平均気温・日最低気温・相対湿度について年、乾涼期(10～4月)、湿熱期(5～9月)ごとに都市効果を推定した。日最高気温の都



第6図 深圳における相対湿度に現われた都市効果の経年変化。

第4表 都市化による平均気温・日最低気温・相対湿度の変化率 (1979~1997年)。

	年平均	乾涼期	湿熱期
平均気温 (°C/年)	0.040	0.042	0.038
日最低気温 (°C/年)	0.074	0.079	0.070
相対湿度 (%/年)	-0.199	-0.167	-0.240

大きく、乾涼期における相対湿度の低下率は湿熱期より小さい。その原因については、以下の一因が考えられる。即ち、都市域の地表面はアルベドが農村域より小さく、蒸発量が農村域より少ない。一般的に都市域においては空気の加熱に使われる顕熱が潜熱より大きく、都市化による昇温効果は空気と地表面が乾燥するほど著しくなると考えられる。深における乾涼期の降水量は湿熱期の32.7%、相対湿度は湿熱期の90.8%であり、このため乾涼期における平均気温・日最低気温の上昇率は湿熱期より大きくなると思われる。

算出期間と算出方法が異なるため、深圳における気温の上昇率と相対湿度の低下率について他の都市と単純には比較できないが、過去の研究で得られた東京・名古屋の年平均日最低気温の昇温率と東京の年平均相対湿度の低下率とともに第5表と第6表に示す。深における年平均日最低気温の昇温率は東京・名古屋より大きく、年平均相対湿度の低下率は東京より小さい。

4. 都市効果と都市規模の関係

都市効果が都市規模に左右されることについて、これまでの研究では、人口や都市面積を都市規模の共通指標として関係づけた解析が行われてきた(吉野, 1973; Fukuoka, 1983)。また、都市中心部に近いほど都市化の影響が強く現れるため、人口集中地区の面積や人口が都市効果と高い相関を持つことが報告されている(小林, 1990; 野口, 1994)。ここでは、深圳市の人口集中地区、即ち深圳経済特別区における

第5表 深圳・東京・名古屋における年平均日最低気温の都市化による昇温率。

	昇温率 (°C/年)	人口 (万人)	統計期間	統計方法	文献
深圳	0.074	379.6	1979~1997	小元(1982)	本研究
東京	0.052	854.3	1950~1988	主成分分析	野口(1994)
名古屋	0.040	216.0	1952~1989	比較法	足立(1997)

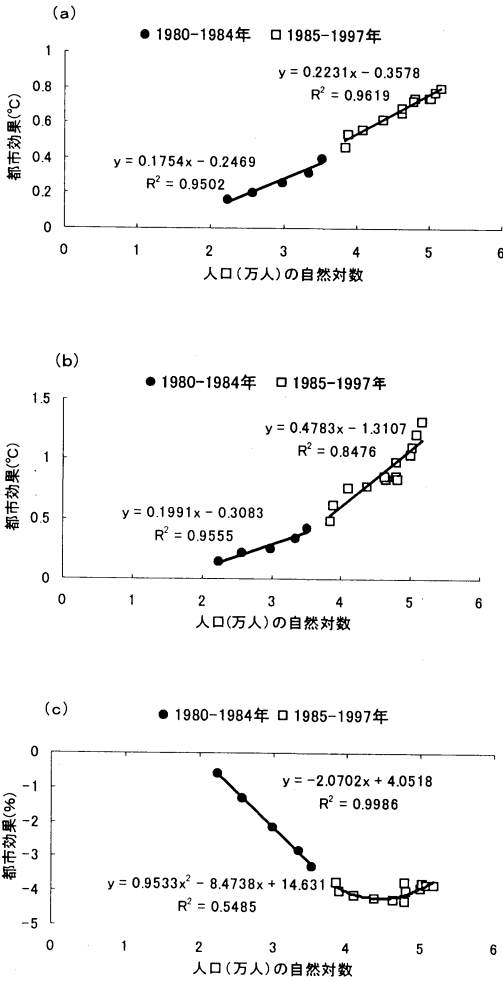
第6表 深圳・東京における年平均相対湿度の都市化による低下率。

	低下率 (%/年)	人口 (万人)	統計期間	統計方法	文献
深圳	-0.199	379.6	1979~1997	小元(1982)	本研究
東京	-0.267	854.3	1946~1975	小元(1982)	小元・體谷(1982)

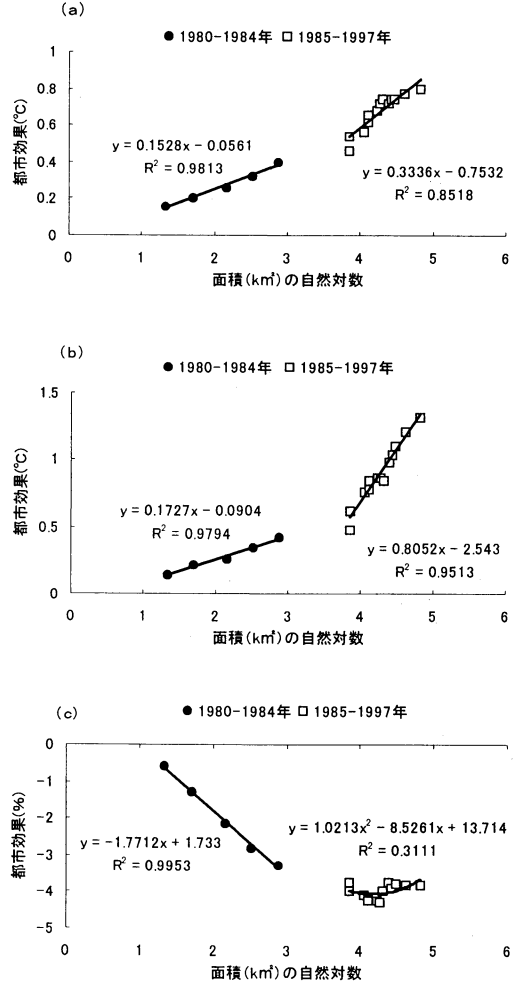
1980~1997年の人口あるいは都市面積(建設済みの都市部の面積)について、平均気温・日最低気温・相対湿度の都市効果との相関関係を解析した。

都市化が進んでいる他の都市と同じように、人口の増加と都市面積の拡大に伴い、都市効果が大きくなる傾向が見られ、人口と都市面積は平均気温や日最低気温との間に強い正の相関、相対湿度との間に強い負の相関がある(第7図, 第8図)。第7図を見ると、2つの期間に分けられ、平均気温と日最低気温の変化割合は1980~1984年の間は緩やかで、1985~1997年の間はそれ以前に比べ急激になった。1984年以前は深圳の人口は30万人以下であり、1984年に人口が33.75万人、1985年に46.98万人となった(第7表)。このような人口と都市化による昇温率もしくはヒートアイランド強度との関係が人口30万人付近で不連続となることは、これまでの研究結果(野口, 1994; Fukuoka, 1983; 朴, 1987)と一致した。相対湿度にも同じような傾向が現れている(第7図c)。都市化による気象要素変化率の不連続は人口だけではなく、都市面積においても現れた(第8図)。深圳の場合の都市面積と都市化による昇温率あるいは相対湿度の低下率については都市面積40~50 km²付近で不連続となった。

1979年から1997年まで深圳特区では人口と都市面積が連続的に増加しているが、人口と都市面積の比、すなわち人口密度の変化傾向は深圳都市化の進行過程によって2つの段階に分けられる(第9図)。1979~1989年の間の深圳は都市化の初期段階、即ち都市の形成及び建設の段階であり、人口と都市面積の急激な増加に



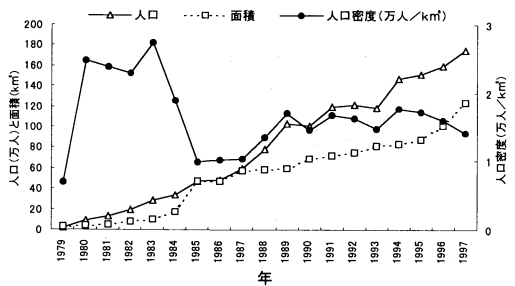
第7図 深圳特別区における平均気温 (a)・日最低気温 (b)・相対湿度 (c) の都市効果と人口 (自然対数) との関係。



第8図 深圳特別区における平均気温 (a)・日最低気温 (b)・相対湿度 (c) の都市効果と都市面積 (自然対数) との関係。

第7表 1983年～1985年における深圳特区の人口・都市面積と人口密度。データは深圳統計年鑑 (1980～1999年) による。

	人口 (万人)	都市面積 (km ²)	人口密度 (万人/km ²)
1983年	28.50	10.4	2.74
1984年	33.75	17.9	1.88
1985年	46.98	47.6	0.98



第9図 深圳における人口・都市面積・人口密度の経年変化。

よって人口密度が激しく変化する。一方、1990年からの深圳は次第に安定な発展段階に入り、人口と都市面積が増加しているが、人口密度は概ね1.5～2.0万人/km²の間で変動している。このような人口密度の変動

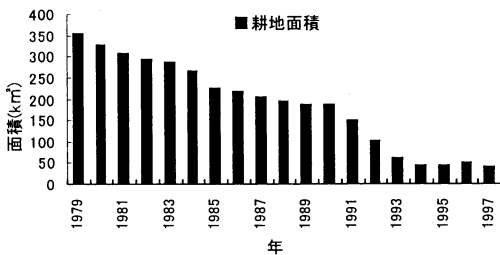
第8表 深圳市の1980年, 1988年, 1994年における土地被覆タイプ別面積比及びアルベド.

		高密度 都市用 地	低密度 都市用 地	水田	森林	果樹園	灌草地	湿地	裸地	水域
面積比 (%)	1980年	0	0.38	37.21	28.34	0	27.54	1.05	1.22	4.25
	1988年	0.10	9.68	26.26	27.43	24.99	0	5.16	2.21	4.17
	1994年	0.28	32.62	7.99	25.39	22.78	0	1.29	3.85	5.81
アルベド		0.10	0.13	0.18	0.20	0.20	0.20	0.15	0.30	0.10

注1) アルベドは Brest (1989) と下堂園ほか (1995) による.

2) 土地被覆タイプ別面積は陳ほか (1998) による.

3) 面積比は土地被覆タイプ別面積と深圳市総面積との比である.



第10図 深圳における耕地面積の経年変化.

に伴う都市化進行過程の特徴は, 都市気候上にも反映されている. 3節で記述した気温と相対湿度に現れた都市効果の急上昇(急降下), その後のほぼ一定の変化パターンはこの都市化進行過程の特徴と一致するもので, 気温と相対湿度の変化パターンは人口密度との間に関連があるのではないかと考えられる.

5. 都市効果と土地被覆変化との関係

都市規模の拡大によって都市近辺にある耕地・林地・湿地・水域等が都市用地に転用され, 元来の地表面とは物理的な被覆状態が大きく変化している. これに伴う広範囲の地表面アルベドの変化は都市の熱環境にも影響を及ぼし, 都市気温を上昇させる原因の1つになったと考えられる.

深圳においては, 都市用地の増加は主に耕地面積の減少によるものであり, 1979~1997年の間に, 312.33 km²の耕地が都市用地に転用された(第10図).

このような激しい土地被覆の変化が都市気候にどのような影響を与えるかを明らかにするため, ここで土地被覆変化による都市域の面的なアルベドの変動を表す指標として, 研究対象域の j 年における面平均アルベド $A_s(j)$ を以下のように定義する.

第9表 深圳市の面平均アルベドの変化.

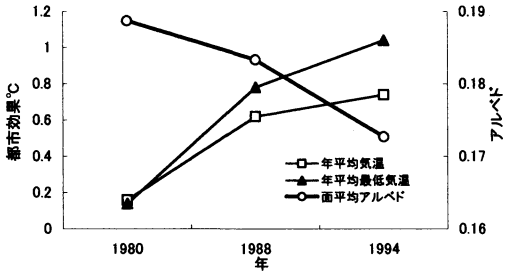
	1980年	1988年	1994年
面平均アルベド	0.1887	0.1833	0.1727

$$A_s(j) = \sum_{i=1}^n A_i \times S_{ij} \quad i=1,2,3,\dots,n(n \geq 1) \quad (5)$$

ただし, A_i は第 i 種土地被覆タイプのアルベド, S_{ij} は j 年における第 i 種土地被覆タイプの面積比, n は土地被覆タイプ数である. j 年における面平均アルベド $A_s(j)$ の値は当年の各土地被覆タイプ面積の増減によるものとなり, 都市化の進展によってもたらされる都市全域の被覆タイプの面的な変化に対するアルベドの変化を反映していると考えられる.

このような考えに基づき, 深圳における1980年, 1988年, 1994年の土地被覆データを利用した. この3年の土地被覆データは, 1980年のLANDSAT-MSSデータ, 1988年と1994年のTMデータを最大尤度法によって分類して求められたものである(陳ほか, 1998). この分類方法は, まずLANDSATによって撮影されたデータに幾何補正, 大気補正や太陽高度角補正を行い, 補正後のデータから土地利用タイプごとにトレーニングデータを選定し, 最大尤度法で土地利用タイプ进行分类する. 次に土地被覆タイプ毎の総面積について深圳市総面積に対する比(面積比)を算出する.

土地被覆タイプ毎のアルベドについては, 現地での実測データがないため, これまでの関連ある研究結果を引用した. 深圳における都市用地の特徴(特に道路の舗装物, 建物の建築材料, 屋根の舗装物等)を考慮し, Brest (1989) と下堂園ほか (1995) の結果を利用してアルベドの値を求めた(第8表). (5)式を用いて1980年, 1988年, 1994年の A_s を求めた結果を第9表に



第11図 深圳市の1980, 1988, 1994年における気温・日最低気温と面平均アルベドとの関係

第10表 解析に用いた都市気象に影響を与える人間活動の指標

エネルギー消費	道路、交通状況と温室効果気体の排出	産業活動と消費活動の水準
石油ガス使用量	道路の面積 バスとタクシーの台数 SO ₂ 排出量	域内総生産 (GDP) 商品の小売総額 住宅面積

注：指標は深圳統計年鑑（1980～1999年）から抽出した。

第11表 人間活動の指標と都市効果との単相関分析結果（1982～1997年）

	年平均気温		年平均日最低気温		年平均相対湿度	
	単相関係数	判定	単相関係数	判定	単相関係数	判定
石油ガス使用量	0.707	**	0.856	**	-0.165	—
道路面積	0.891	**	0.970	**	-0.515	*
バスとタクシーの台数	0.828	**	0.906	**	-0.335	—
SO ₂ 排出量	0.620	*	0.804	**	-0.199	—
域内総生産 (GDP)	0.726	**	0.872	**	-0.189	—
商品の小売総額	0.758	**	0.891	**	-0.228	—
住宅面積	0.860	**	0.945	**	-0.362	—

注) *：危険度5%で有意，**：危険度1%で有意，—：危険度10%で有意でない。

示す。第9表を見ると、年次が経るにしたがって、アルベドが小さくなっており、深圳市都市規模の拡大による影響と思われる。さらに、この3年について $As(j)$ と当時の年平均気温・年平均最低気温に現れた都市効果を示したものが第11図である。 $As(j)$ 値の変動は年平均気温・年平均最低気温の上昇傾向と一致している。衛星データが3年分しか収集できなかったため、毎年の都市効果とどの程度の相関関係を持つかは断言できないが、土地被覆の変動によってもたらされる広範囲の地表面アルベドの変化が、都市気候に影響を及ぼすことが強く示唆される。

6. 都市効果と人間活動との関係

都市効果を生じさせる原因としては、都市の立地条件・人口・空間スケール・土地被覆状態などの外に、都市で行われる人間の活動、すなわち人間の生活活動と経済活動が考えられる。ところが、人間活動そのものは極めて複雑であり、それを指標化して気象要素との関係を議論しようとする場合、指標の選択に任意性があり、選んだ指標について気象要素との関係について十分な解析を行えないことがある。

ここで、1つの試みとして、都市の気象要素に影響を与える可能性のある人間活動として、エネルギー消費による熱の排出、道路・交通状況および温室効果気体の排出、人間活動の頻度または程度を表現する産業活動と消費活動の水準の3つの要因を考え、以下のように7つの指標（第10表）を選び出し、深圳特区における各指標と年平均気温・年平均最低気温・年平均相対湿度に現れる都市効果との相関関係を解析した（第11表、第12表）。

第11表には各人間活動として考えた指標と年平均気温、年平均日最低気温、年平均相対湿度との単相関分

析結果を示す。各指標は年平均日最低気温に現れる都市効果との相関係数がもっとも高く、すべて危険度1%で有意である。年平均相対湿度に現れる都市効果との相関係数はもっとも低く、道路面積を除けば、すべて危険度10%で有意でない。実際には人間活動が都市効果に与える影響は単一ではなく、いろいろの要素が混在して影響を与えているため、各指標の単相関係数からだけでは、ある指標の影響が大きいと判断することは難しい。どの指標の影響が大きいかを明らかにするため、各指標と年平均気温・年平均最低気温・年平均相対湿度に現れる都市効果との重相関関係を解析した（第12表）。年平均気温の都市効果については、道路面積、住宅面積、バスとタクシーの台数との偏相関係数が危険度1%で有意となった。石油ガス使用量との偏相関係数が危険度5%で有意であるが、負の相関である。一方、年平均日最低気温と年平均相対湿度については、道路面積との偏相関係数だけがそれぞれ危

第12表 人間活動の指標と都市効果との重相関分析結果 (1982~1997年).

	年平均気温		年平均日最低気温		年平均相対湿度	
	単相関係数	判定	単相関係数	判定	単相関係数	判定
石油ガス使用量	-0.7614	*	-0.2289	-	0.5524	-
道路面積	0.9283	**	0.7602	*	-0.8580	**
バスとタクシーの台数	0.7904	**	0.2184	-	-0.5192	-
SO ₂ 排出量	0.1239	-	-0.0478	-	-0.1990	-
域内総生産(GDP)	-0.0945	-	-0.1052	-	0.0504	-
商品の小売総額	-0.4864	-	0.0272	-	0.2212	-
住宅面積	0.8112	**	0.1293	-	0.0396	-
重相関係数	0.9979	**	0.9894	**	0.9724	**

注) *: 危険度5%で有意, **: 危険度1%で有意,
-: 危険度10%で有意でない.

危険度5%と1%で有意である。即ち、平均気温・日最低気温・相対湿度に現れる都市効果すべてと有意な相関がある人間活動指標は道路面積だけとなった。この結果から、この7つの指標の中で、道路面積が都市効果に与える影響が一番顕著であることが示唆される。

道路面積の増加によって地表面のアルベドが低くなり、地表面による日射の吸収と長波放射の増加が考えられる。また、道路は雨水の土壌への浸透と土壌水分の蒸発を抑制し、空気中の水蒸気含量を低下させることも考えられる。日平均気温と日最低気温が上昇し、相対湿度が低下した原因の1つとしてこの道路面積の増加を考えることが出来る。

7. まとめ

中国深圳市における急激な都市化が都市気候に与える影響を明らかにするために、深圳と都市化が進んでいない汕尾の平均気温・日最低気温・相対湿度を比較し、都市気候への影響度合—都市効果を抽出した。また、都市効果が都市規模、土地被覆の変化、人間活動などどのような関係にあるかについて解析を行った。その結果、以下のことが明らかにされた。

- (1) 深圳市では1979年~1997年の19年間の急激な都市化の進行によって、気温・日最低気温・相対湿度に著しい都市効果が現れたが、日最高気温にはほとんど現れなかった。この結果は野口(1994)と

小元・鱧谷(1982)の研究結果と一致した。また、気温・日最低気温については、乾涼期(10~4月)を中心に気温の上昇率が大きく、相対湿度については湿熱期(5~9月)を中心に相対湿度の低下率が大きいことが分かった。都市化による相対湿度の低下率が湿熱期において著しいという特徴は、温帯都市を中心とするこれまでの都市気候の研究報告の中にこれまで見られていない結果である。

- (2) 深圳における平均気温・日最低気温に現れる都市効果は人口及び都市面積の対数と強い正の相関があり、相対湿度に現れる都市効果は人口及び都市面積の対数と強い負の相関がある。また、人口30万人付近の不連続が都市化による気温上昇の度合だけではなく、相対湿度低下の度合にも存在した。この不連続の傾向が都市面積においても現れた。
- (3) 深圳における都市化は人口と都市面積が急激に増加する最初の段階—都市の形成及び建設段階(1979~1989年)から、人口密度が概ね1.5~2.0万人/km²の間で変動する安定な発展段階に入ることによって、気温と相対湿度の都市効果にも急上昇(急降下)からほぼ一定となる変化のパターンが現れ、都市効果の経年変化と都市化の進行段階との関連が示唆された。
- (4) 都市規模の拡大に伴う土地被覆特性の変化が、広範囲にわたる地表面アルベドの変動をもたらし、都市気温を上昇させる要因となっていることが考えられた。
- (5) 都市効果に影響を与える人間活動の指標のうち、深圳の場合は道路面積が顕著であった。

謝辞

本研究を行うに当たり、九州大学大学院工学研究科 陳晋博士から、衛星データによる深圳土地被覆分類及び面積データを利用させて頂いた。また、中国教育部帰国留学生研究助成金「都市化過程が地域における生態環境に対する影響分析」(代表・李寧)および山口大学日中学術交流基金「中国の環境評価と環境修復・緑化技術の開発」(代表・早川誠而)の一部を利用させて頂いた。

参考文献

- 足立アホロ, 1997: 経済活動が都市温度に及ぼす影響—名古屋を例として—, 天気, 44, 621-629.
Brest, C. L., 1989: Seasonal albedo of an urban/rural

- landscape from satellite observations, Proc of the Workshop on saving Energy and Reducing Atmos. Pollution by Controlling Summer Heat Islands, Berkeley, CA. Feb., 238-255.
- 陳 晋, 藤倉 良, 井村秀文, 1998: 中国深圳市の経済発展と土地利用変化に関する研究, 環境システム研究, 26, 279-287.
- 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.
- Fukuoka, Y., 1983: Physical Climatological Discussion on Causal Factors of Urban Temperature, Mem. Fac. Integr. Arts Sci., Hiroshima Univ., 8, 157-178.
- 福岡義隆, 高橋日出男, 渡辺誠一, 増野 茂, 1993: 都市規模の増大に伴うヒートアイランドの変化, 日本地理学会予稿集, 44, 98-99.
- 一ノ瀬俊明, 1997: 都市気候学に関する国際会議(ICUC'96)に参加して, 天気, 44, 137-141.
- 一ノ瀬俊明, 下堂園和宏, 鶴野伊津志, 花木啓祐, 1997: 細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション地表面境界条件の高精度化, 天気, 44, 785-797.
- 河村 武, 1977: 都市気候の分布の実態, 都市気候に関する最近の展望, 気象研究ノート, 133, 26-47.
- 小林 守, 1990: 関東平野の諸都市の都市規模と都市ヒートアイランド強度, 都市化進展に伴う都市気候の変化に関する研究(西沢利栄編), 昭和61年度~平成元年度科学研究費補助金(一般研究(A))研究成果報告書, 55-61.
- 玄地 裕, 大谷武弘, 天野治男, 小杉信明, 長 豊, 長本英俊, 小宮山 宏, 1998: 都市ヒートアイランド現象が地温に与える影響-東京都内における観測結果一, 天気, 45, 707-715.
- 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.
- 森 牧人, 武政剛弘, 小林哲夫, 薦田広章, 1997: 長崎市中心地域における夜間の気温構造と局地風, 天気, 44, 113-120.
- 野口泰生, 1994: 日最高・最低気温の永年変化に与える都市化の影響, 天気, 41, 123-135.
- Oke, T. R., 1973: City size and urban heat island, Atmos. Environ., 7, 769-779.
- 小元敬男, 鱧谷 憲, 1979: 気象官署のデータからの都市気候効果の消去の試み, 農業気象, 35, 93-96.
- 小元敬男, 鱧谷 憲, 1980: 気象官署のデータからの都市気候効果の消去の試み(2), 農業気象, 36, 203-206.
- 小元敬男, 鱧谷 憲, 1982: 日本の都市気象台における近年の湿度の低下について, 天気, 29, 73-80.
- 朴 恵淑, 1987: 日本と韓国の諸都市における都市規模とヒートアイランド強度, 地理学評論, 60, 238-250.
- 榊原保志, 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.
- 深圳自然資源と経済開発編集委員会, 1996: 深圳自然資源と経済開発, 広東科技出版社.
- 下堂園和宏, 一ノ瀬俊明, 鶴野伊津志, 花木啓祐, 1995: 土地利用および人間活動の都市気候へのインパクト評価: 一東京23区を例にして一, 環境システム研究, 23, 347-351.
- 杉本荘一, 近藤純正, 1994: 仙台市におけるヒートアイランドと各種地表面温度の日変化の観測, 天気, 41, 541-544.
- 山地一代, 米谷俊彦, 森 征洋, 1999: 香川県の都市域における気象要素の経年変化と地表面状態の変化, 天気, 46, 197-204.
- 安成哲三, 山根理子, 1990: 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, 昭和61年度~平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書, 73-81.
- 吉野正敏, 1977: 日本および外国の諸都市における気候の変化, 気象研究ノート, 133, 1-25.

The Change of the Urban Climate with the Rapid Urbanization For Instance in ShenZhen City of China

Wei GU*, Seiji HAYAKAWA**, Ning LI* and Nan MA*

* Institute of Resource Sciences, Beijing Normal University.

** (Corresponding author) Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, 1677-1, Oaza Yoshida, Yamaguchi, 753-8515 Japan.

(Received 22 February 2000 ; Accepted 1 May 2001)