

日本の諸都市における人口とヒートアイランド強度の関係

榊 原 保 志*・北 原 祐 一**

要 約

都市の人口とヒートアイランド強度との関係を調べるため長野県佐久市と浅科村の6集落において、自動車による気温の移動観測を149回実施した。その結果、晴天日中、曇天夜間、晴天夜間のいずれのケースにおいても各集落の平均ヒートアイランド強度と人口の間には対数比例の関係が認められた。回帰線の傾きについては晴天日中と晴天夜間は同程度であったが、曇天夜間はそれらに比べ小さい。平均ヒートアイランド強度の季節変化については夜間には明瞭な違いが認められないが、日中には夏季がほかの季節と比べ大きいことがわかった。また、今回の調査集落のほか、1年間を通じて観測があった日本の諸都市における観測結果を加えて、最大ヒートアイランド強度と人口の対数との関係を調べた。その結果、回帰線は30万人付近で折れ曲がるのではなく一本の直線で表現された。

1. はじめに

ヒートアイランド強度と都市規模との関係を最初に論じたのはChandler (1967)である。彼は人口が大幅に異なる2つの都市、ロンドンとレスターにおいて夏季晴天静夜に3回観測し、2つの都市のヒートアイランド強度が同程度であったことから、都市規模の違いはヒートアイランド強度に影響せず、むしろ建物密度(それによる熱容量と都市キャニオンの形)の方が重要であるとした。その後、Oke (1973)はヒートアイランド強度と都市規模との関係を巧妙な方法で調べている。彼は気象条件、地形、水体(海、湖、大きな川など)、観測時刻および測器による影響を少なくするために、同一平地の10都市を巡回する移動観測を採用し、都市規模を表す指標として用いた人口がヒートアイランド強度と対数比例の関係にあることを示した。さらにこれまで報告された欧米における観測結果を基に最大ヒートアイランド強度と人口の間には対数比例の関係があることを示した。

これに対し、日本の諸都市ではヒートアイランド強

度と人口の対数との回帰線が人口30万人付近で折れ曲がるとする報告(Fukuoka, 1983)がある。これは、日本の都市における最大ヒートアイランド強度は欧米の同規模の都市と比較してやや小さい値を示すのに対して、人口30万人以下の小中規模都市では欧米と比べてかなり小さな値を示すことを意味する。朴 (1987)は日本のみでなく韓国の諸都市においても同様な傾向があることを示した。

その後、小林 (1990)は関東平野の諸都市について同時観測を行い、人口の対数とヒートアイランド強度との回帰線は一本の直線で表せるとしている。このように日本における人口とヒートアイランド強度との関係は二つの異なる説が存在する。

本研究では日本における都市規模とヒートアイランド強度との関係を検討することを目的とする。そこで、これまでの小中規模都市のデータが不足していると考え、小集落が点在する長野県佐久市と浅科村において自動車による移動観測を行った。そして集落別のヒートアイランドの強度を求め、日本の都市規模とヒートアイランド強度との関係を検討した。

2. 方法

2.1 調査対象地域

調査を行った佐久市は長野県の東部に位置し、総人

* 信州大学教育学部, ** 長野県立丸子実業高等学校。
—2002年1月18日受領—
—2003年6月2日受理—

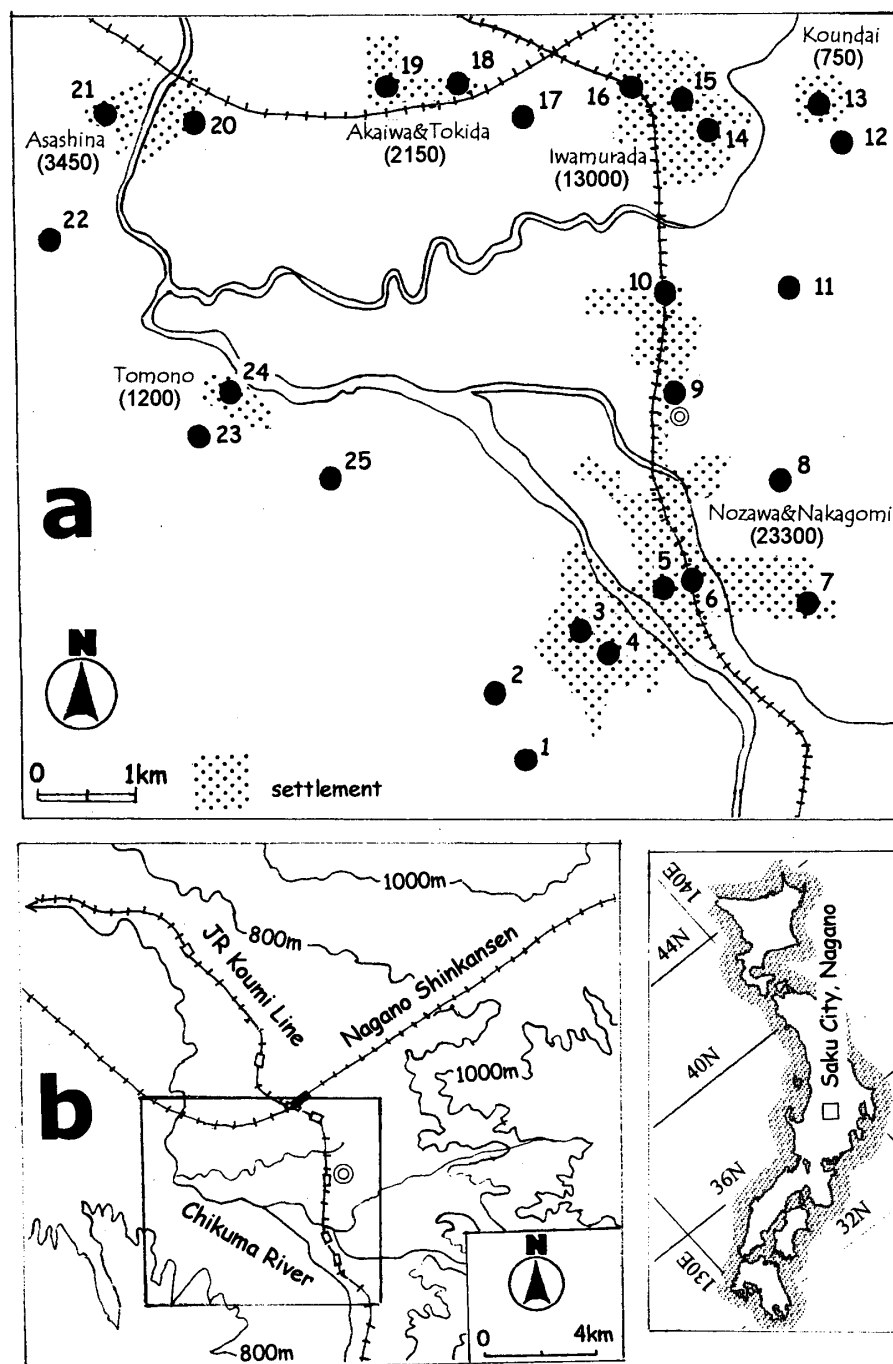
口は6万6千人(1998年2月1日現在)である。佐久市は佐久平と呼ばれる盆地のほぼ中央部にあり、同市南部の800 mの等高線から南側では土地の傾斜はきわめて緩く、市域では平均 0.7° 以下であり、平坦地に属する(第1図)。この平坦地に耕地や集落は集中し、古くから稲作が行われていた。市街地には2~3階建ての建物があり、商店街や住宅からなる。郊外に見られる農耕地の多くは水田である。

佐久地域は寒暖の差が大きく雨量の少ない内陸性気候である。気温の年較差は 25°C に達し、日較差も夏冬共に比較的大きい。年間降水量は900 mmと北海道の網走、長野県の上田に次いで少ない地域とされる。

この佐久地域を研究対象とした理由は、①市街地がまとまって1か所に集中することなく集落単位で分散しているため、同一の気象条件下で都市(集落)規模とヒートアイランド強度との関係を調べるのに適していること、②年間を通じて晴天日数が多い気象条件が、ヒートアイランド現象の研究に適することである。

2.2 観測方法

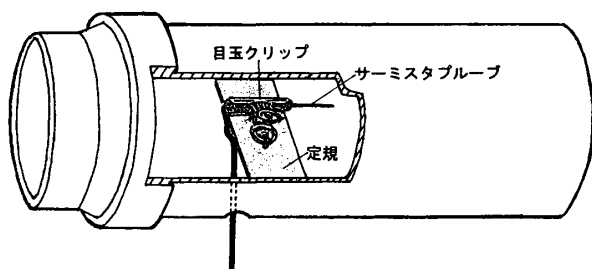
観測に用いた温度センサはサーミスタ(日置電気(株)製、9021-01)である。これを3 mの延長コードにより車内にあるハンドヘルドコンピュータ(EPSON製、HC-40)と接続し、示度をコンピュータに読み取らせた。観測終了後、RS232Cケーブルを経由してノート型パソコン(NEC製、PC9801NS)にデータを転送した。



第1図 Research area in this study.

◎: AMeDAS (Saku), ●: Observation sites, (): population.

直径107 mm, 厚さ3 mm, 長さ360 mmの円筒形の放射よけ内部にセンサを固定した(第2図)。放射よけの外側はアルミシートで覆い、これと直径80 mm, 長さ3000 mmの塩化ビニルパイプをコネクタによって接続し、センサ部が自動車の前方バンパーの上方1.5 mになるように、ルーフキャリアの進行方向右側に固定した。この位置はセンサがエンジンから生じる熱の影響を最も受けにくい位置とされる(佐橋, 1983)。また、



第2図 Radiation shield.

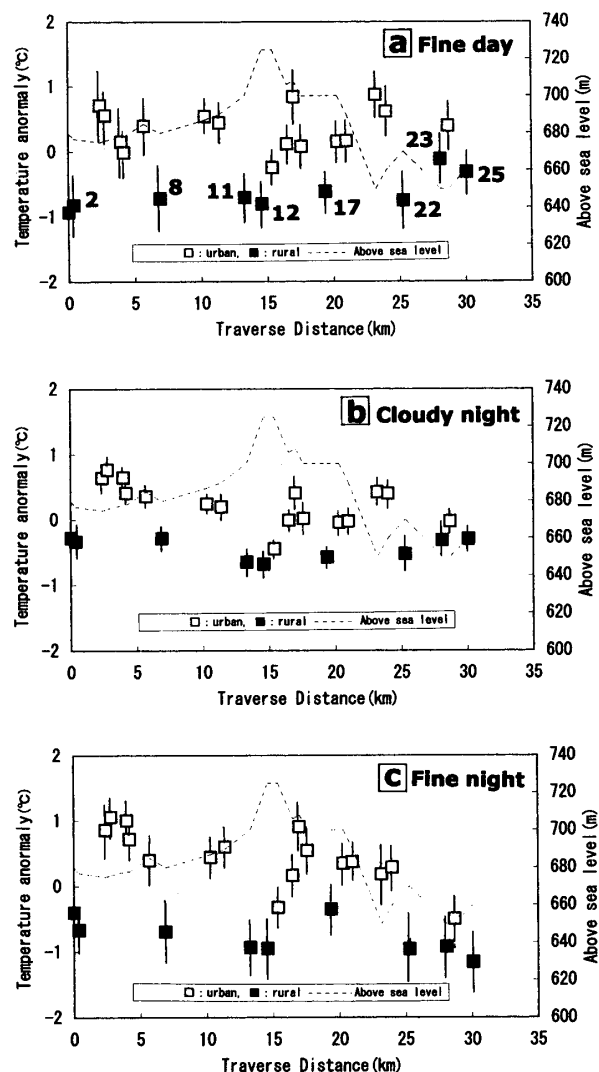
30～50 km/h 程度で走行しながら測定を行うため特別な通風装置は付けなかった。

移動観測の走行ルートは、佐久地域の集落のうち、他の集落との境が明瞭で郊外の地点が選びやすいことを考慮して、人口が750～23,300人の範囲にある6集落を選んだ。そして、数回の予備観測を経て、それら集落の高温を記録する地点と水田域中央部のような典型的な郊外の景観を有する地点を観測点として決めた。総観測地点数25か所を、第1図aに見られる地点番号順に移動した。それぞれの集落の名称、人口は第1図aのとおりである。総走行距離は約30 km、1回の観測に約1時間を要した。自動車による気温の移動観測の精度は0.5℃程度であるとされる(田宮, 1979)。

Oke (1973) の都市巡回型移動観測では都市通過に要した時間がいずれも10分間未満であったため、時差補正の必要はないと判断している。また、田宮・大山(1981)は時差補正による新たな誤差導入を避けるため、観測時間を短くすることによって補正を行わないとしている。本研究においても、野沢・中込の集落通過に10数分間を要した以外は、いずれも10分間以内で各集落を通過しており、後述する各集落毎のヒートアイランド強度を算出する上では、時差補正の必要性はないと考えた。

集落内外で気温差を求めるために用いた地点間の高度差が最大であった集落は野沢・中込と岩村田で、ともに25 mと極めて小さい。標準大気を仮定すると、この高度差による気温差は0.16℃と小さいので、高度補正についても必要なしとした。

観測は晴天日中、および曇天日と晴天日の夜間に実施した。この場合の晴天とは雲量4未満、曇天とは雲量9以上と分類した。既存の気象観測所が佐久アメダスしかないため(第1図aの◎印)、雲量は筆者らの目視による。観測時間帯は14時と21時前後とした。14時は1日における最高気温出現付近の時間帯、21時はヒートアイランドが最も発達する日没後数時間の時間



第3図 Traverse distance from station No.1 and nocturnal mean temperature in observation stations. □ : Urban (settlement), ■ : Rural.

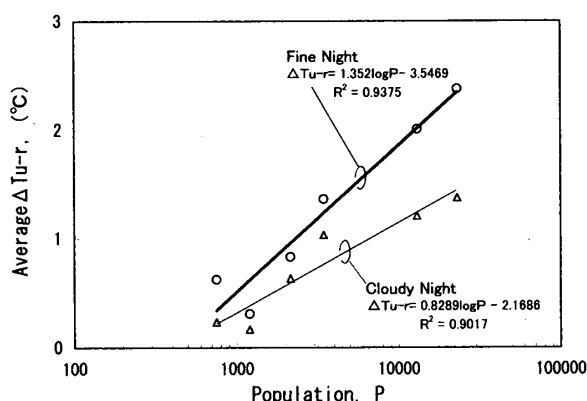
帯(たとえば, Oke, 1973)に相当する。観測は1998年4月から1999年3月にかけて、昼夜を合わせ延べ149回行った(第1表)。

3. 平均気温分布とヒートアイランド強度の算出

ヒートアイランド強度の算出には都市と郊外の地点の選択方法が問題になる。どちらの地点も典型的な景観を有することは不可欠である。都市の地点には建物が建ち並び人が集まる繁華街を選び、郊外の地点には比較的大規模な水田、畑、果樹園、裸地などで、かつそれらの地域中央を走る道路上の地点を選ぶべきだろう。なお、道路上の地点としたのは自動車による移動観測を行う上での制約である。今回の調査で郊外とし

第2表 Settlements and classification of observation points.

Settlement	Urban	Rural
Nozawa & Nakagomi	3-7, 9, 10	1, 2, 8, 11
Koundai	13	12
Iwamura	14-16	12, 17
Akaiwa & Tokida	18, 19	17
Asashina	20, 21	22
Tomono	24	23, 25



第4図 Relation between settlement population and the average of nighttime heat island intensity. ○: Fine day, △: Cloudy day.

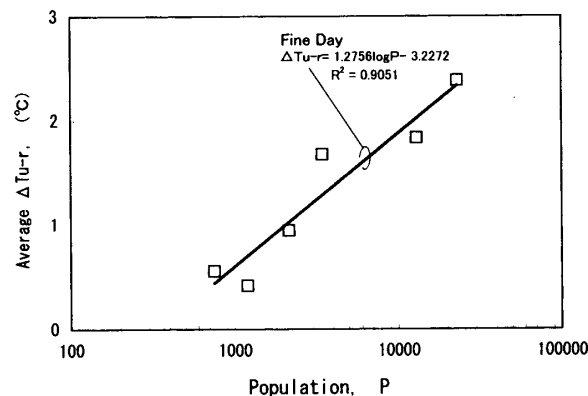
た結果であり、当地域の代表的郊外の地点を特定の1地点で代表させることは危険であることを意味する。

Oke(1973)は、ヒートアイランド強度 ΔT_{u-r} を都市中心部の最も高かった気温 T_u と都市周辺郊外における都市が存在しなかったときのバックグラウンドとなる気温 T_r の差と定義した。 T_u の決定は難しいことではないが、 T_r は簡単ではない。どの範囲までをその都市の郊外とするかで ΔT_{u-r} の値が変わるからである。

郊外の範囲の決め方は単純ではない。しかし、集落に隣接する郊外の気温はバックグラウンドの気温と同じではないものの、それに近いものと考えられる。そこで、集落に隣接する郊外の範囲を便宜的に集落市街地最外郭から1 km 以内とした(第2表)。郊外の地点はこの範囲内における比較的大きな水田域内の地点とし、郊外の候補地点が複数ある集落ではそれらの中から最も低い気温をその集落のバックグラウンドの気温 T_r と見なした。

4. 平均ヒートアイランド強度と集落人口

夜間の観測日を晴天日と曇天日にわけ、集落人口を



第5図 Relation between settlement population and the average of daytime heat island intensity.

対数軸にとり平均ヒートアイランド強度との関係を検討した(第4図)。なお、夜間晴天日と夜間曇天日における風速の平均はそれぞれ0.8 m/s, 1.0 m/sであった。

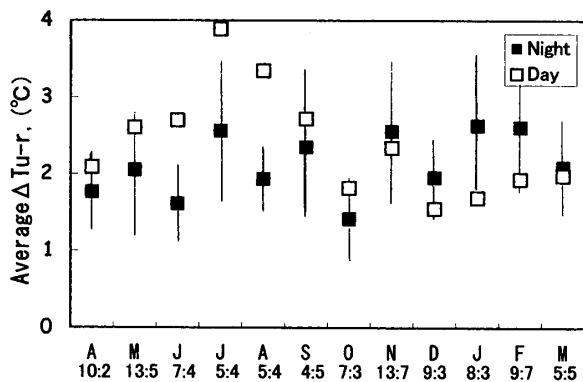
図から分かるように、曇天日、晴天日のどちらも明瞭な相関が見られる。また、晴天日夜間の回帰線の傾きは曇天日夜間よりも大きい。榊原・三枝(2002)によれば晴天日の月平均ヒートアイランド強度は曇天日より大きい傾向があるとされ、今回の結果と一致する。

次に昼間晴天日(平均風速2.3 m/s)におけるヒートアイランド強度と集落人口との関係を第5図に示す。昼間においても両者には対数比例の関係があることが分かる。そして、第4図の夜間晴天日と比較すると、平均風速は異なるものの夜間晴天日と昼間晴天日の回帰線の傾きや切片はほとんど同じである。

5. 平均ヒートアイランド強度の季節変化

ヒートアイランド出現の季節変化を調べるため、最も大きな集落の野沢・中込における月平均ヒートアイランド強度を夜間と昼間に分けて求め、その年変化を示したものが第6図である。図の一番下に示した2つの数字は、左側のものが夜間の月別事例数であり、右側が昼間の事例数である。また、夜間は事例数が多いので標準偏差のエラーバーを付けた。図から分かるように、夜間には年変化らしいものは見られない。それに対し、昼間には、灌水期の夏季に最大、秋季から冬季にかけて最小となる変化を示している。

このような季節変化が人口と平均ヒートアイランド強度との関係において生じているのかを調べる。当地域では郊外の水田に水が張られる灌水期は5月中旬か



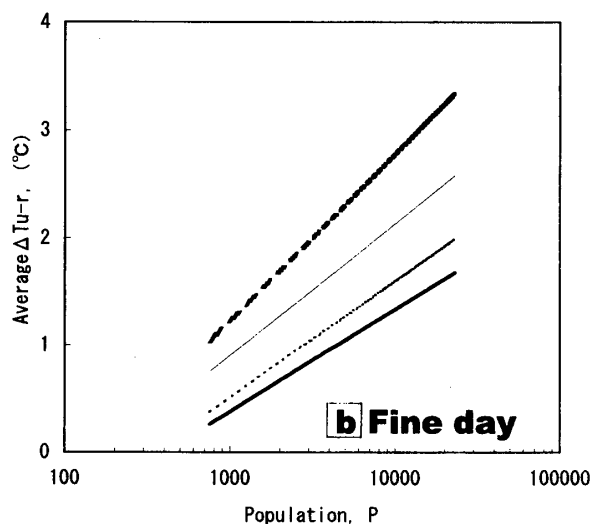
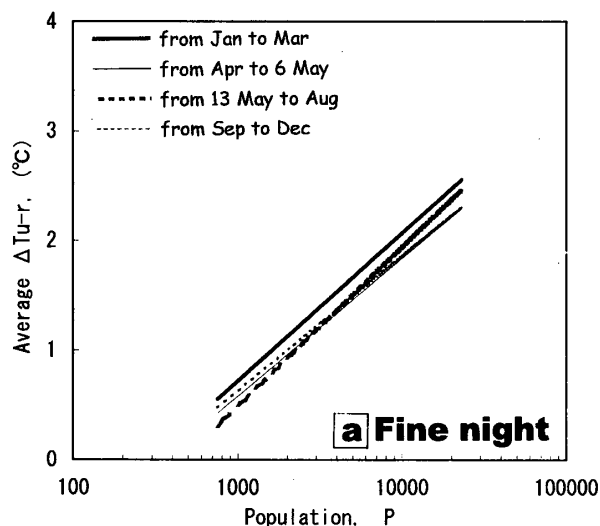
第6図 Seasonally change of monthly mean heat island intensity in Nozawa & Nakagomi settlement.

ら8月である。また、郊外に限らず観測ルート全体において、凍結路および圧雪路になる可能性のある時期が1月から3月である。この地表面被覆の違いにより1年を4つの期間に区分し、その期間別、日中・夜間別に晴天日における人口と平均ヒートアイランド強度との関係を第7図に示す。いずれの期間においても平均ヒートアイランド強度は集落人口の対数と相関係数0.9程度の高い相関があった。夜間晴天日にはそれぞれ回帰線がほぼ重なり期間別の差異を見出すことができないが、昼間晴天日には期間別の違いが明瞭である。そして5月中旬から8月の回帰線が他の期間より上に位置する。

昼間のヒートアイランド現象が夜間と決定的に異なるのは、日射の影響を直接受けることである。この影響により水田域では潜熱が増大し日中の水田域の気温上昇を妨げるように作用する。夜間の場合は日射による潜熱フラックスの季節変動が小さいために回帰線に違いがなかったものと考えられる。この点については榊原（1994，1999）においても同様の報告がなされている。

6. 最大ヒートアイランド強度と人口の関係

最大ヒートアイランド強度 $\Delta T_{u-r(max)}$ と人口との関係を検討する(第8図)。ここでいう最大ヒートアイランド強度とは、夜間におけるヒートアイランド強度の年間最大値であり、理想的な気象条件下でヒートアイランドが顕著に発達したときに生じる値とする。これを用いることで気象条件の違いによるヒートアイランド強度の差異は小さくなると思われる。なお、前章で用いたヒートアイランド強度は年平均したものであり、ここで用いる最大ヒートアイランド強度とは異なる。

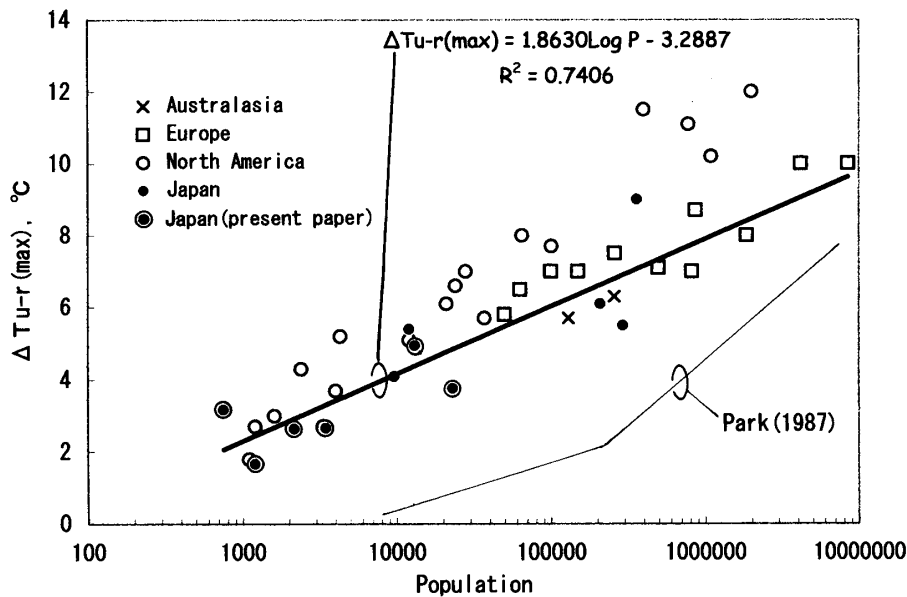


第7図 Relation between settlement population and the average of heat island intensity in seasonally classification.

る。たとえば、野沢・中込の集落において両者を比較すると、夜間晴天時の平均ヒートアイランド強度は2.6°Cであり、最大ヒートアイランド強度は3.7°Cと4割程度大きい。

この図の Australasia, North America と Europe については Oke (1981) によるもので、折れ曲がった線は朴（1987）が選んだ日本の諸都市による回帰線である。今回日本の諸都市として用いた回帰線は太線で示した。佐久地域の集落の他は、1年間を通して観測があった都市のデータを利用した（第3表）。

図から分かるように日本の回帰線は一本の直線で表されたヨーロッパの諸都市のものに近い。このことは朴（1987）が示した日本や韓国の結果と明らかに一致しない。



第8図 Relation between settlement population and the maximum nocturnal heat island intensity in Japan, North America, Europe and Australasia. A bold line indicates regression of Japanese settlements.

第3表 Maximum heat island intensity and population for Japanese settlements.

Settlement	Observation Year	P ($\times 10^3$)	$\Delta Tu-r(max)$ ($^{\circ}C$)
1. Asahikawa	1998/1999	362	9.0
2. Koshigaya	1992/1993	292	5.5
3. Matsumoto	1999/2001	208	6.1
4. Obuse	1996/1997	12	5.4
5. Hakuba	2000/2001	9.6	4.1
6. Nozawa&Nakagomi	1998/1999	23	3.8
7. Iwamura	1998/1999	13	5.0
8. Asashina	1998/1999	3.5	2.7
9. Akaiwa&Tokida	1998/1999	2.2	2.6
10. Tomono	1998/1999	1.2	1.7
11. Koundai	1998/1999	0.8	3.2

Sources: 1. Ishida(2000); 2. Sakakibara(1994);
3. Sakakibara and Mieda(2002); 4. Sakakibara(1999);
5. Sakakibara and Morita(2002); 6-11. Present paper.

ここで問題になるのは現実の最大ヒートアイランド強度に近い値を利用したか否かである。

観測計画を立てるに当たり「観測地点の選択」と「気象条件の選択」において配慮すべきことがある。前者については都市域の地点は景観により比較的見つけやすいが、日本の多くの都市は都市が拡大するにつれて孤立せずスプロール化して隣の集落と続いてしまうた

め郊外の地点の選択が困難である。今回の観測では郊外の地点は都市域から1 km 内の水田域を選択した。今回解析に利用した日本の諸都市の郊外の地点はいずれも水田域内である。また、後者については、今回の調査も含め晴天日の夜間に限定した観測例が40回以上ある都市での事例とした。

朴(1987)が用いた日本の諸都市については、Fukuoka(1983)の論文の図を基に秋季から冬季にかけて3回以上の観測値がある都市を、また韓国の諸都市については夏季3か月に行っ

た5つの都市(朴, 1986)と大邱市(Kim, 1976)を選んでいる。その結果、日本と韓国の諸都市において、ともに都市人口とヒートアイランド強度との間の回帰線は単なる直線関係でなく、人口約30万人を境に勾配の異なる直線で表されるとした。朴(1987)は、韓国の最大ヒートアイランド強度は夏季に限られた観測例から求めたものなので、西欧や日本と比べ小さくなっていると見なし、韓国と他の地域についての人口とヒートアイランド強度の関係式の定量的な比較はできないとしている。しかし、日本のケースについても、観測事例数が3回程度の都市の観測値を含むこと、年間を通した観測値でないことから、最大ヒートアイランド強度を観測するための「気象条件の選択」が満足できるデータセットであったか検討の余地がある。また、「観測地点の選択」について、韓国の5都市については簡単な土地利用に関する記述はあるものの、日本の都市については利用した文献の出典が明記されていないため確認ができなかった。以上のことから朴(1987)が用いた日本の諸都市のデータは現実の最大ヒートアイランド強度に近い値になっているという確認はできなかった。今後、朴(1987)で利用された都市においてヒートアイランド強度の再調査を行う必要があるだろう。

次に、今回の観測を含む日本の諸都市における最大ヒートアイランド強度と人口の対数との回帰線が一本

の直線で現される意味について検討する。最大ヒートアイランド強度 $\Delta T_{u-r(max)}$ と人口 P のそれぞれについて対数を取り、両者の回帰式を求めると次のようになる。

$$\text{Log} \Delta T_{u-r(max)} = 0.1851 \text{ Log } P - 0.1630$$

この式を $\Delta T_{u-r(max)}$ について解くと

$$\Delta T_{u-r(max)} = P^{0.1851} / 1.455$$

となる。今回観測した佐久地域集落の最大ヒートアイランド強度を観測事例中の上位1~3を平均したもので同様な計算をすると最大ヒートアイランド強度は人口の0.2221乗に比例することになり、上位2~4の平均値では最大ヒートアイランド強度は人口の0.2537乗に比例した。すなわち、最大ヒートアイランド強度は人口の1/5~1/4乗に比例することが考えられる。これに関する興味深い理論的考察を Summers (1964) が行っている。彼が考えたモデルは都市域に大気が横切るとき郊外の大気が徐々に暖められていくことに基づいたヒートアイランドモデルである。都市域を一樣な熱源と仮定すると、このモデルはヒートアイランド強度が、風上側にある都市と郊外の境界線から都市の中央部までの距離の平方根に比例することを示した。もし、都市を円形と仮定するならば、この距離は市街地面積の平方根で表され、人口は市街地面積に比例すると考えると、ヒートアイランド強度は人口の1/4乗に比例することになる。

今回都市規模の指標として人口を用いたが、これは単に統計値が利用しやすいという理由による。ヒートアイランド形成に対し、人口が持つ意味についてはよくわかっていない。人口が増えると都市のトータルの人工熱は増大するが、木造家屋が鉄筋コンクリートの建物にかわることによる都市構成物質の質的变化、緑地の減少による潜熱の低下、建物の高層化に伴う都市粗度の増大やアルベドの低下、天空率の減少等の変化も起こる。これらの要因もまた都市域に流入してきた大気を暖めるように作用するからである。

7. おわりに

人口とヒートアイランド強度の関係について以下のことが分かった。

(1) 年間で平均した晴天日のヒートアイランド強度と各集落の人口は対数比例の関係にあり、その関係は昼夜であまり違いはない。一方、夜間曇天日の平均ヒ-

ートアイランド強度と集落人口との対数比例関係はあるものの、夜間晴天日に比べて、その傾きは小さい。

(2) 集落人口と平均ヒートアイランド強度には対数比例関係がどの季節においても認められた。回帰線の傾きの季節変化は夜間にはほとんど認められないが、昼間には明瞭に現れた。日中のヒートアイランド強度は、郊外の水田域に水が張られる夏季灌水期に最大、水田域が裸地になる冬季に最小となった。

(3) 年間最大ヒートアイランド強度は人口と対数比例の関係が認められた。この結果と最近報告されている日本の諸都市の結果と併せて上記対数比例関係を検討したところ、回帰線は一本の直線で表すことができた。これは従来示された日本の諸都市の研究結果において観測地点や気象条件の選択が十分であったのか不明な部分があり、再調査を行うべきことを示している。

謝 辞

本論文を作成するにあたり長野県自然保護研究所の浜田崇氏には有益な助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- Chandler, T. J., 1967: Night-time temperatures in relation to Leicester's urban form, *Meteorol. Mag.*, **96**, 244-250.
- Fukuoka, Y., 1983: Physical climatological discussion on causal factors of urban temperature, *Memories of the Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima Univ.*, Ser. IV, **8**, 157-178.
- 石田秀樹, 2000: 旭川~積雪寒冷盆地都市, 「都市環境のクリマアトラス」(日本建築学会編), ぎょうせい, 23-36.
- Kim, I., 1976: A study of the distribution of summer air temperature in Taegu City. M. S. Thesis. Dep. Geog., Kyungpook Univ., Korea (unpublished), 65 pp.
- 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, 都市化の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.
- Oke, T. R., 1973: City size and the urban heat island, *Atmos. Environ.*, **7**, 769-779.
- Oke, T. R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observation, *J. Climatology*, **1**, 237-254.

- 朴 恵淑, 1986: ソウル市およびその周辺地域における夏季ヒートアイランドの気候学的研究, 地理学評論, 59, 689-705.
- 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, 1994: 越谷市に見られるヒートアイランド強度—郊外が水田の場合—, 天気, 41, 515-523.
- 榊原保志, 1999: 長野県小布施町におけるヒートアイランド強度と郊外の土地被覆との関係, 天気, 46, 567-575.
- 榊原保志, 三枝あかね, 2002: 松本市における晴天日と曇天日の夜間ヒートアイランド, 天気, 49, 534-540.
- 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.
- 佐橋 謙, 1983: 自動車による気温の移動観測における観測誤差—特に自動車の影響を中心に—, 天気, 30, 509-514.
- Summers, P. W., 1965: An urban heat island model: its role in air pollution problems, with applications to Montreal, Paper presented to “First Canadian Conference on Micrometeorology” in Toronto, 12-14, April, 32pp.
- 田宮兵衛, 1979: 小気候・局地気象—特に移動観測の方法について—, 天気, 26, 633-640.
- 田宮兵衛, 大山秀樹, 1981: 小集落に発生するヒートアイランドの実体と成因について, 地理学評論, 54, 1-21.

Relationship between Population and Heat Island Intensity in Japanese Cities

Yasushi SAKAKIBARA* and Yuichi KITAHARA**

*(Corresponding author) Faculty of Education, Shinshu University,
Nagano, 380-8544, Japan.

e-mail: ysakaki@gipwc.shinshu-u.ac.jp

**Maruko Jitsugyo High School.

(Received 18 January 2002 : Accepted 2 June 2003)

Abstract

The 149 temperature distributions were collected by automobile traverse method in the settlements in Saku city and Asashina village, Nagano, whose populations range from 750 to 23,300 inhabitants, to research the relation between city size and heat island intensity. The analysis shows both of the mean heat island intensity under fine days at day and night to be related to the logarithm of the population (Log P) of the settlements. The same relation can be seen in cloudy nights with smaller slope of regression. The relation between the maximum heat island intensities and log P at night was found to hold remarkably well. This relation is shown to hold in the maximum heat island intensities recently studied in Japanese cities. The regression is to be represented not by two line bending (Park, 1987) at around 300,000 in population but by straight line.