

東京および仙台における 都市温暖化(ヒートアイランド)の移動観測

Field Observation of Urban Heat Island in Tokyo and Sendai

山田 昇 *1
Noboru YAMADA

斎藤 武雄 *2
Takeo S. SAITO

Abstract

Rapid progress in industrialization and urbanization has resulted in the concentration of economic growth and social functions in the urban areas. In most cities, it has become more and more certain that the increase of energy consumption is causing environmental issues including the temperature rise in the urban atmosphere (urban heat island or urban warming). The present paper reports on the results of field observation of urban heat island in Tokyo metropolitan area and Sendai city. Three automobiles equipped with thermocouples are employed for moving observation platform. First, the latest field observation results of ambient temperature in Tokyo metropolitan area are reported. Next, the authors classify the past data of field observation in Tokyo and Sendai, which have been measured for eight years. The results of the classification of the past data show that the heat island intensity, which is defined as the maximum temperature difference between the highest temperature in urban area and the lowest temperature in rural area, is increasing by 2.5 °C/decade on summer early morning in Tokyo metropolitan area.

キーワード: 都市温暖化, ヒートアイランド, 都市気候, 移動観測, ヒートアイランド強さ

Key Words : Urban Climate, Urban Heat Island, Urban Warming, Field Observation, Heat Island Intensity.

1. 緒言

近年、東京などの大都市では、エネルギー消費量の増大や地表面性状の改変などに起因する都市温暖化(ヒートアイランド; Urban heat island, or Urban warming)が顕在化している。環境省では、2001年10月にヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告し⁽¹⁾、アメダスデータ等を通じて、できる限り多くの実測データを集める必要があると述べている。また、2002年8月には、国土交通省がヒートアイランド対策連絡会議を設置し⁽²⁾、さらに東京都では、2002年7月に全国初のヒートアイランド観測網を東京都区部120ヶ所に構築することを発表している⁽³⁾。

ヒートアイランドは、人間が意図して創り出したものではないが、人間活動の所産であり、時代とともに同一の都市でも変化するものと考えられる。よって、比較的長期にわたる観測を継続的に行って現象を把握し、また、人間活動との相関を明らかにしていかなければならない。加うるにヒートアイラン

ドは、スケールの大きい複雑な現象であるため、理論的アプローチだけでは、その解説には限界がある。したがって、必ず観測による検証が必要となってくる。

ヒートアイランドの観測については、セントルイスを対象としたPeterson and Stoffel⁽⁴⁾およびShreffler⁽⁵⁾のように、かなり大規模な3次元観測が行われた例もあるが、通常、地表面付近における定点観測および移動観測が主流である。また、近年では、人工衛星を利用したリモートセンシングによる観測例もあるが、これによって得られるのは地表面温度の粗い近似値であり、それから気温を推定するためには、結局、実地観測による補正等が不可欠となっている。定点観測の例として、河村⁽⁶⁾、松本ら⁽⁷⁾および伊藤ら⁽⁸⁾による東京都内の気温分布の測定結果がある。また、移動観測の例としては、河村⁽⁹⁾およびYamashita⁽¹⁰⁾、浮田⁽¹¹⁾などがある。しかしながら、定点観測では1年間、移動観測では数日間といった特定の期間の調査に限られており、長期的なヒートアイランドの動向を把握するには十分とは言えない。

一方、斎藤ら^{(12)~(19)}は、東京および仙台を対象に、1983年から2001年の18年にわたって、継続的に自動車を用いた移動観測を行っている。そこで本報では、自動車による移動観測の方法について述べ、最近の観測結果を報告するとともに、斎藤ら^{(12)~(19)}による、これまでの観測結果を整理し、東

*1 東北大学大学院環境科学研究科 助手
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
e-mail : noboru@cc.mech.tohoku.ac.jp

*2 東北大学大学院環境科学研究科 教授
(原稿受付: 2003年4月24日)

京および仙台のヒートアイランドの動向と現状を明らかにする。

2. 自動車による都市温暖化の移動観測方法および2001年7月の東京における観測結果

2.1 自動車による移動観測

ヒートアイランドの観測では、主として数km～数十km四方の気温の水平分布を獲得することを目的とする場合が多く、そのための観測手法としては、多数点、たとえば数百mメッシュの格子点で同時観測を行うことが理想だが、それは不可能に近い。一方、自動車をプラットフォームとして観測用の温度計を搭載して移動観測する方法では、観測精度は定点観測より劣るもの、最小限の機材で、より多くの観測ポイントを測定できるという特長がある。

ここでは、自動車をプラットフォームに用いた移動観測方法について述べ、次いで、猛暑であった2001年7月に東京を対象に行った移動観測結果について報告する。

図1(a),(b)に測定プローブと観測車の概要を示す。測定プローブのセンサー部には、直径0.2mmの銅-コンスタンタン熱電対を用いた。この熱電対を静止空気中で40km/hで移動させると、11m/sの通風を与えたときとほぼ同じで、その場合の時定数は約0.3sとなる。自動車による移動観測の方法については、佐橋⁽²⁰⁾～⁽²²⁾および河村⁽⁹⁾の報告を参考にした。測定プローブは、底を抜いた筒に入れ、筒には熱放射の影響を避けるためにアルミ箔を巻いている。この測定プローブを自動車の屋根上のキャリアに固定した棒の先端に取り付け、フロントバンパーの真上、地上高1.5mに位置するようにした。この位置は、自動車の車体からの熱の影響を走行中に最も受けない位置であることが佐橋⁽²¹⁾によって報告されており、本研究においても事前にそのことを確認している。また、地上高は気象台の記録との比較を考慮して決定した。

このような仕様の観測車を3台用意し、3コースに別れて観測を行う。測定コースは図2に示すようにA,B,Cの3つに分割し、測定点は温度変化が大きいと考えられる都心部付近ではなるべく密にし、合計379点とした。測定はすべて走行中にを行い、自動車の速度は、市街地での速度制限の実態を考慮し、制御可能な場合は40km/hと決めた。また、先行車との距離は約20m以上とし、対向車のない条件で測定するよう努めた。

本研究では、自動車を気温観測のプラットフォームとして用いる以上、測定点はすべて道路上に限定される。道路上で観測した気温が地域代表性を満足するかどうかについては判断が難しいところではあるが、たとえば、東京都中央区の土地利用のうち道路が占める割合は35%，宅地面積は48%となっており⁽²³⁾、都市空間のほとんどは道路に隣接しているといってよく、道路上で測定された気温が地域代表性を著しく欠くことはないものと考える。

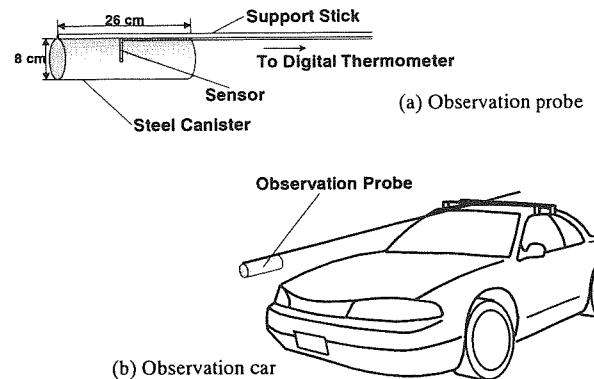


Fig.1 A schematic of the field observation probe and vehicle

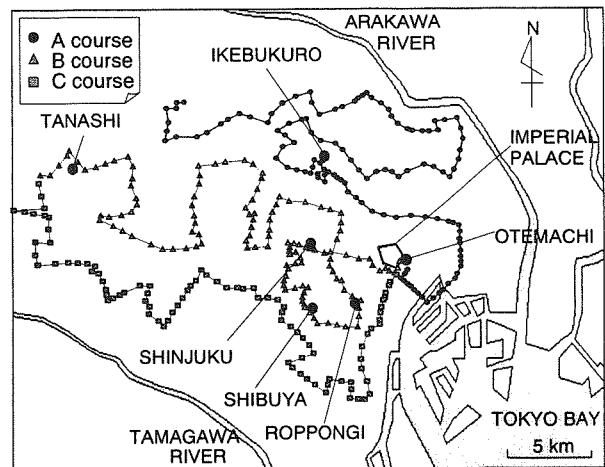


Fig.2 Observation courses for Tokyo metropolitan area

2.2 2001年7月の東京における移動観測

以上のような方法により、実際に移動観測を行った結果について報告する。ヒートアイランドは、夏期よりも冬期の方が強く現れることが知られているが、最近では夏期の冷房排熱などの影響による不快な熱環境が問題となっており、夏期におけるヒートアイランドの実態を把握する意義は大きいものと思われる。そこで観測日時は、2001年7月23日の19:00～21:30および同年7月24日の2:00～4:30とした。このときの気象条件として、水平面全天日射量と気温の日変化の様子を図3に、また、気温、相対湿度、風速および雲量の日平均値を表1に示す。各気象データはいずれも気象庁東京管区気象台発表値(千代田区大手町、AMeDAS観測地点)であり、7月23日の日最高気温は35.6℃、翌24日の日最高気温は38.1℃であった。両日とも風が弱く、日射量も安定していたが、23日は終日雲が多かった。なお、この年の7月は猛暑であり、東京消防庁管轄における熱中症患者は628人にのぼった。

図4に2001年7月23日の19:00～21:30にかけて行った気温の観測結果を分布図として示す。図2に示した各測定点における測定値に基づいて等高線を描画する計算プログラムにより分布図を作成した。このとき、近隣の測定点における測

定値との相互関係を考慮し、滑らかな等高線を描画している。また、この時間帯では図3に示すように、観測開始時刻と終了時刻において、気象庁発表値で1.7°Cの気温減少が生じたため、この減率に基づいて気温の時間補正を行い、19:00における気温分布として算出している。これによると、気温が高いのは、大手町・丸の内付近、新宿、渋谷・六本木付近であり、ヒートアイランド強さ(Heat island intensity; HI)は約4°Cであった。図中には、最高温度 T_{max} を記録した新宿と最低温度 T_{min} を記録した石神井の地点を明記した。さらに、観測領域内におけるAMeDASの観測地点と当該時刻における気温を明記した。なお、本研究においては、ヒートアイランド強さを観測領域内における都心部と郊外の気温の最大差と定義するが、今回の移動観測では、都心から5~10km程度しか離れていない地点を郊外としていることに留意する必要がある。

図5は、2001年7月24日の2:00~4:30にかけて行った同様の結果である。この時間帯では、時刻による気温減少は0.5°Cと小さいため、時間補正是行っていない。新宿、渋谷付近で気温が高く、ヒートアイランド強さは夕方とほとんど変わらず約4°Cとなった。夕方、気温が高かった大手町付近は、新宿や渋谷付近に較べると気温は低くなっている。

以上の観測結果から、東京の場合、オフィスビルの集中する千代田区大手町・丸の内付近と繁華街の新宿、池袋、渋谷付近の気温が周囲よりも相対的に高くなる傾向があり、分散型のヒートアイランドが形成されている。また、都心部でも緑地や水面の面積が比較的大きい皇居や新宿御苑の周辺では気温が低くなることが認められた。AMeDASの観測地点は皇居に隣接しているためか、移動観測結果よりも1°C程度低めとなっている。

今回の観測結果において、ヒートアイランド強さが夕方および早朝において約4°Cと比較的小さく、また同じになった理由として、23日の雲量が多かったことが挙げられる。一般に、ヒートアイランドは良く晴れた冬期の深夜に最も強く現れることが知られているが、この原因是、都心部と郊外の地表面性状の相違により、放射冷却現象の生じる度合いが郊外の方が大きくなるためである。夏期には大気中の水分量が増加するため、放射冷却の度合いが弱まるものの、晴れた日の方がヒートアイランドは強まるものと思われる。

3. 過去の移動観測結果の整理

3.1 東京における移動観測結果

齋藤らによって東京を対象に行われた移動観測結果(1993年~2001年)ならびに観測日の風速と雲量の気象庁東京管区気象台発表の日平均値を表2に示す。東京における観測は、主に夏期(7月および8月)に行われており、ヒートアイランド強さは4.0~6.0°Cの範囲であることがわかる。

この結果のうち、風速5.0m/s以下、雲量7未満の結果のみ

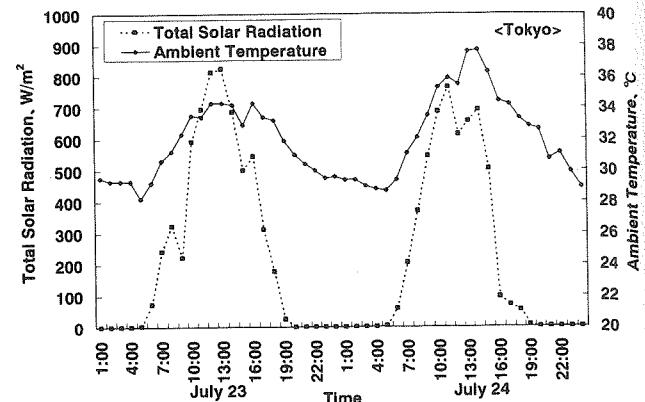


Fig.3 Climate condition from July 23 to July 24 in 2001

Table 1 Daily mean values of the climate condition

	July 23, 2001	July 24, 2001
Ambient Temperature, °C	35.6	38.1
Relative humidity, %	63.0	60.0
Wind velocity, m/s	2.1	2.4
Cloudiness	9.3	2.3

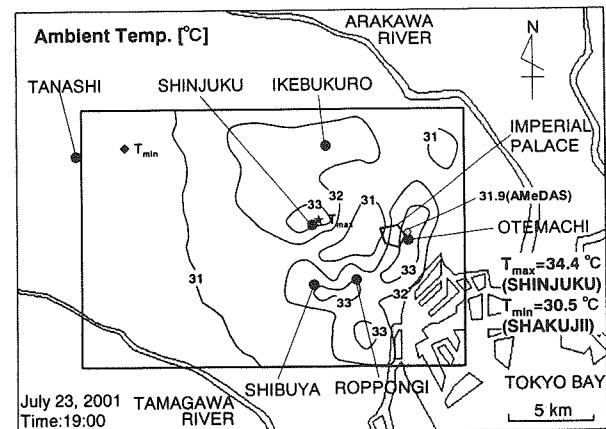


Fig.4 Observation result of ambient temperature in Tokyo (19:00, July 23, 2001)

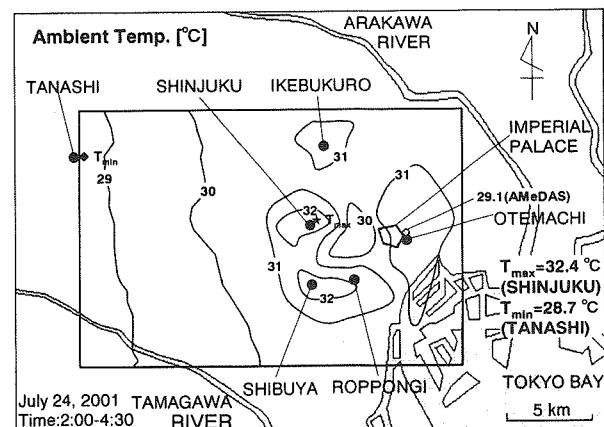


Fig.5 Observation result of ambient temperature in Tokyo (2:00-4:30, July 24, 2001)

を用いたときの東京のヒートアイランド強さの経年変化を図6に示す。観測数が多くないためあまり一般的ではないが、やはり、ヒートアイランドは強くなっている傾向があり、夏期の早朝の場合、線形近似すると10年間で 2.5°C の割合*でヒートアイランド強さは大きくなっている。

なお、冬期の例として、1992年3月14日早朝に行った観測では、ヒートアイランド強さは 8.1°C となり、夏期よりも大きい傾向が認められている⁽¹⁵⁾⁽¹⁸⁾。

3.2 仙台における移動観測結果

東京における観測と同様に、仙台においても移動観測を行った。図7は仙台における観測コースである。測定点は、仙台駅周辺の繁華街において密に配置し、合計149点となっている。

Table 2 Field observation results in summer in Tokyo metropolitan area from 1993 to 2001

	Date	T_{\max} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{\min} [$^{\circ}\text{C}$]	HI [$^{\circ}\text{C}$]	Wind velocity [m/s]	Cloudiness
Evening	1993/8/23	29.3	26.0	3.3	3.8	4.3
	1994/8/8	34.7	28.3	6.4	3.2	4.0
	1995/7/31	33.5	28.2	5.3	2.5	6.5
	1997/8/1	32.0	27.0	5.0	3.0	4.0
	1999/7/23	33.0	27.4	5.6	2.9	5.8
	2001/7/23	34.4	30.5	3.9	2.1	9.3
Early morning	1993/8/24	28.0	22.6	5.4	3.4	2.8
	1994/8/9	31.0	27.1	3.9	3.8	4.3
	1995/8/1	30.3	26.0	4.3	2.4	5.8
	1997/8/2	30.1	24.2	5.9	2.0	2.0
	1999/7/24	31.0	25.0	6.0	4.8	6.5
	2001/7/24	32.4	28.7	3.7	5.1	2.3

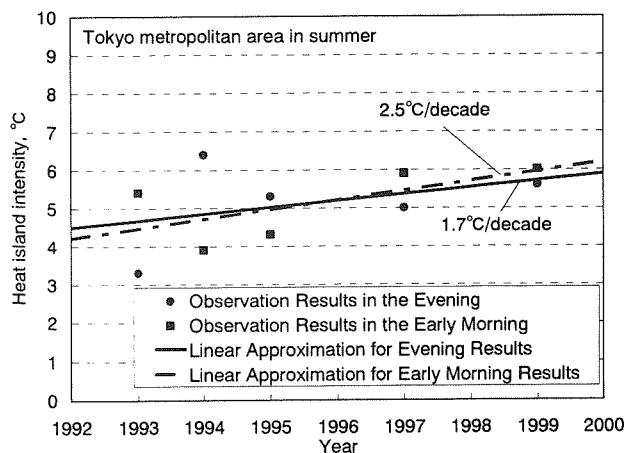


Fig.6 Annual change of heat island intensity in summer in Tokyo metropolitan area

* IPCCの最近の報告によると、これから100年の地球温暖化スピードは平均で 3.6°C (10年では 0.36°C)であり、これに比べるとヒートアイランドのそれは7倍近く大きい。

図8および図9は、1999年7月24日の夕方(18:00~19:30)と深夜(24:00~1:30)に行われた気温の観測結果である。この日は、東北南部において梅雨明けが宣言された日であり、仙台管区気象台発表(図8および図9記載のAMeDAS観測地点)の最高気温は 32.4°C であった。夕方の観測における最高気温は繁華街である国分町の 31.6°C で、ヒートアイランド強さは 4°C であった。また、深夜の観測においても、最高気温は国分町で現れ、 29.3°C となり、ヒートアイランド強さは 4.8°C であった。このように、仙台のような中規模の都市においても夏期のヒートアイランドが顕著であることがわかる。

次いで、齋藤らによって仙台を対象に行われた移動観測結果(1983年~1999年)ならびに観測日の風速と雲量の仙台管区気象台発表の日平均値を表3に示す。

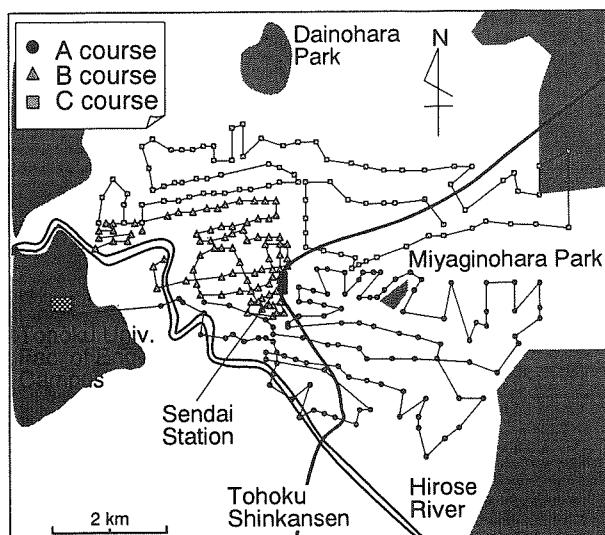


Fig.7 Observation courses for Sendai city

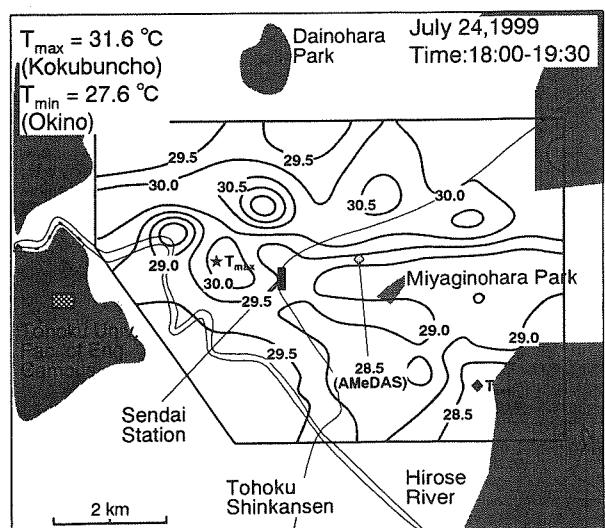


Fig.8 Observation result of ambient temperature in Sendai (18:00-19:30, July 24, 1999)

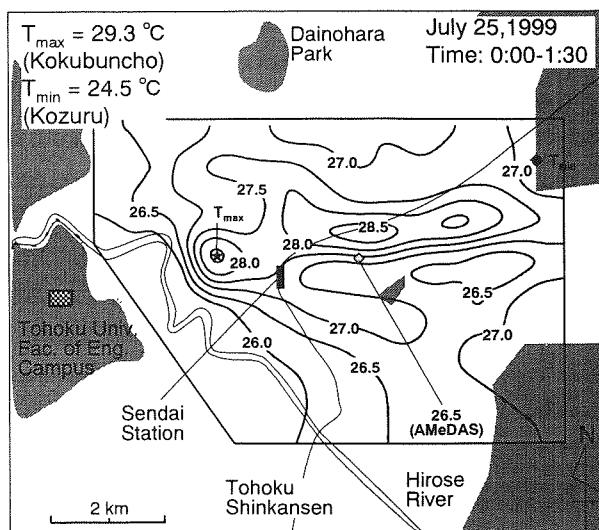


Fig.9 Observation result of ambient temperature in Sendai (0:00-1:30, July 25, 1999)

Table 3 Field observation results in Sendai from 1983 to 1999

	Date	T_{max} [°C]	T_{min} [°C]	HI [°C]	Wind velocity [m/s]	Cloudiness
Summer	1983/8/5	24.1	22.9	1.2	6.3	2.5
	1994/8/4	30.9	24.7	6.2	2.1	2.3
	1997/8/5	28.3	23.6	4.7	4.0	9.3
	1999/7/25	29.3	24.5	4.8	2.1	4.3
Winter	1983/1/11	0.6	-1.2	1.8	6.2	2.5
	1988/1/13	5.0	2.5	2.5	2.3	4.3
	1988/1/20	4.5	0.5	4.0	2.5	0.5
	1988/2/20	1.0	-0.5	1.5	2.8	7.0
	1990/2/4	1.9	0.4	1.5	4.4	9.3
	1990/2/8	0.5	-3.0	3.5	4.6	4.8
	1990/2/22	7.5	4.0	3.5	3.1	0.8
	1990/2/28	2.5	-1.5	4.0	3.9	0.8
	1993/2/26	2.0	-1.5	3.5	4.5	1.8
	1993/2/27	3.5	-1.5	5.0	3.1	7.8
	1994/1/19	1.6	-3.5	5.1	3.5	4.8
	1994/1/26	2.2	-1.5	3.7	2.1	4.5
	1994/2/10	1.8	-1.0	2.8	5.3	10.0
	1994/2/17	3.3	-1.4	4.7	4.6	4.5

仙台における観測は、主に冬期(1月および2月)において継続的に行われており、観測時刻は24:00～1:30である。表3に示す観測のうち風速5.0m/s以下、雲量7未満の9回の観測結果に基づくヒートアイランド強さの経年変化を図10に示す。これより、冬期の仙台においても、数km離れた郊外と較べても都市中心部が着実に高温化している傾向があり、10年に1.8°Cの割合で進行している。このようなヒートアイランドの進行は、都市における人工エネルギー消費量と密接な関係があると考えられているため、図11に示すような1979年および1997年の仙台市における人工エネルギー消費密度マッ

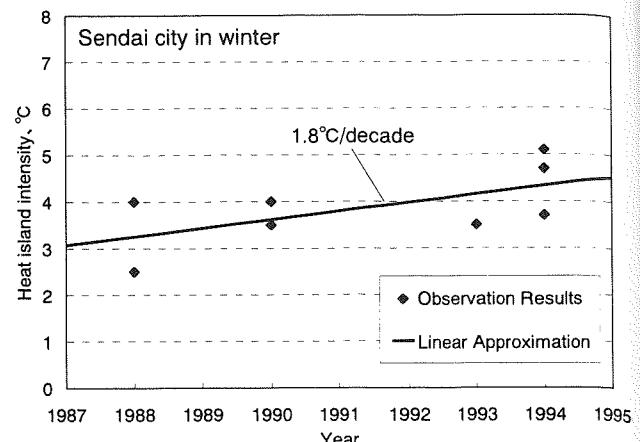


Fig.10 Annual change of heat island intensity on winter midnight in Sendai city

プを作成した。

仙台駅を中心に南北24km、東西16kmの領域を500mの正方形メッシュに分割し、町名毎の電力消費量と都市ガス消費量の1月の月積算値から、メッシュ毎の人工エネルギー消費量を算出した。その際、同町名内では消費量は均一であると仮定し、メッシュ内における町名の面積比率を乗じた。なお、移動観測では、測定は道路上で行われており、自動車による排熱の影響を受けているものと考えられるが、交通量の把握や石油、ガソリン、軽油等のメッシュ毎の消費量の推定が困難であるため、ここでは考慮していない。

しかしながら、この図から都心部では18年間で、エネルギー消費密度が約20W/m²から約90W/m²に増大していることがわかる。また、エネルギー消費は郊外へ拡大していることがわかる。エネルギー消費は郊外よりも都心部で急激に増大しており、仙台におけるヒートアイランド進行には、このような都心部における人工エネルギー消費密度の増大が起因しているものと考えられる。

4. 結 言

本論文では、自動車による移動観測の方法について述べ、最近の観測結果を報告するとともに、過去の東京および仙台でのヒートアイランドの観測結果を整理して、以下の知見を得た。

- 1) 自動車を気温観測のプラットフォームとした移動観測方法では、定点観測に比べて、測定に時間要するため、測定精度は劣るもの、時定数の短い熱電対を用いることにより、最小限の機材で多くの観測地点のデータを採取することができる。
- 2) 東京における移動観測により、猛暑であった2001年7月のヒートアイランドの実態を明らかにした。東京のヒートアイランドは、オフィスビルの集中する千代田区大手町・丸の内付近と繁華街の新宿、渋谷、六本木付近でとくに気

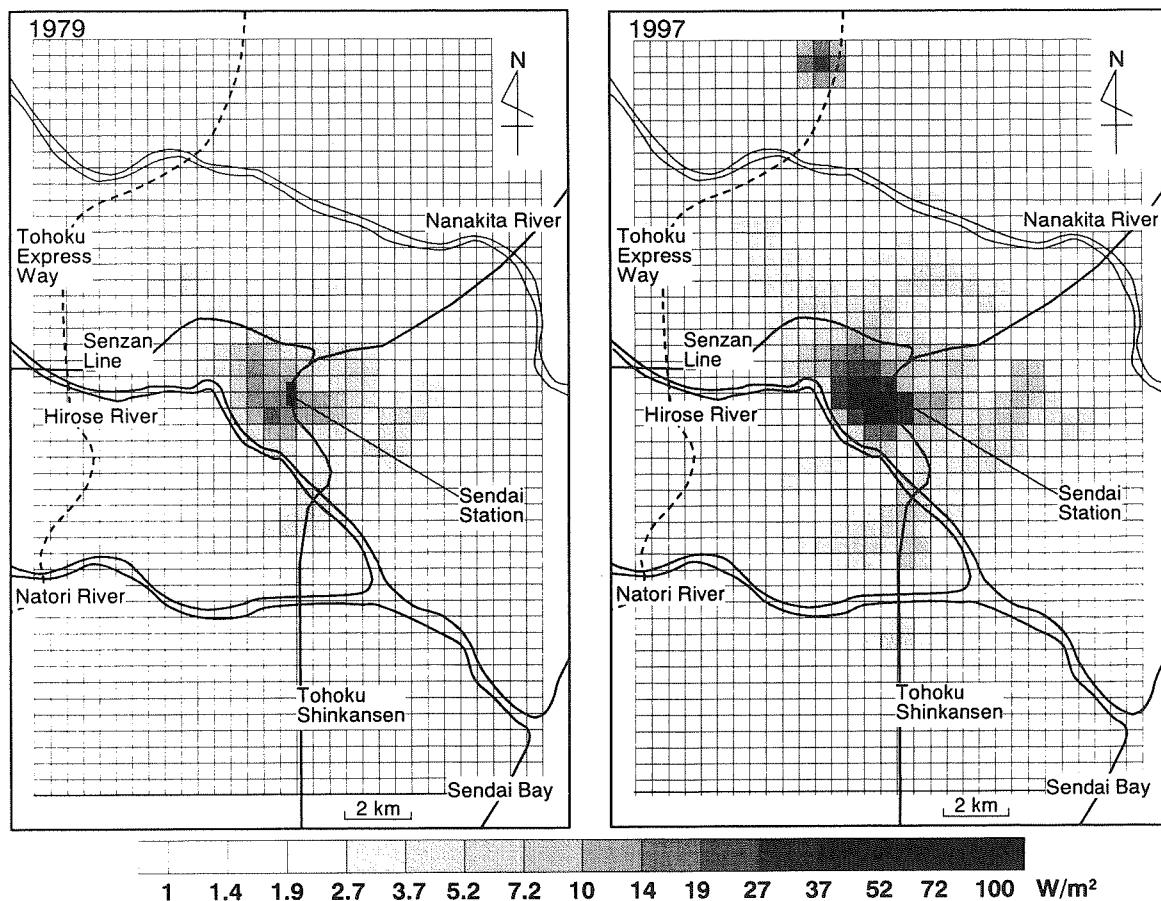


Fig.11 Anthropogenic heat emission intensity including electricity and gas consumptions in Sendai (January)

温が高く、分散型であることがわかった。

- 3) 過去のヒートアイランド観測データを整理することにより、東京および仙台において、ヒートアイランドが進行していることが認められ、東京の夏期においては、10年間で 2.5°C 、仙台の冬期では10年間で 1.8°C の割合でヒートアイランド強さが大きくなっていることを明らかにした
- 4) 仙台市における1979年と1997年の人工エネルギー消費密度マップから、都心部においてエネルギー消費密度が4倍以上に増大していること、ならびにエネルギー消費が郊外へも拡大していることを明らかにし、仙台市のヒートアイランドの進行と人工エネルギー消費との密接な関係を裏付けた。

5. 課題

自動車による移動観測の精度を向上させるためには、観測車両を増やして観測時間を極力減らすことが考えられるが、そのほかにも、既設の気象観測施設や人工衛星を利用したリモートセンシングとの同時観測による観測値の検証やGPSとの連携で位置情報と測定情報をリンクさせ、よりスマートな観測を行うことなどが今後の課題として挙げられる。

さらに、ヒートアイランドの長期的な動向を把握するため、

継続的に観測を行う必要があり、また、日射量、風速、雲量などの種々の気象因子とヒートアイランドとの相関を明らかにする必要がある。

記号表

T_{max}	: 気温の最大値, $^\circ\text{C}$
T_{min}	: 気温の最小値, $^\circ\text{C}$
HI	: ヒートアイランド強さ = $T_{max} - T_{min}$, $^\circ\text{C}$

参考文献

- (1) “ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方についての報告書”，環境省報道発表資料2001年10月(2001).
- (2) “国土交通省ヒートアイランド対策連絡会議の設置について”国土交通省報道発表資料2002年8月13日(2002).
- (3) “東京都区部にヒートアイランド観測網を構築”，東京都環境局報道発表資料2002年7月8日(2002).
- (4) Peterson, J.T. and Stoffel, T.L., “Analysis of Urban-Rural Solar Radiation Data from St.Louis, Missouri,” *J. Appl. Meteor.*, vol.14 (1980), pp.1459-1477.
- (5) Shreffler, J.H., “Heat Island Convergence in St.Louis during Carm Periods,” *J.Appl. Meteor.*, vol.18 (1979), pp.1512-1520.
- (6) 河村武, “都市気候の分布の実態,” *気象研究ノート*, 13 (1977), pp.204-225.
- (7) 松本淳ほか, “最近の東京における都市気温分布の変化について”, 東京都環境科学研究所年報1991(1991), p.11-17.

- (8) 伊藤政志, 宇田川満, 三上岳彦, “東京都内の気温分布について(1)”, 東京都環境科学研究所年報1994(1994), pp.35-46.
- (9) 河村武, “自動車による気温の移動観測について,” 天気, Vol.4, No.11 (1957), pp.13-16.
- (10) Yamashita, S., “Some Studies of Heat Island in Japan-With Special Emphasis of the Climatological Aspects”, Geographical Review of Japan, Vol.61(Ser.B), No.1(1988), pp.1-13.
- (11) 浮田崇正, 吉田篤正, “岡山市街地の気温の移動測定”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2000), pp.653-654.
- (12) 千葉秀樹, 齋藤武雄, “都市型ヒートアイランドの3次元シミュレーションと都市の設計および防災への応用”, 東北大学修士論文(1983).
- (13) 山田逸作, 齋藤武雄, “都市温暖化の3次元シミュレーションと観測結果の対比”, 東北大学修士論文(1990).
- (14) 島田達哉, 齋藤武雄, “都市温暖化の3次元モデリングとシミュレーションに関する研究”, 東北大学修士論文(1992).
- (15) 星秀俊, 齋藤武雄, “都市温暖化とカウンタープランとしての緑化に関する改善効果に関する研究”, 東北大学修士論文(1994).
- (16) 砂塚隆, 齋藤武雄, “広領域を対象とした都市温暖化の3次元シミュレーションに関する研究”, 東北大学修士論文(1996).
- (17) 山田昇, 齋藤武雄, “都市温暖化と快適性評価に関する研究”, 東北大学修士論文(1996).
- (18) Saitoh, T. S., Shimada T. and Hoshi, H., “Modeling and Simulation of the Tokyo Urban Heat Island,” Atmospheric Environment, Vol.30, No.20, pp.3431-3442 (1996).
- (19) 齋藤武雄・山田昇, “都市温暖化と快適性評価に関する研究”, 日本機械学会論文集(B編), 63巻609号 (1997), pp.295-302.
- (20) 佐橋謙, “小学校の「風」の教材について—気象学の立場からー”, 岡山大学教育学部研究収録, 39(1974), pp.59-66.
- (21) 佐橋謙, “自動車による移動観測における観測誤差—とくに自動車の影響を中心に—”, 天気, Vol.30, No.10 (1983), pp.21-26.
- (22) 佐橋謙, “移動観測による気温水平分布の観測値に含まれる誤差について,” 岡山大学教育学部研究収録第81号別刷(1989), pp.1-8.
- (23) 東京都総務局統計部統計課, 東京都統計年鑑(1992).
- (24) 山田昇, 齋藤武雄, “都市温暖化の構造物を考慮に入れたマイクロモデリングに関する研究”, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.28, No.4 (2002), pp.27-33.
- (25) 山田昇, 齋藤武雄, “日射を考慮した都市空間の熱環境評価に関する研究”, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.28, No.5 (2002), pp.65-70.
- (26) Saitoh, T. S. and Yamada, N., “Experimental and Numerical Investigation of Thermal Plume in Urban Surface Layer”, Experimental Thermal and Fluid Science (2003), to appear.