

都市域の気温変化と土地利用変化の関連性の分析

羽島知洋・清水 庸・大政謙次

(東京大学大学院農学生命科学研究科)

Analysis of Relationships between Air Temperature and Land Use Change in Urban Area

Tomohiro HAJIMA, Yo SHIMIZU and Kenji OMASA

(Graduate School of Agricultural and Life Sciences,
The University of Tokyo, Tokyo, 113-8657 Japan)

Abstract

This study was conducted to determine the relationships between temperature and land use change in urban areas. The main object was to verify whether there is a direct relationship that could explain the change in temperature as a result of land use change in urban areas. Using the 11 meteorological stations in the Kanto District, the monthly records of maximum and minimum temperature from 1940 to 1997 were analyzed. At the same time, the land use maps of 1971 and 1997 were analyzed to determine the land use changes. In concentric circles with the meteorological station as its center, the number of grids that changed from arable and forest to urban land use was used as the indicator of land use change. The appropriate extent of land use change around a meteorological station was considered by varying the radius of the concentric circles from 1 km to 20 km. The average temperatures for two periods before 1971 and 1997 were respectively calculated, with the period for averaging varied, and the difference among them was regarded as the climatic warming corresponding to land use change between 1971 and 1997. The relationship between the climatic warming and the change in the number of urbanized grids was analyzed statistically, considering various combination of the radius of the concentric circles for monitoring urbanization and the number of years for averaging of temperatures for both periods. Results of the correlation analysis between maximum air temperature and change in land use showed a weak relationship. On the other hand, a significant positive correlation between minimum temperature and change in land use was found by taking the average of monthly mean temperature for 20 years and using the land use indicator calculated at 20 km radius.

Key words: Change in temperature, Kanto district, Land use change, Urban area.

キーワード: 関東地域, 気温上昇, 都市, 土地利用変化

1. はじめに

気温の経年変化を見た場合、その気温変化には、気候の循環による周期的な気温変動のみではなく、地球温暖化のような全球規模での気温上昇や、都市化に伴う気温上昇といった、人為的な気温変動の成分が含まれている。特に、都市気候のような局所的な気温上昇分を、全国規模の観測気温データからそれぞれ抽出することは、地球温暖化を評価・予測する上で重要な課題とされてき

た。

ヒートアイランド現象に代表される、都市化の進展に伴う都市域の気温上昇の要因は、地表面の熱収支といったミクロスケールでの研究の発展により、人工排熱や土地被覆の変化等が主な要因であることがわかってきた (Ichinose, 1995)。例えば、土壌や緑地などの状態がアスファルトやコンクリートのような土地被覆に改変されると、蒸発散作用による気温上昇を抑制する機能が失われる。また比熱が小さくなるために、蓄熱作用によって気温を上昇させる。土地被覆の改変以外にも、自動車やエアコン等の人工的な排熱は、大気を直接的に暖め、気

2003年9月10日、合同大会にて発表

2003年10月31日 受付, 2004年8月23日 受理

温を上昇させることになる。Ichinose *et al.* (1997) は、東京 23 区を対象に、細密地理情報の土地利用分類に各種地表面パラメータを与え、局地気象モデルによる熱環境の数値シミュレーションを行った。この際、それぞれのグリッドの持つ土地利用分類ごとに、アルベド・蒸発散効率・地表面粗度・密度・比熱・熱拡散係数の各種パラメータを与えてシミュレーションを行っている。

全国規模において都市化に伴う気温上昇を評価する手法の一つとして、都市における気温変化を、都市化の有無により観測点を分類して、気温変化を比較する手法がある。Maruyama *et al.* (2002) は、全国の県庁所在地の都市と、その周辺の市町村との気温差を求め、重回帰分析により人口以外の気温変動の要因を除去した修正気温差を求めた。その後、修正気温差と人口で示す都市規模の関係を分析している。また、Noguchi (1994) は、都市域の各気象官署での気温（最高・最低気温）から都市化の影響のない気象官署群の平均値を引くことによって、都市化に伴う気温上昇分を抽出した。また、その抽出した気温上昇分と人口との関連性を分析した結果、日最低気温については都市化の影響が著しいが、日最高気温については都市化の影響はほとんどみられなかったとしている。また、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のみから抽出し、比較観測点を使わず、都市気候成分を抽出している研究もある。Park *et al.* (1994) は平均気温を、Kusaka *et al.* (1998) は最高・最低気温について上記の分析を試みており、その結果、Noguchi (1994) と同様に、最低気温に関しては都市化の影響が顕著であるとしている。

このように、都市化に伴う気温上昇分を観測気温データから抽出する手法は様々であるが、いずれも、気温に含まれる都市気候成分を抽出した後、都市化との関連性を検証する際に、その指標として「現在の人口」を用いている。これは、Oke (1973) や Karl *et al.* (1988) の研究によって、都市化の指標として現在の人口が代用可能であることが示されているからである。

しかしながら、田園地帯に独立して存在する欧米の都市と異なり、日本では都市を中心としたスフロール現象が起きており、都市の境界が曖昧にならざるを得ない。また、都市化による気温上昇を考える際、人工排熱やアスファルトのような人工的な地盤の増加等の物理的特性とより直接的な関係性を持つであろう土地利用変化を、都市化の指標として捉え、気温変化との関連性を分析することが必要と考えられる。特に、土地利用に関するデータは、近年のリモートセンシングの活用により一括して広範な範囲のデータ蓄積が可能になりつつある。現在得られる解像度の土地利用データを用いて、都市化に

伴う気温上昇をどこまで評価しうるかを明らかにすることは重要な意義を持つと考えられる。

そこで本研究では、都市化の指標として土地利用変化に着目し、最高・最低気温との関連性を分析する。土地利用データによって都市における気温上昇が説明可能であるかを評価することを本研究の目的とする。

2. 使用データおよび解析方法

2.1 解析方法

本研究では気象官署周辺における 2 時点の土地利用メッシュデータを用い、その期間の土地利用の変化を定量化する。また、土地利用データの 2 時点に対応した最高・最低気温の変化分と土地利用変化との相関関係を分析する。

2.2 使用データ

気温データには気象庁年報 2001 に収録されている要素別月別累年値の最高気温・最低気温を用いた。対象地域は、関東 1 都 6 県における 11 カ所の気象官署と測候所（東京、熊谷、秩父、勝浦、横浜、銚子、水戸、館野、前橋、宇都宮、日光）である。Noguchi (1994) は、全国の 136 カ所の気象官署の 1950～88 年の気温偏差データを用いて主成分分析を行い、各主成分が各気象官署に対して持つ説明力によって日本を区分した。その結果から、関東は同一の大気候的条件下にあるとみなすことが出来る。そこで、関東 1 都 6 県の気象官署に限定することにより、上記の気象官署がほぼ関東平野に立地しており、比較的同一の気候条件をバックグラウンドに持つという仮定のもと、分析を行う。ただし、館山と千葉の気象官署データは気温データの観測年数が短いため、分析対象から除外した。

土地利用データには国土数値情報の「土地利用メッシュ」を用いた。これは一辺約 100 m の細分区画メッシュであり、1976 年版、1987 年版、1991 年版、1997 年版的の 4 時点のものが整備されているが、本研究では土地利用の長期的な変化を対象とするために、1976 年版と 1997 年版的の 2 時点のものを用いた。また、1976 年版土地利用データは 1/25000 地形図を、1997 年版土地利用データは Landsat 画像を基礎データにそれぞれ用いており、土地利用の分類も若干異なっている。そこで本研究では、「田、畑、森林、荒地、その他の用地、建物用地、幹線交通用地、河川地および湖沼、海水域、海浜」の計 10 種類に分類し直した。また、1976 年版土地利用メッシュの基礎データである 1/25000 地形図は、地域によって、作成・更新年度が異なる。そこで地形図履歴を参照して、1976 年版土地利用メッシュは 1971 年頃の土地利用を表していると判断した。以下、1976 年版土地

、平均年数 x の大きい値を示している。これは東京気象官署を中心とした半径 $1 \sim 10$ km 円内の領域では、1971 年時点においては都市化に伴う土地利用形態の改変が完了していること、変化値 $JLU_{i,r}$ としては値が小さくなったことによる。集計半径を拡大すると 1971 年時点の土地利用の進んでいない東京周縁部の地域を含むことになるため、 $JLU_{i,r}$ は増加する。逆に、勝浦における $JLU_{i,r}$ は、集計半径を拡大するほど小さい値に収束する。これは、1971 年の時点において気象官署を中心とした半径 $1 \sim 10$ km 円内の土地利用の広がる面積が小さい上、半径を大きくすることによって円内の総グリッド数が大きくなるため、都市部と非都市部の連担する面積について、東京・勝浦の中間値がかけられるものとして宇都宮が挙げられる。

Fig. 1 における宇都宮の値の変化は、東京・勝浦の 2 つの値を併せ持った形となっている。

3.2 夏・冬季における都市的土地利用変化率と気温変化との相関傾向

冬・夏を代表する月として 1 月、8 月を選び、気温変化における累年平均の統計期間 x と、土地利用変化の集計円の大きさ r を変化させた場合の、両者の相関係数の変化傾向を Fig. 2 (a)~(d) に例示する。

Fig. 2 (a) に示される 1 月の月平均最高気温と都市的土地利用変化率の相関係数は、平均年数 24 年、集計半径 20 km のときに最大となり、0.755 であった。集計半径が大きく、平均年数が長くなるようにパラメータ設定することによって、相関係数が安定した高い値を示す傾向がある。一方、Fig. 2 (b) に示される 8 月では、平均年数・集計半径の設定に関わらず、月平均最高気温と都市的土地利用変化率との相関は低いという結果が得られた。

1 月、8 月の月平均最低気温と都市的土地利用変化率との相関分析の結果が Fig. 2 (c), (d) である。両月ともに、半径 20 km で集計した都市的土地利用変化率を用いたときに最も相関が高くなる傾向がある。また、平均年数についてであるが、最高気温に比べ比較的短い期間でも高い相関が得られる。ここでは 1 月と 8 月のみを示しているが、同様の解析を他の月でも行っており、平均年数 20 年以上で相関係数が安定しているという傾向がみられた。1 月の最低気温は $r = 20$ km, $x = 20$ 年のとき相関最大となり、0.812 となった。一方、8 月の最低気温では、 $r = 20$ km, $x = 16$ 年で最大となり、0.931 であった。

3.3 平均年数 x と集計半径 r の決定

前節では、最高気温および最低気温の変化、 $JT_{\max,n,x,m}$ 、 $JT_{\min,n,x,m}$ と都市的土地利用変化率 $JLU_{i,r}$ との相関が、集計半径 r と平均年数 x を変化させること

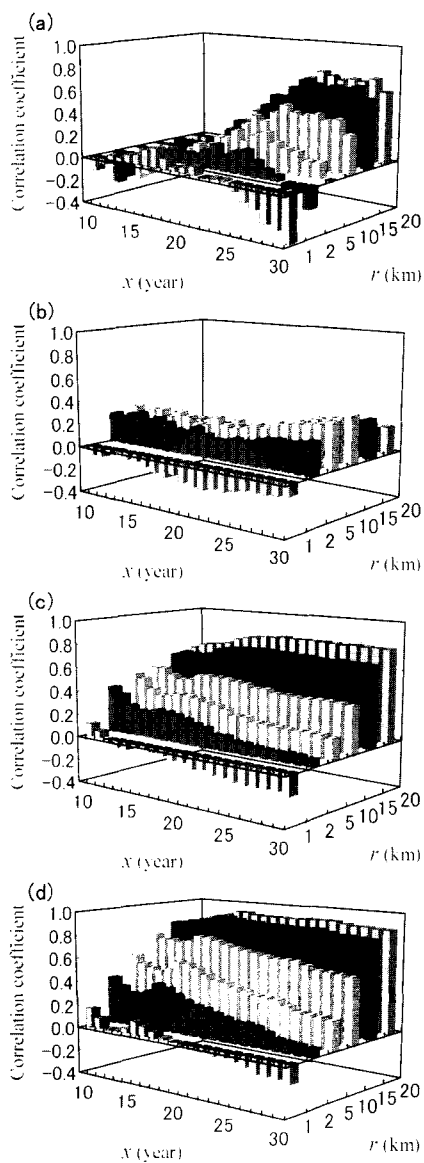


Fig. 2. Correlation coefficient between $JLU_{i,r}$ and $\Delta T_{n,x,m}$, according to the various combinations of the radius r for $JLU_{i,r}$ and the period x for averaging of maximum/minimum temperature. $\Delta T_{n,x,m}$ is the difference between $T_{n,x,m} - t_{n,x,m}$, where $T_{n,x,m}$ is the average temperature from "1996-x" to 1996, and $t_{n,x,m}$ is from "1970-x" to 1970. The subscript n denotes maximum or minimum temperature, and the subscript m denotes a month. (a) Maximum temperature in January; (b) maximum temperature in August; (c) minimum temperature in January; and (d) minimum temperature in August. $JLU_{i,r}$ is described in Fig. 1.

Table 1. Maximum values of the correlation coefficients between $\Delta LU_{i,r}$ and $\Delta T_{n,x,m}$, according to the various combinations of the radius r and the period x for averaging. $\Delta LU_{i,r}$ and $\Delta T_{n,x,m}$ are described in Fig. 1 and Fig. 2, respectively.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Maximum air temperature													
Correlation coefficient	0.755	0.689	0.613	0.520	0.513	0.191	0.278	0.393	0.468	0.282	0.432	0.821	0.518
x (year)	24	20	28	30	30	30	30	30	10	16	29	30	30
r (km)	20	15	10	10	10	20	10	10	5	20	20	20	15
Minimum air temperature													
Correlation coefficient	0.812	0.869	0.829	0.937	0.908	0.874	0.738	0.931	0.951	0.840	0.859	0.843	0.928
x (year)	20	21	22	23	28	28	27	16	25	30	23	17	22
r (km)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

によってどのような変化傾向を持つかを解析した。そこで、パラメータ r と x を変化させたとき、各月の最高・最低気温の気温変化と都市的土地利用変化率の相関係数の最大値のみを、Table 1 にまとめて示す。最高気温では12月・1月における相関係数が0.821、0.755と比較的高いが、最低気温と比べると全体的に低い値となっていることがわかる。年平均においても最高気温の相関係数は0.518となっており、強い関連性があるとは言いがたい。また、各月での最大の相関を示す平均年数 x は月によってまちまちであり、今回設定した10~30年の範囲内に分散しており一意に決まる傾向がみられない。同様に集計半径 r についても、半径5~20kmと月によって異なる結果となった。

一方、月平均最低気温と都市的土地利用変化率の相関係数は全体的に高く、最低値を示す7月でも0.738であった。特に4月、8月、9月において0.9以上の高い相関を示した。相関最大を示す集計半径 x は、最高気温と異なり、すべての月において20kmという結果が得られた。また、平均年数は16年から30年と幅広い結果が得られたが、1月・8月以外にも3.2節と同様の解析を行うことにより、20年前後の平均年数を用いれば十分であると判断した。

以上の結果をまとめると、最高気温は最低気温に比べ、都市的土地利用変化率 $\Delta LU_{i,r}$ との関連性はあまりみられず、特に夏季における関連性は弱く、例えば8月では最適なパラメータ選択を行っても相関係数は最大で0.393であった。逆に冬季の1月、12月ではやや関連性がみられるという結果となった。一方、最低気温では、月によらず都市的土地利用変化率 $\Delta LU_{i,r}$ との相関が高い。また、最大の相関値を示したときの集計半径は、月によらず20kmで一定であり、気温変化値 $\Delta T_{\min,x,m}$ を求める際に必要な平均年数 x は、20年前後をとれば十分と考えられる。

そこで、平均年数20年、集計半径20kmと設定し、

月最低気温の気温変化 $\Delta T_{\min,x,m}$ と都市的土地利用変化率 $\Delta LU_{i,r}$ の結果を散布図として Fig. 3 に示す。(a) は1月の月平均最低気温、(b) は8月の月平均最低気温のものである。1月では相関係数0.812、8月では0.908となった。

都市的土地利用変化率と最高気温の変化には強い関連性がみられないという結果が得られたが、Noguchi (1994) や Kusaka *et al.* (1998) によっても示されているように、一般的に都市化に伴う気温上昇は最高気温よりも最低気温で顕著であるとされている。これは、最高気温が観測される時間帯の気象条件・日射条件が大きく影響していると考えられる。本来、地表面付近の大気を暖める熱源として考えられるのは、日射・地表面・排熱などがあるが、最高気温は日中正午過ぎに観測されるため、気温の形成に日射が大きく関わる。しかし、日射の状態は観測地の局所的な立地条件によって大きく変わるため、都市化の規模を反映しにくいと考えられる。また、Ichinose (1995)、Mikami (1996) は、東京におけるヒートアイランド現象では日中の海風により温塊の移流もしくは崩壊が起きており、温塊の発生地と気温観測地の空間的不一致が生じていることも考えられる。

以上の理由から、特に夏季において最高気温の変化と土地利用変化との関連性が低いという結果が得られたと推察される。また最高気温では、Table 1 で得られたパラメータ x と r の値も月によってまちまちであり、本研究で用いた都市的土地利用変化率との統計解析ではその気温上昇を把握することは困難であると考えられる。一方、最低気温では相関最大となるとき集計半径はすべての月において20kmであり、平均年数 x も20年程度で十分であるという結果が得られ、都市的土地利用変化率と最低気温の気温変化には強い関連性があると示された。気象官署を中心とした半径20km以内における都市的土地利用変化率が、最低気温の気温上昇と関連性が

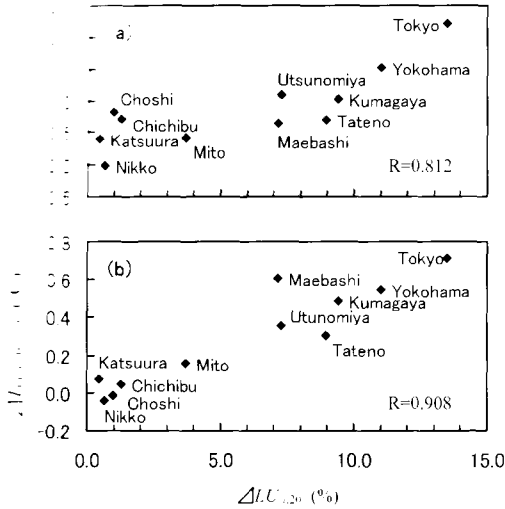


Fig. 3. Scatter diagram showing the relationship between $\Delta LU_{i,r}$ and $\Delta T_{min,x,m}$ for (a) January and (b) August ($r=20$ km, $x=20$ years). $\Delta LU_{i,r}$ and $\Delta T_{n,x,m}$ are described in Fig. 1 and Fig. 2, respectively.

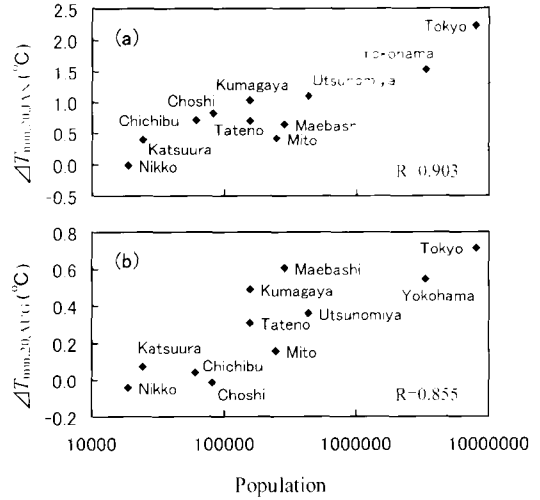


Fig. 4. Scatter diagram showing the relationship between population and $\Delta T_{min,x,m}$ for (a) January and (b) August ($r=20$ km, $x=20$ years). $\Delta LU_{i,r}$ and $\Delta T_{n,x,m}$ are described in Fig. 1 and Fig. 2, respectively.

あるという結果が得られたが、気象官署から 20 km 離れた地点での土地利用の状態が気象官署で観測される最低気温に影響しているとは考えにくい。この結果は、気象官署が位置する都市の規模に応じて発生する、人工的な地盤や排熱の増加といったものの都市化の指標として、半径 20 km の円内で集計される都市的土地利用の変化率が最低気温の変化に影響を及ぼすことを示すと考えられる。本研究で対象とした気象官署には、東京・横浜のような日本でも有数の大都市を含んでおり、このような大都市を含めて評価するには半径 20 km 程度の集計円が必要と考えられる。したがって、対象となる気象官署に大都市に立地するものが含まれていない場合、より小さい集計円でも十分な結果が得られると予想される。その際には、今回と同様の解析を行うことにより適切な集計円を適用する必要がある。

3.4 都市的土地利用変化率と人口の比較

本研究では、都市化の指標として土地利用変化を使用しているが、一般的には人口を用いることが多い。Karl *et al.* (1988) によると、気温変化を説明する際に現在の一時点のみの人口で十分であるとしている。また、Noguchi (1994), Park *et al.* (1994), Kusaka *et al.* (1998) は、各気象官署における気温上昇を説明する変数として、現在の対数人口を用いている。そこで、都市規模として都市的土地利用変化率を用いた場合と、現在の人口を用いた場合との比較を行った。1月、8月の最

低気温の気温変化 $\Delta T_{max,x,m}$, $\Delta T_{min,x,m}$ と 1995 年の人口との相関分析を試みた。ただし、平均年数は 20 年で両者とも統一した。Fig. 4 (a), (b) がそのときの散布図である。人口を用いたとき、1月の最低気温との相関係数は 0.903、8月の最低気温との相関係数は 0.855であった。対数人口と都市的土地利用変化率で相関を調べたところ、相関係数 0.874 であった。

ここでは現時点での人口を用いることによって、気温上昇と比較的高い相関が得られたが、人口を用いた場合の問題点として、人口データの集計方法が人為的な行政区分によるものであることが挙げられる。日本のように市街地同士が隣接している地域では、気象官署がどの行政区画まで含まれるかを決定する際に注意を要する。また、ある1時点の人口は、本来、気温を変化させる要因の代用的な要因と考えられる。本研究で都市化の指標として用いた土地利用変化は、気温を変化させる要因として、1時点の人口よりも、より直接的な指標と位置づけられるとともに、気温変化との相関分析から人口と同程度の説明力を持つ指標であることを示した。社会経済データである人口は、センサスデータが未整備な地域では使用することができないが、土地利用データは、衛星リモートセンシングのデータから推定可能であり、センサスデータがない地域においても、都市化による気温変化を推定できる可能性がある。

都市化といった局所的要因に基づく気温上昇を実測気

温データから抽出し、都市化との関連性を分析するためには、周期的な気候変動に基づく要因を排除する必要がある。Noguchi (1994) や Maruyama *et al.* (2002) は対象とする気象官署の気温データから、同じバックグラウンド気候の成分を持つと考えられる気象官署の気温データを引いており、また、Park *et al.* (1994) や Kusaka *et al.* (1998) は、気温偏差の季節変化パターンに着目した主成分分析を行い、1観測点のデータから都市化の影響に基づく気温上昇分を抽出している。本研究では、周期的な気温変動分を気温データから除去するために累年平均値を用い、平均年数を20年として分析を行ったが、20年の平均年数によってすべての周期的な気候変動分を消去し切れていない可能性があることは考慮に入れる必要がある。

4. ま と め

本研究では、都市化が気温に及ぼす影響を、土地利用の変化と最高気温・最低気温の関連性という観点から見直し、土地利用データを用いて都市における気温上昇が説明可能であるかを検証した。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 最高気温の変化と土地利用変化との間には強い関連性はみられず、特に夏季においてはほとんど相関がみられなかった。複数の都市を対象として、都市における最高気温の気温上昇を評価する際には、都市規模といったマクロな指標を用いて説明することは困難であることが本研究でも確認された。

(2) 最低気温の変化と土地利用変化との関連性では、気象官署を中心として半径20kmの円内での都市的な土地利用変化を集計することによって、最低気温の変化と高い相関関係が示された。半径20kmに設定することによって、東京のような大都市でも土地利用の変化が進む市街地周縁部を円内に含めることが可能となり、関東に存在する気象官署における都市気温を評価することが可能となった。また、気温変化を算出する際に周期的な気候変動の影響を除去するため、累年平均値を用いた。その結果、累年平均値の統計期間を20年前後に設定することにより、気温に及ぼす都市化の影響を検知することが可能であることが示唆された。

(3) 本研究では、都市化が気温に与える影響を評価するために、都市化の指標として土地利用の変化に着目

した。都市化の指標としてはこれまで現在の人口を用いることが一般的であったが、土地利用データを用いて都市における気温上昇を評価する手法を提案することが出来た。

謝 辞

多数の有益なコメントを下さった査読者および編集委員に深く感謝申し上げる。

References

- Fujibe, F., 1989: Air temperature variability in the eastern part of Honshu characterized by a dominant period of about ten years. *Tenki*, **36**, 31-35.
- Ichinose, T., 1995: Heat island: anthropogenic heat and urban climate. *Seikatsu Eisei*, **39**, 309-319.
- Ichinose, T., Shimodozono, K., Uno, I. and Hanaki, K., 1997: Upgrade of surface boundary condition for numerical simulation of urban climate based on very precise geographic information. *Tenki*, **44**, 23-34.
- Karl, T. R., Diaz, H. F. and Kukla, G., 1988: Urbanization; Its detection and effect in the United States climate record. *J. Clim.*, **1**, 1099-1123.
- Kusaka, H., Nishimori, M. and Yasunari, T., 1998: Estimation of the increasing rate of surface air temperature associated with urbanization by use of seasonal variation of maximum/minimum temperature anomaly. *Tenki*, **45**, 31-40.
- Maruyama, T., Saito, K., Ishikawa, S. and Nagasaka, S., 2002: Analysis of annual mean temperature difference between prefectural capital cities and their surrounding small town by AMeDas data. *Trans. Agric. Eng. Soc. Jpn.*, **218**, 127-136.
- Mikami, T., 1996: Urban heat island phenomena and their long term variations in Tokyo. *Compr. Urban Stud.*, **60**, 77-85.
- Noguchi, Y., 1994: The effect of urbanization on the long-term trends of daily maximum and minimum temperatures. *Tenki*, **41**, 123-135.
- Oke, T. R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.*, **7**, 769-779.
- Park, O., Yasunari, T., Oki, R. and Oda, T., 1994: Detection of the urban climate component based on the seasonal variations of surface air temperature anomaly. *Geogr. Rev. Jpn. Ser. A*, **67**, 561-574.