日本における近年の著しい夏季高温の発生状況

藤部文昭 (気象研究所)

近年、盛夏期に多発している著しい高温について、アメダス資料を利用してその空間分布と経年変化(1979~2002年)を調べた。昼間の高温(最高気温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ あるいは $\geq 38^{\circ}\text{C}$)は三大都市圏の内陸域で多発し、夜間の高温(最低気温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ あるいは $\geq 28^{\circ}\text{C}$)は関東以西の沿岸域と大都市の中心部で多発している。経年的にみると、関東~九州では夏季のピーク時の気温が $1^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ のオーダーで上昇しているが、850 hPaの気温上昇率は地上の半分以下であり、地上の経年昇温の過半は境界層内の変化である。この高温化は都市域だけでなく東~西日本の広範囲に及んでいるが、三大都市圏の内陸域では周辺地域に比べて最高気温の上昇率が $0.2\sim 0.4^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ 大きい。これらのことから、近年の大都市圏の高温多発傾向は、徐々に進展してきた都市ヒートアイランドにバックグラウンドの急激な高温化が加わった結果であると考えられる。

キーワード: 高温, 高温化, 気温の経年変化, ヒートアイランド, 盛夏期

I はじめに

日本では1994年の夏に記録的高温になって以降、盛夏期に著しい高温が多発するようになった(たとえば後出の図4参照)。熱中症による死者は毎年200人前後に達し¹⁾、電力需要が逼迫するなどの影響が出ている。そして、高温の原因の一端として都市ヒートアイランドの寄与が指摘され、その緩和対策への社会的要求が高まっている。

周知のように、日本の諸都市の気温は夜間(日最低気温)を中心として上昇している(たとえば、原田1982)。各都市の最低気温の経年上昇率と人口の対数との間には正相関があり、最高気温についても弱いながら正の相関がある(Fujibe 1995; 藤部1997)。また、東京や名古屋などの大都市域では都市化による気温上昇が都心部だけにとどまらず、夏の昼間には海風による移流効果などが加わって都市の内陸側数十kmにわたる範囲で昇温していることが、数値シミュレーションによって示されている(Kimura and Takahashi 1991; 高橋・木村1991; Kitada et al. 1998; Kusaka et al. 2000; 近藤2001: 113-124)。都市ヒートアイランドが夏の暑さを増す一因になっていることは、想像に難くない。

しかし、著しい高温の発生に対する大規模場の寄与も無視すべきでない。1994年の猛暑は全国的なものであって、その主因は大規模場にあり、加えて少雨・乾燥による地表面の顕熱フラックスの増加が昇温効果をもたらしたと考えられる(Fujibe 1996)。また、関東の内陸域では過去数十年間に著しい高温の発生が増加しており、その原因としては首都圏の都市化の進展のほかに、総観的な要因として中部山岳を越える暖かい西風の増加も関わっていると考えられる(藤部1998)。近年の高温を単純に都市化と結び付ける前に、まずその発生状況を見極め、「本当に都市域(だけ)で高温が多発しているか」、「経年的にみて、高温が都市域(だけ)で増えているか」を確かめることが望まれる。

今ではアメダスが本格運用になってから20年以上が過ぎ、1994年以降については10分ごとの観測値がデジタル化されている。本稿ではこれらの資料を利用し、近年の高温の空間分布と経年変化の特徴を明らかにする。

II 資料と解析方法

1994~2002年のアメダス10分値と、1979~2002年のアメダス1時間値を使った。最高気温(以下、

表1 $T_{\max}^{(10)}$ と $T_{\max}^{(\text{hour})}$, および $T_{\min}^{(10)}$ と $T_{\min}^{(\text{hour})}$ による階級別日数 (全対象地点の 1994~2002 年の総数) の比較

Table 1 Comparison of the number of days on which $T_{\max}^{(10)}$, $T_{\max}^{(\text{hour})}$, $T_{\min}^{(10)}$, and $T_{\min}^{(\text{hour})}$ exceeded each threshold value

最高気温 (°C) ¹⁾	≥35	≥36	≥37	≥38	≥39	≥40
$T_{\max}^{(10)}$ による日数 (日)	20,178	8,165	2,832	781	176	18
$T_{\max}^{(\text{hour})}$ による日数 (日)	14,601	5,618	1,797	483	89	6
最低気温 (°C) ²⁾	≥25	≥26	≥27	≥28	≥29	≥30
$T_{\min}^{(10)}$ による日数 (日)	46,688	18,081	5,132	936	142	7
$T_{\min}^{(\text{hour})}$ による日数 (日)	47,388	21,167	6,309	1,250	196	14

1) $T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ の場合, $T_{\max}^{(10)}$ と $T_{\max}^{(\text{hour})}$ の差の平均は 0.43°C , 1°C 以上の差が出る頻度は 10.0%.

2) $T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ の場合, $T_{\min}^{(10)}$ と $T_{\min}^{(\text{hour})}$ の差の平均は 0.14°C , 1°C 以上の差が出る頻度は 3.8%.

$T_{\max}$ は 09~21 時の最高値, 最低気温 (以下, $T_{\min}$) は前日 21 時~当日 09 時の最低値として求めた²⁾. これらの計算にあたっては 3 回の欠測を認め, 欠測がこれらより多い場合には $T_{\max}$ あるいは $T_{\min}$ を求めなかった.

10 分値による解析は, 連続観測で求められるべき真の $T_{\max}$, $T_{\min}$ に近く, その意味でより正確な値を得るために行ったものである. 一方 1 時間値による解析は, 資料を利用できる期間が長いことを生かして気温の経年変化を調べることを目的にしている. 以下それぞれを $T_{\max}^{(10)}$, $T_{\max}^{(\text{hour})}$ のように表す.

解析は全国を対象にしたが, 奄美・沖縄と小笠原は高温の発生状況が九州以北と大きく異なる ($T_{\min}$ の高値が非常に多い) ため除外した. 対象地点は, 解析期間中 ($T_{\max}^{(10)}$, $T_{\min}^{(10)}$ については 1994~2002 年, $T_{\max}^{(\text{hour})}$, $T_{\min}^{(\text{hour})}$ については 1979~2002 年) のすべての年に欠測率が 20% 未満であった地点とした. ここで欠測率とは, $T_{\max}$ については「国内のどこかで 35°C 以上の値が観測された日³⁾ のうち, その地点で $T_{\max}$ が求まらなかった日の比率」をいい, $T_{\min}$ については「国内のどこかで 25°C 以上の値が観測された日のうち, その地点で $T_{\min}$ が求まらなかった日の比率」をいう. 解析期間の途中から運用開始, あるいは途中で運用終了になった地点は対象外としたが, 地点が移転した場合には緯度・経度の

変化が 0.03° 未満であれば同じ地点として扱った⁴⁾. 以後の図中では, それぞれの解析対象になった地点数を n で示す. $T_{\max}$ と $T_{\min}$ とでは別々の時間帯の資料が使われるため欠測回数も異なり, n の値に若干の差ができる.

$T_{\max}^{(10)}$, $T_{\min}^{(10)}$ と $T_{\max}^{(\text{hour})}$, $T_{\min}^{(\text{hour})}$ とは当然異なる. 表 1 はそれぞれによる階級別日数を, 全対象地点について統計したものである. $T_{\max}^{(10)}$ と $T_{\max}^{(\text{hour})}$ との間には平均 0.43°C の差があり, 35°C 以上の日数には 1.5 倍, 40°C 以上の日数には 3 倍の開きがある. $T_{\min}^{(10)}$ と $T_{\min}^{(\text{hour})}$ による差はこれらよりも小さいが, 無視できるとまではいえない. 以下では $T_{\max}^{(10)}$, $T_{\min}^{(10)}$ と $T_{\max}^{(\text{hour})}$, $T_{\min}^{(\text{hour})}$ との間に系統的な差があることを認識し, 両者を混同しないように気を付けながら議論を進める⁵⁾.

参考までに, $T_{\max}^{(10)}$, $T_{\min}^{(10)}$ と連続観測から求められるべき真の最高・最低気温 (以下 $T_{\max}^{(\text{cont})}$, $T_{\min}^{(\text{cont})}$) との比較を表 2 に示す. ここで $T_{\max}^{(\text{cont})}$, $T_{\min}^{(\text{cont})}$ としては気象官署における 00~24 時の観測値を使い, $T_{\max}^{(10)}$, $T_{\min}^{(10)}$ もそれに合わせて 00~24 時の 145 個の 10 分値から求めた (したがって他の箇所の $T_{\max}^{(10)}$, $T_{\min}^{(10)}$ とは異なる⁶⁾). 表 2 によると, $T_{\max}^{(10)}$ と $T_{\max}^{(\text{cont})}$ とはほとんど差がないが, $T_{\max}^{(10)}$ と $T_{\min}^{(\text{cont})}$ との間には平均 0.22°C の差がある. 本研究で扱う $T_{\max}^{(10)}$ は, 真の最高気温に比べてこの程度の偏りを持っている

表2 $T_{\max}^{(\text{cont})}$ と $T_{\max}^{(10)}$, および $T_{\min}^{(\text{cont})}$ と $T_{\min}^{(10)}$ による階級別日数 (対象地点中, 気象官署における 1994~2002 年の総数) の比較

Table 2 Comparison of the number of days on which $T_{\max}^{(\text{cont})}$, $T_{\max}^{(10)}$, $T_{\min}^{(\text{cont})}$, and $T_{\min}^{(10)}$ exceeded each threshold value

最高気温 (°C) ¹⁾	≥35	≥36	≥37	≥38	≥39	≥40
$T_{\max}^{(\text{cont})}$ による日数 (日)	4,223	2,059	711	211	44	1
$T_{\max}^{(10)}$ による日数 (日)	4,067	1,616	553	152	33	0
最低気温 (°C) ²⁾	≥25	≥26	≥27	≥28	≥29	≥30
$T_{\min}^{(\text{cont})}$ による日数 (日)	15,659	6,371	1,808	319	31	1
$T_{\min}^{(10)}$ による日数 (日)	16,182	6,700	1,953	358	33	1

本表に限り, $T_{\max}$ と $T_{\min}$ は 00~24 時のデータから求められた値を示す.

1) $T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ の場合, $T_{\max}^{(\text{cont})}$ と $T_{\max}^{(10)}$ の差の平均は 0.22°C , 1°C 以上の差が出る頻度は 0.6% .

2) $T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ の場合, $T_{\min}^{(\text{cont})}$ と $T_{\min}^{(10)}$ の差の平均は 0.05°C , 1°C 以上の差が出る頻度は 0.0% .

図1 年間最高気温の分布図

Fig. 1 Distribution of annual maximum temperature based on 10-minute data from 1994 to 2002

ことを断っておく.

III 高温の空間分布

図1は1994~2002年における年間最高気温 ($T_{\max}^{(10)}$ の年間最高値, 以下 T_{MAX}) の平均値の分布を示したものである. 図2は1994~2002年における $T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ および $T_{\max}^{(10)} \geq 38^{\circ}\text{C}$ の日数⁷⁾ の分布を示す. また, これら3要素の上位20地点と, $T_{\max}^{(10)} \geq 40^{\circ}\text{C}$ が記録された地点・起日の一覧を表3の左側4項目に掲げる. これらから, 以下のことが読み取れる.

(1) T_{MAX} の分布 (図1) においては, 東京・名

古屋・大阪周辺すなわち「三大都市圏」の内陸域の高温傾向が目立ち, 特に関東の中~北西部は上位20地点のうち13地点を占める. また一方, 佐久間・天竜のように都市域から離れた場所にも, 著しい高温の現れる地点が散見される.

(2) $T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ および $\geq 38^{\circ}\text{C}$ の日数 (図2) においても同様の特徴がある. 三大都市圏への集中傾向は $T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ よりも $\geq 38^{\circ}\text{C}$ の日数のほうがより顕著である.

以上のように, 著しい高温の発現状況においては三大都市圏, とりわけ首都圏の暑さが際立つ. しかし, 東京・大阪都心は上位20位には含まれない.

図2 $T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ および $\geq 38^{\circ}\text{C}$ の年間日数分布

○の直径の対数が日数に比例するように描いてある。+は日数5日未満および1日未満の地点。

Fig. 2 Distribution of annual number of days with maximum temperature $\geq 35^{\circ}\text{C}$ and $\geq 38^{\circ}\text{C}$, based on 10-minute data from 1994 to 2002

Crosses indicate values lower than 5 days and 1 day, respectively.

これら2地点の $T_{\max}$ は共に 36.9°C (それぞれ67位, 71位) であり, $T_{\max}^{(10)} \geq 38^{\circ}\text{C}$ の日数は2日と3日にすぎず, 内陸側に位置する練馬や枚方に比べると大幅に少ない。昼間の著しい高温は都心部よりもその内陸側で発現することがわかる。

ついでながら, $T_{\max}^{(10)} \geq 30^{\circ}\text{C}$ すなわち真夏日の日数は, 関東から九州まで広く分布し, 三大都市圏への偏りは目立たない(図は省略)。真夏日日数の上位20地点はほとんどが西日本で, うち12地点が九州の地点であり, 大阪は年間72.4日で22位, 関東では練馬の62.8日(88位)が最多である⁸⁾。三大都市圏への集中傾向は, 35°C 以上あるいは 38°C 以上というような著しい高温だけにみられる特徴である。

図3は $T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ (熱帯夜) と $T_{\min}^{(10)} \geq 28^{\circ}\text{C}$ の日数の分布を示す。これらの上位20地点を表3の右側2項目に掲げる。特徴をまとめると, 以下のようになる。

(1) $T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ の多発地点は関東以西の主として沿岸域に分布し, 内陸域には少ない。しかし, 関東や東海~近畿では内陸でも日数が100日を超える地点がある(たとえば岐阜で284日, 熊谷で126日)。全体として, 大都市域の観測点で日数が多く, 表3に掲げられた大阪・福岡・東京のほか, 京都(286日), 横浜(259日), 名古屋(245日)などで200日を超える。

(2) $T_{\min}^{(10)} \geq 28^{\circ}\text{C}$ の多発地点は $T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ に比べて分布範囲が狭まり, 北陸以西の日本海沿岸と九州

表3 各要素の上位20地点と、 $T_{\max}^{(10)} \geq 40^{\circ}\text{C}$ の記録の一覧 (1994~2002年)
 Table 3 Top 20 stations for each parameter, and all the $T_{\max}^{(10)} \geq 40^{\circ}\text{C}$ records during 1994-2002

$T_{\max}^{(10)} \geq 40^{\circ}\text{C}$ の記録 ($^{\circ}\text{C}$ および起日)		年間最高気温の 高い順 ($^{\circ}\text{C}$)		$T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ 日数の 多い順 (年間日数)		$T_{\max}^{(10)} \geq 38^{\circ}\text{C}$ 日数の 多い順 (年間日数)		$T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ 日数の 多い順 (年間日数)		$T_{\min}^{(10)} \geq 28^{\circ}\text{C}$ 日数の 多い順 (年間日数)		
40.7	94.8.5	八開 (愛知)	38.9	伊勢崎 (群馬)	25.6	多治見 (岐阜)	3.9	多治見 (岐阜)	62.7	種子島 (鹿児島)	6.7	大阪 (大阪)
40.6	94.8.4	天竜 (静岡)	38.9	館林 (群馬)	21.1	枚方 (大阪)	2.7	伊勢崎 (群馬)	58.7	鹿児島 (鹿児島)	3.8	越前 (福井)
40.6	94.8.8	かつらぎ (和歌山)	38.7	熊谷 (埼玉)	20.2	堺 (大阪)	2.6	館林 (群馬)	53.3	尾之間 (鹿児島)	2.8	福岡 (福岡)
40.4	97.7.5	越谷 (埼玉)	38.6	佐久間 (静岡)	19.2	五條 (奈良)	2.6	佐久間 (静岡)	50.4	足摺 (高知)	2.6	東京 (東京)
40.3	01.8.1	多治見 (岐阜)	38.5	天竜 (静岡)	19.1	館林 (群馬)	2.4	天竜 (静岡)	47.4	大阪 (大阪)	2.4	鹿児島 (鹿児島)
40.3	01.7.24	佐久間 (静岡)	38.4	古河 (茨城)	18.8	佐久間 (静岡)	2.0	岐阜 (岐阜)	45.3	長崎 (長崎)	2.4	敦賀 (福井)
40.3	98.7.4	上里見 (群馬)	38.4	多治見 (岐阜)	17.9	日田 (大分)	1.7	枚方 (大阪)	44.9	下関 (山口)	2.3	糸魚川 (新潟)
40.3	95.8.4	天竜 (静岡)	38.4	鳩山 (埼玉)	17.7	久世 (岡山)	1.6	熊谷 (埼玉)	43.8	福岡 (福岡)	2.3	鳥取 (鳥取)
40.3	95.8.8	古河 (茨城)	38.3	前橋 (群馬)	17.1	京都 (京都)	1.4	久世 (岡山)	43.8	牛深 (熊本)	2.2	種子島 (鹿児島)
40.3	95.8.19	佐久間 (静岡)	38.3	越谷 (埼玉)	15.6	古河 (茨城)	1.3	越谷 (埼玉)	41.4	島原 (長崎)	1.9	米子 (鳥取)
40.3	94.8.8	枚方 (大阪)	38.2	練馬 (東京)	15.4	熊谷 (埼玉)	1.3	前橋 (群馬)	38.8	岡山 (岡山)	1.9	益田 (島根)
40.2	97.7.5	鳩山 (埼玉)	38.2	寄居 (埼玉)	15.4	越谷 (埼玉)	1.2	八開 (愛知)	38.3	東京 (東京)	1.9	富山 (富山)
40.2	94.8.7	八開 (愛知)	37.9	上里見 (群馬)	15.3	美濃 (岐阜)	1.2	甲府 (山梨)	37.3	広島 (広島)	1.9	和歌山 (和歌山)
40.1	97.7.5	館林 (群馬)	37.9	枚方 (大阪)	15.2	甘木 (福岡)	1.2	美濃 (岐阜)	36.9	和歌山 (和歌山)	1.8	福井 (福井)
40.1	94.8.7	枚方 (大阪)	37.8	八王子 (東京)	15.0	練馬 (東京)	1.1	鳩山 (埼玉)	36.6	津 (三重)	1.7	下関 (山口)
40.0	97.7.5	古河 (茨城)	37.8	久世 (岡山)	14.8	伊勢崎 (群馬)	1.1	練馬 (東京)	36.2	南淡 (兵庫)	1.6	長崎 (長崎)
40.0	94.8.5	枚方 (大阪)	37.7	所沢 (埼玉)	14.8	岐阜 (岐阜)	1.1	名古屋 (愛知)	36.0	枕崎 (鹿児島)	1.6	牛深 (熊本)
40.0	94.8.7	多治見 (岐阜) ¹⁾	37.7	久喜 (埼玉)	14.8	豊岡 (兵庫)	1.1	高梁 (岡山)	36.0	油津 (宮崎)	1.4	境 (鳥取)
			37.6	甲府 (山梨)	14.7	大垣 (岐阜)	1.1	古河 (茨城)	35.8	中館 (鹿児島)	1.3	厳原 (長崎)
			37.6	美濃 (岐阜)	14.7	大洲 (愛媛)	1.0	福渡 (岡山) ²⁾	35.4	玉野 (岡山)	1.3	津 (三重) ³⁾

1) 気象官署の連続観測 ($T_{\max}^{(10)}$) による値として、前橋で 40.0°C (2001年7月24日) が観測されている。

2) ほかに堺 (大阪)、寄居 (埼玉)、勝沼 (山梨) で1.0日。

3) ほかに枕崎 (鹿児島) で1.3日。

図3 $T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ および $\geq 28^{\circ}\text{C}$ の年間日数分布

○の直径の対数が日数に比例するように描いてある。+は日数5日未満および1日未満の地点。

Fig. 3 Distribution of annual number of days with minimum temperature $\geq 25^{\circ}\text{C}$ and $\geq 28^{\circ}\text{C}$, based on 10-minute data from 1994 to 2002

Crosses indicate values lower than 5 days and 1 day, respectively.

西部および瀬戸内が主となる。また大都市域においては、特に大阪と東京都心（それぞれ60日、23日）で多く発現している。

このように、 $T_{\min}$ の高値すなわち夜間の高温は大都市の中心部で多く、その傾向は $T_{\min}^{(10)} \geq 25^{\circ}\text{C}$ よりも $\geq 28^{\circ}\text{C}$ の日数のほうがより顕著になる。後半の点は、熱帯夜日数 ($T_{\min} \geq 25^{\circ}\text{C}$) で表現される以上に都市部の夜が暑いことを示している。日本海側で $T_{\min}^{(10)} \geq 28^{\circ}\text{C}$ の日数が多いのは、日本海を台風が進む時などの南風フェーンによるものと考えられる。

なお、 $T_{\min}^{(10)} \geq 30^{\circ}\text{C}$ の例は9年間に7回あり、うち5例は日本海側、他の2例は九州と瀬戸内で観測されたものである（最高は小松（石川県）の 30.6°C 、2000年7月31日）。東京では 29.5°C （1994年8月

5日；ただしこの日は夕方以降雷雨で気温が下がったため00～24時の $T_{\min}^{(\text{cont})}$ は 25.5°C ）、大阪では 29.3°C （1994年8月9日；00～24時の $T_{\min}^{(\text{cont})}$ も同じ）が最高である。

IV 高温の経年変化

図4の左側は全国（南西諸島を除く）を対象にして $T_{\max}^{(\text{hour})} \geq 35^{\circ}\text{C}$ の延べ日数（地点ごとの日数の和）の経年変化を示す。年による変動はあるが、全体として増加傾向があり、1994年に $T_{\max}^{(\text{hour})} \geq 35^{\circ}\text{C}$ の延べ日数が4000日を超えて以降、1000日以上の方が頻発している。図4右側は $T_{\min}^{(\text{hour})} \geq 25^{\circ}\text{C}$ の延べ日数を示したものである。 $T_{\max}$ の場合ほど急激ではないが、やはり増加傾向がみられる。

図 4 $T_{\max}^{(\text{hour})} \geq 35^{\circ}\text{C}$ および $T_{\min}^{(\text{hour})} \geq 25^{\circ}\text{C}$ の年間延べ日数 (地点ごとの年間日数の合計) の経年変化
 Fig. 4 Changes in the cumulative number of days (summation of the number of days at each station) with maximum temperature $\geq 35^{\circ}\text{C}$ and minimum temperature $\geq 25^{\circ}\text{C}$

図 5 $T_{\max}$ および $T_{\max} - T_{850}$ の経年変化率 (年間上位 10 個の $T_{\max}^{(\text{hour})}$ 値を対象にした 1 次回帰) の分布
 ○は上昇, ●は下降を表し, それぞれの面積が上昇・下降率に比例するように描いてある. + は変化率 $0.5^{\circ}\text{C}/(20 \text{ 年})$ 未満.
 Fig. 5 Linear trend of $T_{\max}$ and $T_{\max} - T_{850}$ from 1979 to 2002, where $T_{\max}$ is the average of the top 10 values of daily maximum temperature, and T_{850} is the temperature at 850 hPa
 Open and closed circles indicate rise and fall, respectively, and crosses indicate changes less than $0.5^{\circ}\text{C}/(20 \text{ years})$.

図6 $T_{\min}$ および $T_{\min}-T_{850}$ の経年変化率 (年間上位10個の $T_{\min}^{(\text{hour})}$ 値を対象にした1次回帰) の分布
○は上昇, ●は下降を表し, それぞれの面積が上昇・下降率に比例するように描いてある. +は変化率 $0.5^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ 未満.
Fig. 6 Linear trend of $T_{\min}$ and $T_{\min}-T_{850}$ from 1979 to 2002, where $T_{\min}$ is the average of the top 10 values of daily minimum temperature, and T_{850} is the temperature at 850 hPa
Open and closed circles indicate rise and fall, respectively, and crosses indicate changes less than $0.5^{\circ}\text{C}/(20\text{ years})$.

図5-aは, 夏のピーク時の気温の指標として地点ごとに年間上位10位までの $T_{\max}^{(\text{hour})}$ を取り, 1次回帰による1979~2002年の経年変化率を示したものである. 北海道では低下傾向があるが, 関東以西では多くの地点で $1\sim 2^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ 以上の上昇がある.

この変化が自由大気の変化と連動したのか, それとも境界層内のものかを知るため, $T_{\max}^{(\text{hour})}$ と850 hPaの気温 T_{850} との差 (以下 $\Delta T_{\max}$) を調べた. 850 hPa気温としては, 12地点 (稚内, 札幌, 根室, 秋田, 仙台, 輪島, 館野, 八丈島, 米子, 潮岬, 福岡, 鹿児島) の高層観測による21時の値を, 下記の最小2乗条件で各地点に内挿したものを使った9).

$$\sum_{k=1}^{12} \exp\left[-\left(\frac{r_k}{r_0}\right)^2\right] (T_k - a_1 x_k - a_2 y_k - T_{850})^2 \rightarrow \text{最小}, \quad (1)$$

ここで x_k と y_k はそれぞれ内挿対象地点を原点とする k 番目の高層観測点の東西・南北座標であり, T_k はその850 hPa気温, $r_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2}$ である. r_0 は高層観測点の間隔を考慮して500 kmとした. 未知数 (最小2乗係数) は a_1 , a_2 , T_{850} であり, このうち T_{850} が内挿値を与える.

図5-bは $\Delta T_{\max}$ の経年変化率を示したものである. これをみると, 関東以西で 1°C 前後の上昇がみられる. このことは, 近年の $T_{\max}$ の上昇傾向の一部が境界層内の変化であることを示している.

図6は年間上位10位までの $T_{\min}^{(\text{hour})}$ 値, およびそれと T_{850} との差 $\Delta T_{\min}$ について, 同様のことを示

図7 $T_{\max}$ の経年変化における T_{850} と $\Delta T_{\max}$ ($=T_{\max}-T_{850}$) の寄与分, および $T_{\min}$ の経年変化における T_{850} と $\Delta T_{\min}$ ($=T_{\min}-T_{850}$) の寄与分

いずれも地域平均値。なお甲信は長野・山梨, 東海は静岡・愛知・岐阜・三重, 北陸は新潟・富山・石川・福井, 近畿は滋賀・京都・大阪・和歌山・奈良・兵庫の各府県。

Fig. 7 Contributions of T_{850} and $\Delta T_{\max}$ ($=T_{\max}-T_{850}$) in the linear trend of $T_{\max}$, and of T_{850} and $\Delta T_{\min}$ ($=T_{\min}-T_{850}$) in the linear trend of $T_{\min}$, averaged over each region

したものである (T_{850} は前日 21 時の値を使用)。

$T_{\max}$ の場合よりも率は小さいが, 関東以西で $T_{\min}$ に $1^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ 程度, $\Delta T_{\min}$ にも若干の上昇傾向がみられる。

図7は関東～九州を八つの地域に分け, $T_{\max}$ と $T_{\min}$ の上昇率 (地域内の平均値) を, T_{850} の寄与と $\Delta T_{\max}$, $\Delta T_{\min}$ の寄与とに分けて示す。図8は関東と九州の経年変化をグラフで示したものである。 $T_{\max}$ も $T_{\min}$ も, 年々の変動はあるがほぼ単調に上昇している。 $T_{\max}$ の上昇率は関東で $2^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ 弱, 九州で $1^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ 強であり, 東の地域ほど大きい。これは主として T_{850} の違いによるもので, $\Delta T_{\max}$ の上昇率は各地域とも $1^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ 前後である。 $T_{\min}$ は $T_{\max}$ よりも上昇率が小さく, $\Delta T_{\min}$ の上昇率にやや地域差がある (東日本で小さい)。関東～九州の平均値でみると, $T_{\max}$ の上昇率のうち T_{850} による分は $0.47^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$, $\Delta T_{\max}$ は $1.05^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ であり, 経年上昇率の7割が境界層内の昇温による。 $T_{\min}$ についても, T_{850} と $\Delta T_{\min}$ の上昇

図8 関東と九州における各要素の経年変化
上図では $T_{\max}$ は左側目盛り, T_{850} と $T_{\max}-T_{850}$ は右側目盛り。
下図では $T_{\min}$ と T_{850} は左側目盛り, $T_{\min}-T_{850}$ は右側目盛り。
Fig. 8 Time series of each parameter averaged over the Kanto and Kyushu regions

In the upper part, the scale for $T_{\max}$ is on the left, and that for T_{850} and $T_{\max}-T_{850}$ is on the right. In the lower part, the scale for $T_{\min}$ and T_{850} is on the left, and that for $T_{\min}-T_{850}$ is on the right.

率がそれぞれ 0.34 , $0.58^{\circ}\text{C}/(20\text{年})$ であり, やはり境界層内の昇温のほうが大きい。

また, 同じ地域内でも上昇率にばらつきがある (図5, 6)。その中には, たとえば九州の西側よりも東側で上昇率が大きいというような, 気候学的に意味のあるシグナルもみられる。しかし, ところどころに孤立して上昇率が大きかったりマイナスであったりする地点もあり, これらは観測所の移設や立地条件の変化の影響を受けている可能性もある。

上記の高温化は東～西日本の広域に及ぶものであり, 都市化による気温変化のシグナルは一見して目立たない。これを検証するため, 三大都市圏の内陸域における $T_{\max}$ の上昇率を, 関東・東海・近畿の地域平均上昇率 (図7) と比較した。対象地点は各都市圏の中で沿岸域や海拔 150 m 以上の場所を除

図9 図10と図11の解析対象になった都市圏の地点(●印)
斜線域は濃さの順に海拔200 m, 500 m, 1000 m, 2000 m以上の領域。

Fig. 9 Suburban stations (dots) used for the analysis in Figs. 10 and 11

Hatching indicates the area with altitude above 200 m, 500 m, 1000 m, and 2000 m above mean sea level with increasing tones.

図10 都市圏(図9)とそれらを含む各地域の T_{max} の経年変化における T_{850} と ΔT_{max} ($=T_{max}-T_{850}$) の寄与分の比較

Fig. 10 Contributions of T_{850} and ΔT_{max} ($=T_{max}-T_{850}$) in the linear trend of T_{max} in each of the three regions and the suburban stations (Fig. 9) therein

く以下のものを選んだ(図9)10)。

関東: 古河(茨城), 前橋, 桐生, 伊勢崎, 館林(以上群馬), 寄居, 熊谷, 久喜, 鳩山, さいたま, 越谷, 所沢(以上埼玉), 練馬(東京)

図11 都市圏(図9)とそれらを含む地域の ΔT_{max} の差 ($\delta\Delta T_{max}$) の経年変化

Fig. 11 Time series of $\delta\Delta T_{max}$, which is the difference of ΔT_{max} in each region and the suburban stations therein

東海: 八開, 名古屋, 豊田(以上愛知), 美濃, 揖斐川, 美濃加茂, 関ヶ原, 大垣, 岐阜, 多治見(以上岐阜)

近畿: 枚方, 豊中, 堺, 熊取(以上大阪), 三田, 三木(以上兵庫), 奈良(奈良)

図10は, 上記の地点と周辺地域の T_{850} , ΔT_{max} の変化率を比較して示したものである。都市圏のほうが周辺地域の平均よりも昇温率が大きく, ΔT_{max}

の差 $\delta\Delta T_{\max}$ は東京・名古屋・大阪圏でそれぞれ 0.36^* , 0.22 , $0.32^{**}\text{°C}/(20\text{年})$ である (*は5%水準で有意, **は1%水準で有意であることを表す; 以下同じ). 図11は $\delta\Delta T_{\max}$ の経年変化をグラフで示したもので, 東京・大阪圏では右上がりの変化が明らかにみられる.

なおこれらの地域では $\Delta T_{\min}$ の周辺地域との差 $\delta\Delta T_{\min}$ にもそれぞれ 0.22^* , 0.16 , $0.24^*\text{°C}/(20\text{年})$ の上昇がある. また, 東京・大阪都心の $\delta\Delta T_{\min}$ 上昇率はそれぞれ 0.15 , $0.24\text{°C}/(20\text{年})$ であり, 夜間の高温が顕著である割に小さな値である. このことは, 東京・大阪都心の高温化が近年はむしろ鈍化している可能性を示唆する.

V 議 論

今回の解析により, (1) 昼間の著しい高温は三大都市圏の内陸域で多発していること, (2) 夜間の高温は沿岸域や大都市で多いこと, (3) 1979年以降の経年変化において, 高温時の気温が上昇していることが示された. (1)(2)は, 大都市圏の内陸域における昼間の高温化と夜間の都心部の高温化を示す既往の研究結果 (I) と矛盾せず, 高温の一因が都市化にある可能性を示している.

しかし, (3)の急激な高温化は関東から九州にかけて広く起きている変化であり, 都市よりもスケールの大きい, いわばバックグラウンドの昇温関わっている. その一方, 大都市圏の内陸域では $T_{\max}$ の上昇率がやや大きく, ヒートアイランドの進展も高温化に一部寄与していることが示唆される. 都市圏の上昇率の割増し分は首都圏の場合 $0.36\text{°C}/(20\text{年})$ で, 一見小さそうであるが, これは100年当たりによれば 1.8°C であり, Iで触れた既往の研究結果と矛盾しない. 実際, 現在の大都市圏の姿は過去100年以上にわたる発展の結果であり, ヒートアイランドの進展も10年や20年ではなく数十年から100年の時間スケールで論ずべきものである.

以上をまとめると, 近年の大都市圏の暑さは「長期間 (数十年以上) にわたって徐々に進展してきた都市ヒートアイランドに, バックグラウンドの急激な (10年スケールの) 高温化が加わった結果」であると解釈できる.

地域別にみて $T_{\max}$ の上昇率が最も大きいのは関東である. これは T_{850} の上昇が大きいことを反映したもので, 総観的な要因による高温化が首都圏の昼間の昇温傾向を他地域よりも際立たせていることを示唆する. 藤部 (1998) が指摘したように, 1980年代以降は高温な西風の吹く日が増加しており, このことは中部山岳の風下側に位置する関東平野に特に著しい高温をもたらす. しかし, 夏季の気圧パターンの長期変動を詳しく解析して高温化との関連を具体的に検討することは, 今後の研究に残されている.

東日本～西日本全体としては, T_{850} の上昇よりもこれに相対的な地上の昇温, すなわち ΔT の上昇のほうが大きい. このことは「バックグラウンドの急激な高温化」に境界層内の何らかの要因が関わっていることを示唆する. 1994年の猛暑に関しては気温と降水履歴との間に相関が認められ, 高温の原因の一端が少雨による地表面の乾燥にあることが推測された (Fujibe 1996). しかし, 今回利用した1979～2002年の資料によると, 境界層内の昇温傾向はすべての季節にみられ, 気温と降水履歴の対応は弱いようである. 詳しい解析を通じてこの昇温の実体を解明することを, 今後の課題としたい.

VI ま と め

1) 高温の空間分布 (1994～2002年)

a. 昼間の高温

年間最高気温や $T_{\max} \geq 35\text{°C}$ あるいは $\geq 38\text{°C}$ 日数の分布においては, 三大都市圏とりわけ首都圏の高温が目立つ. 都心よりも内陸域が高温の中心である.

b. 夜間の高温

$T_{\min} \geq 25^{\circ}\text{C}$ あるいは $\geq 28^{\circ}\text{C}$ の日数は、関東・北陸以西の沿岸と大都市で多い。

2) 高温の経年変化 (1979~2002 年)

関東から九州にかけ、高温の日数や値に増加・上昇傾向がある。年間上位 10 位までの $T_{\max}$, $T_{\min}$ について経年変化率を求めると、 $T_{\max}$ は関東~九州で $1\sim 2^{\circ}\text{C}/(20\text{ 年})$, $T_{\min}$ も $1^{\circ}\text{C}/(20\text{ 年})$ 程度上昇している。850 hPa の気温上昇率は上記の値の半分以下であり、地上の経年昇温の過半は境界層内の変化である。この昇温は都市域に限らず広くみられるが、三大都市圏の内陸域では周辺地域に比べて最高気温の上昇率が $0.2\sim 0.4^{\circ}\text{C}/(20\text{ 年})$ 大きい。

以上のことから、近年の大都市圏の高温は、過去数十年以上にわたって進展してきた都市ヒートアイランドに、1980 年代以降急激に進んだバックグラウンドの高温化が加わった結果であると考えられる。

気象官署・アメダスの資料は気象研究所蔵の CD-ROM を利用した。本研究の骨子は 2003 年度日本地理学会春季学術大会 (2003 年 3 月 29 日, 東京大学) で発表した。

(投稿 2003 年 7 月 1 日)

(受理 2003 年 11 月 8 日)

注

- 1) 熱中症による年間の死者数は 1993 年までは 100 人以下の年が多かったが、1994 年に 589 人に達した後は 200 人前後で推移している。これは同じ期間の風水害による死者の倍以上にあたる。
- 2) 気象庁が発表する「日最高気温」、「日最低気温」は、00~24 時の最高値・最低値である。著しい高温はまず例外なく日中に現れるので、本研究で求めた高温日の $T_{\max}$ は 00~24 時の最高値と事実上一致する。しかし 00~24 時の最低値は、明け方よりも夜半前のほうが気温が低くなる場合があるため、「ひと晩の最低気温」を必ずしも表現せず、本研究で求めた $T_{\min}$ とは一致しないことがある。熱帯夜の本来の意味は「気温が 25°C 未満に下らない夜」であるので、本研究の $T_{\min}$ のほうが、その定義に合っている。以上は日最高・最低気温に対する日界の影響に関する問題であり、これは藤部 (1999, 2000) で詳述されている。
- 3) 「日最高気温 35°C 以上の日」は、気象庁では特に呼

称が定められていないが、報道などではしばしば「酷暑日」と呼ばれ、著しい高温の一つの目安になっている。

- 4) 0.03° という値は「小規模 (3 km 程度) の移動」の目安として便宜的に設定したものである。
- 5) $T_{\max}^{(\text{hour})}$ と $T_{\min}^{(\text{hour})}$ を補正して使う方法もあるが、本研究ではデータに手を加えるのをはばかったことと、アメダス 1 時間値による日極値は気象庁の業務で長年使われてきたことを考え、補正をしなかった。なお、気象庁は 2003 年からアメダス地点の日極値を、それまでの 1 時間値に代えて 10 分値を使って求めるようになった。
- 6) 前掲注 2) 参照。
- 7) $T_{\max}^{(10)} \geq 35^{\circ}\text{C}$ の日と並んで $T_{\max}^{(10)} \geq 38^{\circ}\text{C}$ の日数を取り上げるのは、それが極端な高温であり、かつ統計資料としての価値を持ち得ると思われるだけの事例数があるからである。
- 8) 気温 30°C 以上の総時間数についても、上位は西日本の地点であるが、全体として都市の比率が高くなり、大阪・京都がそれぞれ年間 565 時間と 543 時間で 1, 2 位になる。関東では練馬の 435 時間 (35 位) が最多で、東京は 368 時間である。大都市で 30°C 以上時間数が多めなのは、朝夕の気温が高く高温の継続時間が長いことを反映している。
- 9) 1961~1994 年を対象にした同様の解析 (Fujibe 1996) によると、09 時の 850 hPa 気温を使っても、日射補正の有無による偏りを補正すれば、21 時のデータを使った場合とほぼ同じ経年変化率が得られる。850 hPa の代わりに 700 hPa の気温を使った場合も同様である。
- 10) 地点の選定にはある程度の任意性や主観性が入らざるを得ない。対象地点から東京・大阪を除き名古屋を含めたのは、名古屋の観測点が都心部ではなく、その山の手側に位置するからである。なお近畿の地点として大阪平野にある枚方、豊中、堺だけを使うと、 $\delta\Delta T_{\max}$ の上昇率は $0.75^{\circ}\text{C}/(20\text{ 年})$ になる。

文 献

- 近藤裕昭 2001. 『人間空間の気象学』朝倉書店。
- 高橋俊二・木村富士男 1991. 都市気候を表現する局地気候モデルの開発と応用。『平成 3 年度気象研究所研究発表会誌』44-51. なお結果の主要部分は気象庁 1994. 『近年における世界の異常気象と気候変動——その実態と見通し (V)』303-313 に掲載されている。
- 原田 朗 1982. 『大気汚染と気候の変化』東京堂出版。
- 藤部文昭 1997. 都市気象官署における気温極値の経年変化。『天気』44: 101-112.
- 藤部文昭 1998. 関東内陸域における猛暑日数増加の実態と都市化の影響についての検討。『天気』45: 643-653.
- 藤部文昭 1999. 日最低・最高気温の統計値における日界

- 変更の影響. 天気 46: 819-830.
- 藤部文昭 2000. 日最低・最高気温の階級別日数(冬日・熱帯夜など)における日界変更の影響. 天気 47: 245-253.
- Fujibe, F. 1995. Temperature rising trends at Japanese cities during the last hundred years and their relationship with population, population increasing rates and daily temperature ranges. *Pap. Meteorol. Geophys.* 46: 35-55.
- Fujibe, F. 1996. Boundary layer features of the 1994 hot summer in Japan. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 74: 259-272.
- Kimura, F., and Takahashi, S. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area: A numerical experiment. *Atmos. Environ.* 25B: 155-164.
- Kitada, T., Okamura, K., and Tanaka, S. 1998. Effects of topography and urbanization on local winds and thermal environment in the Nohbi Plain, coastal region of central Japan: A numerical analysis by meso-scale meteorological model with a k -turbulence model. *J. Appl. Meteorol.* 37: 1026-1046.
- Kusaka, H., Kimura, F., Hirakuchi, H., and Mizutori, M. 2000. The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 78: 405-420.

Geographical Review of Japan 77-3 119-132 2004

Features of Extremely High Summertime Temperatures in Japan in Recent Years

FUJIBE Fumiaki (Meteorological Research Institute)

Since the unusually hot summer in 1994, extremely high temperatures have frequently been observed in the midsummer season in Japan. As a possible factor increasing the heat, the urban heat island effect has received public interest, calling for political and technical measures to alleviate it. However, it still remains uncertain whether and how the urban effect contributes to the recent heat. The present paper aims to describe the spatial distribution and trends of high temperature with attention to urban anomalies using the data of the Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) network.

The analysis of the spatial distribution of high temperature is based on daily maximum and minimum temperatures ($T_{\max}$ and $T_{\min}$) defined from 10-minute data for the period 1994-2002. The daytime high temperature ($T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} \geq 38^{\circ}\text{C}$, and the annual extreme of $T_{\max}$) was the most pronounced in the inland part of three large urban complexes centered on Tokyo, Osaka, and Nagoya. The nocturnal high temperature ($T_{\min} \geq 25^{\circ}\text{C}$ and $T_{\min} \geq 28^{\circ}\text{C}$) was pronounced at coastal stations and in large cities, especially in Osaka and Tokyo. These features are apparently in agreement with previous studies on the urban heat island, which is characterized by nocturnal warming in the central area of cities and daytime warming on the inland side of large urban complexes located on the coast.

To evaluate the trend of high temperature in recent decades, the ten highest values of $T_{\max}$ and $T_{\min}$ in each year and their deviation from the 850-hPa temperature were analyzed using hourly data from 1979 to 2002. There were rising trends in $T_{\max}$ and $T_{\min}$ on the order of $1^{\circ}\text{C}/(20 \text{ years})$ in a wide area from central Honshu to Kyushu. The change at 850 hPa accounts for only a fraction of these changes. These facts indicate rapid warming in the background field during the past few decades, with a larger amplitude in the boundary layer than in the free atmosphere. The signal of urban warming is nearly concealed in this change, but there are some anomalous trends of $T_{\max}$ in the inland areas adjacent to the three cities by $0.2\text{--}0.4^{\circ}\text{C}/(20 \text{ years})$ in comparison with surrounding regions. This implies the existence of slowly intensifying urban warming, which can have a substantial impact on a time scale of several decades or a hundred years.

In conclusion, the frequent occurrence of extremely high temperature in the major urban areas in Japan can be attributed to the rapid background warming in the past few decades superimposed on the preexisting and slowly intensifying urban heat island.

Key words: high temperature, temperature rise, long-term temperature change, urban heat island, midsummer