

日本の気候の長期変動と都市化

—2010年度日本気象学会賞受賞記念講演—

藤部 文昭*

1. はじめに

このたびは全く思いがけず、日本気象学会賞を受賞することになりました。私の研究を支え、評価して下さいました皆様に深く感謝致します。

私は東京大学海洋研究所（2010年に東京大学大気海洋研究所として再編）の院生として浅井富雄先生に指導して頂いた後、新東京航空地方気象台（今の成田航空地方気象台）を経て、1986年からは気象研究所予報研究部で主にメソ現象（局地現象）を統計的な立場から調べてきました。当時の予報研究部は比較的自由的な雰囲気があり、自分の興味に合わせた研究を進めることができました。また、海洋研で都市ヒートアイランドの研究に手を染めて以来このテーマに興味があり、都市気候に対する社会的関心の高まりを背景にして、都市の高温や降水についても調べました。ただ、当時はまだ都市気候を地球規模の気候変動と関連づけて扱うという発想はあまりありませんでした。

2004年になって藤谷徳之助所長（当時）のもとで気象研究所に「融合型経常研究」の制度ができ、研究部・室を越えた柔軟な研究体制がとれるようになりました。この年は日本に10個の台風が上陸し、また東京で39.5°Cという過去最高の気温が観測され、異常気象やそれと気候変動との関連に対する社会の関心が増していました。一方、2001年ごろから気象庁で降水データの電子化が進められ（3.1節）、長期変動の解析に使えるデータが整備されつつありました。そこで、これらのデータを使った気候変動の研究計画に加わり、長期変動の研究を本格的に行えるようになりました。本

稿では、その結果を中心として、日本の気温と降水の長期変動の実態と、その問題点や課題を紹介し、併せて、長期変動の解析にとって重要であるデータの均質性の問題について、若干の議論を行います。

2. 日本の気温の長期変動

日本では都市の環境変化が著しく、都市の気候変動には地球温暖化だけでなく都市化の影響が関わっています。地球温暖化と都市高温化〔後注1〕とは、ともに人為的要因による昇温ですが、メカニズムも空間スケールも全く異なっており、気候変動の実態を調べる上では両者の違いを意識した解析が求められます。この章では、全国規模の気候変動〔後注2〕と都市効果の分離、および夏の暑さと都市化の関連を取り上げます。

2.1 全国規模の気温変化と都市高温化の影響

地球温暖化の監視にとって、観測地点周辺の都市化の影響は誤差要因（都市バイアス）になります。都市バイアスが問題になる理由の1つとして、歴史の長い観測点の多くが都市やその近くにあるという事情があり、これは日本にも当てはまります。都市バイアスについては1980年代からさまざまな形で研究が進められ、全球の気温変化率の算定に当たって都市化の影響を補正あるいは回避する努力がなされてきました（Karl *et al.* 1988 ; Jones *et al.* 1990）。現在では対流圏全体にわたる昇温傾向や、海面水温の上昇傾向も確認されており、過去数十年間の全球の気温上昇（1906～2005年に0.74°C/(100年)）には都市バイアスがほとんどないとされています（IPCC 2007）。

一方、地球温暖化の研究者からは都市高温化への疑問や慎重論も出ています。その論点は、(1)都市高温化の根拠になるデータの信頼性や均質性に疑問がある、(2)気温に対しては微気候的な影響が大きく、都

* 気象研究所予報研究部。ffujibe@mri-jma.go.jp.

—2010年7月22日受領—

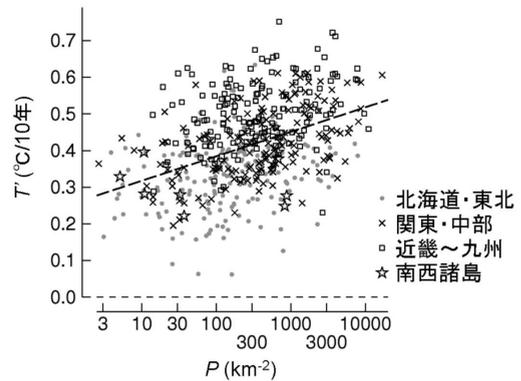
—2010年10月21日受理—

市イコール高温という単純な図式は正しくない、(3) 都市効果を強調する情報が偏って流布している、等です (Peterson 2003; Peterson and Owen 2005; Parker 2006, 2010; Jones and Wigley 2010) [後注3]。これらの指摘にはそれぞれもっともなところがあり、実際にヨーロッパやアメリカでは昇温傾向が目立たない都市もあって (Jones *et al.* 2008; Jones and Lister 2009), その理由としては都市化の進展が止まったことや、観測所が公園や空港に設置されていることが挙げられています。都市気候の研究者としては、これらの意見を受け止め、より実証的な研究を進めていくことが求められます。他方、都市と郊外の昇温率の差を示す研究結果も相次いでおり (Stone 2007; McCarthy *et al.* 2010), 特に東アジアでは都市の昇温傾向が多くの研究で指摘されています (Choi *et al.* 2003; Zhou *et al.* 2004; Griffiths *et al.* 2005; Hua *et al.* 2008; Ren *et al.* 2008; Kataoka *et al.* 2009; Lai and Cheng 2010)。また、アメリカでもロサンゼルスやフェニックスでは100年当たり数°Cの大幅な昇温が見出されています (Hansen *et al.* 1999; Tamrazian *et al.* 2008) [後注4]。CRUの格子気温データについても、中国東部や日本では都市バイアスが存在する可能性があります (Jones *et al.* 2008; Fujibe and Ishihara 2010)。

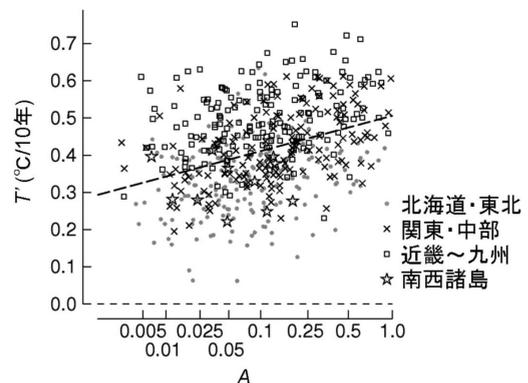
日本の場合、東京などの大都市では過去100年間に2~3°Cの昇温があり (気象庁 2005, 2010, 2005-2010), 都市化の影響は明らかです。しかし、気候変動監視の観点からすると、大都市以外の気温データに都市バイアスが含まれるかどうかが問題になります。気象庁の気候監視業務には17官署の気温データが使われており、1898~2009年の平均昇温率は1.13°C/(100年)と算定されています。これらの官署は「観測データの均質性が長期間維持され、かつ都市化などによる環境の変化が比較的少ない」という条件で選ばれたものですが、その中には県庁所在地の地点も含まれており、「都市化の影響は完全には除去されていない」(気象庁 2010)とされています。全国規模の気候変動を精度良く評価するためには、都市バイアスが存在する可能性を念頭に置き、都市と広域場の昇温率をそれぞれ量的に見積もっていく必要があります。

Fujibe (2009 b, 2010 b) はアメダス資料を使って、近年の気温上昇における都市化の寄与を調べました。第1図は1979年3月~2008年2月の29年間の資料 (移転などの影響が小さいと判断された531地点; 解析方

法の詳細はFujibe (2009 b) 参照) を使って、気温上昇率 T' と観測点周囲の人口密度 P の関係を示したものです。 P は2000年の国勢調査による約1 km格子 (緯度30秒×経度45秒) の人口データを使い、ガウス関数型の重み ($\exp\{-r/r_0\}^2$; $r_0=3$ km) をかけて観測点周囲の値を求めたものです。第1図によると、 $P < 100$ 人/km²というほとんど都市化していない地点でも、0.3°C/(10年)ぐらゐの昇温があり、これは近年の高温化が全国規模のものであることを裏づけます。その一方、 T' と P との間には0.40の正相関があり、都市域の昇温が非都市地点よりも大きくなっています [後注5]。100 ≤ $P < 300$ 人/km²という都市化の程度が弱い地点でも、 $P < 100$ 人/km²の地点に比べてわずかながら昇温率が大きく、中小の都市でも若干の



第1図 気温の経年変化率 (1979年3月~2008年2月) と人口密度 P の関係。破線は1次回帰。Fujibe (2010 b) に掲載した図と同じ。



第2図 第1図と同様、ただし横軸は市街地率。

都市バイアスがあることが分かります。なお、曜日別気温の解析によっても、 $P \geq 300$ 人/km²の地点について平日と土休日の気温に有意な差があり、人為的效果の寄与が確認されます (Fujibe 2010 a)。

第2図は国土数値情報による1997年の土地利用データを使って、 T' と市街地率 A (土地面積に占める建物用地・幹線交通用地・その他の用地の比率) との関係を示したものです。 T' と $A^{1/2}$ の間には0.35の正相関があり、 $T'-P$ 関係 (第1図)と同様の特徴が認められます ($A^{1/2}$ とは、 A のベキのうち T' との相関が最大になる値)。しかし、1976年と1997年の土地利用データから求めた市街地率の変化率 A' については、 T' との相関はありませんでした (Fujibe 2009 b)。 T' が A' よりも A そのものと相関するという事実は一見不思議ですが、市街地面積そのものの変化よりも、市街地内の何らかの熱収支変化が、昇温率により強く反映することを示唆します。今後、この「熱収支変化」の実体を調べていくことが望まれます。

また、もっと長い期間の気温変化における都市バイアスの評価も課題です。アメダスが導入されるまで、日本には「区内観測」として1000ヶ所以上で気温や降水量の観測が行われており、その活用が期待されます。

なお、現在では2006年の土地利用データを国土交通省のサイト (<http://nlftp.mlit.go.jp/>) から入手できます。また、2005年の国勢調査による約1 km 格子の人口データは政府統計の総合窓口 (www.e-stat.go.jp) の「地図で見る統計 (統計 GIS)」で公開されています。

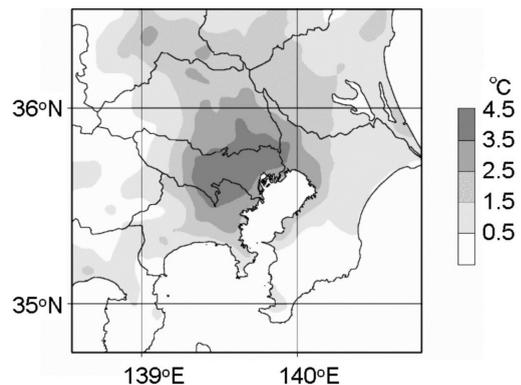
2.2 大都市域の夏の暑さ

地球温暖化や都市高温化が生活に最も大きく関わるのは夏の暑さです。厚生労働省の「人口動態統計」によると、「自然の過度の高温への曝露」による全国の死者数 (多くの報告物や報道では「熱中症による死者数」と表現される) は2007年に904人、2008年には569人を数えています。熱中症の発生数と気温との相関を示す調査結果は数多くあり (例えば環境省 2009)、2010年の夏は高温が長期間続いて高齢者を中心とした熱中症被害が社会問題になりました。著しい高温は人命に関わる気象災害として捉えていくべきでしょう。

もともと、都市ヒートアイランドの研究は夜、特に寒候期の夜に重点が置かれていました。これは、夜の方が昼間よりも上空への熱拡散が弱く、都市の気温偏

差が地上付近の薄い層内に集中する結果、ヒートアイランドが顕著に現れるためです。中でも寒候期の冷え込んだ夜は、郊外に強い接地逆転ができるのに対して都市の下層大気は中立成層に近く、都市内外の気温差が大きくなります。しかし1990年代以降、ヒートアイランドがもたらす都市の暑さに関心が集まるようになり、研究対象が夏へ移ってきました。それとともに、夜だけでなく昼間のヒートアイランドが注目されるようになりました。

従来、昼間のヒートアイランドは目立たないというのが通説でした。しかし、気象研究所の木村富士男先生 (現・海洋研究開発機構) と高橋俊二さん (現・室蘭地方気象台) が1990年ごろに行った数値シミュレーションの結果、暖候期の午後には東京の西～北側の数十～100 km にわたる範囲で都市効果による1°C以上の昇温が起きていることが示されました (Kimura and Takahashi 1991; 気象庁 1994; 第3図)。この「広域ヒートアイランド」とも言うべき変化は、個別の都市の単位で捉えられていたヒートアイランドの従来の概念を超えるものです。暖候期の午後の広域的な昇温傾向は、観測データの解析からも支持されます (Fujibe 1994, 2003)。また、京阪神や濃尾平野を対象にした数値シミュレーションでも同様の広域的变化が指摘されています (Ohashi and Kida 2002 a, b ;



第3図 都市効果による昇温量のシミュレーション結果 (「ヒートアイランド監視報告」(気象庁 2005)の結果を簡略化して表示)。8月の晴天日の条件を与え、都市パラメタリゼーション (人工排熱と土地利用; 簡単な都市キャノピー有り)を入れた場合と、都市を草地に置き換えた場合の計算を行い、14時の気温差を取ったもの。

Kitada *et al.* 1998；気象庁 2005-2010).

広域ヒートアイランドの主因は、市街化による蒸発散の抑制であると考えられます。夏の昼間は植生地からの蒸発散が盛んであるため、市街化によって蒸発散が減ると、顕熱が増加します。昼間は混合層が存在し、熱拡散が活発ですが、市街化による顕熱の増加量は非常に大きい (100 Wm^{-2} のオーダー) ため、混合層内に拡散してもなお 1°C 以上の気温上昇をもたらすものと解釈できます。言い換えると、広域ヒートアイランドは混合層内全体に及ぶ変化です。このことを裏づけるように、夏の午後の気温偏差は0.数 hPa の気圧低下を伴い風の変化を引き起こすことが、数値シミュレーションと統計解析の両面から見出されています (Kusaka *et al.* 2000；Fujibe 1994, 2003)。

広域ヒートアイランドのより詳しい形成メカニズムについては、解明すべき点が残っています。特に、内陸域の高温化に対し、午後に発達する「広域海風」やその変化がどう関わっているのか、あるいは、内陸域自身の都市化が寄与しているのかどうか、という問題は興味深いところです。

近年は3大都市圏の内陸域で 36°C 以上、あるいは 38°C 以上という著しい高温が多発しており、その分布は広域ヒートアイランドの範囲と重なっています (藤

部 2004 b)。このうち、関東内陸域にある熊谷や前橋では、著しい高温の日数が激増していることが確認されます (藤部 1998, 第4図)。ただ、このような高温がどこまで都市化によるのかについては、見極めが必要です。関東内陸域の高温は、高気圧におおわれた広域海風日だけでなく、総観場の風が西寄りになった日にもしばしば起こり、中部山岳の風下側の昇温が関わっていると考えられます [後注6]。1980年代以降、西風高温日が増える傾向があり (藤部 1998)、総観場の長期変動も念頭に置いて高温の発生要因を調べていくことが今後の課題です。

3. 降水の長期変動

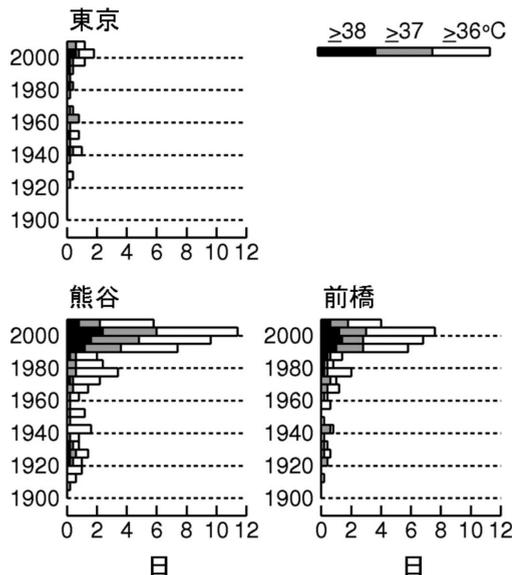
降水の長期変動も、地球温暖化と都市化による影響の両面から議論されています。しかし、気温に比べると降水は自然の年々変動が相対的に大きいため、まずはトレンドの有無を確認することが興味の対象になります。また、降水に対する都市化の影響は気温ほど明瞭ではなく、都市バイアスの評定よりも、むしろ都市化による変化の有無を確認することが求められます。このあたり、「温暖化で豪雨が激増」「ヒートアイランドのため都市部でゲリラ豪雨が頻発」というようなセンセーショナルな情報が先走ることのないよう、実態をきちんと見極める必要があります。

以下、全国規模の降水変化についての研究と、東京都心の短時間降水について都市シグナルの検出を試みた結果を紹介します。

3.1 全国規模の降水変化

大雨や降水日数の長期変動を知るためには、日降水量のデータが必要です。以前はそれが1961年以降の分しか電子化されていなかったため、できることに限界がありました。Iwashima and Yamamoto (1993) は気象官署の累年極値記録 (歴代1~3位) を使って、20世紀初頭以降の極端な降水の増加傾向を見出しました。当時は世界的にもまだこのテーマの研究例が少なく、上記の研究は先駆的なものでした。

2001年から2004年にかけて、気象庁で各官署の観測開始以来の降水データを電子化する作業が行われ、100年間以上にわたる降水の変化をさまざまな角度から調べられるようになりました。Fujibe *et al.* (2005, 2006 a) はこのデータを使い、降水の強さ別の長期変動や、日変化形の長期変動を調べました。また、51地点の1901年以降の日降水量データについては気象庁で丹念な品質チェックが行われ、うち43地点で欠測数が



第4図 東京・熊谷・前橋における最高気温 36°C 以上の日数の経年変化。1900~04年から2005~09年までの5年ごとについて、1年当たりの日数を示す。

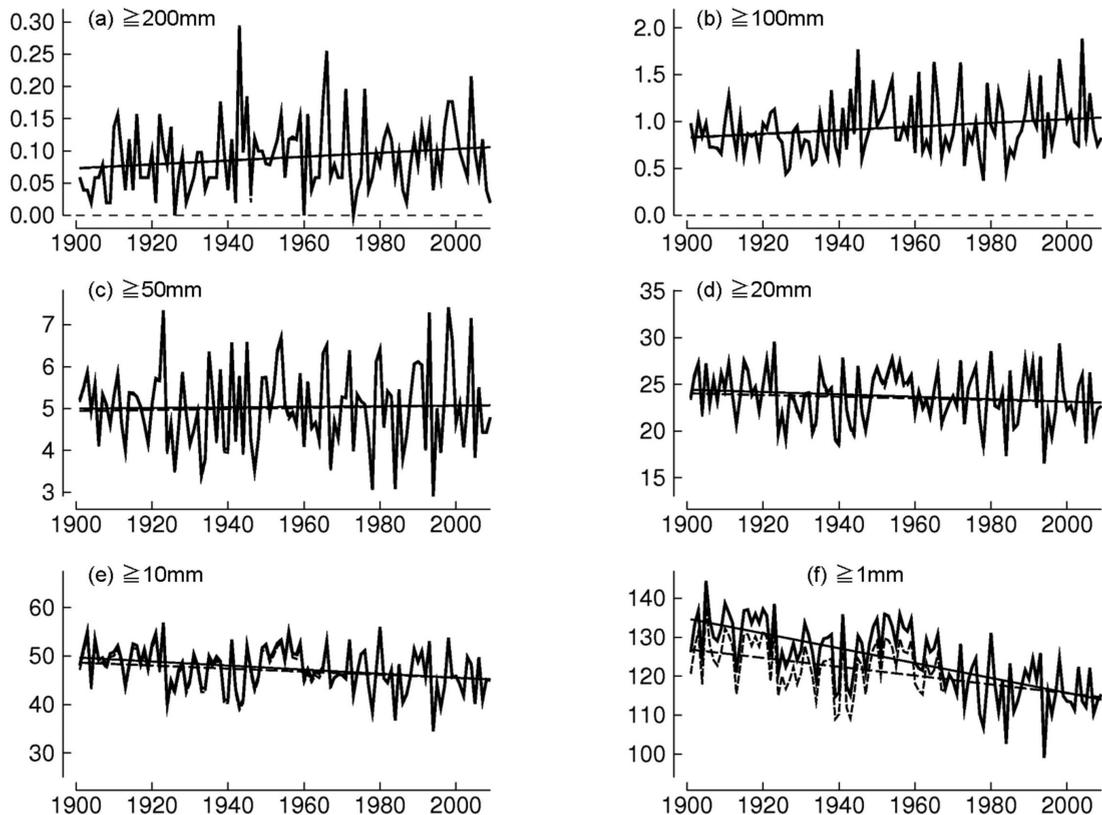
10個未満という質の高いデータセットが得られました。Fujibe *et al.* (2006 b) はこれを利用して強い降水や少雨の長期変化を解析しました。以下、対象期間を2009年まで延ばして再解析した結果を紹介します。

第5図は1901～2009年の109年間について、日降水量の階級別の変化を示したものです。降水量 ≥ 200 mmの日数や ≥ 100 mmの日数は年々の変動が大きく、1940～50年に極大、1980年ごろに極小を持つ長期変動も見られますが、全期間を通算すればそれぞれ33%/100年、21%/100年の率で増えており、後者は5%水準で有意です（以下、断らない限り有意水準を5%とする）。一方、日降水量 ≥ 10 mmや ≥ 1 mmという、弱いものまで含めた降水の頻度は、それぞれ8.8%/100年、15.4%/100年の率で有意に減っています。このように、日本では過去1世紀に強い降水が増え、弱い降水は減る傾向にあります。なお、年降

水量は上記51地点の平均として6.6%/100年の率で減少しています（10%水準で有意）。

ただし、大雨には地域差があることに注意が必要です。 ≥ 100 mmの日数は、西日本の南岸や南西諸島では年に2～3日であるのに対し、本州中部や北海道の一部地点では100年間に10日以下であり、その間に数十倍の差があります。従って、第5図の ≥ 200 mm日数や ≥ 100 mm日数のグラフは、全国を対象にした統計とは言っても、実際には主として西日本～南西諸島の変化を見ていることになります。

第6図は「各地点における109年間の日降水量の上位100事例」を取り、それらの発現頻度の経年変化を示したものです。これはその定義上、すべての地点が等しく寄与します。この尺度についても21%/100年の有意なトレンドが認められ、全国規模で大雨が増加していることを確認できます。第7図は上位100事例

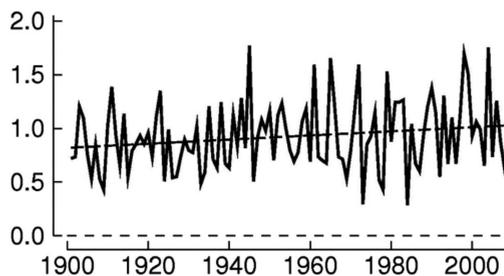


第5図 降水量の階級別年間日数の経年変化（51地点平均、1901～2009年）とその1次回帰。実線は、1960年代までの0.1 mm単位の観測値を転倒ます雨量計による0.5 mm単位の値に変換する際に無蒸発の仮定を使ったもの、点線は完全蒸発の仮定を使ったもの（4.3節参照）。 ≥ 20 mmから上の階級では、実線と点線はほぼ重なっている。

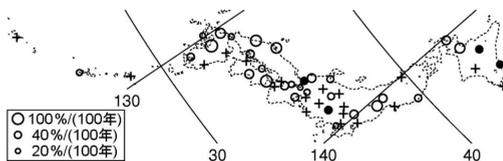
の頻度の経年変化率を地点ごとに示したものです。地点によるばらつきはありますが、全国的に増加地点が多く、特に西日本でその傾向の強いことが分かります。

強い降水の増加は世界各地で見出されており (Frich *et al.* 2002; Groisman *et al.* 2005; Alexander *et al.* 2006), その主因は気温上昇に伴う水蒸気量の増加にあると考えられます (IPCC 2007; 気象庁 2005; Emori and Brown 2005). 将来気候のモデルシミュレーションでも、温暖化に伴う全球あるいは日本域の大雨増加が予測されています (Kimoto *et al.* 2005; Kitoh *et al.* 2009). 一方、弱い降水の変化傾向は地域によって異なり、アメリカでは降水日数が増加している (Karl and Knight 1998) のに対し、中国では減少傾向が報告されています (Zhai *et al.* 2005; Liu *et al.* 2010). 将来気候シミュレーションの中にも日本付近の降水日数減少を予測しているものがあります (Kimoto *et al.* 2005).

社会的には「ゲリラ豪雨」という言葉に象徴される短時間強雨への関心が高まっていますが、時刻別データの品質や期間に限界があり、その長期変動実態についての研究はまだ少数です (Fujibe *et al.* 2005;



第6図 日降水量上位100事例の発現頻度の経年変化とその1次回帰 (51地点平均, 1901~2009年).



第7図 日降水量上位100事例の発現頻度の地点別経年変化率 (1901~2009年). ○は増加, ●は減少, +は変化率20%/(100年)未満の地点.

Iwasaki and Sunaga 2009). 時刻別のデータを整備して解析を進めていくことが今後の課題です (次節では東京の118年間の毎時降水量による解析結果を紹介しします). また、降水の増減と総観場との関連、例えば低気圧の頻度や降水系の性質の長期変動なども、これからの興味深い研究課題になると思います。

3.2 東京の短時間降水における都市シグナルの検出

都市は郊外に比べて地表面からの蒸発散が少なく、水蒸気量もどちらかと言うと郊外より少ないと考えられます (例えば榊原 2001; 藤部 2002). これらは降水の発達に不利に働くはずですが、その一方、都市では地表面の強い加熱によって混合層がより高く発達し、積雲の発生が促されること、ヒートアイランドに伴う局地循環 (ヒートアイランド循環) によって都市上空に上昇流ができ、上空へ水蒸気が蓄積されることが考えられ、これらは対流性降水を発生させやすくする要因になり得ます。アメリカでは1970年代に行われたMETROMEXをはじめとして、いくつかの都市の風下側 [後注7] で暖候期午後の対流性降水の増加が見出されています (Shepherd 2005; Pielke *et al.* 2007 b). しかし、日本では降水に対する総観規模擾乱やメソ擾乱の寄与が大きい上、地形の複雑さもあり、降水における都市シグナルの検出は簡単ではありません (藤部 2004 a).

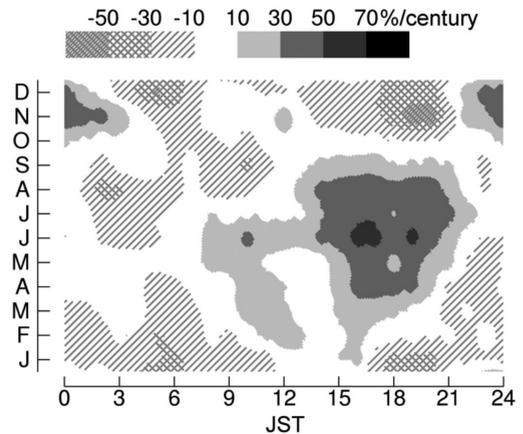
Inoue and Kimura (2004) は、首都圏の暖候期の積雲分布について、都市効果の明らかな証拠を見出しました。この研究は、11年間の4~10月の晴天日328日間について、NOAA衛星の画像を丹念に解析して関東平野の積雲分布を求めたものです。結果をLANDSATで得られるNDVIの分布と対比すると、東京から放射状に延びる鉄道沿線の市街地で雲量の多いことが確認されます。雲量分布が「場所の関数」であるように見えることから、地表面状態による混合層高度の差 (市街地で高い) が積雲量の差に効いていると考えられます。ただ、これらの雲は雨を降らせるものではなく、降水の変化については別途調べていく必要があります。

Kanae *et al.* (2004) は1890年以降の東京の毎時降水量データを独自に電子化し、これを使って1999年までの長期変動を調べました。その結果、強い降水が1990年代に増えたのは事実だが、1940年代にも強雨頻度の高い時期があり、単調に増加しているとは言えないことが示されました。この研究結果は「都市化で豪

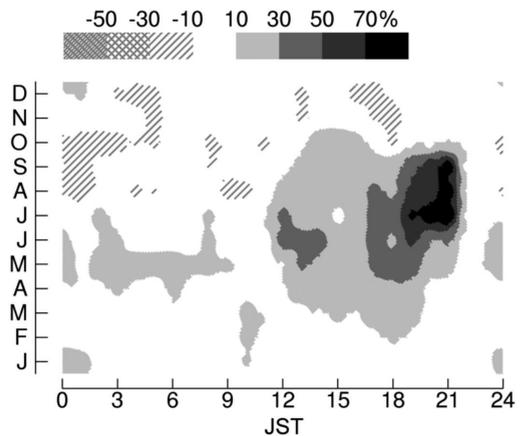
雨が激増…」というイメージが先行しがちな中で、結論を急ぐ前に十分長い期間の変化を見極めるべきことを示しています。

大気に対する都市の力学的影響が最も強いのは、市街地の蒸発散抑制効果によって大きな顕熱増が生ずる暖候期の午後であると考えられます。そこで、暖候期午後の短時間降水に的を絞った解析をすれば、都市のシグナルを検出できる可能性があります。2008年になり、東京管区気象台で東京と名古屋の19世紀末からの毎時降水データについて、品質チェックが完了しました(戸川ほか 2008)。Fujibe *et al.* (2009) はこれを使い、「前6時間降水量が1mm未満である」という条件を満たす「非継続的降水」[後注8]を定義してその経年変化を調べました。その結果、暖候期の16～20時を中心として30%/100年以上の有意な増加が認められました(第8図)。また、アメダスを使って「非継続的降水」の空間的な偏差(東京の周囲19地点の降水量を内挿した値からの差)を調べた結果でも、東京都心では暖候期の18時前後に数十%の正偏差が見出されました(第9図)。これらにより、東京都心における暖候期午後の短時間降水は、長期的に増加しているとともに、空間的にも正偏差を持つことが分かります。この他、自治体による稠密な雨量計データを使った研究も行われており、都内に強い降水の多い地域が見られる等、興味深い結果が出ています(Takahashi *et al.* 2009; 古橋・日下 2010)。

しかし、降水に対する都市の効果は卓越的なものではなく、あくまでも降水の発生・発達を促す1要因と考えるべきです。数値シミュレーションを使って都市の影響を調べる際、都市地表面のパラメタリゼーションを入れたモデルと入れないモデルの計算を行って結果を比べる方法がよく使われますが、Matheson and Ashie (2008) は東京付近の複数の降雨事例にこの方法を適用したところ、都市パラメタリゼーションを入れることによって都市域の降水量が増える例もあれば、減る例もありました。Kusaka *et al.* (2009) は、モデルによる降水分布が物理スキームなどの与え方に大きく左右されることを指摘した上で、2001～2007年の8月を対象にしてWRFに都市パラメタリゼーションを入れた場合と入れない場合の計算を行い、上記213日間の総降水量の分布を比べました。その結果、都市を入れた方が東京付近の降水量は多いが、それだけでなく、関東周辺の山地や海上の降水量にも変化が現れました。このことは、都市効果による局所的な変



第8図 東京の非継続的降水の経年変化率(1890～2008年)。Fujibe *et al.* (2009)のFig.2を白黒にしたもの。



第9図 東京の非継続的降水の空間偏差(1979～2008年のアメダス資料による)。Fujibe *et al.* (2009)のFig.5 aを白黒にしたもの。

化が遠方の降水に影響し得ることを示唆するものであり、都市と降水の因果関係に関する注意深いアプローチの必要性を示しています。

4. データの均質性の問題

地球温暖化をはじめとする長期的な気温変動においては、0.何°Cという変化が重要な意味を持ちます。そのため、予報業務や防災業務ではあまり問題にならない小さいバイアスが、解析結果の信頼性を左右します。気温の長期変化率を精度良く求めるためには、

データの長期的均質性の確保が鍵になります。

このテーマは個別の事項を対象にして扱ったことがあります(藤部 1999, 2000, 2001, 2003)が、今回この原稿を書く機会に、ひと通りの取りまとめをしてみました。なお、都市バイアスも気温データなどの均質性に関わる重要な要素ですが、これは前記のようにシグナルが強く、ヒートアイランドという実体の明らかな現象に伴うものであることから、本稿では別格として2.1節で扱いました。

4.1 気象庁におけるデータの均質性についての検討

気象庁の地上観測データにおける均質性の問題は、すでに1960年ごろから検討されていました。気象庁(1961, 1962)では官署の移転や観測方法の変更に対する統計の接続性の判断指針が示され、これはその後の気象統計業務の基本になりました。また、気象庁(1965)では測器や観測時刻の変更による観測値の不均質を補正する試みが紹介されています。気温に関する検討項目は、温度計の通風・非通風の違い、設置状況、日平均気温に対する観測回数の影響、日界の影響などであり、その検討結果は累年気候表(各観測所の年・月別値の表)の均質化に適用されました。このほか、測器変更における比較観測結果の一部は「測候時報」に掲載されています(例えば、気象庁 1984)。気象庁(1974)には当時の観測近代化に関するレビューや論説が特集されています。気象庁(2002)には、気象観測上の主な注意事項や測器の特性が解説されています。

これらの文献を見ていくと、観測方法の変更や平均値更新のたびに、ひと通りの調査・検討が行われていることが分かります。ただ、多くの調査結果の中には外部から参照しにくい資料にのみ掲載されているものもあり、こうした情報の蓄積・継承については物足りなさを感じざるを得ません。今後の気候研究の高度化に向け、資料の体系化と共有化が望まれます。また、データに要求される均質性の程度は、使う目的によって変わり、例えば気候変動の研究では通常の統計業務よりも高い精度の評価が求められることがあります。従って、統計上の接続の可否や補正の要否については、目的に応じた柔軟できめ細かい扱いが行われて然るべきでしょう。

官署の履歴に関しては、「気象庁年報」のCD-ROMに地点ごとの表が掲載されています。また、気象業務支援センター発行の「気象観測月報」(2009年

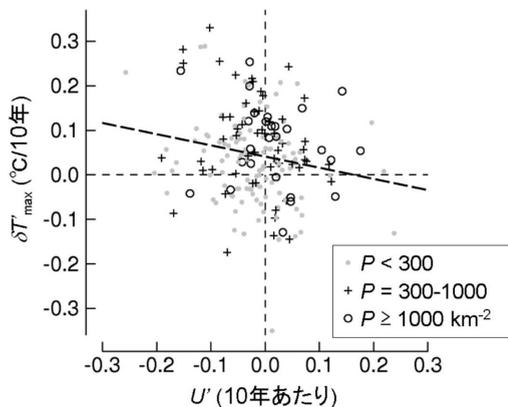
までは「気象庁月報」にはアメダス観測点の位置や風速計高度の変遷を書いた表があります。しかし、測器の交換や調整などマイナーな変更までは載っていないこともあるようで、資料の利用目的によっては不便を生ずる可能性があります。中井・横山(2009)は、降雪時のアメダスの降水量観測値が助炭(風よけ)の有無によって大きく変わることを指摘し、測器の変遷に関する情報共有の重要性を訴えています。

また、移転や移設のような不連続的な変化は分かりやすいのですが、徐々に進む環境変化の影響は評価しにくいという一面があります。最近になって、近藤純正先生(東北大学名誉教授)が気候変動の実態解析に関する一連の解説をホームページに掲載しています(www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/)。この中では、測器や観測方法、観測回数、日界などの変遷に加え、ミクロな観測環境の変化が観測値に及ぼす影響が議論されています。次節ではこの問題に関する研究の現状と問題点を議論します。

4.2 ミクロな環境変化に伴う気温観測値の変化

近藤先生は、観測所の周囲に建物や樹木が増えることによって熱拡散が弱まり、気温の観測値が上がる可能性を指摘し、これを「日だまり効果」と名づけました。建物や樹木の増加は、風速観測値の減少を伴うと考えられることから、気温の長期変化と風速の長期変化の間には負相関が予想されます。先生のホームページには国内19地点を対象にして、これを裏づける解析結果が載っています(www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke39.html)。

Fujibe(2009a)は、全国のアメダス地点(風速計の高さが10m未満で、その変化が小さい等の条件を満たす327地点)について、風速と気温の経年変化率の関係を調べました。その結果、年平均風速 \bar{U} が比較的大きい地点($\bar{U} \geq 1.5 \text{ ms}^{-1}$; 195地点)では、昼間の気温の経年変化率(周囲の非都市地点からの偏差 $\delta T'$; 解析方法の詳細はFujibe(2009a)参照)と風速の経年変化率との間に弱いながら有意な負相関があり、近藤先生の指摘に符合する結果が得られました(第10図)。しかし、平均風速が小さい地点($\bar{U} < 1.0 \text{ ms}^{-1}$ の38地点; 図は省略)では、夕方の気温変化率には風速変化率との負相関がありますが、昼間はむしろ気温変化率と風速変化率が正相関になる傾向があります。この結果は、ミクロな気候変化のメカニズムが単純ではないことを示唆します。熱拡散だけでなく放射の変化なども考慮しながら、「日だまり効果」の実



第10図 気温の経年変化率（1979年3月～2008年2月；周囲の非都市地点からの偏差 δT_{\max} ）と年平均風速の変化率 U' との関係。対象は、移転や風速計の移設が事実上なく、風速計の設置高度が地上10 m未満であり、かつ年平均風速 $\bar{U} \geq 1.5 \text{ ms}^{-1}$ である194地点。地点の人口密度 P によって記号を変えてあり、破線は全地点を対象にした1次回帰。 $\delta T'$ と U' の相関係数は、 $P < 300 \text{ 人}/\text{km}^2$ の112地点については -0.23 、全194地点については -0.18 であり、いずれも5%水準で有意。Fujibe (2009 a) から引用。

態とメカニズムを解明していくことが今後の課題です。

マイクロな環境変化によるデータの不均質性は、都市化されていない地点でも起こり得るものであり、気候変動解析におけるバイアス要因として国外でも議論されています (Changnon and Kunkel 2006; Mahmood *et al.* 2006; Runnalls and Oke 2006; Pielke *et al.* 2007 a)。しかし、今はまだ問題提起にとどまっており、その定量化・モデル化はこれからの研究課題です。

4.3 降水データの観測単位の変更

長期間の降水量の統計に当たって問題になることの1つは、雨量計の変更に伴う観測単位の変遷です。日本では1960年代の前半までは貯水型の雨量計による0.1 mm単位の計測が行われていましたが、1968年ごろに転倒ます雨量計が導入され、観測単位は0.5 mmになりました。アメダスでは、1994年ごろまで収録単位が1 mmでした。

転倒ます雨量計は、降水の積算量を0.5 mmの整数倍になるごとにカウントしていくもので、もしも降り始めの段階で雨量計内にすでに0.4 mm分の雨がた

まっていたら、新たに0.1 mmの雨が降ったところで「0.5 mm」の降水が記録されます。従って、日降水量1 mmと言っても、貯水型による観測値と転倒ますによる観測値とは意味に違いがあります。弱い降水に関わる統計にはこの違いが影響する可能性があり、何らかの補正が必要になります。

Kanae *et al.* (2004) は、貯水型雨量計による毎時の観測値を、端数を次の時刻に繰り越しながら0.5 mmごとに積算する方式で、転倒ますが使われたと仮定したときに得られるべき観測値へ換算しました。Fujibe *et al.* (2005, 2006 a, b) も、ほぼ同様の考え方で換算を行いました。しかしこれらの換算方法は、転倒ます雨量計に入った水がいつまでも蒸発せずに残ることを想定しています（以下「無蒸発の仮定」と表記）。一方、実際の転倒ますでは、中に残った雨がだんだん蒸発していくはずであり、そうだとすると上記の換算値は、正しい値（＝転倒ますを使ったときの観測値）を過大評価します。残念ながら雨量計内の蒸発を正確に評価するのは困難であり、代わりにFujibe *et al.* (2006 b) は、「日付が変わったとたんに、雨量計内に残っている水がすべて蒸発してなくなる」と仮定した場合（「完全蒸発の仮定」；日降水量を、端数を切り捨てながら積算することに相当する）の計算を併せて行って、無蒸発を仮定した場合の結果と比べました。正解は無蒸発と完全蒸発の間にあるはずなので、両方の結果を比べることにより、真の変化の範囲を絞り込むことができます。第5図の点線は完全蒸発の仮定による結果を示します。これによる $\geq 1 \text{ mm}$ 日数の減少率は9.4%/(100年)であり、無蒸発を仮定した場合よりも大幅に縮小します。しかし、幸いなことに符号は変わらないので、定性的には弱い降水の減少傾向が確認されます。また、 $\geq 10 \text{ mm}$ 日数に関しては、完全蒸発の仮定に基づく減少率は6.7%/(100年)であり、無蒸発の仮定による値と大差ありません。 $\geq 20 \text{ mm}$ 日数や、より強い降水の日数については、無蒸発でも完全蒸発でも実質的な差はなく、強い降水に対しては観測単位変更の影響は無視できます。

このほか降水量の観測値に影響し得る要因として、雨量計の周囲の気流による捕捉漏れ、受水器・貯水器内壁の濡れや受水器での跳ね返りによる損失などがあります (気象庁 2002; New *et al.* 2001; Groisman *et al.* 2005)。また、建物や樹木も降水量の観測値に影響する可能性があります。雨量計の変遷がこれらの要因を介して降水の長期変化の検出に与える影響につ

いては未知の部分が大きく、今後の調査が望まれます。

本稿では触れませんが、風、湿度、日照、あるいは目視観測要素についても、いろいろな不均質要因があります。ただ、強調しておきたいのは、同種の問題は他の国にもあり、日本の気象データは世界的に見れば良質で優れた気候情報源としての価値を持っていることです。この価値を気候研究に生かしていくためには、引き続きデータの電子化と品質管理を進めるとともに、観測所や観測方法に関する情報（メタデータ）を整備し、共有していくことが必要です。それを通じてデータの特性に対する理解を深め、バイアス要因を精査し定量化していくことが、信頼性の高い気候情報を得る鍵になると思います。

謝辞

東京大学海洋研究所（当時）では、浅井富雄先生をはじめとするスタッフの方から、気象に対する分析的な見方や、論文の書き方を教えて頂きました。気象研究所へ移ってからは、多くの方からメソ現象等について教えられ、研究を支援して頂きました。ここに深く感謝致します。また、私が今回の一連の研究を行うことができたのは、100年以上にわたって気象観測が続けられ、そのデータが蓄積・電子化されたおかげです。観測を行ってきた歴代の職員、データの電子化を提案した方、および電子化と品質チェックに携わった職員の皆様に深く敬意を表するとともに、今後いっそうデータの電子化と公開が進み、気候変動の研究に役立てられることを期待します。

後注

- 1 「温暖化」と「高温化」とは、本稿では同義です。ただ、「温暖化」はしばしば「地球温暖化」の意味に使われるので、これと区別するため、都市化による気温上昇を「高温化」と表現します。
- 2 端的に言えば地球温暖化ですが、「日本全国規模の気候変動」と地球温暖化とを完全には同一視できない可能性を考え、本稿では前者を「全国規模の変動」「広域変動」等と表現します。
- 3 Peterson (2003) は、都市の昇温傾向を示した過去の研究を、データの不均質や微気候的効果の可能性などを理由として次々に批判しています。都市高温化そのものを疑問視するかのようその論調は、都市気候の研究者としてショックであると同時に、都市の気温変化の実態をきちんと解析する必要性を感じさせました。ただ、最

近は温暖化の研究者も、地域によっては都市バイアスが存在し得ることを認めた上で、全球～広域への影響は小さいという言い方になっています (Parker 2006, 2010; Jones and Wigley 2010など)。

- 4 Lebassi *et al.* (2009) は、1970年代以降カリフォルニア沿岸で夏の日最高気温が大幅に下がっていることを指摘し、その理由として、内陸域の昇温による海風の強まりを挙げています。Tamrazian *et al.* (2008) の結果でも、ロサンゼルス都心の日最高気温は1980年ごろから低下に転じています。
- 5 第1図には昇温率 T' が西日本で大きく北日本で小さいという地域差がありますが、この地域差を除いた解析を行っても T' と P の間に正相関があることは変わりません (第2図も同様)。
- 6 しばしば「フェーン現象」と言われますが、山麓が強風が吹き下りる本来のフェーンとは異なり、地上風は弱いのが普通です。このような昇温の機構については今後の解明が待たれます。
- 7 降水雲を移動させる上空の風の下流側という意味であり、普通は東～北東側。
- 8 「非継続的降水」とはぎこちない表現ですが、他に適当な言葉を思いつきませんでした。非継続的降水は「その前の時刻が無降水だった場合」と定義されており、後の時刻については条件をつけていない点が「短時間降水」と違います。このような定義を使ったのは、夏の午後の雷雨後、弱い降水が数時間以上続くケースが時々あるためです。

略語一覧

- CRU: Climatic Research Unit イギリス・イーストアングリア大学 (University of East Anglia) の気候研究ユニット
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
- LANDSAT: アメリカ航空宇宙局 (NASA) などが打ち上げた一連の地球観測衛星
- METROMEX: Metropolitan Meteorological Experiment 1970年代にミズーリ州セントルイスを対象地として行われた都市気候観測プロジェクト
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration アメリカ海洋大気局
- NDVI: Normalized Difference Vegetation Index 正規化植生指数、赤色・近赤外光の反射強度から算出される地上植生量の指標
- WRF: Weather Research and Forecasting メソスケール気象モデルの1つ

参 考 文 献

- Alexander, L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci and J. L. Vazquez-Aguirre, 2006 : Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, doi : 10.1029/2005JD006290.
- Changnon, S. A. and K. E. Kunkel, 2006 : Changes in instruments and sites affecting historical weather records : A case study. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **23**, 825-828.
- Choi, Y., H.-S. Jung, K. Y. Nam and W. T. Kwon, 2003 : Adjusting urban bias in the regional mean surface temperature series of South Korea, 1968-99. *Int. J. Climatol.*, **23**, 577-591.
- Emori, S. and S. J. Brown, 2005 : Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17706, doi : 10.1029/2005GL023272.
- Frich, P., L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank and T. Peterson, 2002 : Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, **19**, 193-212.
- Fujibe, F., 1994 : Long-term falling trends of pressure over the Kanto plain as evidence of increasing heat content in the lower atmosphere in the daytime of the warm season. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 785-792.
- 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.
- 藤部文昭, 2001 : JMA-80型地上気象観測装置の導入に伴う気象官署の風速観測値の変化. *天気*, **48**, 219-226.
- 藤部文昭, 2002 : 東京都心における高温日の湿度の経年変化. *天気*, **49**, 473-476.
- Fujibe, F., 2003 : Long-term surface wind changes in the Tokyo metropolitan area in the afternoon of sunny days in the warm season. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 141-149.
- 藤部文昭, 2003 : アメダス地点における風速観測値の経年変化. *天気*, **50**, 457-460.
- 藤部文昭, 2004 a : ヒートアイランドが降水におよぼす影響—夏の対流性降水を中心にして—. *天気*, **51**, 109-115.
- 藤部文昭, 2004 b : 日本における近年の著しい夏季高温の発生状況. *地理学評論*, **77**, 119-133.
- Fujibe, F., 2009 a : Relation between long-term temperature and wind speed trends at surface observation stations in Japan. *SOLA*, **5**, 81-84.
- Fujibe, F., 2009 b : Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. *Int. J. Climatol.*, **29**, 1811-1822.
- Fujibe, F., 2010 a : Day-of-the-week variations of urban temperature and their long-term trends in Japan. *Theor. Appl. Climatol.*, **102**, 393-401.
- Fujibe, F., 2010 b : Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring. *Int. J. Climatol.*, Early View, doi : 10.1002/joc.2142.
- Fujibe, F. and K. Ishihara, 2010 : Possible urban bias in gridded climate temperature data over the Japan area. *SOLA*, **6**, 61-64.
- Fujibe, F., N. Yamazaki, M. Katsuyama and K. Kobayashi, 2005 : The increasing trend of intense precipitation in Japan based on four-hourly data for a hundred years. *SOLA*, **1**, 41-44.
- Fujibe, F., N. Yamazaki and K. Kobayashi, 2006 a : Long-term changes in the diurnal precipitation cycles in Japan for 106 years (1898-2003). *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 311-317.
- Fujibe, F., N. Yamazaki and K. Kobayashi, 2006 b : Long-term changes of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901-2004). *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1033-1046.
- Fujibe, F., H. Togawa and M. Sakata, 2009 : Long-term change and spatial anomaly of warm season afternoon precipitation in Tokyo. *SOLA*, **5**, 17-20.
- 古橋奈々, 日下博幸, 2010 : 真夏日の午後に東京23区で観測された短時間強雨の実態調査. *日本気象学会予稿集*, (97), P327.
- Griffiths, G. M., L. E. Chambers, M. R. Haylock, M. J. Manton, N. Nicholls, H.-J. Baek, Y. Choi, P. M. Della-Marta, A. Gosai, N. Iga, R. Lata, V. Laurent, L. Maitrepierre, H. Nakamigawa, N. Ouprasitwong, D. Solofa, L. Tahani, D. T. Thuy, L. Tibig, B. Trewin, K. Vediapan and P. Zhai, 2005 : Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region. *Int. J. Climatol.*, **25**, 1301-1330.
- Groisman, P. Y., R. W. Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegerl and V. N. Razuvaev, 2005 : Trends

- in intense precipitation in the climate record. *J. Climate*, **18**, 1343-1367.
- Hansen, J., R. Ruedy, J. Glascoe and M. Sato, 1999 : GISS analysis of surface temperature change. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30997-31022.
- Hua, L. J., Z. G. Ma and W. D. Guo, 2008 : The impact of urbanization on air temperature across China. *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 179-194.
- Inoue, T. and F. Kimura, 2004 : Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area on clear summer days. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05103, doi : 10.1029/2003GL018908.
- IPCC, 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, S. Solomon *et al.* eds., Cambridge University Press, New York, 1056 pp.
- Iwasaki, H. and Y. Sunaga, 2009 : Study of recent variation in weak rainfall over Japan using 31-year AMeDAS dataset. *SOLA*, **5**, 157-159.
- Iwashima, T. and R. Yamamoto, 1993 : A statistical analysis of the extreme events : Long-term trend of heavy daily precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 637-640.
- Jones, P. D. and D. H. Lister, 2009 : The urban heat island in Central London and urban-related warming trends in Central London since 1900. *Weather*, **64**, 323-327.
- Jones, P. D. and T. M. L. Wigley, 2010 : Estimation of global temperature trends : What's important and what isn't. *Clim. Change*, **100**, 59-69.
- Jones, P. D., P. Ya. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang and T. R. Karl, 1990 : Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, **347**, 169-172.
- Jones, P. D., D. H. Lister and Q. Li, 2008 : Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *J. Geophys. Res.*, **113**, D16122, doi : 10.1029/2008JD009916.
- Kanae, S., T. Oki and A. Kashida, 2004 : Changes in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 241-247.
- 環境省, 2009 : 熱中症環境保健マニュアル. 71 pp., www.env.go.jp/chemi/heat_stroke/manual.html.
- Karl, T. R. and R. W. Knight, 1998 : Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 231-241.
- Karl, T. R., H. F. Diaz and G. Kukla, 1988 : Urbanization : Its detection and effect in the United States climate record. *J. Climate*, **1**, 1099-1123.
- Kataoka, K., F. Matsumoto, T. Ichinose and M. Taniguchi, 2009 : Urban warming trends in several large Asian cities over the last 100 years. *Sci. Total Environ.*, **407**, 3112-3119.
- Kimoto, M., N. Yasutomi, C. Yokoyama and S. Emori, 2005 : Projected changes in precipitation characteristics around Japan under the global warming. *SOLA*, **1**, 85-88.
- Kimura, F. and S. Takahashi, 1991 : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area : A numerical experiment. *Atmos. Environ.*, **25 B**, 155-164.
- 気象庁, 1961 : 1960年までの地上気象観測累年統計実施要領. 公報第6号(昭和36.2.8) 通達(別冊), 80 pp.
- 気象庁(統計課), 1962 : 累年統計値に及ぼす移転の影響の調査結果について. *測候時報*, **29**, 196-208.
- 気象庁(統計課), 1965 : 観測法・統計法の変更の影響を受けた気候統計値を均質化する方法. *気象庁技術報告*, (38), 4-97.
- 気象庁(研究時報編集委員会), 1974 : 観測の近代化に伴う諸問題. *研究時報*, **26**, 9-113.
- 気象庁(統計室・測候課), 1984 : JMA-80型地上気象観測装置の導入に伴う比較観測の結果について. *測候時報*, **51**, 347-366.
- 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), 気象庁, 444 pp., 303-313.
- 気象庁, 2002 : 気象観測の手引き. 気象庁, 81 pp., www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/tebiki.pdf.
- 気象庁, 2005 : 異常気象レポート2005. 気象庁, 374 pp., www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/index.html.
- 気象庁, 2010 : 気候変動監視レポート2009. 気象庁, 90 pp., www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/index.html.
- 気象庁, 2005-2010 : ヒートアイランド監視報告. 気象庁, www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/himr/index.html.
- Kitada, T., K. Okamura and S. Tanaka, 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 mesoscale meteorological model with a $k-\epsilon$ turbulence model. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1026-1046.
- Kitoh, A., T. Ose, K. Kurihara, S. Kusunoki, M. Sugi and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group, 2009 : Projection of changes in future weather extremes

- using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program : Results of preliminary experiments. *Hydrol. Res. Lett.*, **3**, 49-53.
- Kusaka, H., F. Kimura, H. Hirakuchi and M. Mizutori, 2000 : The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo Metropolitan area. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 405-420.
- Kusaka, H., F. Kimura, K. Nawata, T. Hanyu and Y. Miya, 2009 : The chink in the armor : Questioning the reliability of sensitivity experiments in determining urban effects on precipitation patterns. Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Climate, 29 June-3 July 2009, Yokohama, B12-2.
- Lai, W.-L. and W.-L. Cheng, 2010 : Air temperature change due to human activities in Taiwan for the past century. *Int. J. Climatol.*, **30**, 432-444.
- Lebassi, B., J. González, D. Fabris, E. Maurer, N. Miller, C. Milesi, P. Switzer and R. Bornstein, 2009 : Observed 1970-2005 cooling of summer daytime temperatures in coastal California. *J. Climate*, **22**, 3558-3573.
- Liu, B., M. Xu and M. Henderson, 2010 : Where have all the showers gone? Regional declines in light precipitation events in China, 1960-2000. *Int. J. Climatol.*, Early View, doi : 10.1002/joc.2144.
- Mahmood, R., S. A. Foster and D. Logan, 2006 : The GeoProfile metadata, exposure of instruments, and measurement bias in climatic record revisited. *Int. J. Climatol.*, **26**, 1091-1124.
- Matheson, M. A. and Y. Ashie, 2008 : The effect of changes of urban surfaces on rainfall phenomenon as determined by a non-hydrostatic mesoscale model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 733-751.
- McCarthy, M. P., M. J. Best and R. A. Betts, 2010 : Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L09705, doi : 10.1029/2010GL042845.
- 中井専人, 横山宏太郎, 2009 : 降水量計の捕捉損失補正の重要さ—測器メタデータ整備の必要性—. *天気*, **56**, 69-74.
- New, M., M. Todd, M. Hulme and P. Jones, 2001 : Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int. J. Climatol.*, **21**, 1899-1922.
- Ohashi, Y. and H. Kida, 2002 a : Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas : a numerical study with a mesoscale atmospheric model. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 30-45.
- Ohashi, Y. and H. Kida, 2002 b : Effects of mountains and urban areas on daytime local-circulations in the Osaka and Kyoto regions. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 539-560.
- Parker, D. E., 2006 : A demonstration that large-scale warming is not urban. *J. Climate*, **19**, 2882-2895.
- Parker, D. E., 2010 : Urban heat island effects on estimates of observed climate change. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, **1**, 123-133.
- Peterson, T. C., 2003 : Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States : No difference found. *J. Climate*, **16**, 2941-2959.
- Peterson, T. C. and T. W. Owen, 2005 : Urban heat island assessment : Metadata are important. *J. Climate*, **18**, 2637-2646.
- Pielke, R. A., C. A. Davey, D. Niyogi, S. Fall, J. Steinweg-Woods, K. Hubbard, X. Lin, M. Cai, Y.-K. Lim and H. Li, 2007 a : Unresolved issues with the assessment of multidecadal global land surface temperature trends. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S08, doi : 10.1029/2006JD008229.
- Pielke, R. A., J. Adegoke, A. Beltrán-Przekurat, C. A. Hiemstra, J. Lin, U. S. Nair, D. Niyogi and T. E. Nobis, 2007 b : An overview of regional land use and land cover impacts on rainfall. *Tellus*, **59 B**, 587-601.
- Ren, G. Y., Y. Zhou, Z. Chu, J. Zhou, A. Zhang, J. Guo and X. Liu, 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *J. Climate*, **21**, 1333-1348.
- Runnalls, K. E. and T. R. Oke, 2006 : A technique to detect microclimatic inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. *J. Climate*, **19**, 959-978.
- 榎原保志, 2001 : 長野県小布施町における市街地と郊外の水蒸気圧差の特徴. *天気*, **48**, 151-158.
- Shepherd, J. M., 2005 : A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interact.*, **9** (12), 1-27.
- Stone, B. Jr., 2007 : Urban and rural temperature trends in proximity to large US cities : 1950-2000. *Int. J. Climatol.*, **27**, 1801-1807.
- Takahashi, H., Y. Nakamura and H. Suzuki, 2009 : Distribution of summertime intense rainfall frequency and the surface roughness in the Tokyo Metropolitan Area. Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Climate, 29 June-3 July 2009, Yokohama, P 3-38.
- Tamrazian, A., S. LaDochy, J. Willis and W. C. Patzert, 2008 : Heat waves in southern California : Are they becoming more frequent and longer lasting? *Yearb.*

- Assoc. Pac. Coast Geogr., 70, 59-69.
- 戸川裕樹, 渡邊 進, 阪田正明, 2008 : 東京と名古屋における過去の毎時降水量データのデジタル化とそれに基づく強雨の経年変化. 天気, 55, 661-663.
- Zhai, P., X. Zhang, H. Wan and X. Pan, 2005 : Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. J. Climate, 18, 1096-1108.
- Zhou, L., R. E. Dickinson, Y. Tian, J. Fang, Q. Li, R. K. Kaufmann, C. J. Tucker and R. B. Myneni, 2004 : Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. Proc. Natl. Acad. Sci., 101, 9540-9544.
- (注 : ホームページは, 本文中で引用したものを含め, すべて2010年10月16日に閲覧できることを確認しました)

Long-Term Climate Changes in Japan and Urbanization

Fumiaki FUJIBE*

* *Meteorological Research Institute, Tsukuba 305-0052, Japan.*

(Received 22 July 2010 ; Accepted 21 October 2010)
