

日本における地域スケールの猛暑

たか ね ゆう や
 高 根 雄 也[†]

近年、気候変動に関連し世界中で猛暑が頻発しており、これらの猛暑の発生頻度は今後ますます増加すると予測されている。猛暑は人間健康や電力需要、農業等へ悪影響をもたらすため、これらの具体的な対策を立てる必要がある。そのためには猛暑の特徴を理解することが望ましい。そこで本稿では近年国内で発生した地域スケールの猛暑の特徴について解説する。

キーワード：猛暑、フェーン、山岳、都市、将来予測

1. はじめに

近年、気候変動に関連し世界中で猛暑（熱波）が頻発している¹⁾。例えば、2003年の夏にはヨーロッパで熱波が発生し、世界保健機関（WHO: World Health Organization）²⁾によるとその影響による死者はフランス、ポルトガル、イタリアだけでも15,000人を超えた³⁾。また、2016年6月にはインドで50℃を超える熱波も発生した。IPCC¹⁾によると今後も地球の平均気温は上昇し、これら高温の発生数はさらに増加すると予測されている。

こうした傾向は国内でも例外ではない。上記の例とは現象のスケールが異なるものの、国内でも過去に日最高気温が35℃以上となる地域スケール^{*1}の高温^{*2}が頻繁に発生しており、これらの猛暑の日数は過去に比べて上昇傾向にあることがわかっている^{4), 5)}。この上昇傾向の原因は主に気候変動と都市化だと考えられている。このような気温上昇傾向の中、2007年8月16日には埼玉県熊谷市と岐阜県多治見市において、ともに当時の日最高気温の記録を74年ぶりに更新する40.9℃を観測した。また、2013年には高知県四万十市でこれらの最高気温の記録をさらに更新する41.0℃が観測された（表1）。これら国内の記録的な猛暑に関しては社会的関心も高く、猛暑が発生した場合には連日のように報道される。世間では猛暑の発生要因についてさまざま言及されるが、その言及された要因についてこれまであまり科学的に根拠のある説明はなされてこなかった。しかし近年、観測データの充

表1 日最高気温の国内歴代ランキング（2017年10月現在、気象庁HPより作成）

順位	都道府県・地点	観測値	年月日
1	高知県・江川崎	41.0℃	2013年8月12日
2	埼玉県・熊谷	40.9℃	2007年8月16日
々	岐阜県・多治見	40.9℃	2007年8月16日
4	山形県・山形	40.8℃	1933年7月25日
5	山梨県・甲府	40.7℃	2013年8月10日
6	和歌山県・かつらぎ	40.6℃	1994年8月8日
々	静岡県・天竜	40.6℃	1994年8月4日
8	山梨県・勝沼	40.5℃	2013年8月10日
9	埼玉県・越谷	40.4℃	2007年8月16日
10	群馬県・館林	40.3℃	2007年8月16日

実や領域気象モデルの普及に伴い詳細な解析が行われるようになり、徐々にその要因が明らかになりつつある。

本稿では、日本において地域スケールで発生した高温に関して、著者らがその特徴を調べた結果を中心に、その結果を解説する。第2章では、記録的な猛暑の特徴を国内でも暑い町として知られている埼玉県熊谷市と岐阜県多治見市を例に解説する。第3章では、日本の都市圏における猛暑の将来予測の結果について解説する。熊谷市や多治見市等で発生する猛暑の特徴は必ずしもそのまま世界で発生する猛暑に適用できる結果ではない上、本解説は主に理学的視点に基づくものではあるが、著者の専門と紙面の都合を考慮した結果であることをご了承ください。国内では注目度

[†] 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 環境管理研究部門：〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1 産総研つくばセンター西事業所
 E-mail: takane.yuya@aist.go.jp

*1 例えば関東平野のようにある地域に限定される現象のスケールのことを指す。気象学では概ねメソスケールに相当する。

*2 本稿ではこの高温のことを単に猛暑と呼び、明確に定義しないが、気象庁が定義している猛暑日（日最高気温が35℃以上の日）のような高温だとイメージしていただいて差し支えない。

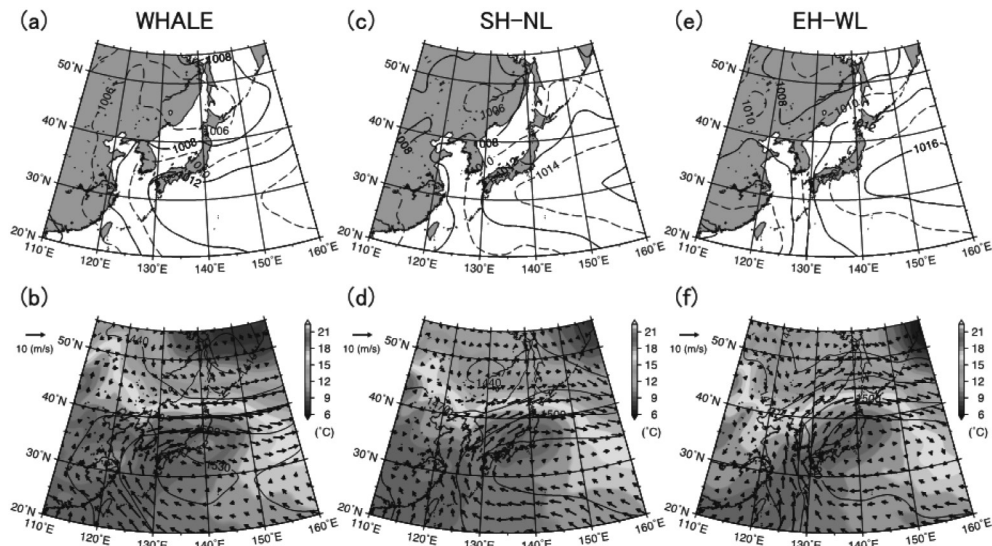


図1 JRA-25/JCDASによる上側：地上における気圧配置（黒線），下側：850hPa面におけるジオポテンシャル高度（黒線）と気温（カラー），水平風速（ベクトル）⁶⁾。いずれも猛暑日75日間の平均。(a), (b) 鯨の尾型（盛夏型），(c), (d) 南高北低型（夏型），(e), (f) 東高西低型。＊カラー版は原著⁶⁾ 参照

の高い地域スケールの猛暑の理学的な特徴を解説することにより，安全工学に関して何かしらの示唆を与えることができれば幸いである。

2. 関東平野と濃尾平野の猛暑

関東平野と濃尾平野は，ともに大都市圏を含む国内では大きな平野の一つである。これらの平野では過去に猛暑が頻発してきた。中でも東京の北西，名古屋の北東にそれぞれ位置する埼玉県熊谷市と岐阜県多治見市は両者とも暑い町として有名である。そこで本章では，熊谷市と多治見市の高温の特徴に関して気候学的な特徴および事例解析の結果を紹介する。

2.1 関東平野の猛暑

関東平野の猛暑と言え，上述の熊谷市や群馬県館林市の名前を思い浮かべる読者も多いと思われる。実際に，これらの都市では過去に記録的な猛暑が発生している（表1）。Takane et al.⁶⁾は，関東平野内陸部の都市の中でも過去に歴代1位となる40.9℃を観測した熊谷を対象に，ここで発生する猛暑の気候学的な特徴を，過去22年間の観測データを用いて統計的に調査した。その結果彼らは，猛暑発生日には非発生日に比べて，1) 鯨の尾型気圧配置（図1a, b）^{*3}と，2) 北西寄りの地上風がともに卓越しやすく，また3) 連続晴天日数^{*4}の平均値が大きいことを見出した。言い換えれば，熊谷で猛暑が発生するためには1) 鯨の尾型気圧配置がバックグラウンド条件としてあり

（つまり天気図のスケールで比較的高温の条件で），この気圧配置がもたらす気圧傾度に関係し2) 熊谷の地上付近で北西寄りの風が卓越し，さらに3) 前日までの連続的な晴天によって地表面が乾燥して大気への顕熱フラックス（輸送量）が卓越しやすいことが重要であることが統計的に示唆された。

この上記3つの条件が重なって発生した猛暑が，上述の2007年8月16日の40.9℃の猛暑である。Takane and Kusaka⁷⁾は，この猛暑のメカニズムを観測データの解析および領域気象モデルWRF（Weather Research and Forecasting）⁸⁾*5を用いた数値実験により調査した。彼らは解析の結果この日の高温（図2）は，上述の鯨の尾型気圧配置の出現に加えて，おもに以下に示す2つの要因が組み合わさった結果，発生したと報告している。一つ目の要因は上述した連続晴天である。すなわち2007年8月16日の前7日間は晴天が連続しており，この前7日間という連続晴天日数は1998～2008年の7・8月の統計では12番目に大

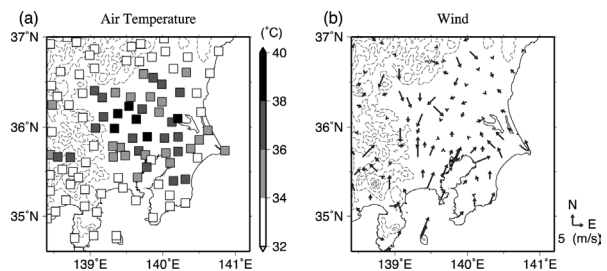


図2 2007年8月16日14時40分における(a) 地上気温と(b) 地上風の水平分布⁷⁾。気象庁による観測値。

*3 盛夏型とも呼ばれる。南高北低型図1c, d, 東高西低型図1e, f) とは気圧場と温度場が多少異なる。

*4 前日までに何日間連続して晴れていたかを示す指数

*5 米国で開発された数値気象モデルの一種。オープンソースであり，世界中に多くのユーザーがいる。

きい値であった。この連続的な晴天により土壌が乾燥し、それにより地表面から大気へ供給される顕熱フラックスが増加していた、と考えることができる。二つ目の要因は、上記一つ目の要因に関係することであるが、地表面からの非断熱加熱を伴う新たなフェーン現象（図3上）である。なお、フェーン現象とは一般的に山越え気流に伴い山岳風下側に気温上昇と湿度低下をもたらす現象である。本事例のフェーンは、気流が中部山岳と関東平野内陸域の混合層内（地表面付近）を吹走する際に、乱流拡散と地表面からの顕熱供給によって昇温し、この昇温した気流が侵入することによって風下側の地上が昇温するメカニズムである。彼らはこのフェーンのメカニズムを、数値シミュレーション結果を用いた後方流跡線解析とラグランジュエネルギー収支解析を組み合わせることにより定量的に見出した。このフェーンが、本事例に関する先行研究^{9), 10), 11)}が指摘した伝統的なフェーンの種類であるタイプII（下記で説明）に比べて猛暑の発生に大きく寄与していたことが数値シミュレーションにより定量的に示されている。なお、この地表面からの加熱を伴うフェーンのメカニズムは、富山平野¹²⁾や北海道¹³⁾や濃尾平野¹⁴⁾でも風下側に高温をもたらすメカニズムとして同様に報告されている。

ここでは、フェーンが高温の重要な要因であるため、紙面をさきフェーンの概要について説明する。2007年8月16日の事例では、地表面からの非断熱加熱を伴うタイプが報告されたが、これまで国内ではフェーンといえば主に伝統的な二つのタイプしか指摘されてこなかった。読者の中には学生時代に地学や地理等の科目でフェーンについて習った方もいるかもしれない。それは風上側に降水を伴うタイプ（図4左：タイプIとする）^{例えば15), 16)}であったと思われる。これは風上側の地上付近の空気塊が風上側の山岳を乗り越える際に空気塊が持つ水蒸気が凝結し降水になることにより、潜熱が解放され、それにより空気塊が加熱され（非断熱加熱の一種）、さらにこの空気塊が山頂付近から風下地上付近に断熱的に吹き降りることにより加熱され（断熱加熱）、風下地上に高温をもたらすタイプである。このタイプは空気塊が風上山岳を乗り越えるため、一般的には風上側の大気安定度が相対的に弱いという環境場が必要である。一方、フェーンには降水を伴わないタイプ（図4右：タイプIIとする）^{例えば15), 17)}もある。このタイプでは、風上側地上付近の空気塊はその付近の大気成層が比較的安定していたため、タイプIとは異なり一般的に山岳を乗り越えることができない。その代わりに風上側のより上空にある空気塊が山岳を超えて、山頂付近から風下地上

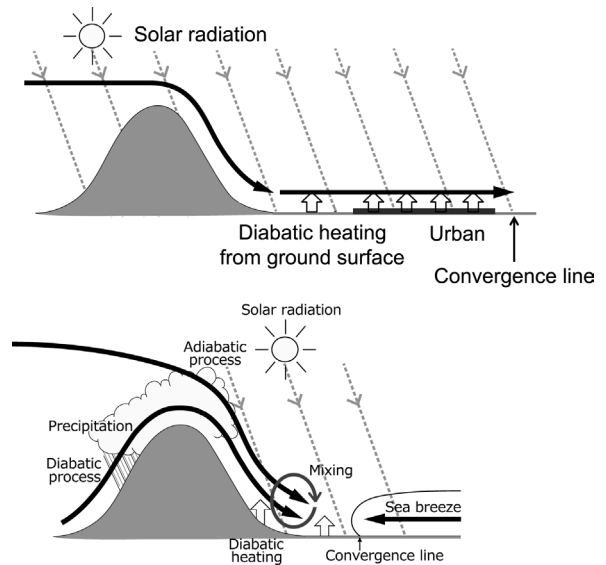


図3 フェーン現象の模式図。上：地表面からの加熱を伴うフェーン^{7), 14)}と、下：典型的なフェーンの種類であるタイプIとIIが混ざった新しいタイプのフェーン¹⁸⁾。

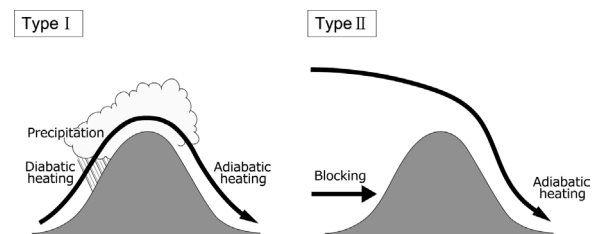


図4 典型的な2つのタイプのフェーンの概念図。左：風上側で降水を伴うタイプ（タイプI）、右：風上側で降水を伴わないタイプ（タイプII）。

付近に断熱的に吹き降りることにより加熱され（断熱加熱）、風下地上に高温をもたらすタイプである。両者は、上述のようにお互いに発生する環境場が異なるため、フェーンが発生した際にはどちらか片方のタイプしか発生していないと考えられてきた。具体的に猛暑の例で説明すると、上記2007年8月16日の事例では、まず観測データにより熊谷で北西風が卓越していたため高温の原因としてフェーンが原因として指摘された。そして、熊谷に気流が流れてきたと思われる山岳の風上側に降水が観測されていなかったため、上記二つのタイプのうち、消去法でタイプIIの発生が指摘された^{9), 10), 11)}。これが、フェーンのタイプ判別に関するこれまでの一般的な見方・方法であった。しかし、Takane et al.¹⁸⁾は上記二つのタイプのフェーンが同一イベントで共存していることをTakane and Kusaka⁷⁾が行った数値シミュレーションと同様の手法で見出し、それが2011年6月24日における39.8℃^{*6}の猛暑の主要因であったと報告している（図

* 6 6月としては国内歴代最高気温（2017年10月現在）

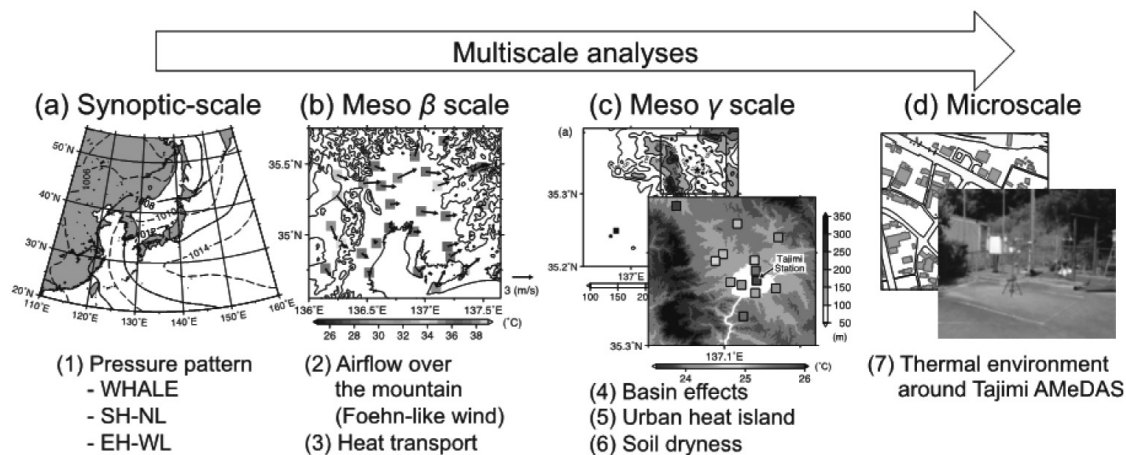


図5 多治見に高温をもたらす7つの仮説²⁴⁾。※カラー版は原著²⁴⁾ 参照

3下)。ただし、これはあくまでシミュレーションの結果であり観測による検証が必要である。なお、彼らと似たような報告がヨーロッパアルプスのフェーンにおいても報告されている¹⁹⁾。

これらの研究から、猛暑をもたらすフェーンには、これまでの伝統的なタイプⅠとⅡだけではなく、Takane and Kusaka⁷⁾によって指摘された地表面加熱を伴うタイプ、そしてさらにⅠとⅡの混合型が少なくとも存在することが指摘されている。ちなみに、フェーンの細かなメカニズムに関しては、例えば Elvidge and Renfrew²⁰⁾によってレビューされているため、興味がある読者はこちらを参照されたい。以上述べてきた関東平野の研究からわかることは、関東平野で記録的な猛暑が発生する際にはフェーン現象が大きく関わっていること、そしてそのフェーンのメカニズムはいつも同一ではなく事例によって異なる、ということである。

以上では、フェーンが関東に記録的な高温をもたらしていることを述べた。ただし注意すべきことは、フェーンが発生しなかった際にも、熊谷では猛暑が発生しており、その事例数はフェーンを伴うものに比べて多い、という事実である⁶⁾。フェーンを伴う猛暑と伴わない猛暑の特徴を簡単にまとめると以下のようになる。すなわち、フェーンを伴う猛暑の事例数は相対的に少ないが、フェーンが発生すると記録的な高温になりやすい。一方でフェーンを伴わない猛暑の事例数は多いが、フェーン発生時に比べると相対的に低い気温の猛暑が発生しやすい。こうしたフェーンを伴わない猛暑に関しては、フェーンほど決定的な原因はわかっていない。しかし、一つの可能性としてフェーンは発生しないもの、基本的には陸面の大気を冷却する東京湾からの海風が熊谷まで届かず、そのため海風が届く関東平野南部に比べて、熊谷を含む北部が高温

になる、というメカニズムが考えられる。首都圏は昔に比べて都市化したが、この都市化に伴い海風の内陸への侵入が阻害あるいは侵入速度が遅れることが報告されており^{21)～23)}、これらの報告は上記の推察を支持している。

2.2 濃尾平野の猛暑

岐阜県多治見市の高温の原因については、過去の調査・研究等により様々なものが指摘されてきた。下記の7つは、著者らがこれまでに指摘されてきた複数の要因をスケール別にまとめたものである²⁴⁾。

- (1) 特定の気圧配置 (図5a)
- (2) 北西／西側の山からの気流 (図5b)
- (3) 名古屋都市域からの熱の輸送 (図5b)
- (4) 多治見を囲む盆地の効果 (図5c)*⁷⁾
- (5) 多治見市のヒートアイランド (図5c)
- (6) 土壌の乾燥化
- (7) 多治見アメダス周辺の熱環境の問題 (図5d)

Takane et al.²⁴⁾では、上記7つを仮説として、これらを過去23年間の気象観測データおよび独自に3年間実施した気象観測により得られたデータを用いて様々なスケールの視点に立ち、気候学的に検証した。彼らは便宜上、晴天日と高温日をそれぞれ定義し、解析期間中の全ての日の内、晴天日と高温日の違いを統計的に調べた。その結果、上記7つの要因に関して以下の結論を得た。

- (1) 特定の気圧配置：鯨の尾型 (図1a, b) は高温発生の必要条件・十分条件ではないが、多治見高温が発生するためには鯨の尾型が大きく影響している。
- (2) 北西／西側の山からの気流：高温の発生には北

*7 盆地を越える気流に伴う小規模なフェーン、弱風時の谷風循環による盆地内の昇温効果、盆地内の空気の滞留による熱交換の抑制等

- 西／西側の山からの気流が深く関与している。
- (3) 名古屋都市域からの熱の輸送：名古屋からの熱輸送が寄与している可能性が低い。
 - (4) 多治見を囲む盆地の効果：小規模盆地形状は多治見市の高温に寄与している可能性は低い。
 - (5) 多治見市のヒートアイランド：ヒートアイランドの存在が認められ²⁵⁾、近年の顕著な都市化は猛暑発生のバックグラウンド要因であると考えられる。
 - (6) 土壌の乾燥化：多治見市は周辺地域に比べて土壌が数日スケールで短期的に乾燥化しやすい大気環境場にはない。
 - (7) 多治見アメダス周辺の熱環境の問題：アメダス地点周辺で独自に測った気温は、市内のどの観測地点よりも高い傾向にある。しかし、アメダス周辺が数 m のスケールで暑いというよりも、数百 m の街区スケールで暑い可能性がある。

上記の結果をまとめると、彼らは多治見市の気候学的な高温には、様々なスケールに渡る複数の仮説のうち、(1) 特定の気圧配置である鯨の尾型の出現と(5) 都市化というバックグラウンドの環境場に、(2) 西／北西側の山からの気流が重なり、かつ(7) 多治見市内では高温が観測されやすい街区内にアメダス観測地点が設置されていることが寄与していると指摘した。さらに、Takane et al.¹⁴⁾ は、上記(2) 西／北西側の山からの気流によって多治見が昇温する具体的なメカニズムとして、上述の地表面加熱を伴うフェーンのマカニズム(図3上)が存在することを現地観測・数値シミュレーション・統計解析の三つの異なる手法により実証した。

2.3 多くの猛暑をもたらすフェーン

これまで関東平野と濃尾平野の猛暑について述べたが、どちらも北西に山岳が位置しており、どちらも記録的な猛暑の発生に対してはフェーンが大きな影響を及ぼしていることは共通している。日本列島には多くの急峻な山岳域があり、太平洋高気圧だけでは

なく、温帯低気圧や台風といった山越え気流を発生させやすい現象が現れやすいため、両平野のように山の方から風が吹き降りてくる条件になれば、その風下側ではフェーンが発生し、時に(特に連日晴天が続いているようなコンディションでは)記録的な猛暑が発生しうる。実際に、表1による山形の高温もフェーンが関わっているという報告²⁶⁾がある。また、富山平野や北海道、そして大阪平野²⁷⁾でも同様のことが報告されている。山岳風下で猛暑が発生しうることは、人間健康や電力需要、農業等への影響を考える上で理解しておくことが望ましいであろう。ちなみに、現在の国内歴代1位の日最高気温の記録を持つ高知県四万十市の猛暑の概要については伊藤ほか²⁸⁾で調査されており、フェーンに似た北西風が要因の一つである可能性も指摘されている。

3. 猛暑の将来予測

過去から現在にかけて気温が上昇傾向にあることは既に述べたが、IPCC¹⁾によると現在から将来にかけてさらに上昇する可能性が高い。そこで、本章では日本の都市圏における気温の将来予測とその影響に関する研究を紹介する。

図6は、領域気候モデルによる力学的ダウンスケーリング^{*8}により温暖化後の地域スケールの日最高気温8月平均分布を予測した結果²⁹⁾である。左が2000年代、右が2070年代の気温の水平分布である。図を見てわかるように、2070年代の8月平均気温は2000年代に比べて領域全体で2.0-2.5℃程度上昇している。2070年代における東京・名古屋・大阪における日最高気温の平均値はそれぞれ32.6℃・34.3℃・34.6℃と予測されている。この気温上昇により、2070年代の首都圏の平均気温は、我々が経験済みである猛暑年：2010年の平均気温と同程度になることを示している。

*8 全球気候モデルによる将来予測結果を元に作成した初期値・境界値を用いて領域気候モデルでより地域詳細の気候を計算すること

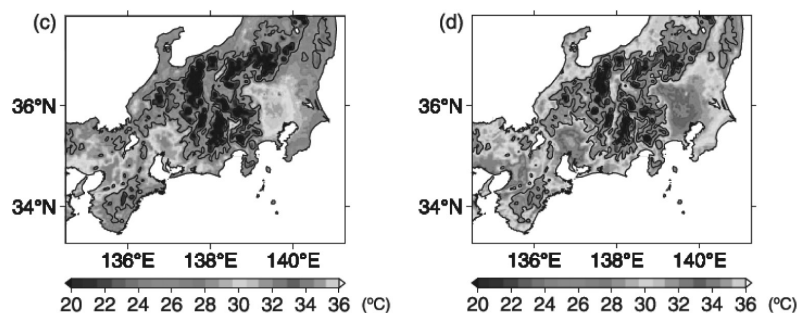


図6 領域気候モデル WRF によって計算された日本の三大都市圏における日最高気温の8月平均値の水平分布²⁹⁾。
左：2000年代、右：2070年代。※カラー版は原著²⁹⁾参照

言い換えると、この結果は2070年代には、2010年に我々が経験した猛暑が日常的に発生する可能性があることを示している。

上述の Kusaka et al.²⁹⁾らの結果は「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)第4次報告書(AR4)の将来の温室効果ガス排出シナリオの一種である SRES A1b シナリオ^{*9}に基づく結果であったが、他のシナリオを用いれば、多少異なる結果が得られる。例えば高根ほか³⁰⁾は、SRES A1b シナリオに比べて温室効果ガスをより排出するシナリオである A2 下で Kusaka et al.²⁹⁾と同様のシミュレーションを行った。その結果、彼らによる将来予測結果よりも東京・名古屋・大阪の各都市で2070年代8月の平均気温が0.3–0.4℃程度高くなることを報告している。このように、将来の気温の予測に対しては、どのシナリオに基づく予測をするか?により予測結果は異なる。当然上記 SRES シナリオよりも新しいシナリオである IPCC 第5次報告書(AR5)の温室効果ガス排出シナリオ: 代表的濃度経路(RCP)シナリオを用いた場合にも上記とは多少異なる結果が得られるであろう。また、上記シナリオ以外にも領域気候モデルの初期値・境界値として使用する GCM の選択や、領域気候モデルのサブモデルの選択によっても予測結果は異なることに注意が必要である。このように、将来気候の予測結果には不確実性が付きまとうもの、と理解しておくことが重要である。将来予測や不確実性に関する解説は例えば鈴木パーカー・日下³¹⁾で詳しく解説されているため、興味がある読者はこちらを参照していただきたい。

予測結果に不確実性は伴うものの、このまま温暖化

*9 高成長社会シナリオ。化石エネルギーや非化石エネルギー等、各エネルギー源のバランスを重視

が進み、かつ我々が対策をしなければ将来、猛暑がより日常的になることは確実であると思われる。そのため、こうした気候変動へ適応するための技術開発や社会実装を目指した下記のような国主導のプロジェクト研究が現在積極的に進められている。

・文部科学省 気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) : <https://si-cat.jp/>

・環境省 環境研究総合推進費戦略研究プロジェクト S-14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」: <http://s-14.iis.u-tokyo.ac.jp/>

都市における気温上昇への具体的な対策としては、都市の形状を変えることや緑化等、様々なものが提案されている。全てを紹介することはできないが、例えば都市の形状を変えることに関しては、Adachi et al.³²⁾やIizuka et al.³³⁾、Kusaka et al.³⁴⁾等、緑化等に関しては例えば高根ほか³⁵⁾等でその効果が評価されている。Adachi et al.³²⁾は、首都圏の都市の分布を現在のもの(図7a)よりも首都圏の総人口を保存したままより郊外に分散させる分散型都市(図7b)と、より都市の中心に集中させる集中型都市(図7c)を作成し、これらを導入した場合に現状の都市分布に比べて気温がどのように変化するかを調べた。その結果、現状都市に比べて分散型都市を導入した場合は「首都圏の領域平均」での夜間の気温が0.34℃程度上昇したのに対し、集中型都市の場合は0.1℃程度減少した。一方で、彼らは「首都圏の領域平均」ではなく「都心部のみ」の夜間気温に限ると上記の結果は逆になるという興味深い結果を示している。つまり分散型都市の場合は都心部の気温が低下し、集中型都市の場合は逆に都心部の気温が上昇する。これらの結果は、例えば集中型都市を導入した場合、首都圏の郊外では

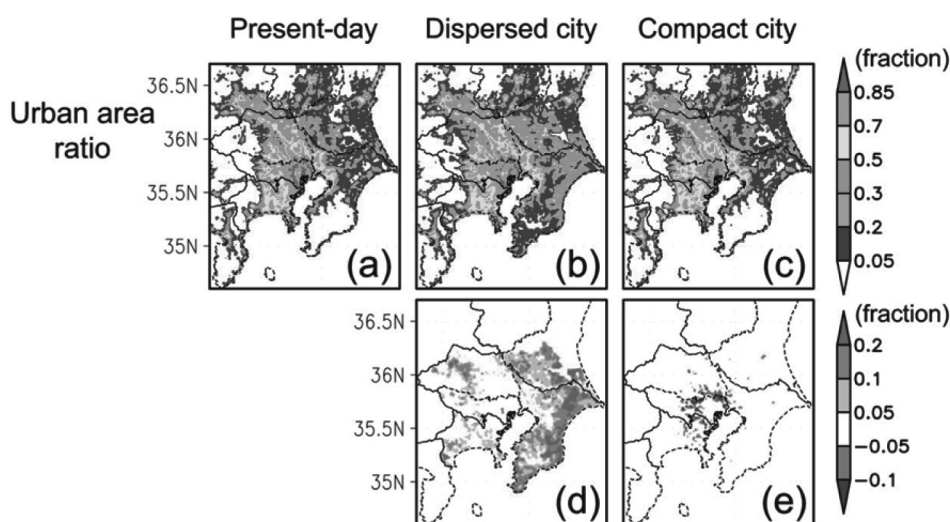


図7 首都圏における都市の割合(数値モデルの各格子の面積の中で土地利用が都市の面積が占める割合)の水平分布³²⁾。(a) 現在, (c) 分散型都市, (e) 集中型都市の分布。(d) は(a)と(b)の差分, (e) は(a)と(c)の差分。※カラー版は原著³²⁾参照

気温が下がるため、郊外に住む人の熱中症や睡眠障害のリスクは減少するがその恩恵を受ける人口は少ないことを意味しており、同時に多くの人口が集まる都市部では気温が上昇するため多くの人が上記健康リスクの増加に直面する可能性を示唆している。実際にこれらの都市計画を導入する場合には詳細な健康影響評価研究等の結果に基づく慎重な判断が必要であろう。

上記は、気温上昇に対する対策を導入した場合に、その気温への影響を調べた研究であったが、近年では気温だけではなく睡眠障害が発生しうる日数や熱中症の指数として国内では頻繁に活用される WBGT (the wet-bulb globe temperature) 等の人間健康に関わる指数²⁹⁾、さらには電力需要等への影響³⁵⁾も調査されている。日本の都市レベルでの熱中症リスクの評価やその将来予測については、例えば Ohashi et al.^{36), 37)}, 鈴木パーカー・日下³⁸⁾, Suzuki-Parker and Kusaka³⁹⁾により行われている。紙面の都合上詳細は省くが気象学に基づく健康影響予測に関してより詳しい情報を知りたい読者はこちらを参照されたい。

以上のように、気候変動に伴い猛暑の発生リスクは高まっており、将来の猛暑の発生とその影響を予防する手法やそれに適応する手段の開発・評価と、その社会実装が望まれる。

4. ま と め

本稿では、国内でも大きな平野である関東平野と濃尾平野でそれぞれ発生する猛暑の特徴に関する現状の知見を解説した。どちらの平野でも記録的な猛暑の発生にはフェーン現象が大きく関わっていることは重要な点である。人間健康や農業、電力需要等への社会への影響を考える上で重要なことは、フェーンが発生するか否か、を事前に把握することであると思われる。気象予報結果のより踏み込んだ利活用が望まれる。

両平野を含む将来の気温の予測結果についても言及した。将来予測結果は、計算に使用するシナリオやモデルの初期値・境界値、サブモデルの選択の影響を受けるため、どの予測結果も絶対的なものではなく不確実性を伴うものである点に注意が必要である。しかし、このまま温暖化が進み、かつ我々が対策をしなければ将来猛暑がより日常的になることは確実であると思われる。そのため、その影響への具体的対策を考え、評価し、社会に実装していくプロセスが重要であろう。

参考文献

- 1) IPCC, Summary for policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, T. F. Stocker et al., Eds., Cambridge University Press, pp. 1–29 (2013)
- 2) WHO (2003) Health effects of extreme weather events: WHO's early findings to be presented at the World Climate Change Conference. Available online from http://www.euro.who.int/mediacentre/PR/2003/20030929_1
- 3) Fink, A. Brucher. T. Kruger, A. Leckebusch, G. Pinto, J. and Ulbrich, U., The European summer heatwaves and drought – synoptic diagnosis and impacts. *Weather* 59, pp. 209–216 (2004)
- 4) 藤部文昭, 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 (8), pp. 643–653 (1998)
- 5) 藤部文昭, 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, pp. 119–132 (2004)
- 6) Takane, Y. Kusaka, H. and Kondo, H., Climatological study on mesoscale extreme high temperature events in inland of the Tokyo metropolitan area, Japan, during the past 22 years. *International Journal of Climatology*, 34, pp. 3926–3938 (2014)
- 7) Takane, Y. and Kusaka, H., Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic foehn and foehnlike wind. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, pp. 1827–1841 (2011)
- 8) Skamarock, W. C. and Coauthors, A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/ TN–4751STR, 126 pp (2008) . [Available online at http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.]
- 9) 桜井美菜子, 篠原善行, 眞下国寛, 須永次雄, 関東地方で日最高気温が 40℃を超えた 2007 年夏の高温 その 1～2007 年 8 月 15 日と 16 日の事例解析～, *天気*, 56 (4), pp. 248–253 (2009)
- 10) 篠原善行, 眞下国寛, 桜井美菜子, 須永次雄, 関東地方で日最高気温が 40℃を超えた 2007 年夏の高温 その 2～JMANHM による日最高気温の再現実験と高温要因の考察～, *天気*, 56 (7), pp. 543–548 (2009)
- 11) 渡来靖, 中川清隆, 福岡義隆, 領域気象モデルを用いた関東平野中央部における 2007 年 8 月 15–16 日の猛暑の数値シミュレーション, *日本生気象学会雑誌*, 46 (1), pp. 35–41 (2009)
- 12) Ishizaki, N. and Takayabu, I., On the warming events over Toyama Plain by using NHRCM. *SOLA*, 5, pp. 129–132 (2009)
- 13) Mori, K., and Sato, Y., Spatio-temporal variation of hightemperature events in Hokkaido, north Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 92, pp. 327–346 (2014)
- 14) Takane, Y. Kondo, H. Kusaka, H. Katagi, J. Nagafuchi, O. Nakazawa, K. Kaneyasu, K. and Miyakami, Y., Foehnlike wind with a traditional foehn effect plus dry-diabatic heating from the ground surface contributing to high temperatures at the end of a leeward area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56, pp. 2067–2079 (2017)
- 15) Hann J., Zur Frage über den Ursprung des Föhn. *Z. Österr. Ges. Meteorol.* 1, pp. 257–263 (1866)
- 16) Hann J., Der Föhn in den österreichischen Alpen. *Z. Österr. Ges. Meteorol.* 2, pp. 433–445 (1867)
- 17) Yoshino, M., *Climate in a Small Area. An Introduction to Local Meteorology.* University of Tokyo Press: Tokyo (1975)
- 18) Takane, Y. Kusaka, H. and Kondo, H., Investigation of a recent extreme high-temperature event in the Tokyo

- metropolitan area using numerical simulations: the potential role of a 'hybrid' foehn wind. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, pp. 1857–1869 (2015)
- 19) Miltenberger, A. K. Reynolds, S. and Sprenger, M., Revisiting the latent heating contribution to foehn warming: Lagrangian analysis of two foehn events over the Swiss Alps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, pp. 2194–2204 (2016)
 - 20) Elvidge, A. D. and Renfrew, Ian A., The Causes of Foehn Warming in the Lee of Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97, pp. 455–466 (2016)
 - 21) Yoshikado, H., Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex. *Journal of Applied Meteorology*, 29, pp. 878–891 (1990)
 - 22) Yoshikado, H. and Kondo, H., Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo. *Boundary-Layer Meteorology*, 48, pp. 389–407 (1989)
 - 23) Kusaka, H. Kimura, F. Hirakuchi, H. and Muzutori, M., The effects of landuse alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 78, pp. 405–420 (2000)
 - 24) Takane, Y. Kusaka, H. Kondo, H. Okada, M. Takaki, M. Abe, S. Tanaka, S. Miyamoto, K. Fuji, Y. and Nagai, T., Factors causing climatologically high temperature in a hot city in Japan: a multiscale analysis of Tajimi. *International Journal of Climatology*, 37, pp. 1456–1473 (2017)
 - 25) 岡田牧, 日下博幸, 高木美彩, 阿部紫織, 高根雄也, 富士友紀乃, 永井徹, 夏季における岐阜県多治見市の気温分布調査, *天気*, 61 (1), pp. 23–29 (2014)
 - 26) 台風 12 号がもたらす高温 週末は関東で 40℃近い可能性も, <https://news.yahoo.co.jp/byline/masudamasaaki/20150724-00047847/>
 - 27) Takane, Y. Ohashi, Y. Kusaka, H. Shigeta, Y. and Kikegawa, Y., Effects of synoptic-scale wind under the typical summer pressure pattern on the mesoscale high-temperature events in the Osaka and Kyoto urban areas by the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, pp. 1764–1778 (2013)
 - 28) 伊藤淳史, 仲吉信人, 山城拓登, 小川憲人, 高根雄也, 日下博幸, 統計解析及び現地微気象観測に基づく四万十市での国内最高気温発生要因の検討, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 72 (4), pp. 73–78 (2016)
 - 29) Kusaka, H. Hara, M. and Takane, Y., Urban climate projection by the WRF model at 3-km grid increment: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90B, pp. 47–64 (2012)
 - 30) 高根雄也, 日下博幸, 原政之, IPCC SRES A2 シナリオ下での三大都市圏の夏季気候の将来予測: WRF-UCM による力学的ダウンスケーリング, *日本ヒートアイランド学会論文集*, 7, pp. 18–26 (2012)
 - 31) 鈴木パーカー明日香, 日下博幸, 気候予測の注意点, *電力土木*, 377 (5), pp. 45–50 (2015)
 - 32) Adachi, S. A. Kimura, F. Kusaka, H. Duda M. G. Yamagata, Y. Seya, H. Nakamichi, K. and Aoyagi, T., Moderation of Summertime Heat Island Phenomena via Modification of the Urban Form in the Tokyo Metropolitan Area, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, 1886–1900 (2014)
 - 33) Iizuka, S. Xuan, Y. and Kondo, Y., Impacts of disaster mitigation/prevention urban structure models on future urban thermal environment, *Sustainable Cities and Society*, 19, pp. 414–420 (2015)
 - 34) Kusaka, H. Suzuki-Parker, A. Aoyagi, T. Adachi, S. A. and Yamagata, Y., Assessment of RCM and urban scenarios uncertainties in the climate projections for August in the 2050s in Tokyo., *Climatic Change*, 137 (3), pp. 427–438 (2016)
 - 35) 高根雄也, 青木翔平, 亀卦川幸浩, 山川洋平, 原政之, 近藤裕昭, 飯塚悟, 領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデルを用いた名古屋市における夏季の電力需要および温熱快適性の将来予測, *日本建築学会環境系論文集*, 80 (716), pp. 973–983 (2015)
 - 36) Ohashi, Y. Kikegawa, Y. Ihara, T. and Sugiyama, N., Numerical Simulations of Outdoor Heat Stress Index and Heat Disorder Risk in the 23 Wards of Tokyo, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, pp. 583–597 (2014)
 - 37) Ohashi, Y. Ihara, T. Kikegawa, Y. and Sugiyama, N., Numerical simulations of influence of heat island countermeasures on outdoor human heat stress in the 23 wards of Tokyo, Japan, *Energy and Buildings*, 114, pp. 104–111 (2016)
 - 38) 鈴木パーカー明日香, 日下博幸, WBGT に基づいた日本の暑熱環境の将来予測. *日本生気象学会雑誌*, 52 (1), pp. 59–72 (2015)
 - 39) Suzuki-Parker, A. and Kusaka, H., Future projections of labor hours based on WBGT for Tokyo and Osaka, Japan, using multi-period ensemble dynamical downscale simulations. *International Journal of Biometeorology*, 60 (2), pp. 307–310 (2016)