

日本における局地的な高温（猛暑・熱帯夜）のメカニズム

高根雄也（産業技術総合研究所 環境創生研究部門）

1. はじめに

近年、国内では日最高気温が 35°C 以上となる猛暑が頻発しており、日最高気温が 40°C を超える極端の高温も以前に比べて珍しい現象ではなくなってきた。実際に、2020 年 8 月 17 日には静岡県浜松にて国内の歴代最高タイの気温となる 41.1°C を観測した。今年も 7 月 7 日に静岡で 40°C を記録したことは記憶に新しい。これらの極値は日中に観測された値であるが、日中だけでなく夜間でも高温は発生している。その指標となるものの一つが日最低気温 $\geq 25^\circ\text{C}$ の熱帯夜であり、熱帯夜も場所によっては頻発している。

このような日中および夜間の高温により、私たちの日常生活は徐々にではあるが確実に脅かされていると言える。なぜならば、高温により熱中症等による健康被害は増加し、暑さを回避するためのエアコンの使用によるエネルギー消費量も増加しているからであるからである。

それでは、このような高温はなぜ発生するのであろうか？本講義では、40°C 超となるような極端な高温や熱帯夜を引き起こすような夜間の高温のそれぞれのメカニズムを、主に著者らの研究を例に紹介する。さらには、メカニズムに基づく対策研究についても紹介したい。

2. 40°C 超の高温のメカニズム

40°C 超の高温はいつどこで発生しているだろうか？気象庁による最高気温のランキング（気象庁 HP: <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/rankall.php>, 最終閲覧日: 2024 年 7 月 17 日)を見ると、トップ 10 のうち 8 つが 2010 年代と 2020 年代に発生したものであることがわかる。そして、その中でもトップに位置するのが、41.1°C を記録した上述の浜松と埼玉県熊谷である。これら以外の地点でも、岐阜県多治見や高知県江川崎等の暑さで有名な地点があるものの、ここでは誌面の都合上、熊谷の高温を例にそのメカニズムを紹介する。

メカニズムを探るための第一歩は、どのような日・どのような状況で熊谷が高温になっているかを理解することである。そこで著者等は、熊谷で高温が観測される際の統計的（気候学的）な特徴をまず調べ

た (Takane et al. 2014)。具体的には、1990-2011 年を対象に、高温発生に関連する複数のファクタ: (1) 日本付近の気圧配置、(2) 関東内陸部の風系、(3) 特定のイベントに先立つ連続晴天日数、(4) その日の日最低気温、(5) つくばにおける 850hPa 面の気温に焦点を当て、これらが高温を含む全ての事例、晴天事例、高温事例別でどのような特徴・差があるかを調査した。

その結果、高温事例では、全ての事例や晴天事例のみに比べて以下の特徴があることがわかった。すなわち、高温事例では (1) 鯨の尾型や盛夏型 (図 1) とも呼ばれる気圧配置の出現確率、(2) 北西寄りの地上風系の割合が多く、(3) 比較的長い連続晴天日数であり、(4) 高い当日の最低気温、(5) 高い 850hPa 面の気温である傾向があった。特に注目すべき点は、研究対象期間で特に高温であった 39°C 以上の高温 7 事例のうち、気温が高い順のトップ 3 事例が、(1) 鯨の尾型気圧配置、(2) 北西寄りの地上風系、(3) 比較的長い連続晴天日数という特徴を兼ね備えていたことである。以上から考察できるメカニズム (仮説) として、日本付近における総観規模での高温と中部山岳から関東内陸へ向かう北西寄りの一般風、そしてこれに伴い地上付近で発生しうるフェーン現象、そして連続晴天による地表面付近の乾燥に伴う顕熱フラックスの増加が考えられる。ただし、上記で統計的な傾向は見えてきたものの、これのみでは具体的なメカニズムを結論付けることはできない。

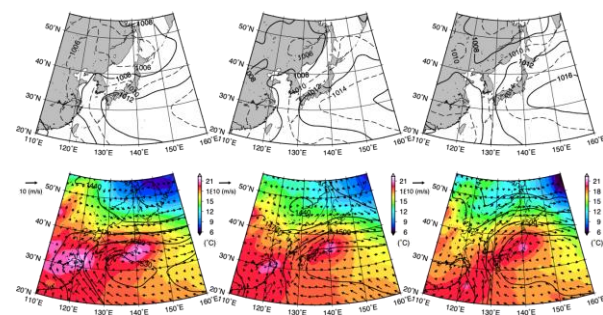


図 1 夏の典型的な気圧配置. 上: 地上気圧, 下: 850hPa 面における水平風と気温. 左: 鯨の尾型 (盛夏型)、中: 南高北低型 (夏型)、右: 東高西低型 (Takane et al. 2014 より).

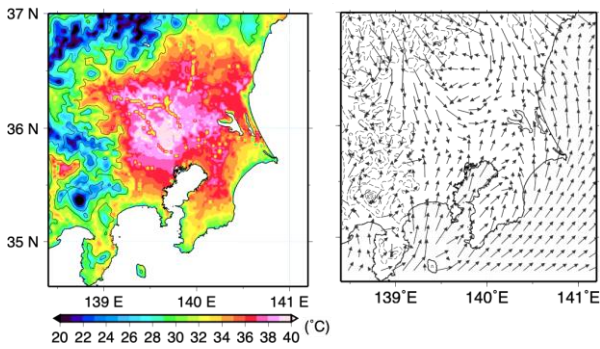


図2 WRFで計算した2007年8月16日15時の気温(左)と地上風系(右)(Takane and Kusaka 2011より).

そこで、上記(1)-(3)の特徴を持った高温のメカニズムに関する仮説を検証するためにおこなったのが、その中でもトップ1の事例であった2007年8月16日の40.9°Cの事例(当時は日本の歴代高温気温)の詳細な解析(Takane and Kusaka 2011)である。上述のように、この事例は、(1)鯨の尾型気圧配置、(2)北西寄りの地上風系、(3)比較的長い連続晴天日数(4日以上)を兼ね備えた事例であった。著者等はこの事例の実態を、当時入手可能であった観測データで調査するとともに、現象のメカニズムを領域気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting, Skamarock et al. 2008)を用いた数値実験により調査した。

WRFが本事例における関東平野内陸部の高温や北西寄りの風系を比較的良好に再現できている(図2)ことを確認した後、その計算結果を用いて、高温時に熊谷に侵入した空気塊がどの場所・どの高度から来ているか、そしてその空気塊が熊谷に侵入する過程で起きるフェーン現象の大きさとメカニズムを、Ishizaki and Takayabu (2009)の手法を用いて推定した。これらを推定・特定することは、高温の主要因が本当にフェーン現象であるかどうかの上述の仮説を明らかにするために本質的に重要である。

解析の結果、まず、高温時に熊谷付近に侵入する空気塊は、一つの場所・高度ではなく、二つの場所・高度から来ていることが示唆された。一つ目のルートは能登半島の北西側の高度2,000mを超える高度からやってくるルート(ルート1とする)、二つ目は富山湾の高度1,000m付近からやってくるルート(ルート2)である(図3)。さらに、これらのルートに沿った空気塊のエネルギー収支の変化からフェーン

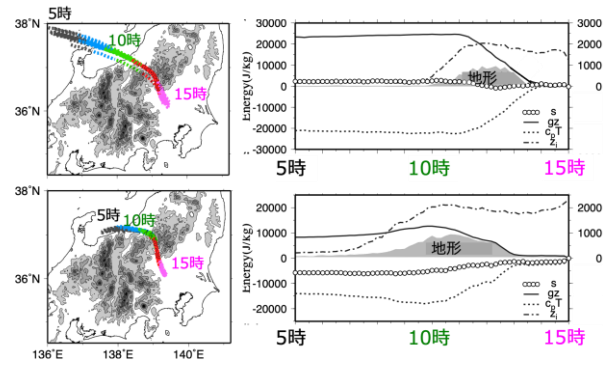


図3 熊谷付近に侵入する空気塊の二つのルート(左)とそれぞれのルートに沿った空気塊のエネルギー収支(右). 上:ルート1、下:ルート2. s:乾燥静的エネルギー、gz:ジオポテンシャルエネルギー、 $c_p T$:顕熱エネルギー、zi:混合層高度(Takane and Kusaka 2011より).

現象の大きさとメカニズムを解析した結果、以下のことが示唆された。

- ルート1、2に沿った気流は、ともに熊谷にフェーンを引き起こしたと考えられる。どちらのルートでも風上山岳部分で降水を伴っていなかったことから、フェーンのメカニズムは非降水タイプのフェーンであったと推察される。
- ルート1によるフェーンのメカニズムは典型的な非降水タイプであるが、ルート1に沿った空気塊のエネルギー収支解析によると、このメカニズムのみでは昇温が十分ではなく熊谷の気温は40°Cに達し得ないことが示唆された。
- 一方でルート2のメカニズムでは達し得ることがわかった。このルートに沿ったフェーンのメカニズムは基本的には上述のように非降水タイプであるが、ルートに沿った空気塊が山肌からの非断熱加熱が加算されている点が異なる。

以上より、非断熱加熱を伴うタイプのフェーンが、この高温の決定打になっていることが示唆された。非断熱加熱は、上記の統計的な解析で紹介した「(3)比較的長い連続晴天日数(4日以上)」を反映したメカニズムであると推察される。この日の高温のメカニズムを端的にまとめると、背景場として(1)鯨の尾型気圧配置(上空の高温と北西寄りの一般風)があり、それにより(2)北西寄りの地上風系でフェーンが発生し、さらに(3)で非断熱加熱が卓越し(2)のフェーンを強化し、それが熊谷高温を引き起こした。こ

のメカニズムは、上記の統計的な特徴と合致する。

上記の解析結果は、よく世間で平野内陸部の高温の要因として指摘される「海からの風が風上の大都市を通過する際に熱風となり、この熱風が内陸に侵入することで内陸が高温となる」というメカニズムとは全く異なる、ということを強調しておきたい。

上記では、熊谷を例に高温の特徴とメカニズムを記載したが、その他の地域（岐阜県多治見や静岡県浜松）でも特徴的なメカニズムが見られる。当日は時間が許す限りそれらの研究内容（e. g., 岡田ほか 2014; Takane et al. 2015; 2017a; 2017b; 伊藤ほか 2016; 高根・伊藤 2021）も紹介する予定である。

3. 平均的に高い気温をもたらすメカニズム

第2章では 40℃超の高温について紹介したが、高温は日中のみに発生しているわけではない。最高気温だけでなく、最低気温や日平均気温の平年値（この場合は 1981-2010 年と少し古い平年値である）のランキング（気温と雨量の統計 HP: <https://weather.time-j.net/Monthly/Heinenti/08>, 最終閲覧日：2024 年 7 月 17 日）を見ると、上述の最高気温ランキングとは異なる特徴が見て取れる。具体的には、最高気温ランキングでは現れなかった大阪府や神戸といった阪神地域が、平年値における最高気温・最低気温・日平均気温のランキングの上位を占める（ただし、沖縄や鹿児島、東京都等の島嶼地域は本州の地点とは条件が異なるため除く）。この観測事実に基づき本章では、平均的に高い気温をもたらすメカニズムについて紹介する。

気温が平均的に高くなる要因としてはいくつか考えられる。緯度の低さや熱容量の多い海に囲まれていることは、島嶼地域の平均気温が高いことから、要因の筆頭であると考えられる。ただし、阪神地域はこの要因では説明がつかない。それでは、阪神地域の平均気温を押し上げるその他の要因は何であろうか？現状で考えられる、もう一つの大きな要因は、我々がこれまでもたらしてきた都市化により引き起こされるヒートアイランド現象である。

ヒートアイランドの歴史的な話や成果等については、2022 年の夏季大学により詳しく紹介されている（日下 2022）。そのため、ここではそのエッセンスのみを紹介する。端的に言うと、ヒートアイランド現象は以下により引き起こされる：

① 自然被覆であった地面（平面）がアスファルト等

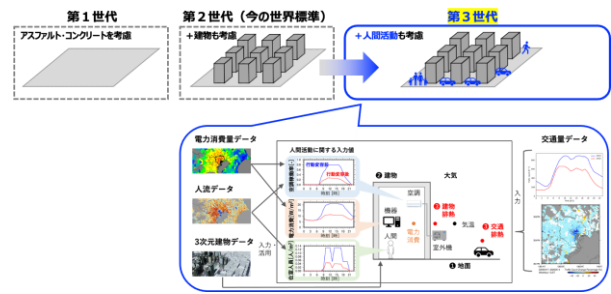


図4 開発している都市気候モデルの概要。

の人工物に置き換えられることで、地面における放射収支・地表面熱収支等が変わる（潜熱が減り顕熱が増え、蓄熱も増える）。

- ② 平面であった場所が建物により立体的な空間になり、風通し悪くなるとともに、蓄熱面や放射面が増える。夜間の放射冷却も阻害され、気温が下がりにくくなる。
- ③ 人間の活動により、人工的な熱（人工排熱）が大気へ排出される。

上記①～③は日中と夜間のどちらの気温を押し上げる方向に働き、阪神地域の平均気温が高いという結果をサポートするメカニズムである（ただし②の建物の存在により歩行者レベルでは日陰になり、日中に都市の気温が周辺よりも低くなるクールアイランド現象が存在し得ることも同時に知られている）。

著者は、このヒートアイランドを再現するための数値モデル：都市気候モデル（都市キャノピーモデルとも呼ばれる）の開発とこれを用いたヒートアイランドの将来予測、そしてこれに基づくヒートアイランド対策に関する研究を進めている。都市気候モデルは世界で数多く開発されているが、その中でも著者が開発に関わっている都市気候モデル（Kikegawa et al. 2003; Nakajima et al. 2023; Takane et al. 2022）の特長は、都市の気温や湿度、放射、風等の都市生活の屋外環境と建物内の室温等（すなわち屋内環境）の相互関係を物理的に計算ができることである（図4）。この特長により、例えば、何かしらの原因で外気温が上昇した際に、その影響が建物の壁や屋上の熱伝導を通じて室温を上昇させ、上昇した室温をエアコンを使用して一定に保つために必要なエネルギー消費量およびその結果屋外に排出する人工排熱を動的に計算できる（図4）。要するに、上記①～③のヒートアイラ

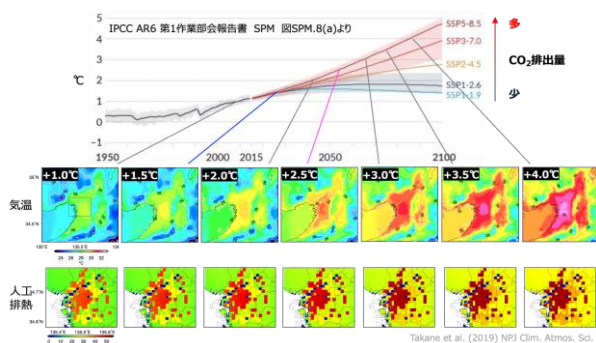


図5 都市気候モデルによる大阪平野の気温と人工排熱量の将来変化推定結果 (Takane et al. 2019 より)。

ンドのメカニズムを全て動的に再現・可能であるということであり、このことは、モデルがヒートアイランドのメカニズムの理解や今後の将来変化の推定に有用であることを意味している。

上記の都市気候モデルを活用し、阪神地域を含む大阪平野全体の気温が今後の気候変動でどのように変化するかを調べた研究 (Takane et al. 2019: 2020) を紹介する。図5は疑似温暖化と呼ばれる手法と都市気候モデルを組み合わせ、過去から気候変動が日本域平均で0.5℃ずつ3.0℃ (産業革命前からは4℃) まで進行した場合に、大阪平野の人工排熱や気温がどのようになるのを推定した結果である。

私たちライフスタイルや建物の断熱性、エアコンの性能等の条件が今後変わらなければ、温暖化が進むにつれ、建物内の熱負荷が増え (室温が上昇する方向に働き)、その結果、エネルギー消費や人工排熱が増加する (図5下)。その結果、都市の気温は局所的ではあるが、さらに上昇すると予測されている (図5中)。上昇するのは気温だけでなく、熱中症指数として知られる WBGT や同様の熱ストレス指標も増加傾向にある (Takane et al. 2020)。現代でも真夏の日中での労働や運動には多くのリスクを伴うが、このままでは将来はさらにリスクが高くなる可能性が高いことを理解する必要がある。

ここまでの説明を受け、都市化が平均気温を押し上げる一つの原因であり、今後の気候変動の影響を受けてヒートアイランドが強化される可能性があることがご理解いただけたと思われる。

ただ、上述を受けて、都市化が平均気温を押し上げるのであれば、大阪と同様に都市化している東京

や名古屋の気温がなぜ阪神に比べて低いのか? と疑問に思う読者がいるかもしれない。実は、その理由は著者の知る限り現状では明らかではない。今後の研究による解明が望まれる。

4. 暑さへの対策

第2、3章では日中の極端な高温のメカニズムと平均的に高い気温となるメカニズムをそれぞれ説明した。メカニズムを理解することは、理学的好奇心を満たすだけでなく、このメカニズムを活かした暑さ対策を考える工学の面でも重要である。例えば、第2章では高温の決定打としてフェーン現象を紹介したが、この現象自体を抑制する策は今のところ考えられない。なぜならば、山がなければフェーンは起きないがフェーンを引き起こすほど大きな山を無くすことは当たり前ではあるが不可能であるからである。しかし、フェーン現象を強化し得る地面からの非断熱加熱を小さくするような対策は現実的かもしれない。また、ヒートアイランドは我々が創り出した人工的な現象であり、創り出すことができたならばある程度それを解消・改善させることも不可能ではないはずだ。そのための対策が、都市の緑化等に代表されるヒートアイランド対策と呼ばれるものであり、気候変動という文脈では、気候変動適応策と呼ばれている。

誌面の都合上、ここに結果は記載しないが、当日は著者等が評価した都市部の気候変動対策に関する研究例 (都市部の緑化・クールルーフ・行動変容・建物の断熱化・自動車の電動化など) (e. g., Takane et al. 2022; 2023; Yamaguchi et al. 2023) を可能な限り紹介し、一人一人が気候変動に適応するための一考としたい。

5. おわりに

気候変動がさらに進んだ場合の将来では、今ではまだ珍しい 40℃超の高温が当たり前になるかもしれない。また、気候変動に伴い最高気温ランキングに登場する場所にも大きな変化が生じる可能性もある。これらを考える上でのヒントは、今回の夏季大学における今田氏や伊東氏の発表内容に関する研究にある。また、これらの高温の健康への影響や対策のヒントは、井原氏の発表内容にあるであろう。上述のような不明点を明らかにするとともに、高温が引き起こす諸問題の深刻さが理解され、現象のメカニ

ズムの理解とメカニズムに基づく対策がいち早く社会実装されることが望まれる。

謝辞

本成果の多くは、科研費 海外学振、26702006、16H04441、環境省・(独) 環境再生保全機構 環境研究総合推進費(JPMEERF20191009、JPMEERF20231007)により実施されました。

参考文献

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, 2014: 夏季における岐阜県多治見市の気温分布調査. *天気*, 61, 23-29.

Ishizaki, N., and I. Takayabu, 2009: On the warming events over Toyama Plain by using NHRCM. *SOLA*, 5, 129-132. doi: 10.2151/sola.2009-033

伊藤淳史・仲吉信人・山城拓登・小川憲人・高根雄也・日下博幸, 2016: 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, 73-78. doi: 10.2208/jscejhe.72.1_73

Kikegawa, Y., Y. Genchi, H. Yoshikado, and H. Kondo, 2003: Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Applied Energy*, 76, 449-466, doi:10.1016/s0306-2619(03)00009-6

日下博幸, 2022: ヒートアイランドと温暖化: ヒートアイランド対策と暑さ対策は違うのか?. *日本気象学会 2022 夏季大学 予稿*, https://www.metsoc.jp/default/wp-content/uploads/2022/08/SS2022_07_v2.pdf

Nakajima, K., Y. Takane, Y. Kikegawa, and K. Yamaguchi, 2023: Improvement of WRF-CM-BEM and its application to high-resolution hindcasting of summertime urban electricity consumption. *Energy and Buildings*, 296, 113336. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113336

Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/ TN-475+STR, 126 pp. [Available online at

http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.]

高根雄也・伊藤享洋, 2021: なぜ浜松で歴代最高気温 41.1 °C が観測されたか? -実況と過去の高温事例との比較による考察-. *天気*, 68, 149-163. doi: 10.24761/tenki.68.3_149.

Takane, Y., Y. Kikegawa, M. Hara, and C. S. B. Grimmond, 2019: Urban warming and future air-conditioning use in an Asian megacity: Importance of positive feedback. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2, 39. doi: 10.1038/s41612-019-0096-2

Takane, Y., H. Kondo, H. Kusaka, J. Katagi, O. Nagafuchi, K. Nakazawa, N. Kaneyasu, and Y. Miyakami, 2017: 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, 2067-2079. doi: 10.1175/JAMC-D-16-0257.1

Takane, Y., and H. Kusaka, 2011: 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, 1827-1841. doi: 10.1175/JAMC-D-10-05032.1

Takane, Y., H. Kusaka, and H. Kondo, 2014: 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, 3926-3938. doi: 10.1002/joc.3951

Takane, Y., H. Kusaka, and H. Kondo, 2015: 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, 1857-1869. doi: 10.1002/qj.2490

Takane, Y., H. Kusaka, H. Kondo, M. Okada, M. Takaki, S. Abe, S. Tanaka, K. Miyamoto, Y.

- Fuji, and T. Nagai, 2017: Factors causing climatologically high temperature in a hotted city in Japan: a multiscale analysis of Tajimi. *International Journal of Climatology*, 37, 1456-1473. doi: 10.1002/joc.4790
- Takane, Y., K. Nakajima, and Y. Kikegawa, 2022: Urban climate changes during the COVID-19 pandemic: Integration of urban-building-energy model with social big data. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 5, 44. doi: 10.1038/s41612-022-00268-0
- Takane, Y., K. Nakajima, K. Yamaguchi, and Y. Kikegawa, 2023: Decarbonisation technologies can halve the nonlinear increase in electricity demand in densely populated areas due to climate change. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104966. doi: 10.1016/j.scs.2023.104966
- Takane, Y., Y. Ohashi, C. S. B. Grimmond, M. Hara, and Y. Kikegawa, 2020: Asian megacity heat stress under future climate scenarios: Impact of air-conditioning feedback. *Environmental Research Communications*, 2, 015004. doi: 10.1088/2515-7620/ab6933
- Yamaguchi, K., Y. Takane, and T. Ihara, 2024: Climate change adaptation and mitigation potential of EVs in Tokyo Metropolitan Area. *Urban Climate*, 55, 101859. doi: 10.1016/j.uclim.2024.101859