

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—

高 根 雄 也*¹・伊 藤 享 洋*²

要 旨

2020年8月17日に静岡県浜松市で観測された日最高気温の歴代最高タイ記録41.1°Cについて、関連する観測データの特徴を調査した。まず、高温の背景要因を考察した結果、鯨の尾型に準ずる夏型気圧配置の出現とそれに伴う850hPa面の高温・概ね北西の一般風、東海地方における梅雨明け以降の連続晴天がその要因として示唆された。次に、高温の直接的な要因を考察したところ、伊吹山地を吹き下りる気流に伴うフェーン現象と、その後この気流が名古屋都市圏の地表面付近を吹走する際の顕熱供給（非断熱加熱）で気流そのものが高温化するメカニズムで浜松の高温がある程度説明できることが明らかになった。この高温化した風が浜松へ侵入し、浜松のすぐ東側の南風と収束したことが、浜松で最も気温が高くなった要因とみられる。以上のメカニズムは過去の国内における高温事例のメカニズムと類似していることから、上記の背景要因と直接的要因を兼ね備える他の地域においても今後40°Cを超える高温が発生する可能性がある。

1. はじめに

近年、40°Cを超える高温が日本各地で頻発している。例えば、2007年8月16日には、当時の日最高気温の記録を74年ぶりに更新する40.9°Cが熊谷（埼玉）と多治見（岐阜）で観測された。その後2013年8月12日に江川崎（高知）で41.0°C、2018年7月23日には再度熊谷で41.1°Cが相次ぎ観測された。気象庁HPに掲載されている日最高気温のランキング（<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall.php>, 2020.8.31閲覧）では、20位タイまで40°Cを超えており、40°Cを超える高温も現代では珍しい現象ではないことがうかがえる。2020年9月には、三条と中条（い

ずれも新潟）において9月としては初となる40°Cを超える高温が観測された。

このような高温に伴う熱中症被害は社会問題の一つになっている。気象庁は、近年の高温を受け、このような高温を一つの災害として認識するようになった（例えば、日本経済新聞 2018）。こうした高温の発生頻度は、過去に明確に増加傾向が見られ（藤部 1998, 2004）、今後も地球温暖化に伴い長期的に増加することが予測されている（例えば、Kusaka *et al.* 2012）。また、高温化に伴う健康被害の増加も懸念されている（例えば、日下ほか 2013）。特に都市部では、人間活動に伴う都市の温暖化も重なり気温と熱ストレスの上昇が大きくなる（例えば、Takane *et al.* 2019, 2020）ことに加えて、人口が集中することにより、多くの人が高温な環境へ暴露される機会・時間が増大するため（Ohashi *et al.* 2014）、高温への備えが急務である。

このような背景の中、2020年8月17日12時10分に浜松（静岡）（第1図）で日最高気温の歴代最高タイ記録となる41.1°Cが観測された。浜松は、気象庁がまとめている日最高気温の歴代全国ランキング（上述）において、いわゆる「ランキングの常連」ではなく、暑さ

*1（連絡責任著者）国立研究開発法人産業技術総合研究所環境創生研究部門。

〒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

*2 気象大学校。

—2020年9月12日受領—

—2021年1月3日受理—

で有名な地域とは一般的に認識されていなかった。実際、浜松（測候所）の明治15年からの歴史上（八木2002）、2020年以前の浜松における日最高気温の最高値は2013年8月11日の39.8°Cであるものの、次点を遡れば19年前の2001年8月4日の39.3°Cとなる。2020年8月17日は浜松の観測138年の歴史の中で最も暑かった日と言える。藤部（2004, 2012）によると、日最高気温が35°C・38°C・40°Cをそれぞれ超える日数が多い暑い地域は、主に三大都市圏の内陸部であることから、沿岸部である浜松における今回の41.1°Cの珍しさが際立つ。

それでは、なぜ2020年8月17日に浜松で日最高気温の歴代最高タイ記録が観測されたのだろうか？気候変動という背景場に加えて、メソ・局地スケールでの高温の特徴を把握することは、極端な高温の予測と防災の観点から重要である。また、これまでも日本におけるメソ・局地スケールの高温の実態やメカニズムに関する研究結果は多数報告されており、それらとの比較も重要である。具体的には、上述の熊谷（桜井ほか2009；篠原ほか2009；渡来ほか2009；Takane and Kusaka 2011；Takane *et al.* 2014, 2015；Nishi and Kusaka 2019）、多治見（伊藤ほか2012；高根ほか2013；岡田ほか2014；Takane *et al.* 2017a, b）、江川崎（伊藤ほか2016）、大阪・京都（Takane *et al.* 2013）などで近年精力的な研究が行われている（高根2018）。このような先行事例との比較は、高温発生の共通項（環境場）を探すことでもあり、今後の気候変動時代における高温への正しい理解と予測にもつながるであろう。

本研究では、浜松で41.1°Cが観測された理由を実況データ等から考察するとともに、これまでの日本の猛暑の特徴・メカニズムと比較し、その特徴を報告する（以下では、本事例を単に「浜松41.1°C」と表記する）。

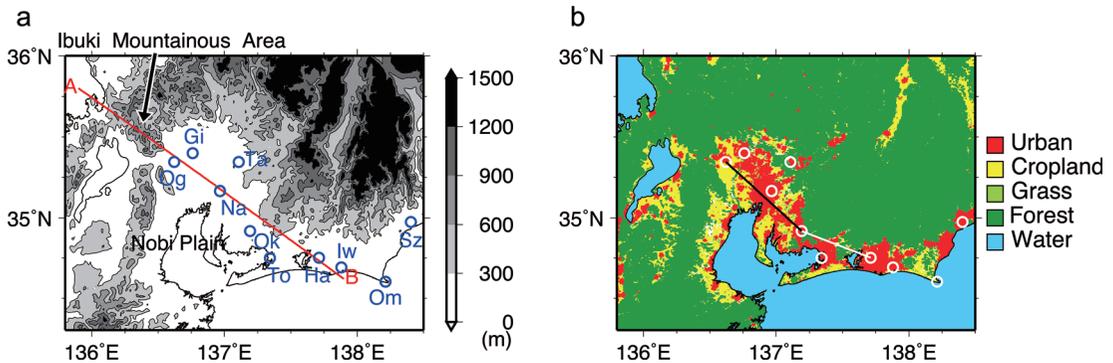
2. 使用データ

2.1 観測データ

浜松で41.1°Cが観測された要因について考察するため、第1表に示す観測データを用いる。高層および地上天気図で気圧配置の特徴を把握するとともに、高層気象観測で上空の気象要素を把握する。ウィンドプロファイラでは高層および地上付近の風の特徴を把握する。気象官署・アメダス観測値で東海地域における地上気象要素を把握する。気象衛星可視・赤外面像で東海地方の雲の状況を見る。

2.2 客観解析データ

観測データと共に、気象要素の詳細な分布が得られる客観解析データとして、メソ解析値を用いて浜松41.1°Cの高温の特徴を4次的に考察する。メソ解析は気象庁メソスケールモデル（MSM）の初期値としても使われるデータであり、MSMと同じ5 kmメッシュの格子点値で3時間ごとにつくられている。また、データ同化手法には4次元変分法が用いられており、空間3次元だけでなく時間方向も含めて4次的に観測値を同化した解析値となっている。これらのことから、メソ解析値は本事例の環境場やその変化を追うのに適したデータと言える。



第1図 東海地方の (a) 地形と (b) 土地利用 (国土数値情報) 分布図。(a) 中の A-B は第6図 b の断面図の位置を示す。Og: 大垣 (岐阜), Gi: 岐阜 (岐阜), Ta: 多治見 (岐阜), Na: 名古屋 (愛知), Ok: 岡崎 (愛知), To: 豊橋 (愛知), Ha: 浜松 (静岡), Iw: 磐田 (静岡), Om: 御前崎 (静岡), Sz: 静岡 (静岡)。(b) 中の黒線は大垣-岡崎間、白線は岡崎-浜松間を、それぞれ示す (第4.2節参照)。

3. 浜松41.1°Cの実況と他の高温事例との比較

3.1 総観場の特徴

ここでは、2020年8月17日の概況を総観場の視点で調べる。

2020年8月17日は高気圧が主に西日本を覆う場であった(第2図 a, b)。この日の気圧配置型はいわゆる鯨の尾型(盛夏型)あるいはこれに準ずる夏型と見られ^[註1]、同様の気圧配置型は少なくとも11日から持続している。Takane *et al.*(2014, 2017b)によると、埼玉県熊谷市や岐阜県多治見市が高温(それぞれ37.2°C, 38.1°C以上)になる時には、高い確率(熊谷は4割以上, 多治見は6割以上)でこの鯨の尾型が出現している。鯨の尾型の特徴として、通常の夏型気圧配置(南高北低型)に比較して、850hPa面の高い気温と概ね北西の一般風(Takane *et al.* 2014)が指摘されている(南高北低型の場合は概ね南西の一般風が卓越する)。

第2図 d に示す松江のエマグラムを見ると、2020年8月17日には、一般風の風上に当たる松江の上空では西寄りの風が吹いている。気温の鉛直分布より、概ね950hPaから上空では安定または中立成層にあり、またこの層では乾燥していることがわかる。当日9時における850hPa面の気温は21.4°C(平年値よりも3.5°C高温)であった。この850hPa面の気温は、埼玉県熊谷市で当時の歴代最高である日最高気温40.9°Cを記録した当日9時の館野の21.6°C(Takane and Kusaka 2011)と同等の高さである。850hPa面高層天気図(第2図 b)によると、松江だけでなく、東海地方を含む西日本が21°C以上の暖気で覆われていた。なお、前日16日21時における松江の850hPa面の気温は更に高く、24.0°Cであった。

名古屋のウィンドプロファイラによる観測値を見ると、850hPa面付近(1500m前後)から地上付近にかけて概ね北西の風が吹いていた(第3図 a)。

3.2 メソ・局地スケールの場の特徴

次に、2020年8月17日の概況をメソ・局地スケールの視点で調べる。

気象官署・アメダスによる地上気象観測によると、東海地方の主に濃尾平野の多くの観測地点(特に愛知県)では、梅雨明けから2020年8月17日にかけて降水日数が少なく、基本的に連続した晴天が続いていた(以降、連続晴天と呼ぶ)。17日も1日を通じて晴れていた(図省略)。なお、気象庁(2020)によると、2020年8月の東海地方の降水量は平年の31%にとどまり、日照時間は平年比137%と多かった。このような少雨・多照の場では、地表面の乾燥化により、大気境界層内が高温になる傾向にあることが指摘されている(Fujibe 1994; 藤部 2012)。この少雨・多照により、浜松では8月に入って以降概ね日々気温が上昇している場であり、12日から17日にかけて、概ね西から北西の風が持続して卓越する場であった(図省略)。

このような場において、濃尾平野では17日の朝から平野の多くの地点でほぼ北西の風が卓越していた(第4図 a)。また、平野の気温は9時の段階で30°Cを超える一律に高い状態であった(第4図 a)。12時10分には、平野を覆う北西の風の風下である浜松で40°Cを超える高温が観測された(第4図 b, 第5図 b)。

浜松とは対照的に、浜松のすぐ東の観測地点である磐田では、17日に南寄りの風が観測されており(第4図 b)、12時10分における地上気温は浜松に比べて約6°C低かった(第5図 b)。このことから、浜松と磐田の間に風の収束があったと推察される(第4図 b)。濃尾平野および中部山岳を含む領域での局地天気図(第4図 c)を見ると、17日は中部山岳域に中心を持つヒートローの南側に等圧線(例えば、1009-1010.5hPa)の大きな曲率(気圧の谷)があることがわかる。この曲率の大きな部分は風の分布に見られるシアラインの

第1表 使用データ一覧。

	観測データ					客観解析データ
	高層天気図(500, 700, 850hPa面)地上天気図	高層気象観測	ウィンドプロファイラ	気象官署・アメダス	気象衛星可視・赤外面像	メソ解析値
場所・地点	日本域	松江	名古屋 静岡	東海地域 (第1図)	東海地域 (第1図)	東海地域 (第1図)
日時	00-21 JST (3時間毎)	09 JST 21 JST	00-23 JST	00-23 JST	00-23 JST	00-21 JST (3時間毎)
目的	気圧配置型の把握	上空の気象要素把握	地上付近の風の把握	地上気象要素把握	雲の実況把握	フェーン現象検討

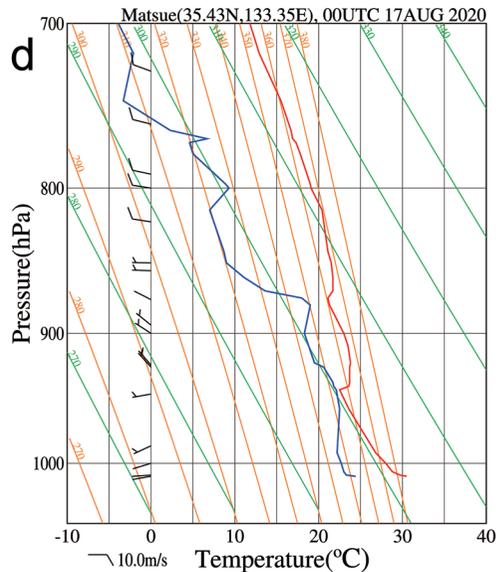
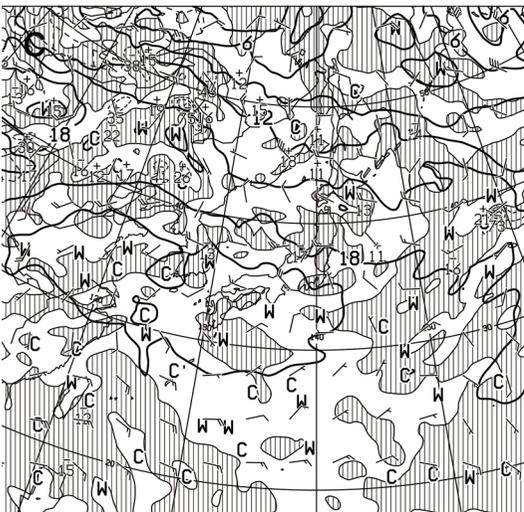
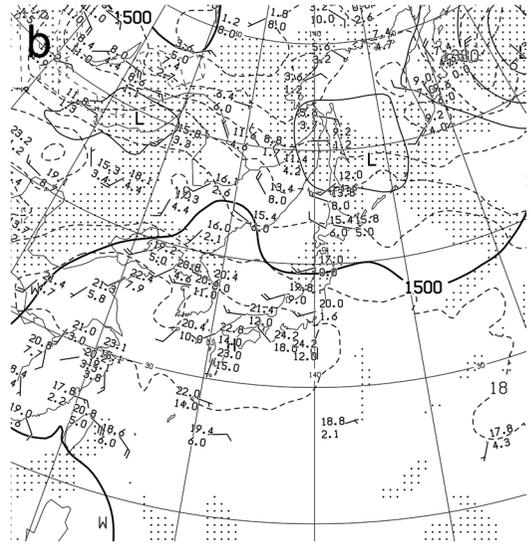
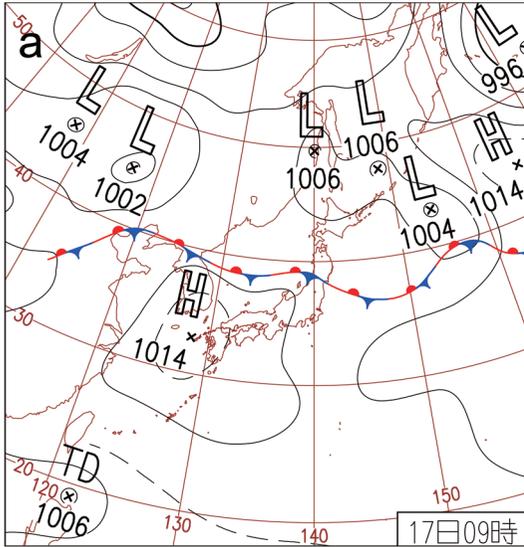
位置と概ね一致し、その西側には浜松が位置し北西～西の風が、東側には磐田が位置し南寄りの風が、それぞれ吹いている。この浜松と磐田における地上付近の風の違いは、浜松と同様に北西の風に覆われていた名古屋と磐田の東に位置する静岡のウィンドプロファイラ観測値（高度約1000m以下）でも明確に確認できる（第3図 a, b）。

4. 浜松41.1°Cのメカニズムの考察

第3章で述べた実況をもとに、本章では浜松41.1°Cの理由について考察する。

まず、第3章で述べた2020年8月17日の概況（観測事実）をまとめると以下ようになる。すなわち、

- 1) 鯨の尾型に準ずる気圧配置とそれに伴う高い850hPa面の気温とほぼ北西の一般風（第2図、第



第2図 (a) 2020年8月17日9時の地上天気図（日々の天気図より）と (b) 850hPa 面高層天気図（実線：等高線、破線：等温線）および (c) 850hPa 気温・風、700hPa 上昇流分布図（実線：850hPa 気温、シェイド・数値：700hPa 鉛直P速度）（いずれも日本付近を中心にトリミング）、(d) 松江における高層気象観測のエマグラム（赤線：気温、青線：露点温度、緑線：乾燥断熱減率、オレンジ線：湿潤断熱減率）。

3 図)

2) 連続した晴天

3) 平野を覆う北西の風 (第 4 図 a, b)

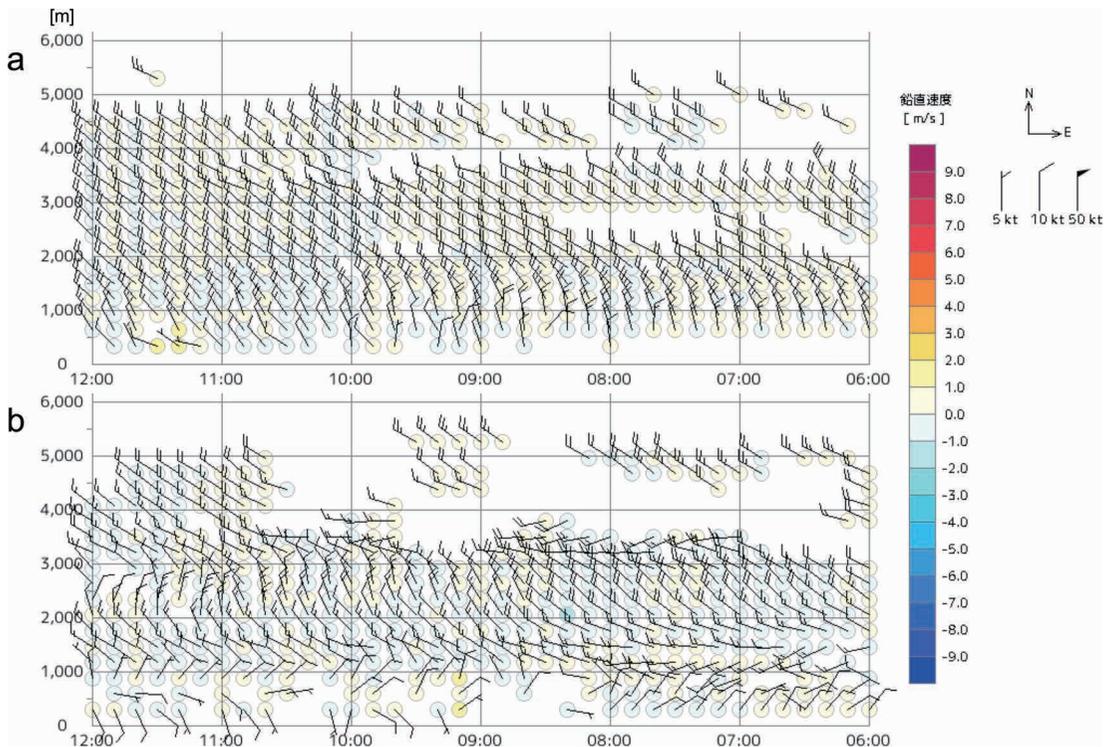
4) 北西風の風下末端で最も高い気温 (第 4 図 b)

である。これらの特徴は、埼玉県熊谷市や岐阜県多治見市が高温になる特徴 (高根 2018) とよく似ている。高根 (2018) によると、熊谷と多治見の両ケースでは、鯨の尾型気圧配置に伴うほぼ北西の一般風により、両地域ではフェーン現象が発生し、これが両平野の高温の支配的な要因の一つとされている。

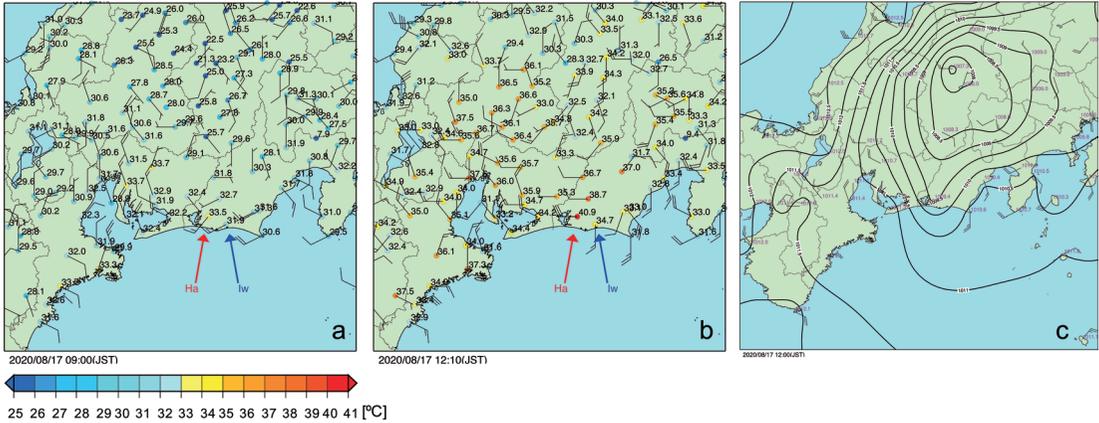
4.1 フェーン現象の議論

そこで、ここではまずフェーン現象の有無とその浜松の高温への寄与について議論する。フェーン現象は大和田・設楽 (1985) によると「山越えをして吹きおりにくる乾燥した比較的高温な風」、齊藤 (2004) によると「山を越える気流に伴い風下側山麓で気温が上昇する現象」とそれぞれ定義される。定義に、風下の乾燥化を含めるか否かの違いがあるが、高温をもたらす点は共通している。一般的に湿度の変化は気温の変化と同様にフェーン現象の判断の根拠となる。現在で

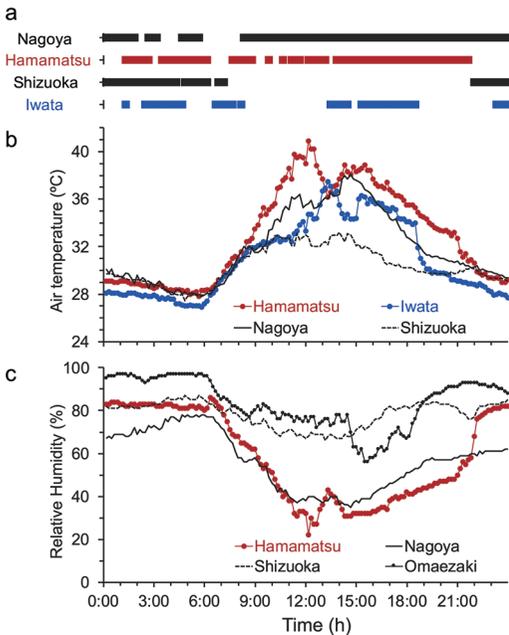
は、フェーン現象には様々なタイプがある (例えば、Takane *et al.* 2015 ; Elvidge and Renfrew 2016 ; Miltenberger *et al.* 2016) ことが知られているが、代表的・古典的なものとして2つのタイプがある。一つ目は風上地上付近の気流が風上山岳を強制上昇する際の降水 (凝結・落下) により、気流が非断熱加熱を受け (気流は等相当温位面に沿う)、山を吹き降りる際に断熱昇温し (等温位面に沿う) 地上に高温をもたらすタイプである。このタイプはウェットフェーン、湿ったフェーン、あるいは熱力学的フェーンとも呼ばれる。二つ目は、風上上空の気流が (風上の降水を伴わずに) 山を越え吹き降りる際に断熱昇温し (等温位面に沿う) 地上に高温をもたらすタイプである。このタイプはドライフェーン、乾いたフェーン、晴天フェーン、あるいは力学的フェーンとも呼ばれる。これら二つのタイプの区別は、風上側の降水の有無で概ね診断できる。なお、本研究では、数値シミュレーションによる詳細な解析 (例えば、Ishizaki and Takayabu 2010 ; Takane and Kusaka 2011 ; Takane *et al.* 2015) を目的としていないことから、この代表的な二つのタ



第3図 ウィンドプロファイラ観測で得られた2020年8月17日の (a) 名古屋, (b) 静岡における高度6,000m以下の風の時系列断面図。



第4図 地上気象観測による2020年8月17日 (a) 9時00分, (b) 12時10分における地上風 (短矢羽根 1.0m s^{-1} , 長矢羽根 2.0m s^{-1}) と地上気温の水平分布図, および (c) 12時00分における局地天気図 (地上気圧の地点観測データから描画ツール GMT により等圧線を描画したもの). 実線は等圧線 (0.5hPa 毎) を示す. Ha: 浜松 (静岡), Iw: 磐田 (静岡).



第5図 2020年8月17日の浜松(赤), 名古屋(黒), 磐田(青), 静岡(黒), 御前崎(黒)における (a) 地上付近の風, (b) 気温, (c) 相対湿度の時間変化 (10分値). (a) の四角は, 地上風の風向が西から北北西の時間帯を示す.

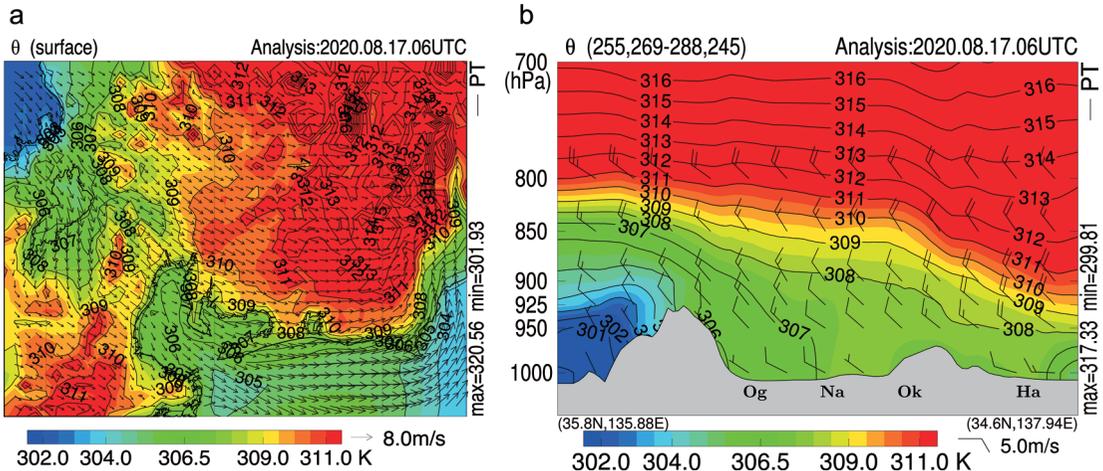
タイプの判定のみ行う.

ここで, 検討すべきフェーン現象は, 濃尾平野の北西側の伊吹山地に起因するフェーンと浜松の北側の山地に起因するフェーンである. 前者のフェーン現象は夏季に頻繁することが先行研究 (Takane *et al.* 2017b) で示されている.

まず, 濃尾平野でフェーン現象があったかどうかを考察する. 基本的にフェーン現象の有無は, 地上気象観測での風・気温・湿度の時間変化や分布から判断できる. また, 客観解析データの等地上高度面・等圧面の温位水平分布や温位の鉛直断面からも診断できる.

第3章で述べたように, 17日の濃尾平野の大部分は伊吹山地が位置している北西側から吹く風で覆われており (第4図 a, b), 気温も9時には多くの地点で 30°C 以上 (第4図 a), 12時には 35°C 以上となっている (第4図 b). 濃尾平野において湿度を観測している名古屋と岐阜では日中の相対湿度は20%後半~40%台まで下がっている (第5図 c). 一方, 北西風の支配下になかった御前崎や静岡では日中に50%後半から70%台までしか下がっていない (第5図 c).

メソ解析値での地上における温位の水平分布 (第6図 a [註2]) を見ると, 伊吹山地周辺の $307\text{--}309\text{K}$ の領域が, 濃尾平野西部に広がっていることがわかる. 一方で, 伊吹山地の風上側の地上では $302\text{--}305\text{K}$ の領域が広がっており (第6図 a), 風上と風下地上の温位差が明瞭である. さらに, 北西風に沿った A-B 断面 (第1図 a) の温位の鉛直分布 (第6図 b) を見ると, 伊吹



第6図 気象庁メソ解析による2020年8月17日15時の (a) 地上における温位と風の水平分布, (b) A-B断面 (第1図a参照)における温位と風の鉛直断面図. Og: 大垣 (岐阜), Na: 名古屋 (愛知), Ok: 岡崎 (愛知), Ha: 浜松 (静岡). なお, 断面図はメソ解析値の等圧面上の値から作成しており, (a)の地上温位は参照していない.

山地の上空850hPa付近の307-308Kの等温位面が、風下へ向けて垂れ下がっており、濃尾平野の地上付近へ達していることがわかる。一方で風上側の主に900hPaより下層では風下に比べて温位が明瞭に低くなっている。

以上より、2020年8月17日には濃尾平野でフェーン現象が起きていたと推察される。このフェーン現象のタイプは、伊吹山地の風上側の気象官署・アメダスで降水が観測されていないことに加えて、気象衛星画像において風上側で雲が見られないこと(図省略)から、典型的な二つのタイプの内、後者のドライフェーンであったと推察される。

濃尾平野でのフェーンの寄与と同様に、浜松の北側の山岳を吹き降りるフェーン現象の寄与の可能性についても議論する。第6図aによると、濃尾平野内陸から浜松に向かう北西から西寄りの風の流れが認められる一方、浜松の北側に位置する山岳からの北寄りの風が吹いているようには見られない。これは観測事実(第4図)とも一致する。したがって、浜松の北側の山岳を吹き降りる風によるフェーン現象は生じず、これは浜松41.1°Cの要因にはなり得ない。

4.2 地表面からの非断熱加熱の議論

前節の議論では、濃尾平野の高温にはドライフェーンによる寄与があったと推察された。しかし、観測事実として、フェーン現象の影響を平地で最初に受ける山麓に位置する大垣(岐阜)の気温は37°C程度であり、

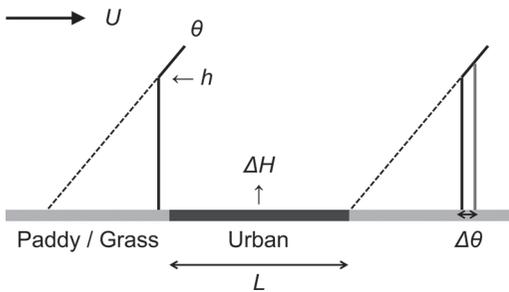
ここからの気流がこのまま浜松に流れ込んだとしても、41.1°Cには届かない。また、メソ解析値においても風下の混合層につながる等温位面の温位の値は307-309K (34-36°C)程度(第6図a, b)であり、この値も41.1°Cまでの昇温には十分ではない。

同様の議論は、熊谷や多治見で過去に発生した高温に対してもこれまでに行われてきた。具体的には、Takane and Kusaka (2011)は、2007年8月16日における熊谷の40.9°Cの高温のメカニズムとして、先行研究で指摘されていたドライフェーンの寄与だけでは説明できないことを指摘した。そして、このドライフェーンの寄与に加えて、連続晴天により乾燥した山肌からの非断熱加熱の寄与が後押しとなり、40.9°Cが記録されたことを数値実験から報告している。2018年8月12日の41.1°Cでも同様のメカニズムが報告されている(Nishi and Kusaka 2019)。このメカニズムは熊谷の事例だけではなく、多治見の高温の要因としても報告されている。Takane *et al.*(2017a)は、この地表面加熱が、風下末端の多治見の高温に寄与していることを、数値実験だけではなく、現地観測と簡易混合層モデル(木村 1994)により指摘した。さらに、このメカニズムは、熊谷と多治見だけではなく、オホーツク地方(北海道)でも報告されている(Mori and Sato 2014)ことを付け加えておく。

これらの議論と、浜松が北西風の風下末端に位置しており、かつ連続晴天が続いていたという観測事実

(第3章)を考慮すれば(地表面加熱による気流の昇温は風下ほど大きくなるため)、今回の浜松の高温にも、風上側の地表面からの非断熱加熱の寄与が仮説として浮上する。

そこで、ここでは、仮説検証のため非断熱加熱の効果を Takane *et al.*(2017a) と同様に簡易混合層モデル(木村 1994)により考察する。この見積もりでは、日中にある大気カラムが一様な風に乗って非一様な地表面を風上から風下へラグランジュ的に移動する様子(フェーン現象により昇温した大垣付近の大気カラムが北西風に流されて浜松へ移動する場面)を想定している。第7図はその状況の模式図である。大気カラムは一様な風(U)で風上から風下へ移動する際に、非一様な地表面からの加熱(ΔH)を受け、昇温する($\Delta\theta$)。ここで、 ΔH (W m^{-2})は主に都市と非都市の地表面からの顕熱輸送量の差を示している。このモデルに、観測された U (m s^{-1})、一般的な ΔH 等を入力することで、風下の $\Delta\theta$ (K)を見積もる。ここで、 $\Delta H = H_{\text{lec}} - H_{\text{wind}}$ と定義する。 H_{lec} は風下の都市の、 H_{wind} は風上の非都市の顕熱輸送量をそれぞれ示す。一様風 U に沿った都市の長さを L (m)とする。また、通常温位は絶対温度(K)で表記することが多いが、以下では本事例との比較のしやすさのため必要に応じてセルシウス温度($^{\circ}\text{C}$)で表記する。



第7図 簡易混合層モデル(木村1994)の概念図。Takane *et al.*(2017a) Fig. 6から引用。

ここで、都市の地表面から供給される顕熱輸送量の積算(ΔQ [J m^{-2}])は以下で表される。

$$\Delta Q = \Delta H L / U \quad (1)$$

混合層高度が h (m)の大気カラムの温位が $\Delta\theta$ (K)上昇するのに必要な顕熱輸送量(ΔQ [J m^{-2}])は、

$$\Delta Q = C_p \rho \Delta\theta h \quad (2)$$

である。(1)と(2)が成り立つ時、大気カラムの混合層の平均的な温位上昇量($\Delta\theta$ [K])は、

$$\Delta\theta = \Delta H [L / (C_p \rho h U)] \quad (3)$$

と書ける。ここで、 C_p は大気定圧比熱($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) (1004を使用)、 ρ は大気密度(kg m^{-3}) (1.14を使用)である。

風下の $\Delta\theta$ を見積もる上での各パラメータの設定を第2表にまとめる。混合層高度 h は、Takane *et al.*(2017a)で推定された濃尾平野における典型的な晴天かつ高温日の値である1,340mを用いる(第2表)。なお、計算では混合層高度の設定による不確実性を見るために、1,340m以外の値を用いた結果も報告する。 U は、名古屋で観測された7時から12時の平均風速 3.37 m s^{-1} を使用する。 ΔH は、Takane *et al.*(2017a)で使用された 158.7 W m^{-2} を用いる。ここで、 H_{lec} は 192.2 W m^{-2} 、 H_{wind} は 33.5 W m^{-2} である。これらの値は、濃尾平野における領域気象モデルによる数値実験での値(Takane *et al.* 2017a)であるが、実際の都市部での観測値(例えば、Moriwaki and Kanda (2004)の 180 W m^{-2} 等)や吉門ほか(2014)における観測に基づく値($250\text{--}400 \text{ W m}^{-2}$)と矛盾しない値である(Takane *et al.* 2017a)。 L については二つの値を用いる。一つ目の値は、大垣から岡崎にかけて名古屋都市圏が概ね連続して広がっている(第1図b)ため、大

第2表 簡易混合層モデルによる風下加熱量の推定。 θ はメソ解析値での値 $34\text{--}36^{\circ}\text{C}$ 。

	$\theta + \Delta\theta$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\theta$ (K)	ΔH (W m^{-2})	L (m)	C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	ρ (kg m^{-3})	h (m)	U (m s^{-1})
大垣-岡崎間 (第1図b)	36.1-38.1	2.1	158.7	68,000	1004	1.14	1,340	3.37
	36.5-38.5	2.5	—	—	—	—	1,000	—
	35.7-37.7	1.7	—	—	—	—	1,500	—
大垣-浜松間 (第1図b)	37.9-39.9	3.9	158.7	126,000	1004	1.14	1,340	3.37
	39.2-41.2	5.2	—	—	—	—	1,000	—
	37.5-39.5	3.5	—	—	—	—	1,500	—

垣一岡崎間の約68kmを用いる（この見積もりを大垣一岡崎間と呼ぶ）。二つ目は、大垣一岡崎間に岡崎一浜松間を足した約126kmである（この見積もりを大垣一浜松間と呼ぶ）。後者のうち、岡崎一浜松間は必ずしも大部分が都市というわけではないが、豊橋（愛知）等の都市を通過することや第3章で述べた連続晴天により乾燥した非都市のポーエン比が大きくなる状況を想定している。

第2表に $\Delta\theta$ の見積もり結果をまとめた。 L として68kmを使用した大垣一岡崎間での $\Delta\theta$ は2.1K(°C)と見積もられた。第4.1節のメソ解析値によると、フェーン現象により濃尾平野の内陸部では34–36°C(307–309K)程度までの昇温が期待される。この34–36°Cに上述の $\Delta\theta$ を単純に足す(線形和とする)^[註3]と、36.1–38.1°Cと浜松で観測された41.1°Cに近づく(第2表, $\theta + \Delta\theta$)。 L として126kmを使用した大垣一浜松間の場合は、 $\Delta\theta$ は3.9K(°C)となる。この場合、濃尾平野内陸における34–36°Cの大気カラムは $\Delta\theta$ (+約4°C)分上昇し、37.9–39.9°Cとなり、観測値41.1°Cにさらに近づく。

自明なことであるが、与える値によりこの見積もり結果は変わる。例えば、与えたパラメータの内、最も不確実性が高いパラメータの一つは混合層高度 h である。そこで、 h として1,000m, 1,500mを使用した場合の $\Delta\theta$ も第2表にまとめている。大垣一浜松間で $h=1,000$ mとした場合は、40°Cを超える値(41.2°C)が見積もられている。実際に、この日は高気圧に伴う総観規模での下降流にも覆われ(第2図c)、メソ解析値において特に風下地域(浜松を含む)の混合層高度は925hPa(800m前後)以下と推定される(第6図b)ことから、この見積もり結果は十分起こりうる値と推察される。このように各パラメータに不確実性は残されている。しかし、この見積もりで最も重要なことは、 h , ΔH , U などについて現実的な範囲内の値を用いて浜松の41.1°Cに近い結果が得られる、ということである。この結果は、浜松の41.1°Cの高温に、風のフェッチとしての都市圏と乾燥した土壌からの非断熱加熱が寄与している可能性を示唆するものである。

なお、この地表面からの加熱は、顕熱の供給量の吹走経路上の積分で効くため、風の到達点(陸地における風下末端)で最も加熱量が大きくなる(気温が高くなる)。第3.2節で、浜松とすぐ東の磐田の間には風の収束(第4図b)が見られたが、この収束により浜松が風下末端となり、北西風に覆われていた他の地点に

比べて最も高温となったと推定される。すなわち、この風の収束が最も高温となる位置を決めた、という意味で非常に重要であった。

以上の簡易混合層モデルで推定される $\Delta\theta$ は、実際に都市の風上と風下で観測された $\Delta\theta$ の観測値によく合うことがTakane *et al.*(2017a)によって報告されている。さらに、今回の事例で温位が地上気象観測の観測値から推定でき、かつ北西の風に覆われていた岐阜と名古屋の7–12時平均の温位差(0.74K)を、簡易混合層モデルは0.9Kとよく再現できていることにも言及しておく(図省略)。

4.3 浜松41.1°Cの要因まとめ

以上の議論に基づく、41.1°Cが浜松で観測された要因の概念図を第8図にまとめる。上空850hPa付近の高温位の空気塊が伊吹山地付近から濃尾平野に吹き降り(第8図、左上の緑色矢印)、その空気塊が名古屋都市圏や乾燥した地表面を吹走する際の非断熱加熱によりさらに温まる(第8図、中央付近の緑色から黄色、赤色へと変色していく矢印)。この北西の風が、南寄りの風(第8図、右下の青い矢印)と収束し、浜松付近が北西の風の陸地での終着点となり加熱の積算効果が最も高くなることで、浜松で最も高い気温が観測された、というメカニズムであると推察される。

なお、翌日18日は17日に比べて連日の晴天の効果がより増大すると推察されるが、18日は10時以降日照が少なく、また南海上からの比較的冷たい海風の進入も見られ、18日における浜松の日最高気温は35.2°Cと、17日に比べて約6°C低かった(図省略)。

4.4 過去の浜松の高温事例との比較

浜松の高温に関しては、本研究で取り上げた2020年以外では、2013年8月11日に39.8°C、2001年8月4日に39.3°Cが観測されている。ここでは、これまでに明らかになった本事例における高温のメカニズムをふまえ、これら過去2事例のメソスケールの場の特徴を考察する。

両事例における地上気温・風の水平分布図と局地天気図を第9図に示す。この図を見ると、第3.2節で議論した2020年浜松41.1°Cにおけるメソスケールの場の特徴と類似していることがわかる。具体的には、2013年と2001年の事例と共に濃尾平野から浜松にかけて概ね北西から西の風に覆われ、浜松の気温が他のどの地点よりも高くなっている一方で、浜松の東に位置する磐田では南西の風が卓越し気温は低くなっている(第9図a, c)。局地天気図においては、2013年と2001年の

両事例ともに中部山岳域を中心としたヒートローの南側に比較的深い気圧の谷があり、この曲率の大きな部分の西側には浜松が、東側には磐田が位置している(第9図b, d)。

上述した、2020年浜松41.1°Cと2013年、2001年の高温におけるメソスケールの場に見られる特徴の類似点は注目すべき点であり、この結果は以上のようなメソスケールの場の出現が、浜松における高温発生条件のひとつと言える可能性を示している。

4.5 今後の課題

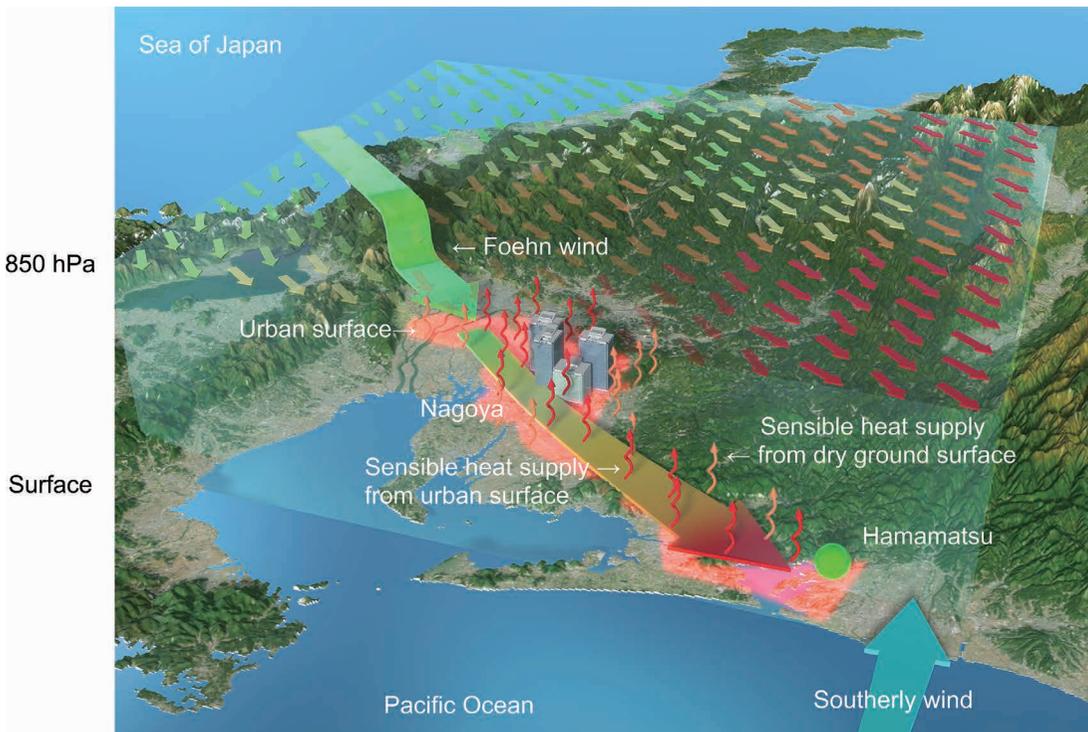
今後の課題として、主に以下の3点を挙げられる。

一つ目は、数値モデルを使用したより詳細かつ定量的な解析である。数値モデルによる再現実験では、観測データを元にした実況把握や診断では見抜けないメカニズムの提唱につながる場合がある(例えば、Takane and Kusaka 2011; Takane *et al.* 2015)ため、重要である。

二つ目は、浜松の観測地点周りのマイクロスケールの影響(例えば、志藤ほか 2015)の検討である。本研究では既に存在する観測データおよびメソスケールの

客観解析データを用いるに留まっており、マイクロスケールの要因については対象にできなかった。マイクロスケールの要因としては、例えば「日だまり効果」(近藤 2015; Sugawara and Kondo 2019)がある。岐阜県多治見市の高温の調査(近藤 2013; 岡田ほか 2014; Takane *et al.* 2017b)や高知県四万十市の高温の調査(中塚・東 2013; 近藤 2014; 伊藤ほか 2016)では、このマイクロスケールでの検討も現地観測により行われており、このようなマイクロスケールも含むマルチスケールでの調査が重要であろう。

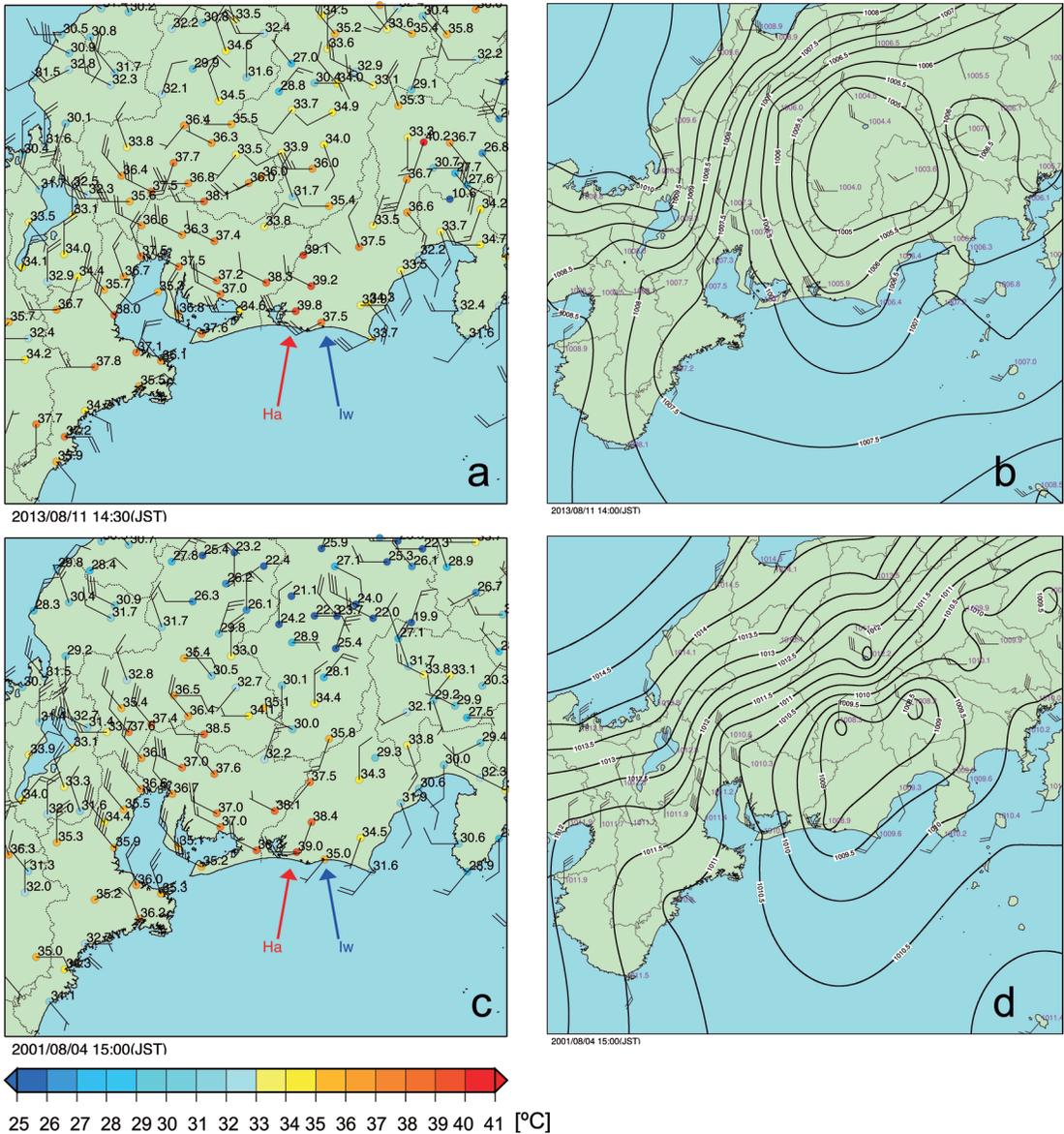
三つ目は、北西から南東へ向かう気流が濃尾平野から浜松にかけて広く覆うような環境場の希少性を統計的に判定することである。Takane *et al.* (2017b)では、多治見が高温になる際とならない際の濃尾平野の平均的な風の分布が示されている。これによると、いずれの風の平均的な分布でも、第4図a, bで示したような、濃尾平野から浜松にかけての一体とした北西-南東方向の気流は認められない。むしろ浜松は海からの距離が近く、本事例の磐田や愛知県の沿岸部のように、海からの南成分の風が卓越する頻度が明らかに高



第8図 2020年8月17日における浜松41.1°Cの要因に関する概念図。カラーは温位分布を示す(第6図のカラースケールと概ね対応)。

い (https://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/fuuhai/fu654.htm, 2020.9.8閲覧). 本事例の特異な点は、この「北西-南東方向の気流が濃尾平野から浜松にかけて広く覆っていたこと」だと思われる. 第4.4節で述べたように、この気流は2013年および2001年の浜松の高温時にも認められていることから、このような気流が浜松の高温の発生条件の一つである可能性がある

と考えられるが、これを結論付けるには更なる事例の積み重ねが必要と考える. 一方で、気圧配置型やそれに伴う北西風と南寄りの風との収束による高温のメカニズムについては、過去に観測された他の地域での高温の特徴 (Takane and Kusaka 2011 ; Takane *et al.* 2015, 2017a ; Nishi and Kusaka 2019) と共通している. このことは、上記の高温メカニズムの特徴を兼ね



第9図 2013年8月11日 (a) 14時30分における地上風と地上気温の水平分布と (b) 14時00分における局地天気図. 2001年8月4日15時00分における (c) 地上風と地上気温の水平分布と (d) 局地天気図. 実線は等圧線 (0.5hPa 毎) を示す. Ha: 浜松 (静岡), Iw: 磐田 (静岡).

備えうる他の地域においても今後40°Cを超える高温が発生する可能性があることを示唆している。

5. まとめ

2020年8月17日に静岡県浜松市で日最高気温の歴代最高タイ記録となる41.1°Cが観測された理由を、観測データと客観解析データから考察した。同時に、過去の高温事例と比較し、類似点を明らかにした。得られた高温の特徴と要因を以下にまとめる。

バックグラウンド要因：

- (1) 8月17日に至るまでの連日、鯨の尾型あるいはそれに準ずる気圧配置が出現していた。この気圧配置型は、関東平野や濃尾平均が高温となる際に出現する確率が高いことが統計的に知られており、過去の40°Cを超える高温事例と共通している。
- (2) (1)の気圧配置型に伴い、高層ゾンドで上空の高い気温と概ね北西の一般風が観測されていた。松江の17日9時の850hPa面の気温は21.4°Cであり、これは埼玉県熊谷市と岐阜県多治見市で40.9°Cを観測した2007年8月16日9時の館野850hPa面の気温21.6°Cと同等の高い値であった。また、北西の一般風も過去の高温事例の特徴と矛盾しない。
- (3) 梅雨明け以降8月17日に至るまで濃尾平野の多くの地点では連続した晴天が続いていた。これにより広い範囲で土壌が乾燥化していたことが推察される。土壌の乾燥化は地表面のボーエン比を大きくし、下記(5)の効果を高める。この連続晴天も、過去の40°Cを超える高温事例と共通している。

直接的な要因：

- (4) 8月17日は、気象官署・アメダスによる地上気象観測やメソ解析値から、伊吹山地からのフェーン現象が診断された。風上側で降水が観測されていないことから、ドライフェーンのみメカニズムと推察される。ただし、このメカニズムでは、風下地上(例えば大垣)は34-36°Cまでの昇温しか期待できない。この点も過去の40°Cを超える高温事例と共通している。
- (5) (4)に加えて、都市や乾いた地表面からの顕熱供給による風の高温化が要因になりうることを示された。簡易混合層モデルによる推定では、(4)のフェーンで昇温した気流が名古屋都市圏を通過する際には、約2-5°Cの追加的な加熱が見積もられた。この約2-5°Cを(4)の34-36°Cに単純に足すと、約36-41°Cとなり、北西風の風下末端(浜松)

で観測された41.1°Cに近づく。

以上の地表面からの加熱量は名古屋都市圏の風に沿った長さや風速、混合層高度、都市からの加熱量に依存する。しかし、いずれも観測や先行研究に基づく現実的な値を採用している点や、先行研究でこの見積もり手法の精度がある程度確認されている点を強調しておきたい。

- (6) (5)の加熱された北西の風と磐田辺りの南寄りの風の収束により、浜松が最も高温となったと推察される。(5)の加熱は、顕熱の供給量の吹走経路上の積分で効くことから、陸地における風の到達点(陸地の風下末端)で最も加熱量が大きくなる(気温が高くなる)ためである。すなわち、この風の収束が最も高温となる位置を決めた、という意味で非常に重要だったと推察される。この点も過去の40°Cを超える高温事例と共通である。

以上(1)~(6)の特徴、メカニズムは、過去に観測された高温の特徴と共通している。先行研究(例えば、Takane and Kusaka 2011; Takane *et al.* 2017b)により、これらの条件が揃うことが確認された地点は、埼玉県熊谷市(関東平野)・岐阜県多治見市(濃尾平野)・静岡県浜松市の少なくとも3地点(地域)である。本研究は、上記の背景要因と直接的要因を兼ね備える他の地点(地域)があれば、そこで40°Cを超える高温が発生する可能性を示唆している。

これまでの高温事例との共通点とは反対に、過去の事例と異なる点は、沿岸部である浜松で高温が発生したことと、濃尾平野から浜松にかけての一樣な北西-南東方向の気流である。この一樣な北西-南東方向の気流は、2013年および2001年の浜松における39°Cを超える高温にも共通していることから、このメソ・局地スケールの場の出現が浜松の高温のキーである可能性がある。

なお、本論文は総観・メソスケールの観点からの実況報告と考察である。本論文をきっかけに高温に対する科学的な議論(高温の実態把握と詳細な解析、過去の高温事例との比較の積み重ね)がより活発になることを期待したい。

後注

[注1] 現状における気圧配置型の判定は、主に人間による主観的な判断で行われるため、判定者によって型が変わり得る。ただし今回の判定は、気圧配置の定義に基づき、かつ著者らによる先行研究での判定と統一的な基準のもの

とで行っている。

[注2] 客観解析データでは浜松が最も高温になる時刻に近いのは15時であることから、現象の物理的な整合性を鑑みこの時刻の客観解析データを参照する。なお、実際の浜松41.1°Cを観測した時刻に近い12時の分布でも15時と同様の傾向が認められる。

[注3] この日の12時前後における名古屋の現地気圧は1004hPa前後であるため、地上付近では概ね気温＝気圧と考えて差し支えない。

謝 辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20191001)の支援により実施されました。

参 考 文 献

- Elvidge, A. D. and I. A. Renfrew, 2016: The causes of foehn warming in the lee of mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 455-466.
- Fujibe, F., 1994: Boundary layer features of the 1994 hot summer in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 259-272.
- 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, 2004: 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**, 119-132.
- 藤部文昭, 2012: 都市の気候変動と異常気象 猛暑と大雨をめぐって. 朝倉書店, 161pp.
- Ishizaki, N. and I. Takayabu, 2009: On the warming events over Toyama Plain by using NHRCM. *SOLA*, **5**, 129-132.
- 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.
- 伊藤 奨, 飯塚 悟, 黒木美早衣, 2012: 領域気象モデル WRF による多治見高温化要因の感度解析. *日本建築学会環境系論文集*, **77**, 779-787.
- 木村富士男, 1994: 都市大気のシミュレーション. *水環境の気象学*, 朝倉書店, 281-307.
- 気象庁, 2020: 8月の天候 (令和2年報道発表資料). <https://www.jma.go.jp/jma/press/2009/01a/tenko2008.html> (2020.9.1閲覧)
- 近藤純正, 2013: K65. 多治見のヒートアイランド観測. <https://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke121.html> (2020.8.31閲覧)
- 近藤純正, 2014: K87. 江川崎の最高気温41°Cは本物か? <https://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kisho/kisho65.html> (2020.8.31閲覧)
- 近藤純正, 2015: K121. 空間広さと気温—「日だまり効果」のまとめ. <https://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke121.html> (2020.8.31閲覧)
- Kusaka, H., M. Hara and Y. Takane, 2012: Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90B**, 47-64.
- 日下博幸, 飯島奈津美, 井原智彦, 原 政之, 高根雄也, 飯塚 悟, 2013: 2070年代8月を対象とした東京・名古屋・大阪における熱中症および睡眠困難の将来予測—複数のCMIP3-GCMからの力学的ダウンスケール実験と問題比較型影響評価手法による健康影響評価. *日本建築学会環境系論文集*, **78**, 873-881.
- Miltenberger, A. K., S. Reynolds and M. Sprenger, 2016: Revisiting the latent heating contribution to foehn warming: Lagrangian analysis of two foehn events over the Swiss Alps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 2194-2204.
- Mori, K. and T. Sato, 2014: Spatio-temporal variation of high temperature events in Hokkaido, north Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 327-346.
- Moriwaki, R. and M. Kanda, 2004: Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **43**, 1700-1710.
- 中塚賢治, 東 克彦, 2013: 江川崎に記録的な高温をもたらした気象状況の調査. *気象学会四国支部研究発表予稿集* (2013年12月20日), 7.
- 日本経済新聞, 2018: 猛暑・多湿列島を襲う「一つの災害と認識」気象庁会見. <https://www.nikkei.com/article/DGXMZ033291910T20C18A7EA1000/> (2020.8.31閲覧)
- Nishi, A. and H. Kusaka, 2019: Effect of foehn wind on record-breaking high temperature event (41.1°C) at Kumagaya on 23 July 2018. *SOLA*, **15**, 17-21.
- Ohashi, Y., Y. Kikegawa, T. Ihara and N. Sugiyama, 2014: Numerical simulations of outdoor heat stress index and heat disorder risk in the 23 wards of Tokyo. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 583-597.
- 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.
- 大和田道雄, 設楽 寛 1985: フェーン. *気候学・気象学辞典 (初版)*, 吉野正敏ほか編, 二宮書店, 470.
- 齊藤和雄, 2004: フェーン現象. *気象科学事典 (第3刷)*, 日本気象学会編, 東京書籍, 463-464.

- 桜井美菜子, 篠原善行, 眞下国寛, 須永次雄, 2009: 関東地方で日最高気温が40°C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, 248-253.
- 志藤文武, 青柳曉典, 清野直子, 藤部文昭, 山本 哲, 2015: 植栽・構造物が気温観測統計値に及ぼす影響—東京(大手町)における通年観測—. 天気, 62, 403-409.
- 篠原善行, 眞下国寛, 桜井美菜子, 須永次雄, 2009: 関東地方で日最高気温が40°C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, 543-548.
- Sugawara, H. and J. Kondo, 2019: Microscale warming due to poor ventilation at surface observation stations. J. Atmos. Ocean. Technol., 37, 1237-1254.
- 高根雄也, 2018: 日本における地域スケールの猛暑. 安全工学, 57, 7-14.
- 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. J. Appl. Meteor. Climatol., 50, 1827-1841.
- 高根雄也, 日下博幸, 高木美彩, 岡田 牧, 阿部紫織, 永井 徹, 富士友紀乃, 飯塚 悟, 2013: 岐阜県多治見市における夏季晴天日の暑熱環境の実態調査と領域気象モデル WRF を用いた予測実験—物理モデルと水平解像度に伴う不確実性の検討—, 地理学評論, 86, 14-37.
- Takane, Y., Y. Ohashi, H. Kusaka, Y. Shigeta and Y. Kikegawa, 2013: 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. J. Appl. Meteor. Climatol., 52, 1764-1778.
- 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. Int. J. Climatol., 34, 3926-3938.
- 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. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 141, 1857-1869.
- Takane, Y., H. Kondo, H. Kusaka, J. Katagi, O. Nagafuchi, K. Nakazawa, N. Kaneyasu and Y. Miyakami, 2017a: 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. J. Appl. Meteor. Climatol., 56, 2067-2079.
- Takane, Y., H. Kusaka, H. Kondo, M. Okada, M. Takaki, S. Abe, S. Tanaka, K. Miyamoto, Y. Fuji and T. Nagai, 2017b: Factors causing climatologically high temperature in a hotted city in Japan: a multiscale analysis of Tajimi. Int. J. Climatol., 37, 1456-1473.
- 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 Clim. Atmos. Sci., 2, 39.
- 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. Environ. Res. Commun., 2, 015004, doi:10.1088/2515-7620/ab6933
- 渡来 靖, 中川清隆, 福岡義隆, 2009: 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, 35-41.
- 八木 晃, 2002: 120周年を迎えた浜松測候所. 天気, 49, 851-853.
- 吉門 洋, 中島 虹, 川本陽一, 大岡龍三, 2014: 東京の市街化地域を通過する海風の熱収支. 天気, 61, 541-548.

Why was the Japanese hottest temperature of 41.1°C recorded at Hamamatsu?

Yuya TAKANE* and Takahiro ITO**

* (Corresponding Author) Environmental Management Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan.

E-mail: takane.yuya@aist.go.jp

** Meteorological College.

(Received 12 September 2020; Accepted 3 January 2021)

Abstract

Here we investigated features of the Japanese hottest temperature of 41.1°C observed in Hamamatsu, Shizuoka, Japan, on 17 August 2020. The result suggested that a whale's tail pressure pattern with high-temperature and northwesterly wind above the mixed-layer, as well as continuous clear skies over the Nobi Plain, were necessary conditions for the 41.1°C event. In addition to these background factors, a foehn-like wind with diabatic heating from urban and the dry ground surface directly contributed to the 41.1°C. This heated airflow entered Hamamatsu was blocked by the southerly wind east of Hamamatsu, which was the reason why the highest temperature was observed in Hamamatsu. As the mechanism described here is similar to that in past high-temperature events in Japan, any other regions may also experience such high temperatures over 40°C in near future when the background factors and the foehn-like wind be combined there.
