

原著論文

岡山県の高梁盆地で暖候期に発生する高温化の気象観測

小川晃生¹・高市泰樹¹・大橋唯太¹

Meteorological observations of the atmospheric heating found during warm season at the Takahashi basin in Okayama Prefecture

Kouki OGAWA¹, Yasuki TAKAICHI¹, and Yukitaka OHASHI¹

Abstract: We investigated how the atmospheric heating in the warm season is induced at the Takahashi basin in Okayama Prefecture, by statistically analyzing the AMeDAS data and the in-situ meteorological observations. During the spring season, the atmospheric heating was locally found at Takahashi, while the heating was broadly formed in the low-altitude region between the Okayama plain and inland area including Takahashi. The air temperature observed at the Takahashi AMeDAS was almost equivalent to the representative temperature within the basin including the Takahashi urban area. On a day when high temperature was recorded at Takahashi, a southerly wind prevailed from the Seto Inland Sea. This causal relationship was discussed using a simple advection model for the sensible heat. As a result, the summer heating at Takahashi was mainly promoted by advection effects due to southerly winds, whereas the spring heating cannot be explained only by the effects. The addition of sensible-heat accumulated in the basin, produced within the closed terrain, likely played an important role in the spring heating at Takahashi.

I. はじめに

盆地は晴天日に日中の気温が上昇しやすく、暖候期に入ると都道府県内や全国の最高気温を記録することが多い(大和田 1975, Kondo et al. 1989). その理由として、盆地は一般に海岸からの距離が遠く、また山で囲まれている地理的特徴が挙げられる。埼玉県熊谷市と岐阜県多治見市の盆地で極端高温が、しばしば出現することは有名である。熊谷市の夏季高温には、晴天日の継続とフェーンとは異なる地表面加熱を受けた山越え気流が深く関わっていることが、Takane and Kusaka(2011)によって明らかにされた。一方の多治見市では、鯨の尾型と呼ばれるような太平洋高気圧の日本列島西方への張り出し、フェー的な気流の存在、多治見の都市化が複合して極端高温の発生に関与していることが、Takane et al. (2017)によって明らかにされている。このほか、群馬県館林市、高知県四万十市、大分県日田市など、暖候期に高温を記録しやすい地域が全国に存在する。岡山県内にも高温を記録しやすい地域として高梁市が以前より知られるが、その実態と要因に関して調べた研究はみられない。そこで本研究では、岡山県で最も高温になりやすいといわれる高梁盆地の高温化を現地にて観測した。高梁盆地は岡山県高梁市にあり、南北約 2 km, 東西約 1 kmの比較的小さ

な盆地である(図 1)。2010年から2017年まで 8 年間における岡山県内アメダス局で観測された猛暑日・真夏日の累積日数を、図 2 に示す。平野から山地にいたる岡山県16地点のなかで、猛暑日(136日)、真夏日(590日)ともに高梁アメダスが最も記録日数が多いとわかる。この期間中、2013年には猛暑日が32日という多さで全国第 5 位の記録にもなった。ほかの年の猛暑日や真夏日の日数も、全国アメダス約930地点で観測される日数よりも顕著に多く、毎年のように上位 5 %以内に含まれていた。

Takane et al.(2017)で述べられているように、局地気象でみられる高温化の要因には多重スケールで複合的に関与している可能性が考えられる。そこで本研究でも、高梁盆地スケール、高梁を含んだ広域スケールから俯瞰できるようなスケールにわたる解析をおこなってみた。最も小さな空間スケールの議論はアメダス露場であるが、図 3 の写真でもわかるように周辺には通風の障害となる建物や熱源となるような排熱源も認められない。また、すぐ近傍を一級河川の高梁川が流れていることは、逆に高梁アメダスの気温が高くなりやすい要素にもなりえる。

本研究では次のような多面的解析をおこなった：①アメダス気温の統計解析、②単発的な移動観測、③長期的な固定観測。これらの結果をもとに、

¹. 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科 Department of Biosphere-Geosphere Science, Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.

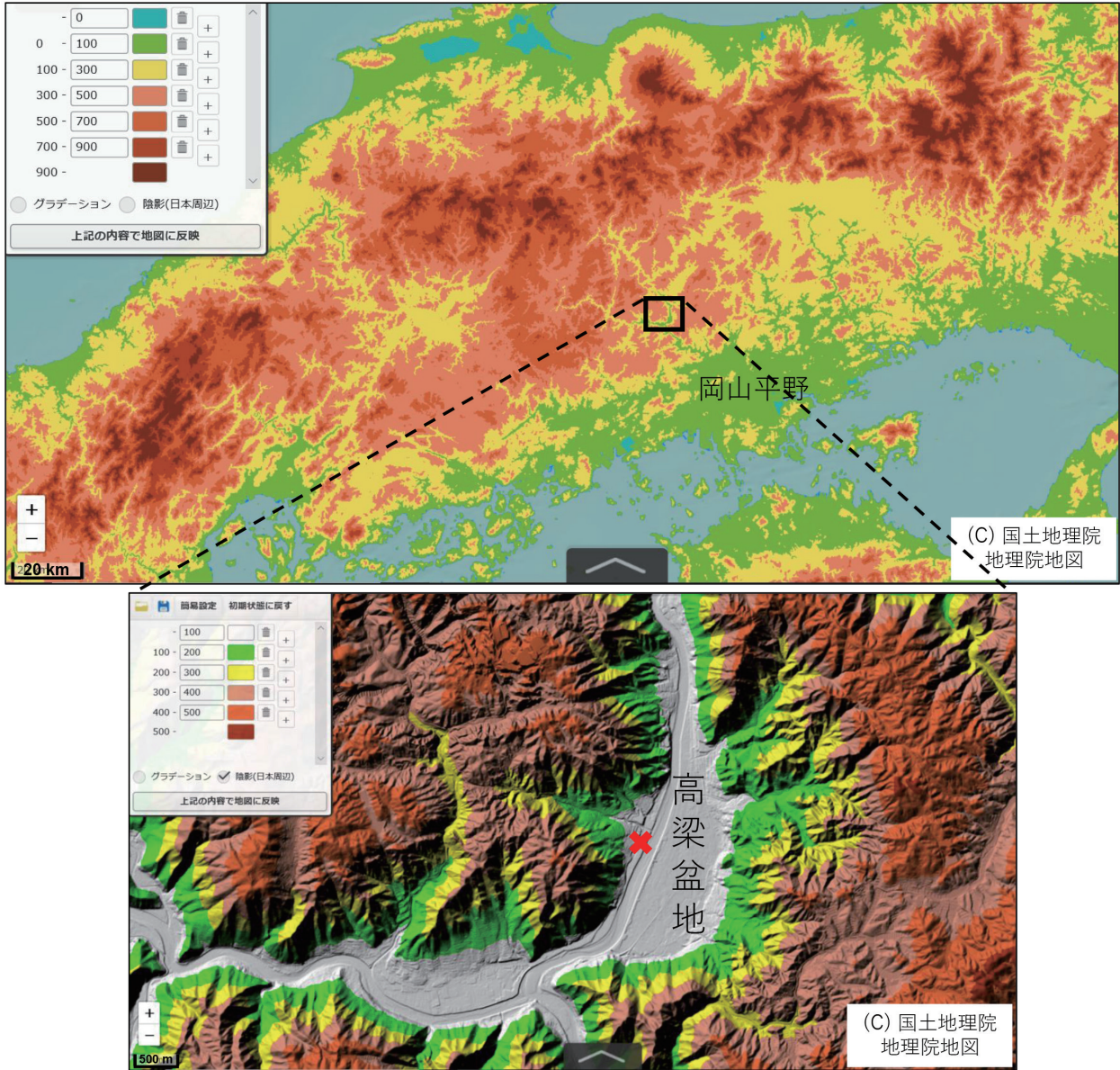


図1. 高梁盆地の位置と地形. 高梁盆地内の×印は高梁アメダスの位置をあらわす. 画像は地理院地図より引用.

簡単な理論的考察も含めることで、高梁地域で発生する高温化の実態と要因を明らかにする。

II. 方法

1. アメダスの統計解析

岡山県を中心とする中国地方東部の気象庁アメダス24地点で観測された気象要素10分値を用いて、統計分析をおこなった(図4)。2010～2015年の6年間の暖候期(4～9月)に、高梁アメダスが高温を記録した日を選び出した。本研究では、この「高梁の高温日」を、1)春季の5～6月と、2)夏季の8月にわけて、それぞれ次のように定義した。

1) 春季5～6月の高温日

- ・高梁アメダスの日最高気温が全国一位を記録

した日。

- ・高梁アメダスの日最高気温が30℃を超え(真夏日)、かつ日積算日照時間が10時間以上を記録した日。

2) 夏季8月の高温日

- ・高梁アメダスの日最高気温が35℃を超えた日(猛暑日)。

この結果、春季の高温日として17日、夏季の高温日としては61日が抽出された。これらに対してコンボジット(合成図)解析をおこなうが、夏季は年ごとに高梁アメダス気温の高い順に選び出し、15日間にしぼった。以上の解析によって、高梁が高温となる日の一般的な気象分布特性を明らかにする。

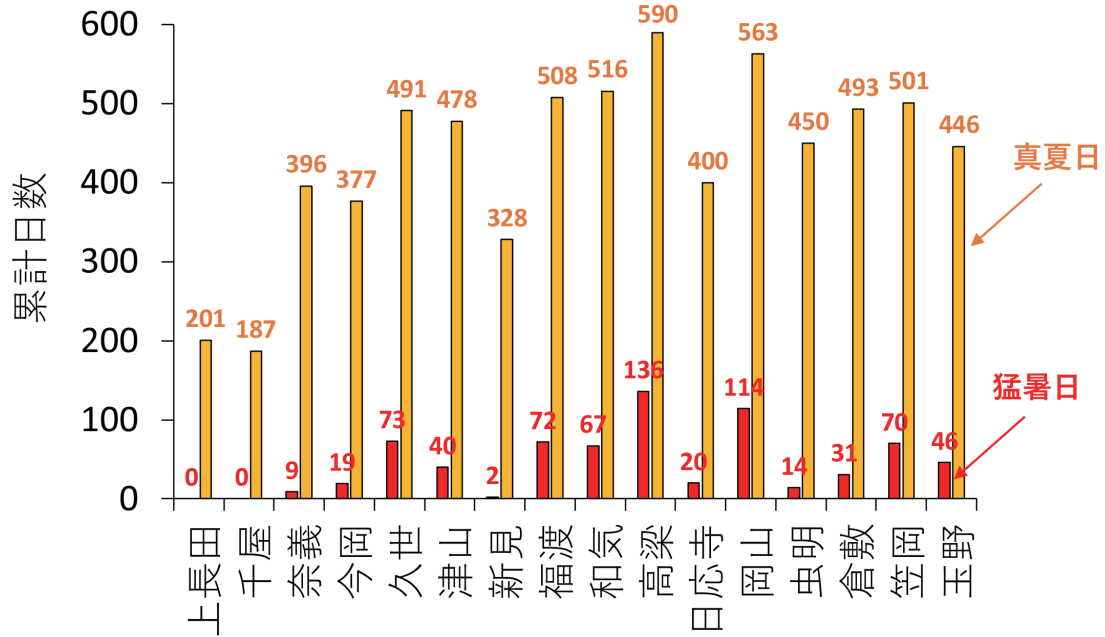
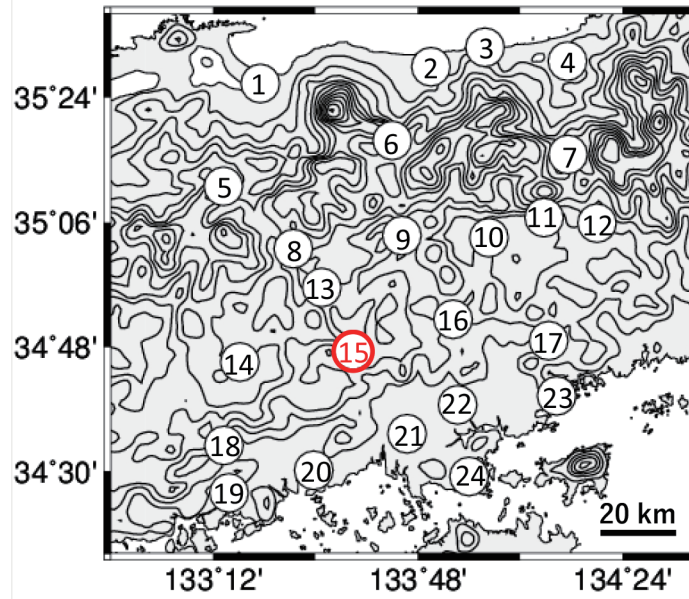


図2. 岡山県内のアメダス観測局で記録された2010～2017年の猛暑日・真夏日の累計日数. ただし岡山アメダスは, 2015年3月に観測露場が移転している.



図3. 高梁アメダスの様子と, 東西南北の景観.



地点番号	名称	地点番号	名称	地点番号	名称
1	米子	9	久世	17	和気
2	倉吉	10	津山	18	府中
3	青谷	11	奈義	19	福山
4	鳥取	12	今岡	20	笠岡
5	茶屋	13	新見	21	倉敷
6	上長田	14	油木	22	岡山
7	智頭	15	高梁	23	虫明
8	千屋	16	福渡	24	玉野

図4. 統計解析の対象とした気象庁アメダスの位置. 岡山県15地点、鳥取県6地点、広島県3地点.

2. 高梁盆地スケールでの気象観測

2014年8月21日、9月2日、9月9日の3日間に、高梁盆地内で自転車を使った移動気象観測をおこなった。移動ルートと観測地点を図5に示す。各日の観測開始時刻は、11時、13時、15時である。高梁川を挟んで西ルートと東ルートを決定し、①～⑤(西ルート)とA～F(東ルート)の各地点では、5分間静止した状態で気温と風向風速を測定した。観測に用いた気象測器とサンプリング間隔などを表1にまとめる。

8月21日は太平洋高気圧に覆われ、高梁アメダスで日照6.3時間、最高気温34.6℃を記録した。9月2日は前線の影響もあって雲が多く、高梁アメダスで日照4.6時間、最高気温29.9℃であった。一方9月9日は日照9.6時間と快晴条件で、気温も32.5℃まで上昇した。

移動しながらの観測のため、観測時刻は地点ごとに異なる。したがって観測した気温には、場所による変化に加えて時間経過に伴う変化も含まれることになる。そこで、観測地点に最も近い固定観測の気温を用いて、時間差の影響を取り除く作業をおこなった。補正後の時刻は、観測時間帯の中央時刻にあたる11時20分、13時20分、15時20分に設定した。時刻補正の方法は、以下の計算に従った(牛山 2000)。

補正後の気温(℃) = 補正前の気温(℃) ± [補正時刻までの時間差(分) × 固定観測の1分あたりの気温変化率(℃/分)] (1)

この移動観測とは別に、高梁盆地内で固定観測もおこなっている。長期観測が実現可能な固定観測の利点を生かし、2014年7月18日～9月22日の68日間にわたって気温を連続測定した(測器やサンプリング間隔などは表1を参照)。できるだけ敷地の開けた場所を選び、盆地内の5地点で観測をおこなった(図5の赤丸地点)。このうち4地点は公園で、1地点は橋上(高梁大橋)に温度計を設置した。

3. 高梁を含む広域スケールでの気象観測

前述の盆地スケールよりも広範囲で起こる気温分布の特性を把握するため、2014年7月18日～9月22日の68日間にわたって岡山平野から高梁地域まで広域の気温を測定した。岡山平野から内陸に向かって、倉敷市、総社市、高梁市の各地域で観測地点を8地点選んだ(図6)。高梁地域では西部の成羽町と川上町、北部の川面町までを範囲としている。観測に用いた気象測器とサンプリング間隔などは、表1に示す。

また、これとは別に、2016年の5月(5/13・19・31)と7月(7/10・19・28)に自動車を利用した移

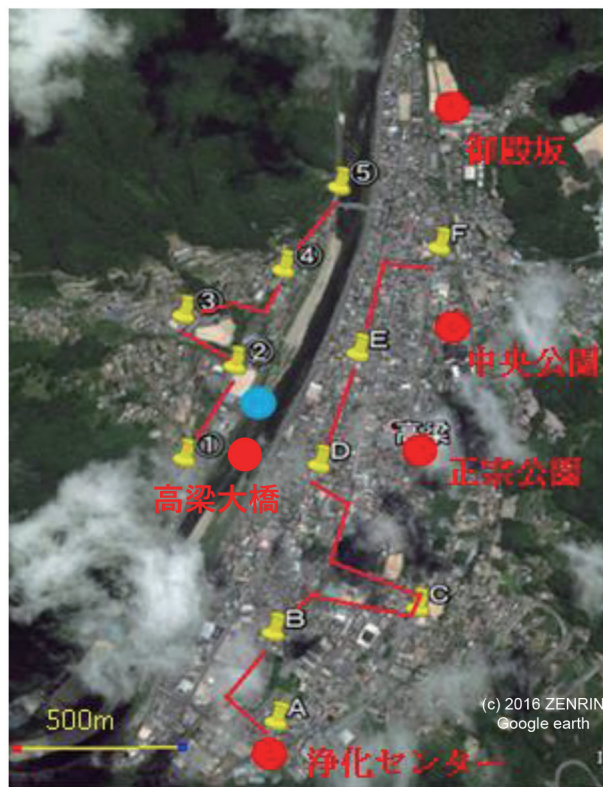


図5. 2014年に高梁盆地内で実施した移動観測のルート（赤線）と固定観測の位置（赤丸）. 青丸は高梁アメダスの位置をあらわす. 高梁川を挟んで西側ルートの地点(①～⑤)と東側ルートの地点(A～F)を、それぞれ自転車で移動しながら気温を観測した. 固定観測は、盆地の南から「浄化センター」、「高梁大橋」、「正宗公園」、「中央公園」、「御殿坂」の5カ所でおこなった. 画像はGoogle Earthより引用.

表1. 本研究で実施した気象観測の概要.

観測期間	観測方法	観測地域	観測項目	サンプリング 間隔	解析時間	使用機器
2014年 8/21、9/2、9/9	自転車による 移動観測	高梁市街地	気温、風向、風速	気温1秒 風10秒	5分間	気温：RTR-52 (T&D) 風：Kestrel4500 (NIELSEN-KELLERMAN)
2014年 7/18～9/22	設置による 固定観測	高梁市街地	気温	10分	瞬間値	TR-73U、TR-77Ui、 RTR-52 (T&D)
2014年 7/18～9/22	設置による 固定観測	岡山平野 ～高梁盆地	気温	10分	瞬間値	TR-73U、TR-77Ui、 RTR-52 (T&D)
2016年 5/13、5/19、5/31 7/10、7/19、7/28	自動車による 移動観測	岡山平野 ～高梁盆地	気温、風向、風速	5秒	5分間	気温：RTR-52 (T&D) 風：Kestrel4500 (NIELSEN-KELLERMAN)

動観測もおこなった. 岡山平野の北西部(総社市)から谷地形を流れる高梁川に沿って高梁市街地まで、7地点の地上気温を順次測定した(図7). 午前岡山平野から高梁に向かう往路、午後には反対に高梁市街地から岡山平野に向かう復路に対して、各地点で10分間の静止気温を測定し、後半5分のデータを解析した(測器やサンプリング間隔などは表1を参照). 気温の時刻補正は、既出の(1)式を用いてお

こなった. 観測ルートに近いアメダスで観測された気温を、固定観測データとして補正に用いた.

いずれも高梁で晴天日となる日に観測をおこなっており、5月13日は日照7.3時間と最高気温27.8℃、5月19日は日照9.9時間と最高気温28.3℃、5月31日は日照10.0時間と最高気温30.8℃、7月10日は日照7.8時間と最高気温32.5℃、7月19日は日照10.1時間と最高気温33.6℃、7月28日は日照7.0時間と

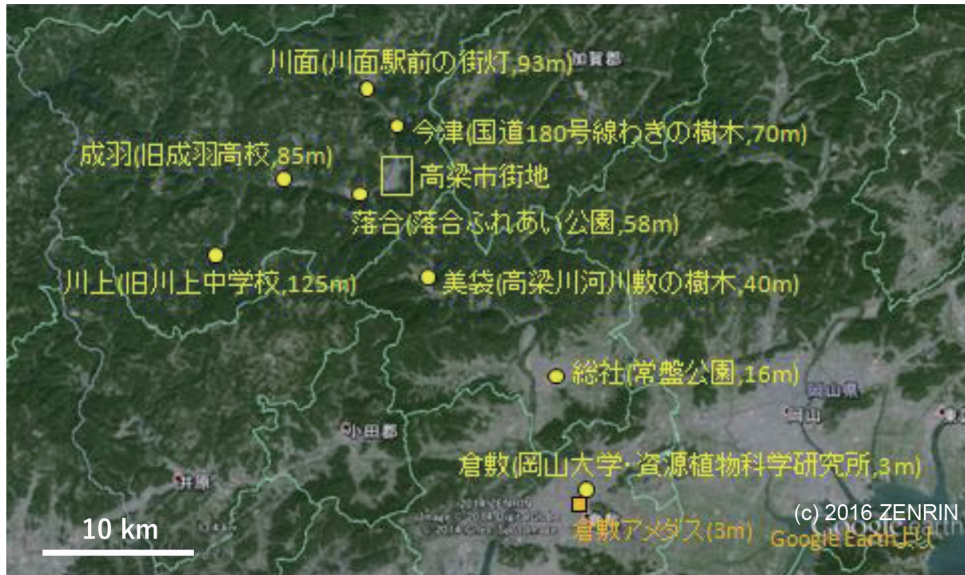


図6. 2014年に岡山平野から高梁盆地まで広範囲にわたって実施した固定観測の位置(Google Earth). 「倉敷」, 「総社」, 「美袋」, 「落合」, 「川上」, 「成羽」, 「今津」, 「川面」の8カ所で実施した. 括弧内には, 具体的な観測場所と標高を示している.



図7. 2016年に岡山平野北西部から高梁市街地まで広範囲にわたって実施した移動観測の位置(国土地理院地図). 「高塚」, 「秦」, 「美袋①」, 「美袋②」, 「玉川」, 「下神崎」, 「高梁市街地」の7カ所で実施した. 青線が自動車による移動ルートを示している. 画像は地理院地図より引用.

最高気温33.9℃を記録した.

III. 結果と考察

1. アメダスの統計解析

春季(5~6月)に高梁が高温となった日のコンポジット・マップを図8aに示す. 日最高気温(マーカー)と日中の卓越風(風ベクトル)をそれぞれコンポジットしてある. また図8bには, その各アメダ

スの日最高気温を棒グラフで比較した結果をあらわす. 春季は, 瀬戸内海の沿岸・平野部や中国山地に比べて高梁が目立って高温である特徴がわかる. この範囲内では, 最大6℃の違いがみられた. 日中の卓越風向は全域でほぼ南寄りであることから(図8a), 海風の発達が予想される(鳥取県に近い上長田アメダスは日本海からの海風のため, 北寄りの風向を示している). 一方で夏季(8月)の高温日の場

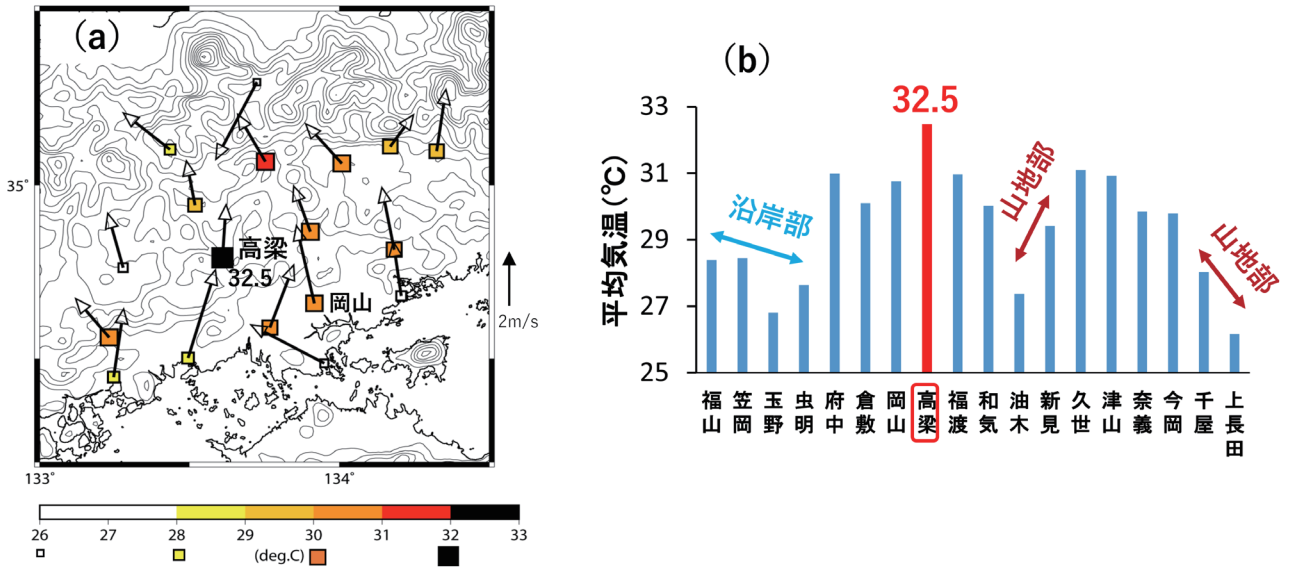


図8. 2010～2015年の春季(5～6月)に高梁が高温となった日の(a)アメダス地上気温・風ベクトルのコンポジット分布と、(b)その地上気温を比較した結果。(a)の風ベクトルは、日中(午前8時から高梁の日最高気温の時刻まで)の最多風向と平均風速としてコンポジットされている。

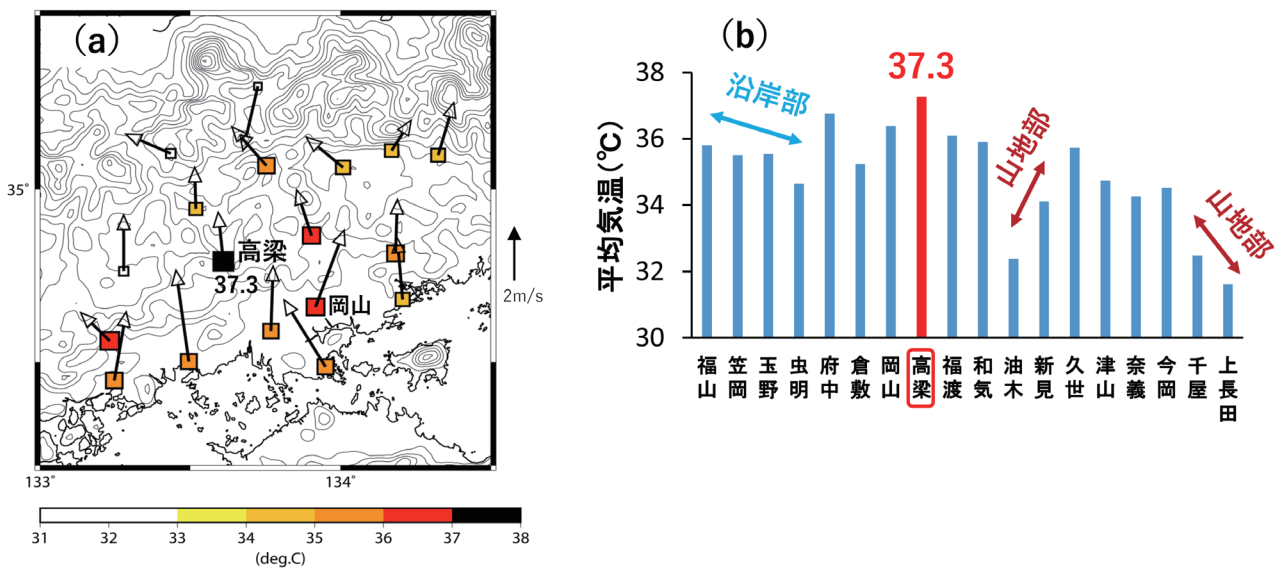


図9. 2010～2015年の夏季(8月)に高梁が高温となった日の(a)アメダス地上気温・風ベクトルのコンポジット分布と、(b)その地上気温を比較した結果。(a)の風ベクトルは、日中(午前8時から高梁の日最高気温の時刻まで)の最多風向と平均風速としてコンポジットされている。

合を図9に示すと、沿岸・平野部から高梁を含む内陸までの比較的広い範囲で高温域が広がっている。高梁と瀬戸内海沿岸・平野部の気温差は1～2℃程度と春季に比べて小さくなるが、中国山地との気温差は春季とあまり違いがなかった。

いずれの抽出日も日照時間が十分な晴天日であったが、この晴天をもたらす高気圧の中心位置(午前9時)を図10にプロットした。春季(図10a)は中国大陸から東進してくる移動性高気圧であり、高梁がその日に高温となる中心位置には共通性がみられない。一方、夏季(図10b)はその多くが太平洋高気圧であったため、中心位置も西日本の南に位置する頻度が

高い。このとき上空の気象条件が実際にどうであったか、高梁に最も近い高層気象観測所の松江局で観測された700hPa午前9時の気温と風向の関係を図11に示す。解析期間中の全日についてプロットしており、このうち高梁アメダスが高温となった日を×で表している。春季(図11a)は、高温日の上空の風向と気温にあまり特徴がみられない。このことから、総観スケールの気象条件が直接影響する要素は、春季の高温日にはないといえる。ところが夏季(図11b)の場合、高梁が高温となる日には上空700hPaの風向が南寄りであり、気温も他の日に比べて高め(10℃以上)である。したがって夏季に高梁アメダスが高温を記

(a) 春季 (5~6月)

(b) 夏季 (8月)

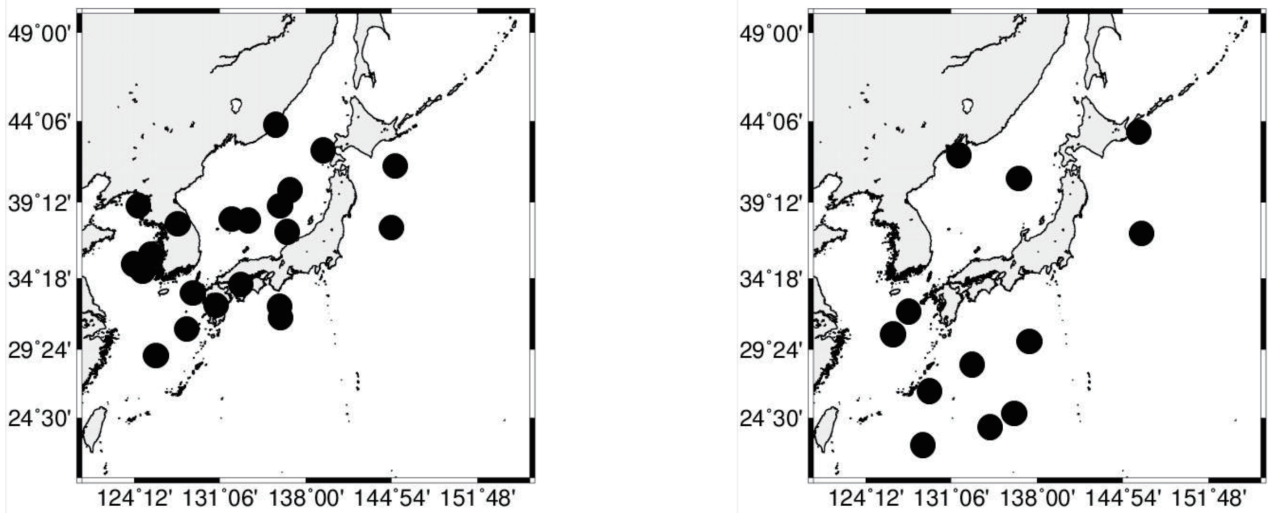


図10. 2010~2015年の(a)春季(5~6月)と(b)夏季(8月)に高梁が高温となった日の午前9時における高気圧の中心位置. 地上天気図内に高気圧の中心が複数みられたり, 逆にまったくなかったりする日もあった.

松江 700hPa・午前9時

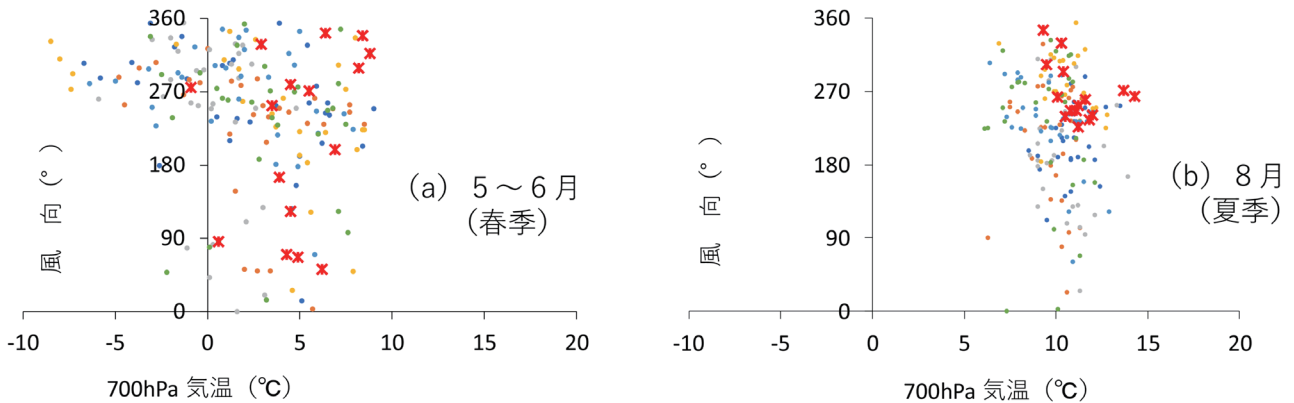


図11. 2010~2015年の(a)春季(5~6月)と(b)夏季(8月)の全日において, 午前9時に松江の高層700hPaで観測された気温と風向の関係. ×印は, 高梁が高温となった日をあらわしている.

録する日は春季と違って総観スケールの大気状態が影響しており, 太平洋高気圧による南からの暖気流が関与していると考えられる.

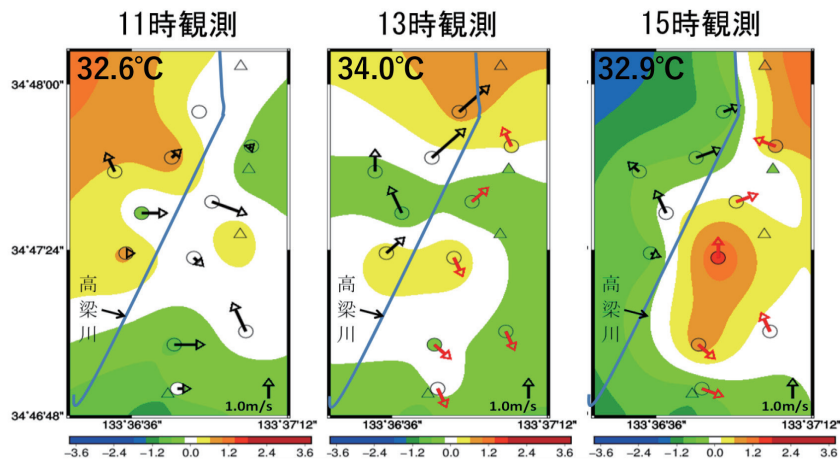
2. 高梁盆地スケールでの気象観測

図12に, 高梁盆地内の移動観測で得られた地上気温と風の水平分布をあらわす. ただし気温は, 全観測地点の平均値からの偏差として示してある. 2014年8月21日(図12a)は, 盆地内で高梁川の西部・北部・東部の順に11時から15時までのあいだ, 高温域が移動しているように見える. この日は13時に, 地点によっては35℃を超える気温が北部で観測されている. 風向は, 高梁川の西側にある観測地点で南西

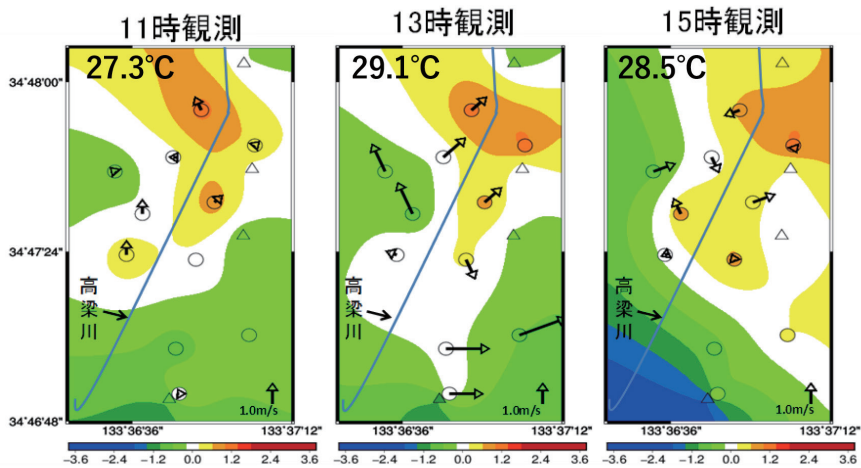
を示しがちであった. 9月2日(図12b)も, 盆地内の北部から東部にかけて周辺よりも1℃以上の高温域が現れており, 反対に南部の高梁川近くでは1~2℃低温な地域が広がっていた. この日は, 観測地点によっては13時に30℃を超える気温が記録された. 9月9日(図12c)も日中の気温は上昇し, 11時のときすでに30℃を超える地点が, 15時には33℃を記録する地点もあった. これまでの日と同様に西部から東部への高温域の移り変わりがみられたが, 反対に南部から西部までの広い範囲で1~2℃低温となる地域がみられた. このときの風は, 13時以降, 南西風が卓越していた.

以上の結果をもとに, 高梁アメダスが観測する気

(a) 2014年8月21日



(b) 2014年9月2日



(c) 2014年9月9日

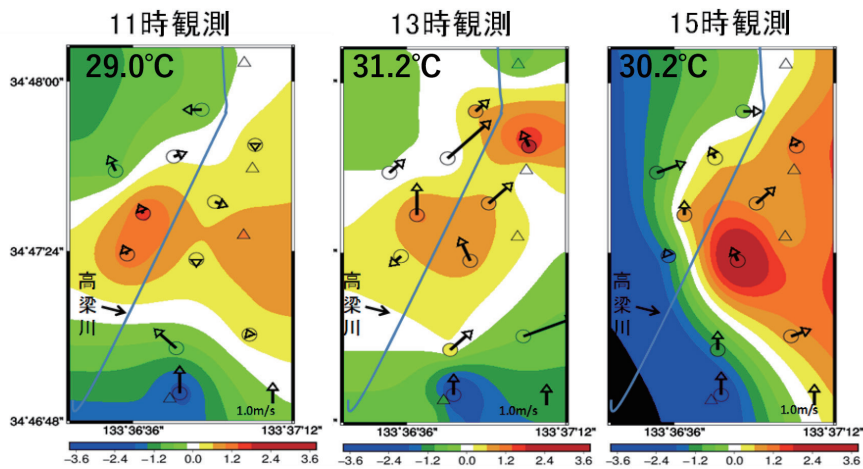


図12. 2014年(a) 8月21日, (b) 9月2日, (c) 9月9日の11・13・15時の移動観測で得られた高梁盆地内の気温偏差(色)と風ベクトルの水平分布. 気温偏差は気温の全地点平均値からのずれであり, 平均値は図中の左上に示してある. 赤色の風ベクトルは, 風速が欠測した地点をあらわす.

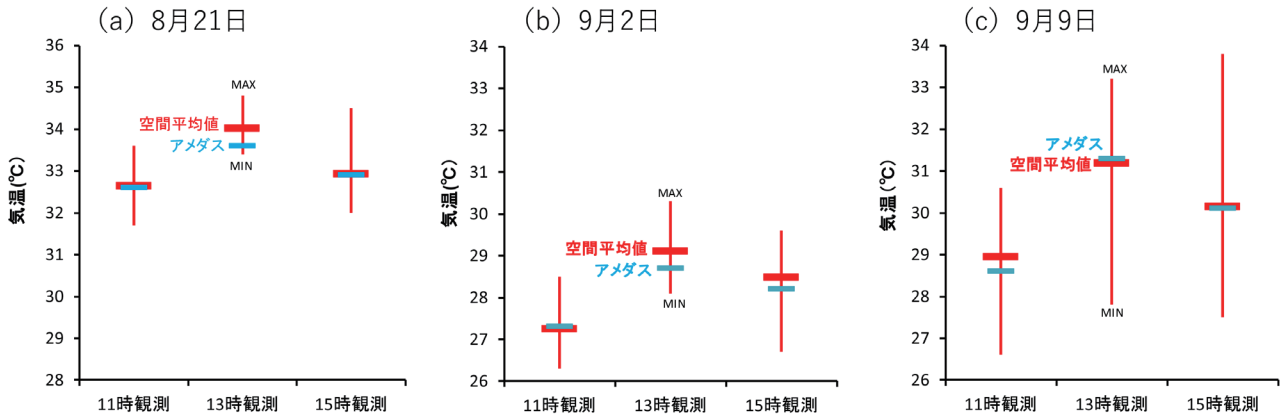


図13. 2014年(a) 8月21日, (b) 9月2日, (c) 9月9日の11・13・15時に, 移動観測で得られた盆地全体の地上気温の平均値(図中の空間平均値)と, 高梁アメダスで観測された気温(図中のアメダス)の比較. 上下のバーは移動観測の最高気温(図中のMAX)と最低気温(図中のMIN)をあらわす.

温と高梁盆地全体の平均気温を比較することで, アメダス気温の空間代表性を検討してみた(図13). 観測した3日間いずれも, アメダス気温と盆地内平均気温の差は 0.4°C 以内におさまっていた. つまり盆地内の場所による気温の不均一性はあるものの, 高梁アメダスで観測される気温は盆地内の空間的な平均気温と概ね一致することを示唆する結果といえる.

図14には, 2014年の夏季に高梁盆地内5地点で独自に観測した地上気温(と高梁アメダス)のヒストグラムを示してある. ここでは観測期間7~9月の各月で高梁が特に高温となった日を選び出し, そのうち典型的な気温分布パターンとなった2014年7月25日の事例をとりあげた. この日は午後になると高梁川に沿うような南西風が持続していた. このとき盆地全体の気温は日最高値を記録し, 高梁アメダス(図中の「高梁(ア)」)では 36°C を超え, 盆地の東部にある観測地点(図中の「中央」や「御殿坂」)の気温はそれ以上に高く記録することが多かった. 一方で南部の観測地点(図中の「浄化」)はこれらの地点の気温よりも明らかに低くなっており, 先述の移動観測の結果と同様であった. また, 高梁川にかかる橋上でも温度計を設置したが(図中の「高梁川」), さらに気温は低く 35°C を超える記録がみられなかった.

3. 高梁を含む広域スケールでの気象観測

III-1節で述べたように, 春季と夏季で総観スケールの気圧配置が異なることから, 広域の高温パターンにも違いがみられた. 2014年の夏季に, アメダスよりも空間分解能の高い気温観測を独自におこなっているが, ここでは図14と同じ2014年7月25日の観測結果を典型例として示す(図15). 太平洋高気圧に日本列島が覆われた気圧配置で高温化が起りやすいが, その典型例であった. 先述の統計解析の結果と同様に, 岡山平野内の倉敷や総社でも高梁と同

程度の高温が記録されていた. 同じ高梁市内でも高梁の西方に位置する成羽や川上といった地域では標高がやや高くなる影響のためか, 高温化の程度は高梁盆地内に比べて弱い. この傾向は2014年夏季の他の日でもみられた.

岡山平野から高梁までの風の流入と気温の分布を詳しく把握するため, 2016年に実施した高梁川沿いの移動観測の結果を図16に示す. ここで典型例として示した2事例の2016年5月19日は大陸からの移動性高気圧に広く覆われ, 西日本の各地で夏日を, 同年7月28日は総観スケールの気圧傾度も弱く西日本の各地で真夏日をそれぞれ記録した. 両日とも高梁川に沿った風の流れが出現しており, 高梁盆地まで瀬戸内海からの南よりの風が到達している様子が捉えられた.

4. 高梁が暖候期に高温化するメカニズム(顕熱移流)

III-1~3節でみられたように, 高梁が高温化する際の風系は瀬戸内海から内陸に向かう南寄りの風が卓越している. 瀬戸内海からの風は, 内陸へ侵入していく過程で地表面からの乱流顕熱輸送を取り込んで非断熱加熱を受けるため, 高梁に到達する頃には冷気でなくなっていると考えられる(井上 1971, 境田ほか 2011). また, 高梁盆地は標高が60m台であるため, 陸上高度が地形的に上昇することに伴う断熱冷却効果も小さい. そこで実際に, 瀬戸内海から侵入する相対的に冷たい南風が高梁の地上気温にどの程度影響するかを, 理論的に計算してみる.

春季の事例として高梁アメダスが全国一位の日最高気温を記録した2013年5月14日, 夏季の事例には高梁アメダスの気温が周辺地域に比べて特になくなった2015年8月1日をモデルケースとして, それぞれ考察した. 瀬戸内海に隣接する玉野アメダスの風

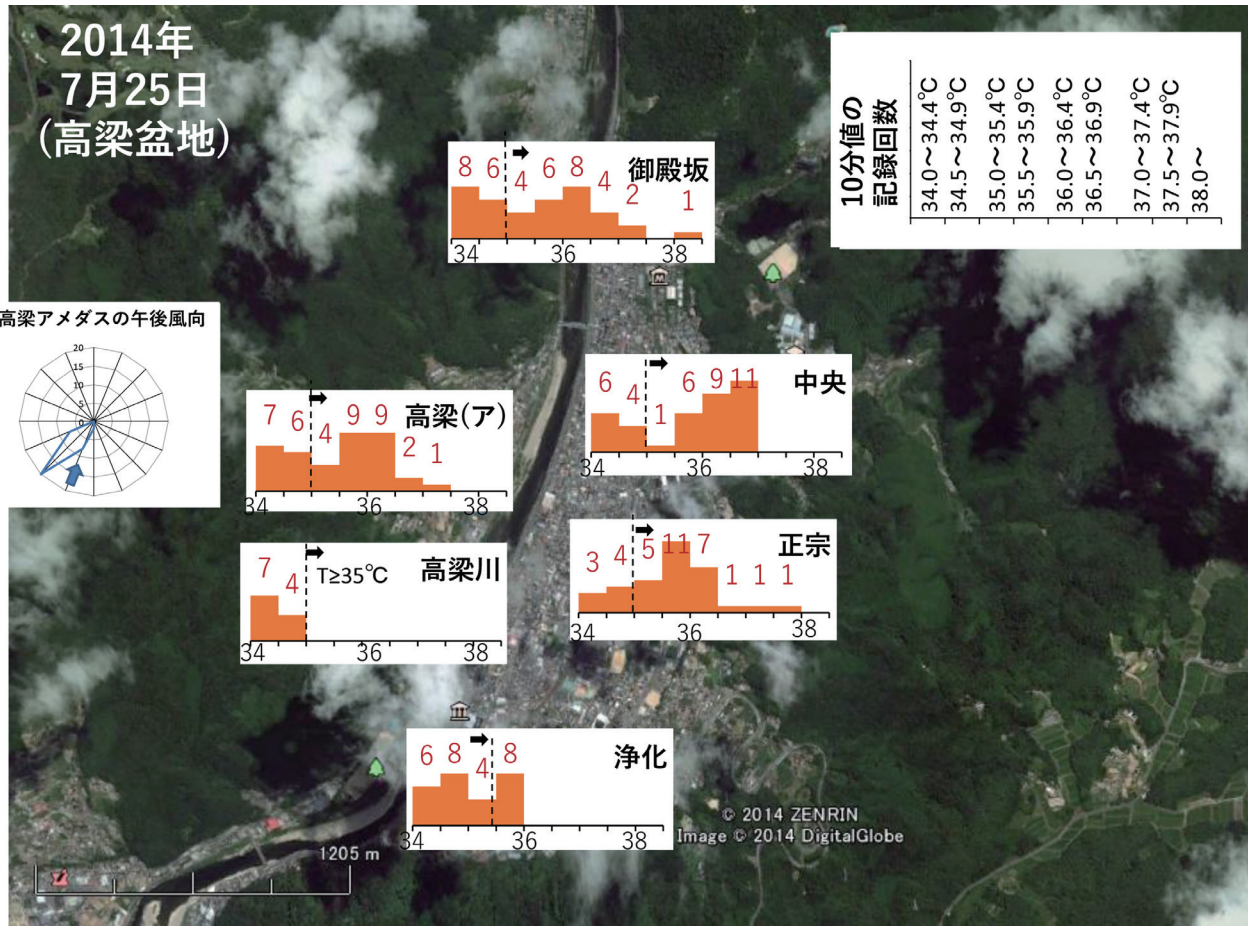


図14. 2014年7月25日に高梁盆地内で観測された地上気温のヒストグラムとアメダスの風配図。高梁アメダスの風配図は12~18時の観測値を示してある。また、ヒストグラムの階級値範囲を右上に示してある。背景画像はGoogle Earthより引用。

向が南よりに変わった時刻(2013年5月14日は8時30分, 2015年8月1日は7時50分)を起点として, 南風が高梁に到達するまでに要する時間を, 玉野アメダスで観測された当該時刻の風速(2013年5月14日は1.9m/s, 2015年8月1日は2.1m/s)と高梁までの直線距離(46,500m)から計算すると, 2013年5月14日は6時間48分, 2015年8月1日は6時間6分であった。したがって南風の影響を見積もる対象時刻を, 2013年5月14日は15時20分, 2015年8月1日は14時00分にそれぞれ設定した。

顕熱の水平移流モデルには, 対流混合層の効果を含んだ以下のシンプルな非定常方程式を用いた。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -u \frac{\Delta T}{\Delta x} + \frac{H}{C_p \rho z} \quad (1)$$

ここで, ΔT は気温変化(K), Δt は時間間隔(s), u は風速(m/s), Δx は2地点間の水平距離(m), H は地表面からの乱流顕熱フラックス(W/m²), C_p は空気比熱(1,006 J/kg・K), ρ は空気密度(kg/m³), z は対流混合層の高さ(m)を表す。(1)式では鉛直方向の顕熱移流は考慮していない。玉野と高梁のあいだに温度傾度 $\Delta T/\Delta x$ が生じ, そこに一樣な風が風速 u で吹いている状況を想定する。温度傾度 $\Delta T/\Delta x$ に従

った顕熱移流が起こることになるが, 地表面から大気に向かう乱流顕熱輸送も水平一様に存在し, したがって移流気塊は地表面から加熱され続けながら高梁まで到達すると考える。以上のような仮定は理想条件であるため正確さに欠けるが, 事象をシンプルにして本質を理解するうえでは便利である。

2013年5月14日の場合, 沿岸の玉野アメダスの風向が(海風の発達によって)南よりに変わった時刻に観測された玉野の気温は16.7°C, 同じ時刻に内陸の高梁アメダスで観測された気温が17.5°Cであった。したがって温度傾度 $\Delta T/\Delta x = (17.5 - 16.7)^\circ\text{C}/46,500\text{m}$ となる。このとき玉野アメダスで観測された風速1.9m/sを u として, この南風が高梁まで定常的に吹くとすれば(1)式の右辺第1項は, $-1.9 \times (17.5 - 16.7)/46,500 = -3.27 \times 10^{-5}\text{K/s}$ となる。この数値が顕熱の水平移流に伴う高梁での温度変化率を意味している。

混合層高度 z は, 実験的に得られた以下の日射量との関係式を用いて推定した(環境省 1977, 鶴野・光本 1994)。

$$z = a \times 76.8 I^{0.499} \quad (2)$$

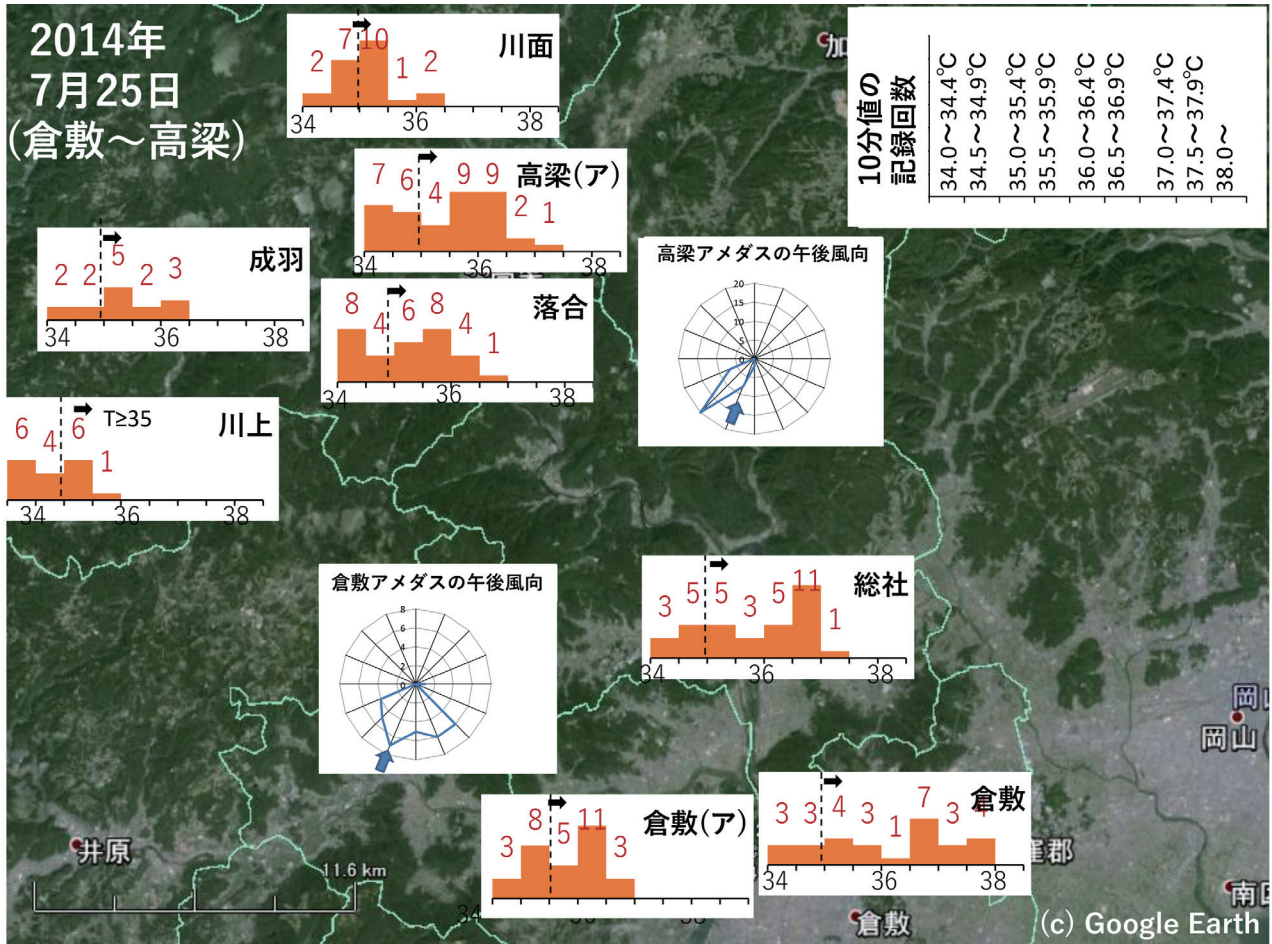


図15. 2014年7月25日に岡山平野～高梁地域の広域で観測された地上気温のヒストグラムとアメダスの風配図。高梁・倉敷アメダスの風配図は12～18時の観測値を示してある。また、ヒストグラムの階級値範囲を右上に示してある。背景画像はGoogle Earthより引用。

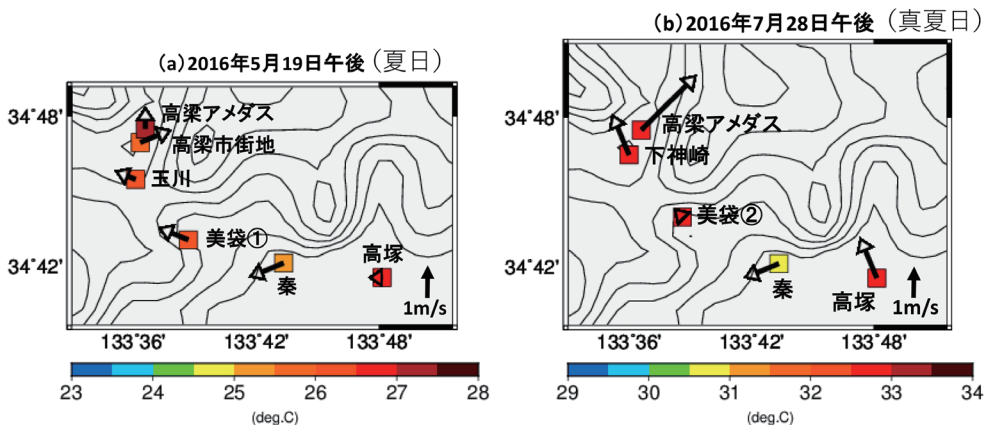


図16. 2016年(a)5月19日と(b)7月28日の午後に、自動車による移動観測で得られた高梁川沿いの地上気温(マーカー)と風ベクトルの分布。図中の南東方向が岡山平野北西部、北西方向が高梁盆地に相当する。

I は求める混合層高度の時刻までの積算日射量 (cal/cm^2), a は12時まで1.0, 15時には1.127に変化する定数である。ここで与える日射量は, NEDO日射量データベース (<http://app0.infoc.nedo.go.jp/metpv/metpv.html>) を利用して, 多照年における5月14日の高梁の特別値を推定した。混合層高度も日射量に追

従して大きく時間変化するため, ここでは南風が陸上を吹送する午前8時から15時までの平均値を与えることにした。その結果, $z = 1176\text{m}$ という数値が得られた。

地表面から大気に供給される乱流顕熱フラックスは風速や大気の熱的安定度にも依存するが, 典型

的な裸地土壌であれば日中は $100\sim 200\text{W}/\text{m}^2$ といわれ(例えば, Garratt 1992, Kuwagata et al. 1994, 近藤 2000), 空気塊の内陸への輸送時間を考慮して(1)式の H をこの数値の範囲内で変化させてみた。(1)式の右辺第2項は顕熱の鉛直混合に伴う温度変化率をあらわしている。

以上の各設定で(1)式の顕熱の水平移流モデルから, 日中に卓越する南風の顕熱移流が高梁の気温上昇に寄与する理論値は, $+0.9\sim +2.7^\circ\text{C}$ と見積もられた。瀬戸内海沿岸で海風が吹きはじめた時刻8時30分の高梁の気温は 17.5°C で, 15時20分には最高気温 32.7°C を記録していることから, この移流による温度上昇量は最大でも2割程度の寄与率と推定できる。したがって春季における高梁の大気の高温化には, 正の温度移流以外の影響が強いといえる。これについては後のIII-5節で考察する。

同様の手順で, 夏季2015年8月1日の水平移流による温度上昇量についても計算してみる。温度傾度 $\Delta T/\Delta x = (25.7 - 28.6)^\circ\text{C}/46,500\text{m}$, 風速 $u = 2.1\text{m/s}$, 混合層高度 $z = 772\text{m}$ が数値としてそれぞれ与えられ, (1)式に代入して算出した温度上昇量は $+5.2\sim +7.6^\circ\text{C}$ となった。瀬戸内海沿岸で海風が吹きはじめた時刻7時50分での高梁の気温は 25.7°C で, 14時00分には最高気温 36.9°C を記録していたことから, 移流による温度上昇量は最大7割ほどの寄与率に相当すると考えられる。したがって, 夏季の高梁の高温化は南からの正の温度移流の作用が大きく, この結果は高梁だけでなく図8で示したような広域にわたって高温化している観測事実からも裏づけられる。

もちろん, 現実にはその場所の気温自体も時々刻々変化するため温度移流が起こる温度傾度自体も非定常に考えなければならないなど, 上述の計算が厳密でない部分もいくつか含んではいるが, 正確さを要求しない大雑把な理解は可能である。

5. 高梁が暖候期に高温化するメカニズム(地形)

ここでは前述の顕熱移流とは異なる高温化因子として, 地形の効果を考察してみる。高梁は南北約2km, 東西約1km程度の盆地もしくは谷状の地形を有する。一方, 同県内にある福渡アメダス(岡山市北区建部町)は高梁アメダスから東へ約30kmの地点に位置し, 瀬戸内海沿岸からの距離や標高も高梁アメダスとよく類似している(標高は高梁アメダス60m, 福渡アメダス63m, 沿岸からの最短距離は高梁アメダス33km, 福渡アメダス35km)。ところが図7・8でもわかるように, 統計的にみても福渡アメダスは高梁アメダスほど暖候期に高温化しない地点といえる。

Kimura and Kuwagata(1993)は, 地形の閉鎖性が

大きいほど局地循環の発達に伴って盆地内に顕熱が蓄積しやすく, 高温になりがちであると報告している。これは前述の盆地外からの顕熱移流とは別の作用である。福渡アメダスのある建部町(岡山市北区)も盆地であり, 高梁アメダスと福渡アメダスの気温上昇の違いには地形の閉鎖性も関与している可能性がある。そこで, この閉鎖性を定量化するために, PCソフト「カシミール3D」(<http://www.kashmir3d.com/>)を使用してアメダスを含む盆地内の大気容積を概算した。カシミール3Dの機能によってアメダスの位置を中心に正方形バッファを描画し, その領域内の空間体積を計算した。盆地が含まれるバッファ面積は 8km^2 に設定し, 鉛直方向の上限範囲は盆地を形成する周辺山地の標高にあわせた。

計算の結果, 高梁盆地の大気容積は約 1.1km^3 , 福渡の大気容積は約 1.4km^3 が得られた。この容積の違いが気温の上昇にどの程度影響するか, 暖候期の午前6時から午後3時までを想定した日中の気温変化を, (1)式の移流項をゼロとした, よりシンプルな対流混合層モデルから見積もってみた。このとき H には会津盆地で観測された日中平均値 $86\text{W}/\text{m}^2$ (Kondo et al. 1989), z は大気容積を正方形の底面積で除した値を与えて計算した結果, 高梁では $\Delta T = 17.1^\circ\text{C}$, 福渡は $\Delta T = 13.3^\circ\text{C}$ が得られた。したがって高梁では地形の閉鎖性が大きいことも, 大気の高温化に寄与していると考えられる。

IV. まとめと今後の課題

本研究では, アメダスの統計解析と現地での気象観測から, 岡山県の高梁盆地が暖候期に高温化する要因を調べた。空間スケールが異なる解析によって, 以下のような特徴が明らかとなった。

(1)高層気象と中国地方東部のアメダス気温の解析からは, 春季(5~6月)の高梁の高温化は局地的であり総観場の気象が強く影響する要素がみられなかった。ところが夏季(8月)の高梁の高温化は広域的な現象の一部とみなされ, 総観場の気象である南からの暖気流の関与が大きいとみられた。

(2)夏季(7~9月)におこなった岡山平野から高梁地域まで及ぶ独自観測からは, 平野部と高梁盆地を含む標高の低い広域で高温となり, 瀬戸内海からの南よりの風で覆われる日が多く出現している様子が捉えられた。特に高梁川を遡上する日中の南風が夏季(7月)に限らず春季(5月)の独自観測からも確認され, 瀬戸内海からの風の流れは, 高梁盆地まで到達していることが明らかとなった。

(3)夏季(8~9月)におこなった高梁盆地内の地上気温の独自観測からは, 盆地内にある市街地の気温の空間偏差は $2\sim 3^\circ\text{C}$, 大きな日には 5°C ほどみられたが, 空間平均値は盆地内にある高梁アメダ

スで観測される気温と差が1℃未満となっていた。したがって高梁アメダスの気温を、高梁市街地を含む高梁盆地の代表気温とみなして問題ないことが示唆された。

(4)上記(1)～(3)の結果を踏まえて、高梁盆地の高温形成について瀬戸内海からの南風による顕熱移流との関連性を理論的に議論した。シンプルな移流モデルと仮定によって得られた結果では、高梁における夏季の昇温の7割程度を顕熱移流で説明できるが、春季の昇温は2割程度の寄与でしか説明できないことが明らかとなった。春季の場合には、盆地内での顕熱供給による昇温作用も加わることが重要であるという結果が、同じくシンプルな対流混合モデルと高梁盆地の閉鎖地形の組みあわせによって示唆された。

以上をまとめると、高梁盆地は標高が岡山平野並みに低い地形的特徴がベースにあることに加え、春季は盆地特有の閉鎖地形による昇温効果が目立つことで他の地域よりも高温となりやすく、夏季は総観場によって形成される南からの暖気流に伴う昇温が目立つが、他の地域も同様の現象が起るため岡山平野と同程度の高温化がみられることになる。

独自の気象観測のうち、特に移動観測の日数が限られた結果であるため、さらなる観測の実施やメソスケール気象モデルや盆地を解像できる高解像度の数値シミュレーションの実行が必要と考える。

謝辞

本研究で気象観測をおこなうにあたって、高梁市の多くの関係者にご協力並びにご理解をいただきました。高梁市民の皆様をはじめ、高梁市教育委員会、高梁市まちづくり課、高梁市産業経済部建設課、岡山県備中県民局高梁地域事務所、高梁浄化センターの皆様、心より感謝申し上げます。

引用文献

- Garratt J.R. (1992). *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, 316pp.
- 井上君夫(1971). 冷海風の陸上移流に伴う昇温過程の数値実験. *農業気象*, 27-1: 1-10.
- 環境省(1977). *南関東大気環境調査報告書*. 166pp.
- Kimura, F. and T. Kuwagata (1993). Thermally induced wind passing from plain to basin over a mountain range. *J. Appl. Meteorol.*, 32-9, 1538-1547.
- Kondo, J., T. Kuwagata and S. Haginoya (1989). Heat bud-

get analysis of nocturnal cooling and daytime heating in a basin. *J. Atmos. Sci.*, 46-19, 2917-2933.

Kuwagata, T., J. Kondo and M. Sumioka (1994). Thermal effect of the sea breeze on the structure of the boundary layer and the heat budget over land. *Boundary-Layer Meteorol.*, 67-1-2, 119-144.

近藤純正(2000). 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会. 324pp.

大和田道雄(1975). 盆地における気温と風との関係について. *天気*, 22-1: 33-39.

境田清隆・江越 新・倉持真之(2011). 仙台のヒートアイランドと海風の影響. *地学雑誌*, 120-2: 382-391.

Takane, Y. and H. Kusaka (2011). Formation mechanism of the extreme surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic foehn and foehn-like wind. *J. Appl. Meteor. Clim.*, 50-9, 1827-1841.

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 temperatures in a hottest city in Japan: a multi-scale analysis of Tajimi. *Int. J. Clim.*, 37-3, 1456-1473.

鶴野伊津志・光本茂記(1994). 大気汚染の数値シミュレーション. *大気汚染学会誌*, 29-3: A43-A54.

牛山泰行(2000). 身近な気象・気候調査の基礎. pp.17-22. 古今書院, 東京.

要旨

本研究では、アメダスの統計解析と現地での気象観測から、岡山県の高梁盆地が暖候期に高温化する要因を調べた。アメダスの解析からは、春季(5～6月)は周辺地域よりも局所的な高温化が高梁で出現し、夏季(8月)は標高の低い岡山平野から内陸にかけて形成された広域な高温化が高梁に含まれるような特徴を示した。また高梁アメダスで観測される気温は、高梁市街地を含む盆地内の代表的な気温を表していることも独自観測からわかった。高梁が高温化する日には日中に瀬戸内海からの南よりの風が卓越しており、因果関係をシンプルな顕熱移流モデルを使って考察した。その結果、夏季は南風による顕熱移流効果が高梁の高温化を引き起こしていることが示唆されたが、春季はその効果だけでは高温化を説明できなかった。春季の高温化には、高梁盆地の閉鎖地形に起因する盆地内での顕熱蓄積が加わることも重要な役割をもっていると考えられた。

(2018年4月19日受理)