

# 例会講演要旨集

第 152 号

## 目 次

詳細目次・・表紙裏

## 例 会

1. ドローンを利用した放射霧の鉛直気象観測・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
2. 中国地方の熱雷時降水分布に関する統計的分析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
3. 区内観測を用いた中国・四国地方における大雪事例の解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
4. 中学校理科第2分野「天気とその変化」の視覚的学習方法の検討  
ータイムラプス動画を用いた映像教材の開発ー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13
5. 兵庫県豊岡盆地における高温化現象ー猛暑期の気象観測ー・・・・・・・・・・・・・・・・・・15
6. 伯耆大山斜面における大気安定度と米子市で発生するヒートアイランド現象の関係・・・・・・・・18
7. 河川堤防における土壌乾燥過程に基づく蒸発量推定モデル構築・・・・・・・・・・・・・・・・22
8. UAV 及び光学データを用いた沿岸藻場の識別解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・26
9. 非階層クラスター分析を用いた日本の熱中症リスク・マップの作成・・・・・・・・・・・・30
10. 暑熱環境下における熱中症リスクの地域性ー鳥取県を対象としてー・・・・・・・・・・・・34
11. 都市気象・建物空間の連成数値モデルを利用した疾病リスク評価・・・・・・・・・・・・38
12. 温熱環境の変化が睡眠中のバイタルサイン変動に与える影響・・・・・・・・・・・・42
13. 気候の年次差がウンシュウミカンの品質変化に及ぼす影響  
ー宇和島・有田・牛窓地域の比較ー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・45

## 特別講演

- 「近年の豪雨と地球温暖化～最新のイベント・アトリビューション研究の紹介～」・・・・・・・・49  
川瀬 宏明 氏（気象庁気象研究所 応用気象研究部第二研究室 主任研究官）

2020 年 12 月 24 日（木）

オンライン開催

日本気象学会関西支部

## 詳細目次

### 例 会

1. ドローンを利用した放射霧の鉛直気象観測・・・・・・・・・・・・・・・・・・1  
\*西原 大貴 (岡山理科大学大学院生物地球科学研究科)・大橋 唯太 (岡山理科大学生物地球科学部)・  
重田 祥範 (公立鳥取環境大学環境学部)
2. 中国地方の熱雷時降水分布に関する統計的分析・・・・・・・・・・・・・・・・・・5  
古矢 真一・\*萩原 卓・東 克彦・大谷 修一 (広島地方気象台)
3. 区内観測を用いた中国・四国地方における大雪事例の解析・・・・・・・・・・9  
\*稲澤 睦美<sup>1</sup>・川瀬 宏明<sup>2</sup>・三和 裕太<sup>1</sup>・高島 昌子<sup>3</sup>・兼富 彩乃<sup>3</sup>・栗栖 朗<sup>3</sup>・村田 茉莉花<sup>3</sup>・渡邊 果歩<sup>3</sup>・  
野沢 徹<sup>1</sup>  
(1 岡山大学大学院自然科学研究科, 2 気象研究所, 3 岡山大学理学部)
4. 中学校理科第2分野「天気とその変化」の視覚的学習方法の検討  
ータイムラプス動画を用いた映像教材の開発ー・・・・・・・・・・・・・・・・・・13  
\*谷口 万里子・重田 祥範 (公立鳥取環境大学環境学部)
5. 兵庫県豊岡盆地における高温化現象ー猛暑期の気象観測ー・・・・・・・・・・15  
\*川口 翔・重田 祥範 (公立鳥取環境大学環境学部)
6. 伯耆大山斜面における大気安定度と米子市で発生するヒートアイランド現象の関係・・・・・・・・18  
\*牧園 善樹・重田 祥範 (公立鳥取環境大学環境学部)
7. 河川堤防における土壌乾燥過程に基づく蒸発量推定モデル構築・・・・・・・・22  
\*南 勇銘<sup>1</sup>・秋永 拓弥<sup>2</sup>・竹下 祐二<sup>1</sup>・岩田 徹<sup>1</sup>  
(1 岡山大学大学院環境生命科学研究科, 2 岡山大学環境理工学部)
8. UAV 及び光学データを用いた沿岸藻場の識別解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・26  
\*白石 朗光<sup>1</sup>・竹内 元春<sup>2</sup>・齊藤 光代<sup>1</sup>・小野寺 真一<sup>3</sup>・岩田 徹<sup>1</sup>  
(1 岡山大学大学院環境生命科学研究科, 2 岡山大学環境理工学部, 3 広島大学大学院先進理工系科学研究科)
9. 非階層クラスター分析を用いた日本の熱中症リスク・マップの作成・・・・・・・・30  
\*岩元 勇樹 (岡山理科大学大学院生物地球科学研究科)・大橋 唯太 (岡山理科大学生物地球科学部)
10. 暑熱環境下における熱中症リスクの地域性ー鳥取県を対象としてー・・・・・・・・34  
\*大谷 一貴・重田 祥範 (公立鳥取環境大学環境学部)
11. 都市気象・建物空間の連成数値モデルを利用した疾病リスク評価・・・・・・・・38  
\*大橋 唯太 (岡山理科大学生物地球科学部)・井原 智彦 (東京大学大学院新領域創成科学研究科)・  
高根 雄也 (産業技術総合研究所)・亀卦川 幸浩 (明星大学理工学部)
12. 温熱環境の変化が睡眠中のバイタルサイン変動に与える影響・・・・・・・・42  
\*森川 裕貴・重田 祥範 (公立鳥取環境大学環境学部)
13. 気候の年次差がウンシュウミカンの品質変化に及ぼす影響 ー宇和島・有田・牛窓地域の比較ー・・・・45  
\*鶴久森 英輔 (岡山理科大学大学院生物地球科学研究科)・大橋 唯太・千葉 太一・安保 美奈子・藤井 瑛美・  
菊池 啓介・松田 拓也・北本 勇也 (岡山理科大学生物地球科学部)

(\*は講演者)

### 特別講演

- 「近年の豪雨と地球温暖化～最新のイベント・アトリビューション研究の紹介～」・・・・・・・・49  
川瀬 宏明 氏 (気象庁気象研究所応用気象研究部第二研究室主任研究官)

# ドローンを利用した放射霧の鉛直気象観測

\*西原 大貴 (岡山理科大学大学院 生物地球科学研究科)  
大橋 唯太 (岡山理科大学 生物地球学部)  
重田 祥範 (公立鳥取環境大学 環境学部)

## 1. はじめに

三次盆地は、広島県の北部に位置し、東西約40km、南北約25kmの規模を有する(図1)。一般的に盆地では、よく晴れた日の夜間に放射霧が発生しやすく(例えば、上甲ほか, 2002; 山本ほか, 2000)、三次盆地では西日本で最大規模の霧が形成される。

霧に関する先行研究では、盆地全域にわたる地上気象観測や、霧の発生予測を目的としたライブカメラによる観察が行われてきた(例えば、Ohashi *et al.*, 2012)。立体的な霧を意識した鉛直気象観測は過去に例が少なく、霧内部の気象学的構造は不明な点も多い。また、従来の鉛直気象観測は、係留気球やドップラーレーダーによる観測(例えば、田中ほか, 2000; Teshiba *et al.*, 2004)が行われてきたが、コスト面や観測の難易度に問題があった。しかし近年では、さまざまな学術分野でドローンの活用が注目を集めており、気象観測においてもドローンの活用が期待されている。

本研究では、ドローンによる霧の鉛直気象観測を実施し、三次盆地で発生する放射霧の鉛直構造を明らかにするとともに、ドローンを利用した鉛直気象観測の有用性について検討した。

## 2. 研究方法

### 2.1 観測概要

ドローン観測は、2019年10月20~23日、11月9~13日(うち11日は雨天で中止)、12月5~6日、15~16日の計12日間に実施した。それぞれの観測日における観測時刻と観測項目を表1に示す。なお、夜間の観測では、使用したドローンの積載量の関係で、気圧の測定を実施しなかった。

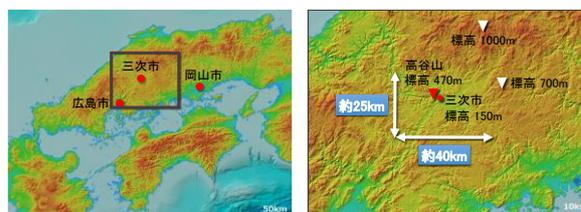


図1 三次盆地の色別標高図(地理院地図)

### 2.2 観測機器

観測で使用したドローンは、SwellPro社製のSPLASH DRONE 3+(表2・図2 a)とHoly Stone社製のHS120D(表2・図2 b)である。日中の観測ではSPLASH DRONE 3+を使用し、日没後の観測では重量が200g未満のトイドローンHS120Dを使用した。

ドローンに搭載した気象測定機器は、SysCom社製のSHTDL-3、T&D社製のTR-73U、Nielsen-Kellerman社製のKestrel 4500である(表3)。SHTDL-3では気温と相対湿度を測定し、TR-73UまたはKestrel 4500では気圧を測定した。気象測定のスAMPLING間隔は、SHTDL-3とTR-73Uを1秒、Kestrel 4500を2秒に設定した。

### 2.3 観測方法

ドローン観測は、江の川の河川敷と高谷山の斜面2か所(斜面①と②)の計3地点で順次行っていった(図3 a)。ドローンに気象測定機器を搭載させ、地表・50m・100m・150mの4高度で1分間のホバリング測定を行った(図3 b)。ドローンの飛行は、航空法で地表から150mの高度までと定められている。標高の異なる3地点で順次行い、鉛直方向に観測データを接合することで、霧層全体の観測を可能とした。なお、夜間の観測で使用したトイドローンは地表・10m・50m・100mの4高度での測定となる。また、ドローンに搭載した気

表1 観測の概要

観測日	2019年10月20~23日	2019年11月9~13日 (うち11日は雨天で中止)	2019年12月5~6日	2019年12月15~16日
観測時刻	早朝6時	夕方5時・夜9時・早朝6時	夕方5時・夜8時・早朝6時	夜9時・早朝6時
観測項目	気温・相対湿度	気温・相対湿度・気圧 (※気圧は夜9時以外)	気温・相対湿度・気圧 (※気圧は夜8時以外)	気温・相対湿度・気圧 (※気圧は夜9時以外)

表2 観測で使したドローンの概要

ドローン	SPLASH DRONE 3+ (SwellPro社製)	HS120D (Holy Stone社製)
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量 2380g</li> <li>ホバリング精度: <math>\pm 0.5m</math></li> <li>防水性 (短時間の潜水で水深60cmまで)</li> <li>GPS, 防水 (IP67) カメラ搭載</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量 200g未満 (トイドローンは航空法の適用外のため、夜間の飛行が可能。)</li> <li>非防水性</li> <li>GPS, カメラ搭載</li> </ul>

表3 観測で使した気象測定機器の概要

測定機器	SHTDL-3 (SysCom社製)	TR-73U (T&D社製)	Kestrel 4500 (Nielsen-Kellerman社製)
測定精度	温度: $\pm 0.2^{\circ}C$ 湿度: $\pm 1.5\%$	気圧: $\pm 1.5hPa$	気圧: $\pm 1.5hPa$
サンプリング間隔	1秒		2秒

象測定機器のセンサー部には、アルミ箔で作成した日除けカバーを取り付けた。

固定地点での気象の時間変化を確認する目的で、三次盆地全域に地上観測地点 (計 20 か所) を設置し、地上の気温と相対湿度を連続測定した。

## 2. 4 解析方法

ドローンで測定された1分間のデータのばらつきを確認すると、後半 30 秒間のデータのばらつきが小さくなることがわかった。そのばらつきは、気温で平均値  $\pm 0.1^{\circ}C$  以下、相対湿度では平均値  $\pm 1.0\%$  以下であった。そこで、気温や相対湿度などの気象要素について、1分間の測定データ (サンプリング間隔 1 秒、データ数 60) のうち、後半 30 秒間のデータを解析に使用した。

地表・50m・100m・150m の 4 高度での気象要素の 30 秒平均値を算出し、河川敷の標高 (150m) を 0m とした鉛直プロファイルを作成した (図 3 b)。また、高谷山の斜面 2 か所については、森林キャノピーの影響を考慮し、地表から高度 50m までの

(a)

(b)



図2 観測で使した (a) SPLASH DRONE 3+ (Swell Pro社製) と (b) HS120D (Holy Stone社製)

測定データは解析に使用せずに、河川敷・斜面①・斜面②を接合して一つの鉛直プロファイルを作った。

ドローンに搭載されたカメラで撮影した映像からは、午前 6 時頃に発生していた放射霧の厚さを推定した。図 4 には、撮影された霧の動画から切り出した静止画を示している。ドローンを上昇させてから映像に霧が写り込んできた高さを霧の底部 (bottom), 霧層からぬけて上空が見えてきた高さを霧の頂部 (top) と判定した (図 4)。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 気温の鉛直プロファイル

2019 年 11 月 9~13 日 (うち 11 日は雨天で中止) の早朝 6 時における気温の鉛直プロファイルと、推定された霧層の厚さを図 5 に示す。霧層の底部より下では、乾燥断熱減率 ( $-1.0^{\circ}C/100m$ ) に従って気温が低下している一方、霧層内部は湿潤断熱減率 ( $-0.55^{\circ}C/100m$ ) に従って低下する様子がみられた。また、霧の頂部より上では強い温度逆転が現れていた。Ohta *et al.* (1986) をはじめとする数値実験の多くでは、霧の頂部で放射冷却が強まる一方、底部では霧層からの下向き長波放射量が増加することが示されている。これは、

(a)

(b)

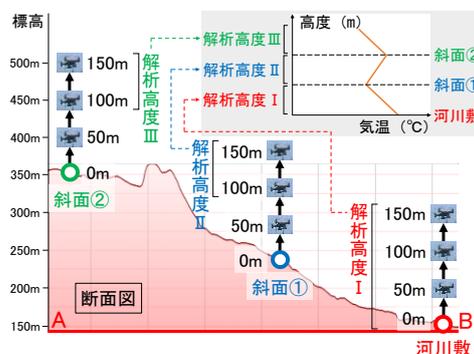


図3 (a) ドローン観測を行った位置 (3 地点) と (b) 各観測点での測定高度 (図 3 a の A-B 上)。解析に使用した高度は、河川敷で地上 (0m) から 150m までの 4 高度、斜面①と②で 100m と 150m の 2 高度 (図 3 b)。

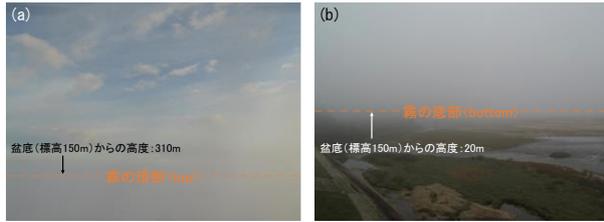


図4 ドローンで撮影された (a) 霧の頂部 (top) と (b) 霧の底部 (bottom) の様子。

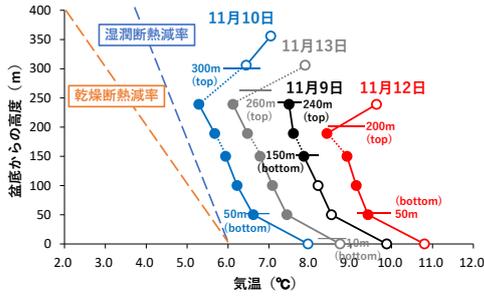


図5 早朝6時の気温の鉛直プロファイル。2019年11月9～13日(11日は除く)の結果。塗りつぶしの丸は霧層の内部、白抜き丸は霧層の外部を示す。プロットを結ぶ点線は、河川敷と斜面1か所目の間、斜面1か所目と斜面2か所目の間を意味する。

霧層内部で鉛直方向の不安定化に伴う鉛直混合が発達することを意味し、気温分布は湿潤断熱減率に従うことになる。一方、霧の頂部よりも上空の気温分布は夜間の熱的安定層が続いているため、霧の頂部付近で強い逆転が生じていたと考えられる。本研究のドローン観測によって、数値実験で示された放射霧の特徴をとらえることができた。

図6には、2019年11月11日夕方5時～12日早朝6時(図6 a)と11月12日夕方5時～13日早朝6時(図6 b)の観測結果を示す。

2019年11月12日と13日の早朝6時に発生していた霧層の厚さを比較すると、12日早朝6時(図6 a)の霧層の推定厚さは150mであったのに対し、13日早朝6時(図6 b)は250mと厚かった。この差は、放射冷却の始まる時間の違いが関与したと考えられる。霧発生前の時刻をみると、11日夕方5時(図6 a)には、高度とともに乾燥断熱減率に従って気温は低下していた。夜9時になると、高度50～100mに気温の逆転層がみられ、この時刻に放射冷却が始まっていたとわかる。一方の12日(図6 b)は、霧発生前の夕方5時の段階で既に盆底から高度100～150mで逆転層がみられ、前日より放射冷却の開始が早かった可能性が考えられる。ここで、三次盆地全域に設置した地上観測地点(計20か所)のうち、盆地内における地点(計12か所)の地上気温の時間変化を比較する

(計12か所)の地上気温の時間変化を比較する

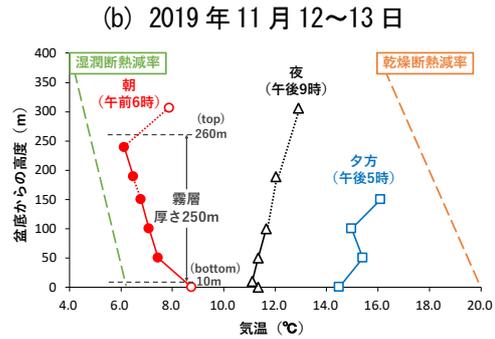
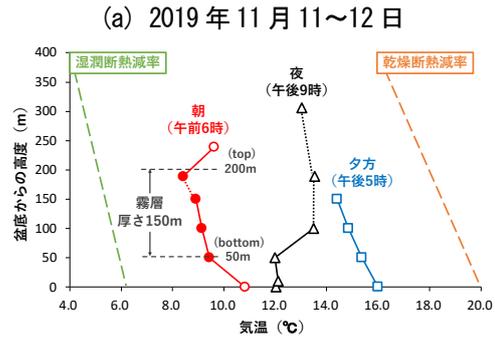


図6 夕方(青色)・夜(黒色)・早朝(赤色)における気温の鉛直プロファイル。(a) 2019年11月11～12日と(b) 11月12～13日の結果。他は図5と同様。

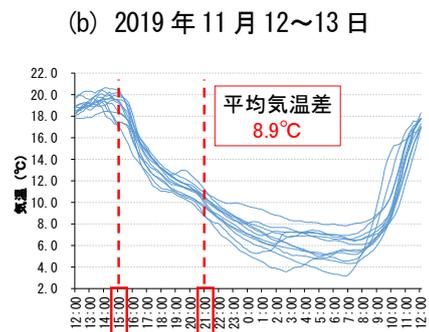
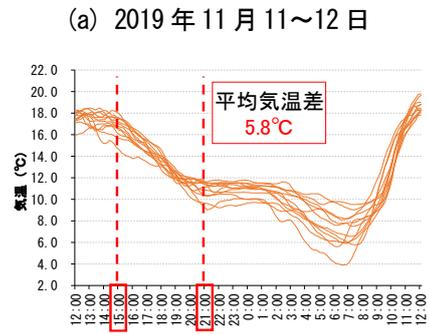
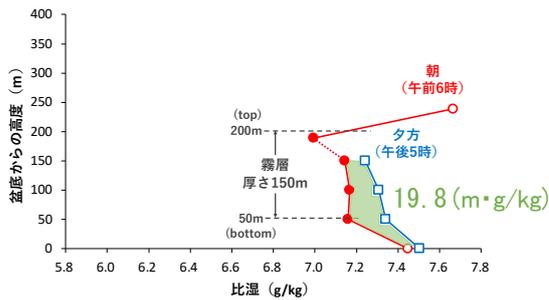


図7 三次盆地内に設置された観測地点で測定した地上気温の時間変化(12地点)。(a)2019年11月11～12日と(b)2019年11月12～13日の結果。

と(図7), 霧層が厚かった日の前日(図7 b)のほうが、15時頃からの気温低下が大きく、放射冷却の開始時刻が両日で異なっていたとわかる。

(a) 2019年11月11~12日



(b) 2019年11月12~13日

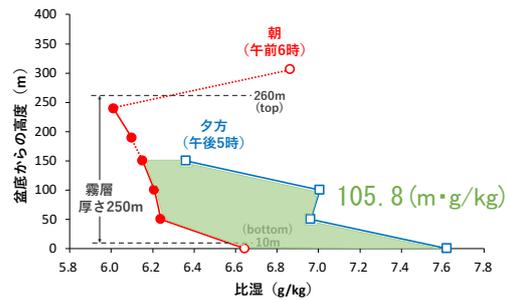


図8 夕方(青色)と早朝(赤色)における比湿の鉛直プロファイル。(a) 2019年11月11~12日と(b) 11月12~13日の結果。緑で塗られた部分は比湿差の面積を表す。他は図5と同様。

### 3. 2 比湿の鉛直プロファイル

2019年11月11日夕方5時~12日早朝6時と11月12日夕方5時~13日早朝6時の比湿の鉛直プロファイルと、推定された霧層の厚さを図8に示す。

霧層内部の比湿は、上層ほど小さくなる特徴がみられた。これは、上層ほど飽和水蒸気量が小さくなるためであり、したがって上層ほど凝結した水蒸気量も多かったと考えられる。

霧発生前の夕方5時と霧発生後の早朝6時の比湿差を比較すると、12~13日(図8b)のほうが大きく、その面積比は約5.3倍大きい。これは、11~12日に比べて12~13日のほうが凝結した水蒸気量が多かった可能性があり、両日で霧層の厚さに違いがみられた要因として考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、広島県三次市で発生する放射霧を対象に、ドローンを利用した霧の鉛直気象観測を実施した。江の川の河川敷と高谷山の計3地点でドローン観測を行い、山の斜面を利用することで地表から350mまでの観測を可能にし、霧の頂部を越えた高さまでの観測を実現した。

また、ドローンに搭載されたカメラで撮影した映像からは、霧の厚さを推定することもできた。

本研究で明らかになった知見は、以下のとおりである。

(1) 霧層の底部よりも下では乾燥断熱減率に従って気温は低下していたが、霧層内部では湿潤断熱減率に従って低下する特徴がみられた。

(2) Ohta *et al.* (1986) をはじめとする数値実験の多くで示された放射霧の特徴を、本研究のドローン観測でとらえることができた。

(3) 推定された霧層の厚さは、日によって差がみられた。これは、日によって放射冷却の開始時

刻や夕方と早朝の比湿差が異なることで、凝結した水蒸気量に違いが生じたためと考えられる。

本研究の結果から、鉛直方向の大気情報を取得するツールとしてドローンの活用が有効であることが明らかとなった。将来的に、水平方向の観測や複数のドローンを用いた観測網など、拡張や応用性が期待できると考える。

### 謝辞

本研究に関して、三次市の関係部署に観測のご理解ならびにご協力頂きました。また、岡山理科大学大橋研究室の学生の皆様にもご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

### 引用文献

- 上甲実・清原康友・塚本修(2002) 津山盆地における霧の観測. 岡山大学地球科学研究報告, 9(1), 41~52.
- 大橋唯太・寺尾徹・宮田賢二・田中正昭・堀口光章・林奏一(2004) 局地循環による水蒸気輸送と盆地霧発生に関連性—広島県三次盆地を対象とした数値実験—. 天気, 51(7), 509~523.
- Ohashi, Y., Iwashita, M., and Kusamoto, M. (2012) Possibility of Predicting Basin Fog by Using the Maximum Possible Cooling Amount and Surveillance Camera Images. *Journal of Agricultural Meteorology*, 68(2), 97~106.
- Ohta, S., and Tanaka, M. (1986) A Numerical Study of the Formation and the Dissipation of Radiation Fogs. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 64(1), 65~77.
- 田中正昭・宮田賢二・米谷俊彦・林奏一・伊藤芳樹・堀口光章・寺尾徹・岩田徹・大橋唯太(2000) 三次盆地における霧の集中観測. 京都大学防災研究所年報, 43(B-1), 185~209.
- Teshiba, M., Hashiguchi, H., Uematsu, A., Tanaka, H., Ohmori, Y., and Fukao, S. (2004) Fog observations with a millimeter-wave scanning radar at Miyoshi basin, Japan. *Earth, Planets and Space*, 56(2), 259~268.
- 山本哲・小山田一夫(2000) 会津盆地における局地的濃霧の発生—1998年12月1日の例—. 気象庁研究時報, 52(1), 17~30.

# 中国地方の熱雷時降水分布に関する統計的分析

古矢真一、萩原卓\*、東克彦、大谷修一（広島地方气象台）

## 1. はじめに

夏季における中国地方では、山間部を中心に熱的不安定現象による短時間強雨が頻繁に発生する。これは、中国地方を東西に貫いて横たわる脊梁山地（中国山地）を指向して吹き込む局地風の地上収束が根本の原因であることに他ならない。しかし、当地方は南北に平坦で、山地が海岸に迫っている領域が広く存在し、複雑な地形を形成している（第1図）。したがって、日中に励起された海陸風や山谷風は相互作用を起こしながら（根山芳晴、1974）、日々様々な降水パターンを発現させていると考えられる。ゆえに、実際に発現する熱的不安定時の降水分布は、各層におけるさまざまな気象要素も考慮すると、診断的予測が非常に難しいものとなっている。当調査ではこれらを踏まえて、中国地方（隠岐、山口県を除く）の

熱的不安定現象による降水分布について、主成分分析とクラスター分析を用いた調査を行い、降水特性の考察、及び気象業務における予報作業への活用を見据えた熱雷基本パターンの作成を行った。

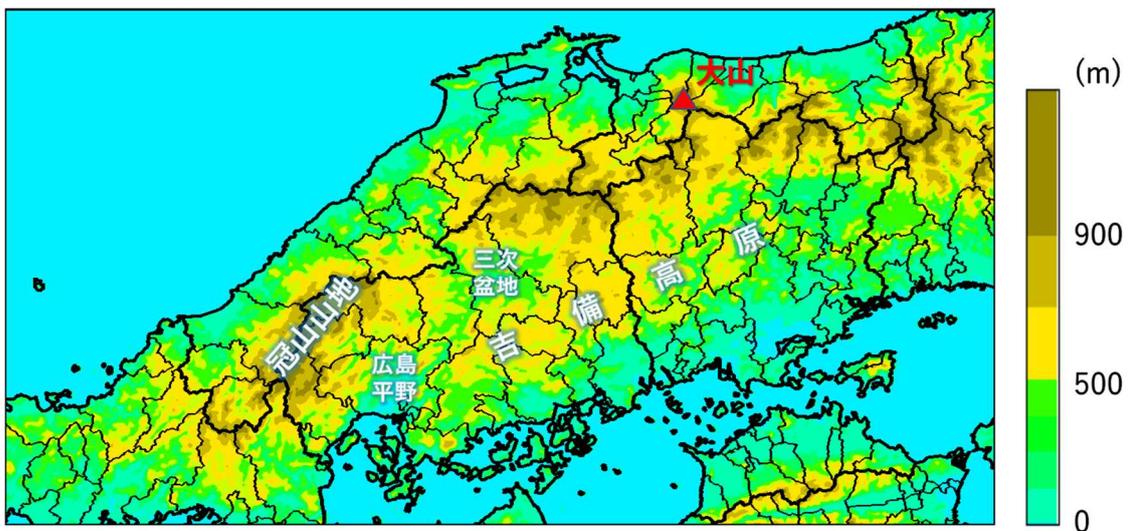
## 2. 手法

### 2.1 使用したデータ

5km 格子解析雨量（2.5km 相当最大値）の日最大1時間降水量を用いた。

### 2.2 事例の抽出

本研究では、1事例を任意の1日間における日最大1時間降水量分布で定義し、事例日の抽出を行った。調査には、太平洋高気圧に覆われており、且つ熱的不安定による降水が発生し得る場であると考えられる2003～2011年の82事例を用いた。



第1図 中国地方の地形図

(国土地理院発行の数値地図1kmメッシュ標高図)

抽出の際は、上空の寒気による影響を強く受けたと思われる事例日を除外した。これは、上空に寒気が入っている条件下では、広範囲に渡って短時間強雨が容易に引き起こされ、熱雷による降水の特性が不明瞭となると考えたからである。

### 2.3 調査方法

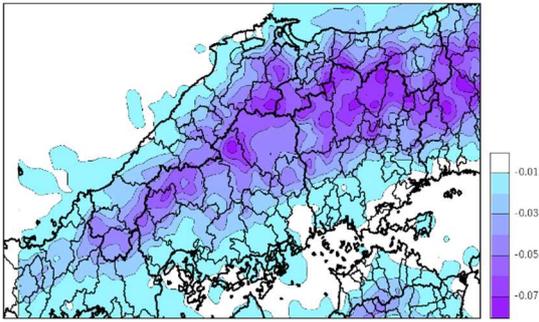
全事例日の日最大1時間降水量に対して、分散共分散行列を用いた主成分分析を適用し、算出した固有ベクトルから、主成分ごとの降水パターン分布図を作成した。また、同データに対して階層クラスター分析を実施し、似通った降水特性を持つ5km格子の区域分けを行い、熱雷基本パターンを作成した。クラスタリング後の分類は、熱雷事例日において実際に解析された降水域のまとまりを考慮した類似度(クラスター数=20)を設定した。クラスター間の距離測定には、ユークリッド距離を用いた分類感度が比較的良好いとされるWard法を採用した。

## 3. 結果と考察

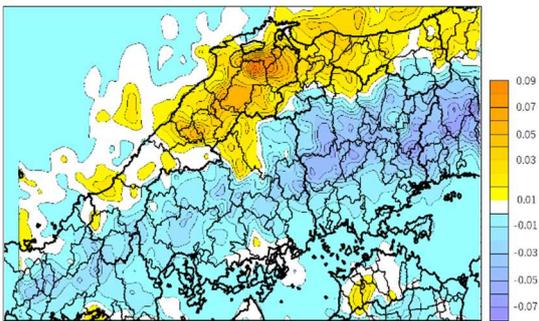
### 3.1 主成分分析

降水量を用いた主成分分析では、ある気象条件の程度と降水量の相関を主成分ごとに見ることができる(ある気象条件とは、各層における様々な気象要素の組み合わせが考えられるが、今回は気象学的意義の追求は割愛する)。ここでは、累積寄与率が36%となった第3主成分までを解析対象とした。その理由は、第4主成分以降は寄与率が極めて小さく、本調査において有意ではないと判断したからである。まず、最も寄与率の大きい第1主成分では、降水量を全事例足し合わせた値に関する因子が算出される

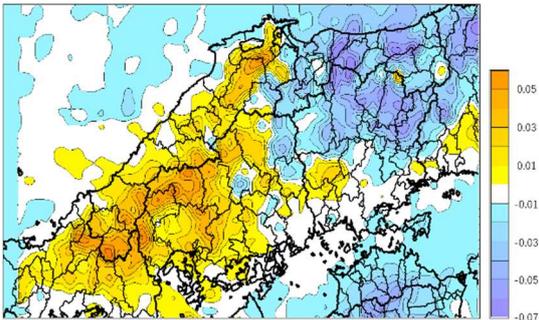
(水越・里村、1999)。実際に第1主成分の固有ベクトル分布図(第2図)を見ると、山陰と山陽の境界を中心に絶対値が大きくなっており、第1図の地形図と重ねて考えた場合、短時間強雨の頻発する地域は概ね山地に集中していることがわかる。しかし、絶対値の面的極大域は必ずしも山稜部に対応していないことが見受けられる。例えば、三次市北部付近に見られる極大域は、山陵から平野部にかけて存在しており、また鳥取県と岡山県の県境にある大山に注目すると、山の東側斜面に対応する形で主成分が負に大きい領域が存在している。これらのことから、熱雷による降水は山の斜面で卓越することが推察される。次に第2主成分の固有ベクトル分布図(第3図)を見ると、概ね山陽と山陰で固有ベクトルの符号が反転している。これは、何らかの気象条件によって、中国山地を挟んで南北のいずれかで降水が卓越するパターンが存在することを示唆している。このパターンは、山地を中心に発生した地上収束線に伴う熱的不安定降水域が、上空の風向きによって南北いずれかに流れていく様子を統計的に表しているために生じていると考えられる。一方で、寄与率はさらに小さくなるものの、第3主成分の固有ベクトル分布図(第4図)においても似たような特徴が表れており、広島県・島根県と鳥取県・岡山県で大きく二分されるような東西振動パターンが示されている。このようなパターンが生じる原因は定かではないが、上空における風向きの東西方向成分や、気圧配置が関係しているのではないかとと思われる。



第2図 第1主成分固有ベクトル分布図(寄与率20%)



第3図 第2主成分固有ベクトル分布図(寄与率10%)

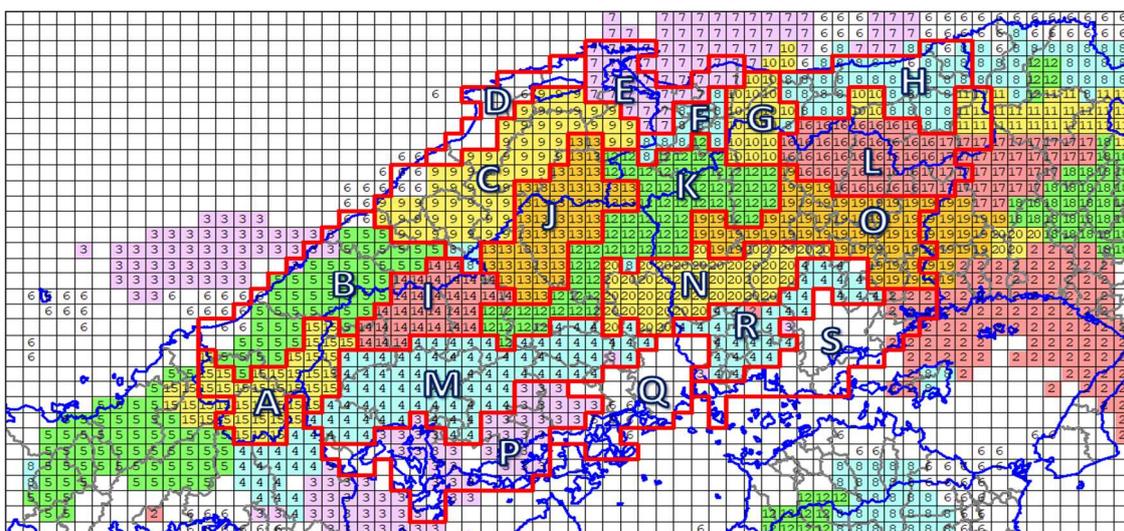


第4図 第3主成分固有ベクトル分布図(寄与率6%)

### 3.2 クラスタ分析

クラスタリングにより出力したデンドログラムから、各事例日における降水のまとまりを考慮してクラスター数を20に絞った後、それぞれのクラスターがある程度の大きさになるよう区域分けを行い作成した基本パターンが第5図である。格子内の数字は、クラスタリングの際に適当に割り振ったクラスター番号である(以下、クラスター番号を参考に区切った赤線で囲まれた領

域について、図中に示す通り大文字アルファベットで表す)。第1図の地形図と比較してみると、「A」「I」「J」「K」「F」「G」「L」は中国山地を構成する山々に対応しており、それぞれが概ね同一の地形に属していることが分かる。例えば「A」「I」は、山口県・広島県・島根県の県境に連なっている冠山山地に対応しており、鞍部を挟んだ東側では、山地を囲うように「J」「K」「F」「G」と続いている。一方、山陽南部に注目すると、「N」が隆起準平原である吉備高原に沿う形で存在しているのが分かる。実際に、神石高原町と高梁市の県境付近で発生した対流雲が上空の風に流されて東西方向に移動し、しばしば同領域に短時間強雨をもたらしている。また、これらの区域を前節の各主成分の固有ベクトル分布と照らし合わせると、固有ベクトルの絶対値が極大となっている領域を囲うように同一の降水特性を示す地域が存在していることが分かる。このように、山地では実際の地形や降水主成分と強い相関を示す領域をクラスタリングによって得ることができた。しかしながら、沿岸部や海岸に近い平野部、例えば廿日市市南部から広島平野を通過して府中市付近まで伸びている区域「M」に注目すると、山岳部や平野部、高原地帯といった様々な地形を含んでいるにもかかわらず、同じ特徴を持つ領域として解析されている。各主成分との対応も悪く、類似度を上げて再分類するも、クラスターが疎で歪になり、思うように区分を行うことができなかった。これは、同領域における顕著な熱雷事例が少ないことが原因で、クラスタリングに対する反応が弱かったからであると推察される。



第5図 熱雷の基本パターン。各区域に任意のアルファベットを割り当てている。

#### 4. まとめ

主成分分析では、中国地方で発生する熱的不安定による降水は山地を中心に発生し、特に山の斜面で卓越することが分かった。また、山陽と山陰で南北振動を示したり、広島県・島根県と鳥取県・岡山県で東西振動を示したりするような降水パターンが存在することが明らかになった。そしてクラスター分析では、地形や降水主成分と強い相関を示すような、似通った降水特性を示す領域を括り分けた熱雷基本パターンを作成することができた。しかし、熱雷の頻発する山地を含む内陸部では概ね精度の良い区分けを行うことができたものの、熱雷事例数の少ない地域では理想的な区分けを行うことができなかった。また、作成した基本パターンはクラスタリングで得られた結果に対して忠実に区域分けを行い、二次細分区域をほとんど考慮しなかったため、実際の予報現業では利用し難いと思われる。今回は主成分分析とクラスター分析という統計分析ではもっともオーソドックスな手法を用いたが、正確な基本パターン作成のためには、

事例の抽出方法を見直し、より多くの熱雷事例数を用いた更なる発展的な検証手法を用いる必要があると考える。

#### 謝辞

本調査における主成分分析とクラスター分析は、関西学院大学社会学部の清水裕士教授が作成・公開している統計分析ソフト「HAD」を用いて行った。ここに併せて謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 清水裕士、2016:フリーの統計分析ソフトHAD、機能の紹介と統計学習・教育、研究実践における利用方法の提案 メディア・情報・コミュニケーション研究、1、59-73.
- 2) 根山芳晴、1974:海陸風と山谷風の相互作用について、天気 21 (11)、587-589
- 3) 大谷修一、仲田直樹、小川則行、2012:広島県の熱雷について
- 4) 水越祐一・里村雄彦、1999:京都府の冬季降水分布に関する統計的解析、天気、46、205-218

# 区内観測を用いた中国・四国地方における大雪事例の解析

\*稲澤睦美(岡山大学大学院自然科学研究科)、川瀬宏明(気象庁気象研究所)、三和裕太(岡山大学大学院自然科学研究科)、高島昌子(岡山大学理学部地球科学科)、兼富彩乃(岡山大学理学部地球科学科)、栗栖朗(岡山大学理学部地球科学科)、村田茉莉花(岡山大学理学部地球科学科)、渡邊果歩(岡山大学理学部地球科学科)、野沢徹(岡山大学大学院自然科学研究科)

## 1. はじめに

普段あまり雪の降らない、本州西日本の太平洋側などで大雪が降ると、大きな被害が出ることもある。しかしながら、このような地域では積雪すること自体が珍しいことから、気象庁の地域気象観測システム(Automated Meteorological Data Acquisition System : AMeDAS)で定時的に降積雪の観測を行っている観測地点は、あまり多くないのが現状である。

本研究では、科研費基盤B「積雪が稀な地域での大雪発生状況の把握と現在及び将来の大雪発生ポテンシャルの評価」の一環として、1980年以前に行われていた区内観測に着目し、山陽地域を中心として、アナログ形式で保存されている区内観測データをデジタル化した。また、デジタル化した積雪データを用いて、1969年3月11日から13日にかけての大雪事例について解析を行った。

## 2. 区内観測について

### 2.1 区内観測とは何か

区内観測とは、AMeDASが導入される以前の1978年ごろまで行われていた、人による気象観測である。区内観測による気象観測データは、現在、観測記録簿に記載された観測値の画像化が進められている。画像化されたままではデータとして処理することが困難であるため、画像から読み取った観測値のデジタル化作業も並行して行われているが、本州の太平洋側など積

雪が稀な地域における降積雪データのデジタル化は、一部地域を除き未着手であった。本研究では、主に積雪の深さを対象としてデジタル化を行った。区内観測は、長いところでは1900年代初頭から観測記録が残されているが、今回は気象庁55年長期再解析データ(JRA-55)と重複している期間(1958-1978年)を対象にデジタル化作業を行った。なお、積雪の深さの観測は毎日午前9時に行われている。

### 2.2 区内観測データを用いることの利点

区内観測データを用いることの利点としては、積雪の少ない地域においては、雪の観測を行っている観測地点がAMeDASよりも圧倒的に多いことが挙げられる。現状で緯度経度情報が正確にわかっているだけでも広島・岡山・鳥取・島根・山口・兵庫・香川・愛媛・徳島・高知において318地点あり、そのほぼ全ての観測地点において冬季(10~4月)に雪に関する観測が行われている。現在運用されているAMeDASで雪の観測が行われている同地域の観測地点数が31地点であることを考慮すると、区内観測がとても稠密に行われていたことがわかる(図1a, b)。以上のことから、大雪が珍しい地域において雪に関する解析を行う際には、区内観測のデータを用いることは、面的に密なデータを得られるため、大変有効である。

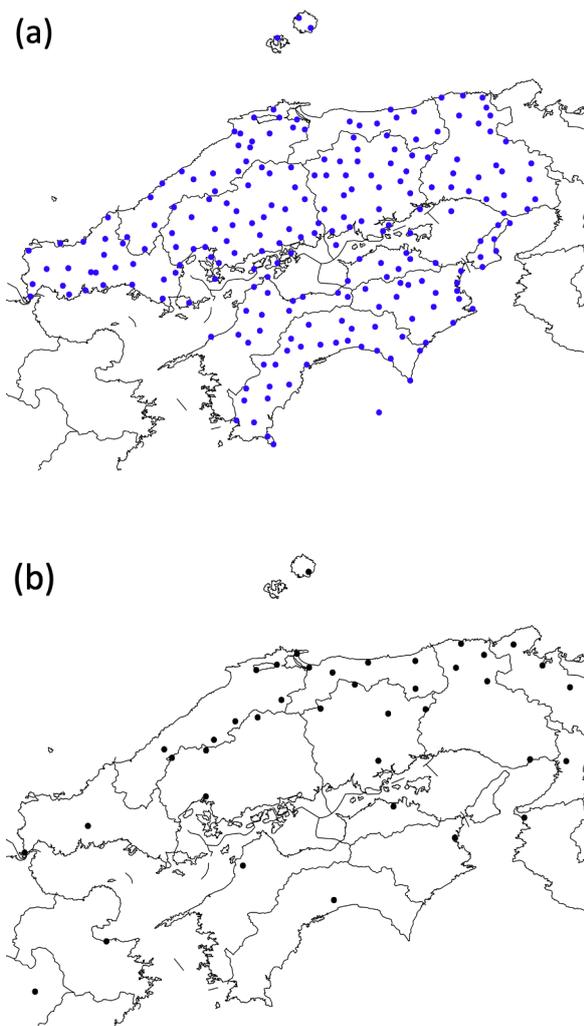


図1 区内観測および AMeDAS によって積雪深の観測を行っている観測地点。(a)区内観測が行われている観測地点、(b)現在 AMeDAS によって雪の観測が行われている地点。

### 3. 区内観測を用いた大雪事例の解析

#### 3.1 1969年3月11~13日の大雪

1969年3月11日の未明から12日にかけて、日本列島の太平洋側を低気圧が発達しながら通過した。それにともない全国的に降積雪が観測され、東京では3月12日に統計史上1位となる日降雪量33cmを記録した。また、四国地方でも多量の積雪を観測し、停電やビニールハウスの倒壊などの被害をもたらした(四国災害アーカイブ <https://www.shikoku->

saigai.com/ 参照)。本研究では、この大雪事例を対象に区内観測のデータを活用した事例解析を行った。

#### 3.2 解析に用いたデータ

解析には、広島、岡山、島根、鳥取、兵庫、山口、香川、愛媛、徳島、高知の10県の区内観測をデジタル化したものを用いている。広島、岡山、山口の3県に関しては1958年から1978年の20年分のデジタル化が行われている。香川、愛媛、徳島、高知の四国4県および兵庫、島根、鳥取の山陰2県に関しては1969年3月分のみ区内観測データをデジタル化した。解析の対象とした期間は、南岸低気圧が通過する前から通過後までの1969年3月11日21時から同年3月13日9時までとした。観測項目は積雪の深さを用いている。当日の気圧配置を確認するため、気象庁55年長期再解析データ(JRA-55)の地表面解析値のうち海面更正気圧を使用した。水平解像度は $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ である。また、参考までに、気象研究所/非静力学地域気候モデル(NHRCM)を用いた、同期間の数値シミュレーション結果(積雪深のデータ)も使用した(Sasaki et al. 2008)。モデルの水平解像度は2kmである。

#### 3.3 解析結果

図2は、1969年3月11日9時から13日9時までの海面更正気圧、積雪の深さ、積雪深の差の経時変化を示す。同年3月11日の深夜から12日の明け方にかけて、四国沖を発達中の低気圧が通過しており、南岸低気圧が四国沖を通過する際に中国・四国地方に降雪をもたらしていることがわかる(図2a, c)。区内観測と数値シミュレーション結果を比較すると、モデルは積雪深を大きく過大評価していることが分かる。

一方、3月12日の夜から13日の朝にかけて、中国・四国地方では南岸低気圧が通過した後に等圧線が南北に走る冬型の気圧配置になって

おり、広島・岡山・兵庫の山陽地域の平野部では降雪は観測されていないが、山間部ではモデルでも区内観測でも降雪が見られる。ただし、中国地方の日本海側では、区内観測では降雪が確認されるのに対して、モデルでは反対に融雪している傾向が見られる。

#### 4. まとめと今後の展望

AMeDAS よりも空間的に稠密な区内観測により観測された積雪深のデータを用いることで、1969年3月11日から13日にかけての南岸低気圧の通過にともなう山陽地域における積雪の時系列変化と地域特性を知ることができた。今後は、1958～1978年を対象としたデジタル化作業を兵庫・大阪・京都などの関西地域にも拡大する。また、デジタル化した区内観測データを用いて、今回の解析事例に代表されるような山陽地域における大雪事例を抽出し、大雪をもたらす気象学的な背景について、モデルデータや客観再解析データなども使いながら解析を進める予定である。

#### 参考文献

Sasaki, H., K. Kurihara, I. Takayabu, and T. Uchiyama, 2008: Preliminary experiments of reproducing the present climate using the non-hydrostatic regional climate model.

SOLA, 4, 25-28.

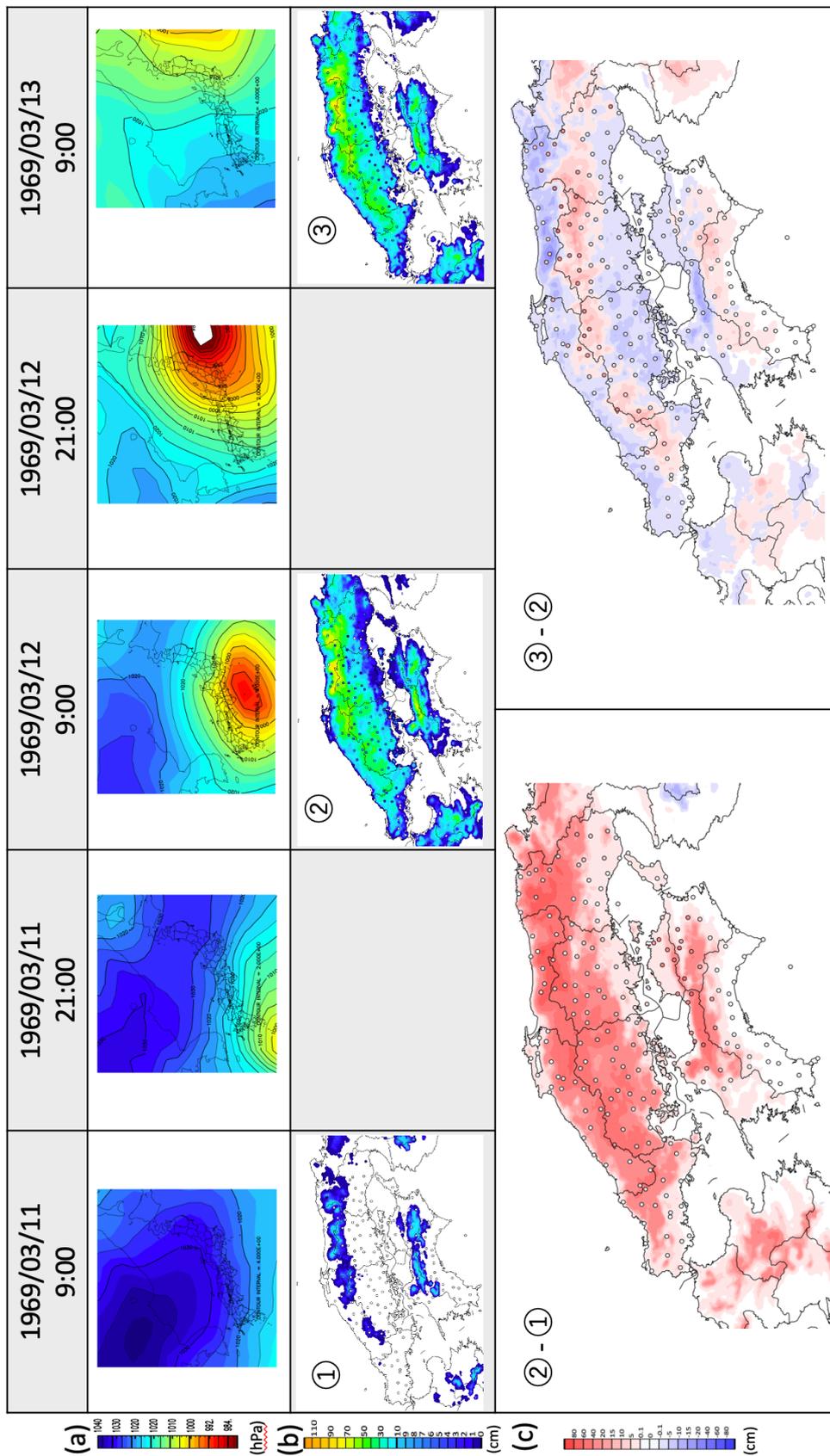


図2 1969年3月11日9時から同年3月13日9時までの(a)海面更正気圧、(b)積雪の深さ、(c)積雪の差の経時変化。(a)JRA-55を用いた海面更正気圧の地理分布。12時間ごとに表示している。(b)区内観測(色付きの丸記号)および数値シミュレーション(トーン)による積雪の深さ。(c)前日9時との積雪の差。正の場合は降雪、負の場合は融雪を表している。

## 中学校理科第2分野「天気とその変化」の視覚的学習方法の検討 －タイムラプス動画を用いた映像教材の開発－

\*谷口 万里子・重田 祥範（公立鳥取環境大学環境学部）

### 1. はじめに

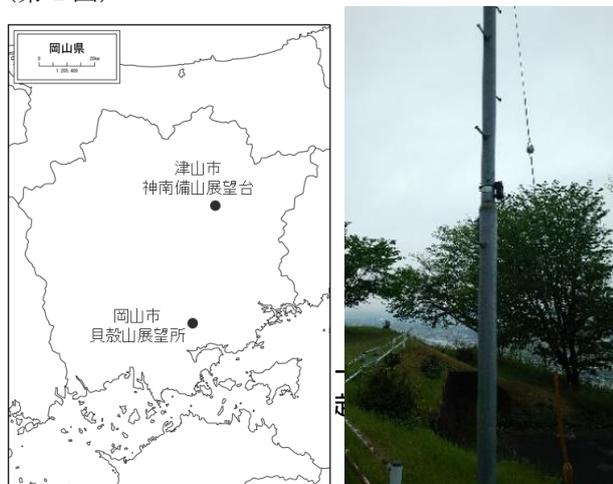
平成 29 年に告示された中学校学習指導要領は、主体的・対話的で深い学びの実現に向けて、観察・実験等の学習活動の質の向上が推進されている。第2分野「気象とその変化」においても、身近な気象の観察・実験を通して天気の変化や日本の気象についての特徴を見いだす授業が求められている。しかし、空はその様子の変化が緩慢なために、視覚でその特徴を捉えることが難しい。そのため、授業内で簡単かつ安定して空の様子を観察することができる手法が必要となっている。

そのような中、名越(2009)は、空の様子をインターバル撮影した映像を教材として授業実践をおこない、雲の動きを捉える教材として生徒たちの興味・関心を刺激する効果があったと結論付けている。本研究では、空の様子を撮影したタイムラプス動画と地上天気図を用いて、前線と天気の変化を視覚的に学習させる映像教材を開発することを目的とする。

### 2. 研究概要

#### 2.1 タイムラプス動画

タイムラプスカメラの設置場所は、北に市街地が広がる展望台とした。使用したカメラは APEMAN の 2019 年版防犯カメラ H55 である。小型で入手しやすく、設置が容易であるため、校内に取り付けることも可能である。撮影したデータはメモリーカードに保存されるため、データの回収も容易におこなえる。サンプリング間隔は 2 分、写真の解像度は 1920×1080 P、視野角は 60 度である。2020 年 2 月 15 日より岡山県岡山市貝殻山展望所に、2020 年 5 月 10 日より津山市神南備山展望台にカメラを設置した。カメラは市街地と空が半分ずつ移るように角度を調整し、インターバル撮影をおこなった。(第1図)



第1図 タイムラプスカメラの設置地点。

#### 2.2 映像教材の開発

ここでは、前線の通過にともなう天気の変化を容易に学習することができる教材作成を試みる。この時取り上げる天気の変化とは、雨の様子、気温の変化、風向の変化の3つとする。前線が日本列島を通過している日時は、日本気象協会の過去の実況天気図を参照し判断した。映像教材に使用する動画は、前線の通過にともなう天気の変化が鮮明に観察できるか否かを条件に、目視で確認し、選出した。

動画は 10 秒あたり 25 枚の速さで再生される。天気の変化の特徴を目視でとらえるには速いため、1 秒あたり 1 枚の速さに再生速度を調整した。動画編集ソフトは Adobe 社の動画編集ソフト「Adobe Premiere Pro」である。

#### 2.3 気象観測データ

前線の通過にともなう気温変化の特徴を教材に取り込むために、岡山地方気象台の観測データを使用して 1 日の気温変化のグラフを作成した。比較対象として、日本列島に前線の通過が認められない晴天日を選出した。また、前線通過前後の風向を 1 時間ごとに天気図記号を用いて表し、グラフの下部に明記した。

### 3. 結果

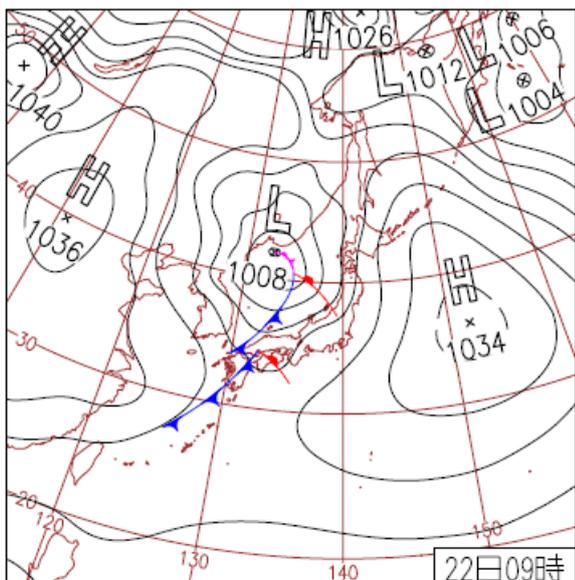
#### 3.1 タイムラプス動画による天気の変化

タイムラプス動画は、雨や雪などの天気の変化の様子を観察できるほか、高度によって雲の形や流れていく方向が異なる様子を観察することが可能であった。

2020 年 2 月 15 日から 4 月 28 日までにおいて、日本列島を前線が通過したのは、2 月 16 日、22 日、25 日、29 日、3 月 4 日、5 日、22 日、28 日、4 月 1 日、4 日、18 日、20 日、26 日の 12 日間であった。その中で、寒冷前線の通過にともなう天気の変化が明瞭に観察できる日は、2 月 22 日、3 月 22 日の 2 日間であった。

第2図は 2020 年 2 月 22 日 9 時の地上天気図である。この日は日本海の北部で低気圧が発達し、前線が本州を通過したため、全国的に雨や雪が降っていた。

日本気象協会提供の実況天気図より、15 時頃に寒冷前線が岡山県を通過し、兵庫県付近にかかっていることが確認された。そこで、岡山市貝殻山展望台のタイムラプス動画を見ると、15 時頃から雲が北から南に向かって流れてくる様子が観察でき、その後激しい雨が短時間にわたって降る様子が捉えられていた(第3図)。また、3 月 22 日では正午頃に寒冷前線が岡山県にかかり通過した。カメラでは雲の流れが前線の通過前後で南から西よりに変化した様子が観察できたが、降水の有無は動画で観察することができなかった。そのため、本講演では、2020 年 2 月 22 日を対象に説明していく。



第2図 寒冷前線通過時の地上天気図。  
(2020年2月22日9時)。

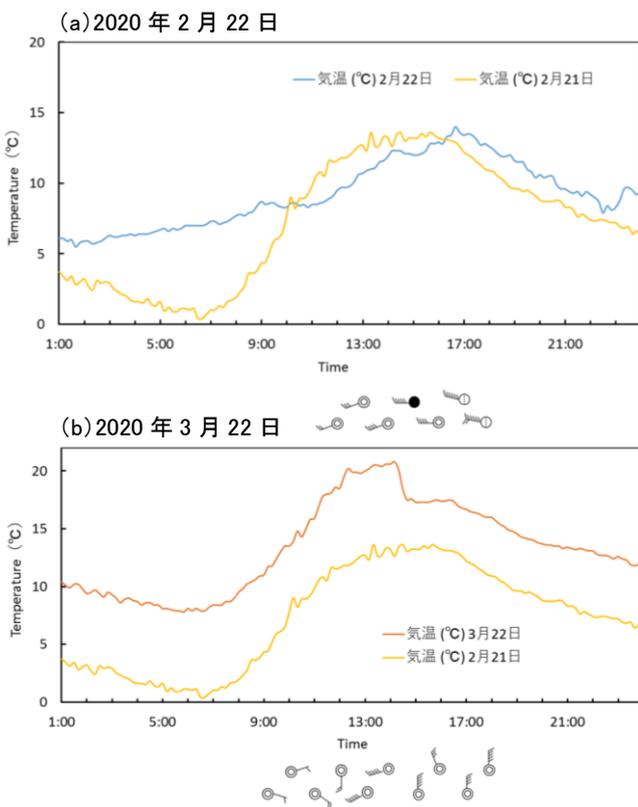


第3図 タイムラプスカメラが捉えた天候の急変。  
(岡山県岡山市:2020年2月22日15時19分)。

### 3.2 天候の変化

第4図aは、寒冷前線が通過した2020年2月22日と前線の通過が認められなかった晴天日(2月21日)の気温変化の時間変化である。2月22日は、寒冷前線が通過したにも関わらず、15時頃は気温の低下や急激な風向の変化は認められなかった。そのため、教材では生徒の誤認を防ぐために、2月22日の気象データは使用せず、気温と風向の変化がはっきりと視認することができる日を別に選出した。

第4図bは寒冷前線が通過した3月22日と、2月21日のグラフである。3月22日のグラフでは、13時から14時にかけて気温が約3℃低下しており、2月21日のグラフと比較することで気温の変化の特徴を見いだすことができる。また、風向も南よりであったものが西、北よりに変化している様子が確認できる。そのため、映像教材の開発には、第4図bを用いることにする。



第4図 寒冷前線通過時の気温変化。

(a)2020年2月22日, (b)2020年3月22日。

### おわりに

本研究では、寒冷前線による天気の変化の特徴を学習する映像教材を作成した。映像教材の詳細については発表にて紹介する予定である。

特徴を黒板に書いて覚えさせるのではなく、実際に天気の変化の様子やグラフを見せる学習活動をおこなうことで、生徒の思考力や観察力を伸ばすことができると考えられる。また、映像教材により大気現象や気象観測に対する興味・関心を引き出し、生徒の追求意欲を刺激することで、主体的に気象を学ぼうとする姿勢を育成することができる。

### 引用文献

- 文部科学省, 2017: 中学校学習指導要領(平成29年告示)解説
- 名越利幸, 2009: Web カメラによるインターバル撮影を利用した映像観察システムの教材化—中学校理科「地上からの雲の観察」に関する授業実践を通して—, 岩手大学教育学部研究年報, 第69巻, 59-71
- 気象庁, 2020: <https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/hibiten/2020/2002.pdf> (2020/11/10 閲覧)

# 兵庫県豊岡盆地における高温化現象－猛暑期の気象観測－

\*川口 翔・重田 祥範（公立鳥取環境大学環境学部）

## 1. はじめに

一般的な盆地地形は海岸からの距離が遠く、盆地は周囲を山や高地などに囲まれているため盆地底は大気が滞留しやすい(深石, 2006). そのため、暖候期の盆地内の空気塊は周辺大気と混合しにくくなり、高温化しやすい. さらに、周辺山地からの移流によってフェーン現象が発生し、高温かつ乾燥化が広がる(福岡, 1980). ゆえに、好天静穏日の日中には、気温上昇が顕著になり、熱中症の危険度も高まる. なかでも、埼玉県熊谷市などが位置する埼玉県北西部では、夏季に高温となる日がしばしば出現する. この高温化現象は、都心部から運ばれる熱移流によるものではなく、地表面加熱を受けた山越え気流が深く関わっていると指摘されている(たとえば, Takane and Kusaka, 2011). このほかにも、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(小川ほか, 2019).

そこで、本研究では、夏季に日最高気温 35.0℃以上の猛暑日をたびたび記録する兵庫県豊岡盆地を対象として定点型の気象観測をおこない、その高温化現象の実態と形成メカニズムの解明を試みる.

## 2. 研究概要

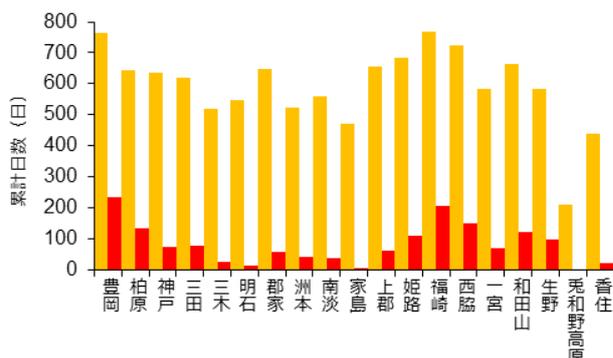
### 2.1 対象地域

本研究の対象地域である兵庫県豊岡盆地は、兵庫県北部に位置しており、盆地内には、人口約 7.7 万人を有する豊岡市が存在している. 豊岡盆地は、東西約 38km、南北約 32km と広大である. 市域は蘇武岳(1074m)をはじめとする山地に取り囲まれている(第 1 図). ここで、2010～2020 年 までの計 11 年間における兵庫県内の気象観測局(气象台やアメダス)で測定さ

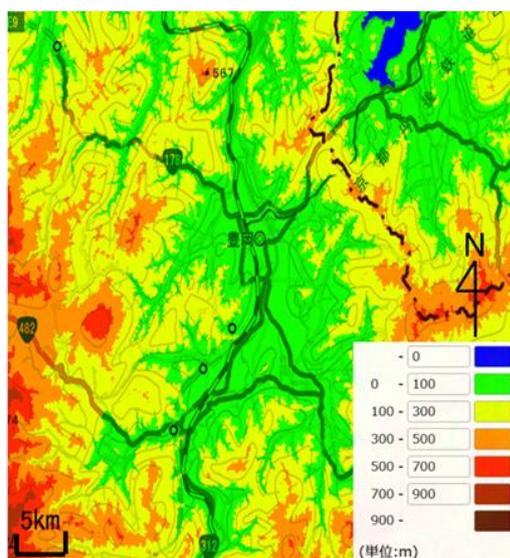
れた気象データから猛暑日・真夏日の累計日数を第 2 図にまとめる. 平野から山地にいたる兵庫県 19 地点の中でも豊岡特別地域観測所は真夏日が合計 763 日、猛暑日が 234 日となっており、ともに他の地点と比べて非常に多い. 特に、2019 年には猛暑日が計 21 日記録され、全国第 9 位である. このことから、豊岡盆地は、全国有数の高温化になりやすい地域だといえる.

### 2.2 対象地域

本研究では、兵庫県豊岡市を対象とした定点型の気象観測を長期的に実施した. 観測地点は、JR 豊岡駅(第 3 図 A)を中心とした東西約 8km、南北約 10km の範囲で実施した. 観測は 2020 年 8 月から実施しており、現在も継続している(12 月 10 日時点). 観測地点は豊岡市内に都市内外のデータが得られるように計 25 地点設け、地点間隔が均等になるよう配置した(第 3 図). 観測項目は気温(℃)、相対湿度(%)である. なお、測定間隔は 10 分毎であり、解析の際には測定された値から前後 20 分を中央平均した値を用いた.



第 2 図 兵庫県の真夏日・猛暑日累計日数(2010～2020 年).



第 1 図 豊岡盆地周辺の地形.



第 3 図 豊岡盆地における気象観測地点. 数字は観測番号を示す.

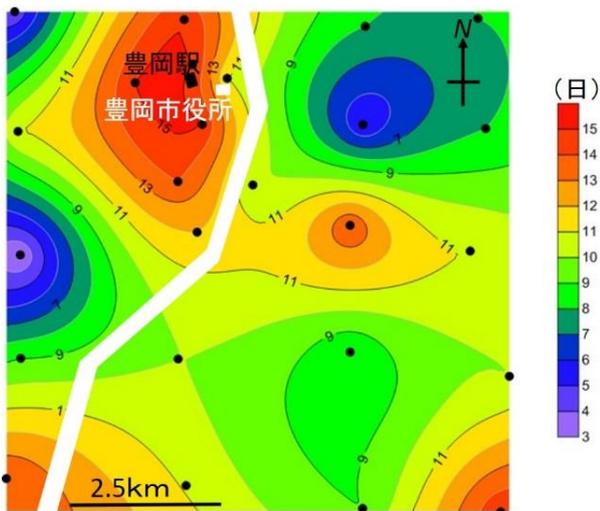
### 3. 結果

#### 3.1 猛暑日数と気温偏差

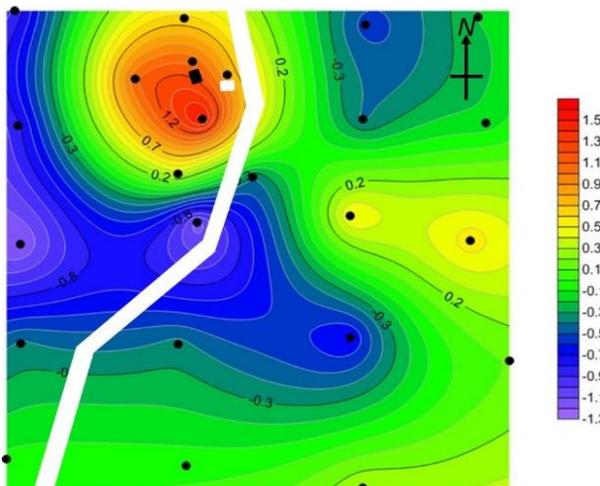
本研究では、豊岡盆地の高温化を時空間的に把握するため、各観測地点における猛暑日数を算出した(第4図)。空間補正は内挿法の一つであるKriging法を用いた。第4図から猛暑日数は都市中心部で13日以上となっている。一方、郊外では猛暑日数が10日以下であり、地域によって大きな差が生じている。また、豊岡特別地域観測所において8月における日最高気温を記録した2020年8月27日の9:00~18:00の平均気温偏差分布図を第5図に示す。猛暑日数と同様に都市中心部で気温が周囲よりも高くなっており、日中においても郊外より約2°C高くなっている。ここで、気温が高くなっている地域を地理院地図の航空写真で確認すると、人工建造物の割合が高いようにみえる(第6図)。このことから、観測地点周辺の人工被覆率の割合によって気温が決定づけられていると推測される。

#### 3.2 土地被覆率の算出

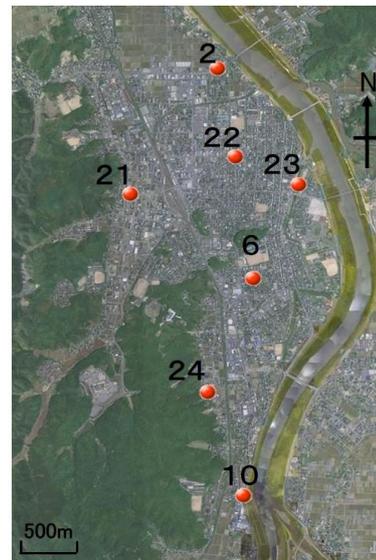
観測地点周辺の土地被覆形態を把握するため、土地被覆率の算出をおこなった。土地被覆率は100mメッシュと250mメッシュそれぞれ算出した。高層建造物(オフィ



第4図 豊岡盆地における猛暑日数.



第5図 地上気温偏差分布。  
(2020年8月27日9:00~18:00の平均値).

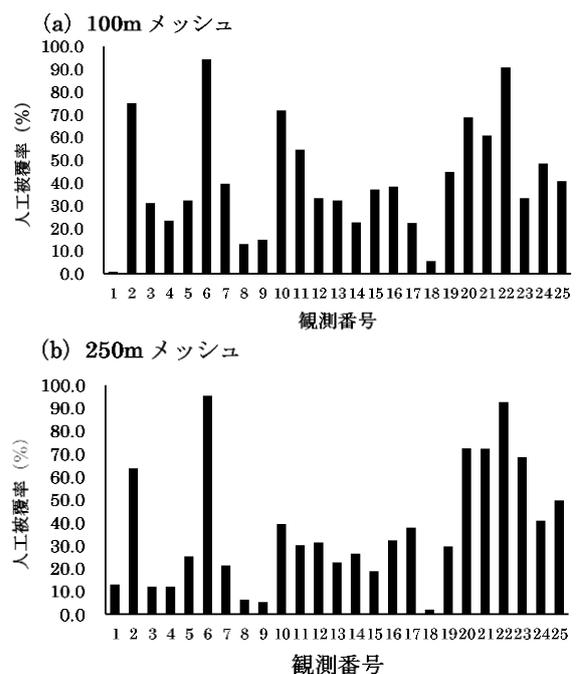


第6図 豊岡市内の航空写真数値は観測番号を示す。

ス等)、低層建造物(一般住宅)、工業用地、駐車場や港湾、道路、墓地、裸地、緑地、山地、水田、水域、海域の13項目に分類した。解析の際には13項目のうち前記6項目の合計値を人工被覆率として算出した。算出した人工被覆率の結果を第7図に示す。

#### 3.3 人工被覆率と気温変化との関係性

本研究では3.2で算出された人工被覆率から土地被覆形態と高温化との関係性を明らかにするため、晴天日に着目して解析をおこなった。晴天日の抽出の条件は、豊岡特別地域観測所で降水量が0.0mm以下、日最高気温が30°C以上、日照時間が可照時間の50%以上とした。抽出の結果、16日間が該当した。晴天日における人工被覆率と気温変動との関連性を明らかにするため、地点ごとの日最高気温、日中平均気温の2項目に着目し、気温と人工被覆率との相関分析をおこな



第7図 各観測地点周辺の人工被覆率.

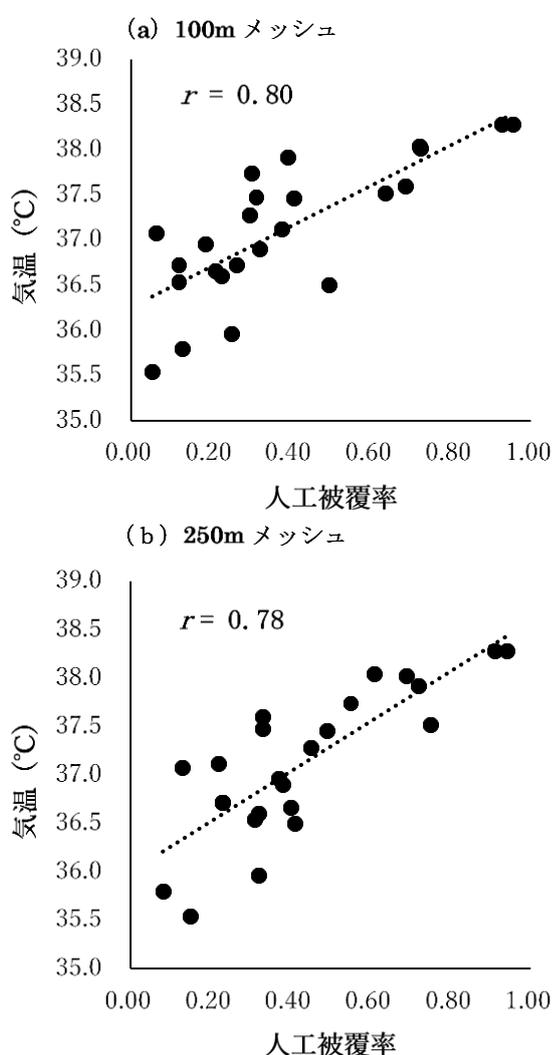
(a)100mメッシュ, (b)250mメッシュをそれぞれ示す。

った。ここで、日中の値は 9:00~18:00 の平均とした。分析の結果、100m メッシュ・250m メッシュともに 16 日間で 15 日が正の相関 ( $r = 0.50 \sim 0.83$ ) が認められた。この結果から、日中における人工被覆率の割合が高い場所では気温が高くなるといえる(第 8 図)。

#### 4. まとめ

本研究では兵庫県豊岡盆地における高温化現象について長期的な気象観測をおこなった。その結果、猛暑日数が高いところと日中における気温偏差が高いところはほぼ同様であった。一方、日中において人工被覆率の割合が高い場所では、気温が高くなる明瞭な正の相関が認められた。このことから、人工被覆率の割合が高いことが高温化の一要因と推察される。

今後は、夜間のヒートアイランド強度の変化など、日中の高温化と夜間の違いについて定量的に明らかにしていく予定である。



第 8 図 日最高気温と人工被覆率の関係(2020 年 8 月 27 日).  
(a)100m メッシュ, (b)250mメッシュをそれぞれ示す。

#### 引用文献

- 深石一夫, 2006:奈良盆地の気候特性, 総合研究所所報, 15, 115-121pp.
- 福岡義隆, 1980:環境地理, 古今書院, 98-99pp.
- Kondo,J ., T.Kuwagata and S.Haginoya, 1989: Heat budget analysis of nocturnal cooling and daytime heating in a basin, J. Atmos. Sci.,46-19, 2917-2933pp.
- 小川晃生, 高市泰樹, 大橋唯太, 2019: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, 岡山理科大学自然植物園, 23, 1-14pp.
- 佐藤典人, 2014:谷口市街における夜間の気温分布と山風の相互作用, 法政大学文学部紀要, 68, 71-68pp.
- 重田祥範・大橋唯太, 2009:岡山市を対象とした細密な気象観測によるヒートアイランド強度の解析, 天気, 56, 443-454pp.
- 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-wind. J. Appl. Meteor. Clim., 50-9, 1827-1841pp.

# 伯耆大山斜面における大気安定度と米子市で発生するヒートアイランド現象の関係

\*牧園 善樹・重田 祥範 (公立鳥取環境大学環境学部)

## 1. はじめに

鉛直方向の気温は、大気安定度に起因した気温減率によって左右され、一般的には、標高が高くなるにつれて気温も低下していく。その反面、大気安定状況によっては、地上付近よりも数百m上空の空気塊の方が高温になる接地逆転層が出現する場合もある。既往研究として、吉野(1982)は、筑波山の斜面で気象観測をおこない、静穏な夜間に斜面中腹の気温が地表付近よりも高くなる斜面温暖帯の存在を確認している。さらに、植田ほか(2011)は、筑波山において4斜面の気象観測をおこなった。その結果、逆転層の発生頻度は東斜面が突出して高いことを見出した。

一方、都市気候の代表的なものとして都市部の気温が郊外の気温よりも高くなるヒートアイランド現象が挙げられる。近年では、地球温暖化の影響とヒートアイランド現象により都市部での不快感や、熱中症増加のリスクが懸念されている。そのため、都市の熱環境を改善することは急務となっている。この熱環境を改善するにあたっては、形成要因の解明が優先的におこなわれ、気象観測をはじめとして多くの研究事例が存在する。なかでも、榊原(1998)は長野市における夜間のヒートアイランド強度と接地逆転層の関係を調べ、両者には正の相関があることを示した。つまり、ヒートアイランドの発生には、安定成層の形成の形成が起因していることを示唆している。特に、冬季の静穏な夜間には、放射冷却によって接地逆転層が出現する。さらに、都市部のヒートアイランドの影響による上昇気流は、その逆転層に遮られる。すると、ダストドームを形成し大気汚染物質が都市内に滞留する。そのため、都市部での大気汚染濃度が増加し、健康被害の増加も懸念されている(山本, 2005)。

そこで、本研究では鳥取県西部に位置する伯耆大山と隣接する鳥取県米子市において気象観測をおこない、実測データをもとに大気安定度と米子市のヒートアイランド現象の関係性を明らかにする。

## 2. 研究概要

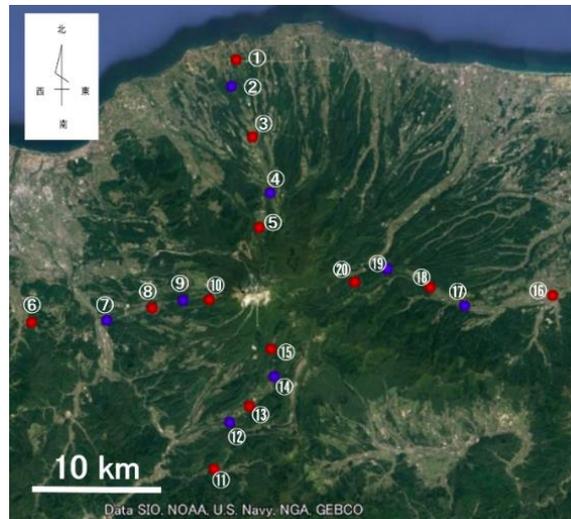
### 2.1 伯耆大山

伯耆大山(以下、大山)は、標高1,729mであり、中国地方最高峰の山である。鳥取県西部の旧国名が伯耆国であったことから伯耆大山(ほうきだいせん)とも呼ばれている。本観測では、海拔約10mから約800mのあいだで東西南北4斜面の気温観測を実施した。観測地点は、海拔約200m毎に1斜面につき5地点の計20地点である。自然通風式シェルターに気温センサ(RTR-52:T&D社)を用いて、定点型の長期的な観測を実施した。さらに、それぞれの斜面において最低・中間・最高地点の3カ所計

12地点で、同時に大気圧(TR-73U:T&D社)も測定した。測定間隔は気温、大気圧ともに5分毎である。第1図に大山における気象観測地点を示す。

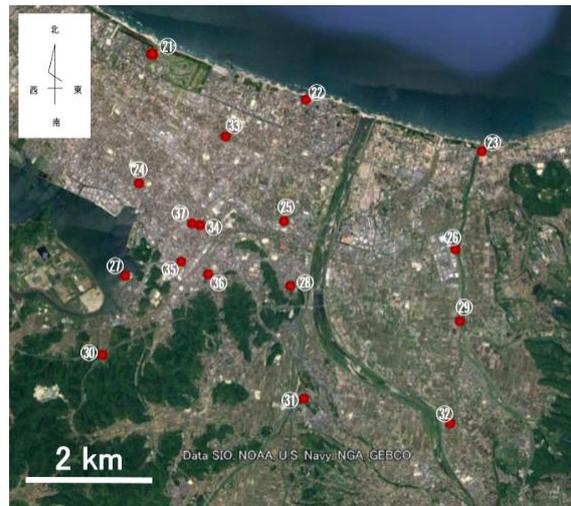
### 2.2 鳥取県米子市

鳥取県米子市は鳥取県西部に位置し、147,445人の人々が暮らしている(2020年4月30日時点)。米子市では、前述と同様の手法で温湿度センサ(TR-72wf:T&D社)を用いて、都市部と郊外を含めた15地点で気温・相対湿度をそれぞれ測定した。測定間隔は気温、相対湿度ともに5分毎である。第2図に鳥取県米子市における観測地点を示す。



第1図 大山における気象観測地点。

●は気温・大気圧、●は気温を測定している地点  
数値は本文中の地点番号を示す。



第2図 鳥取県米子市における気象観測地点。

●は気温・相対湿度を測定している地点、  
数値は本文中の地点番号を示す。

### 3. 解析手法

#### 3.1 対象日の選定

解析対象時期は、ヒートアイランド現象と郊外の接地逆転層が強く出現すると予想される晩秋とした(2020年10月下旬~12月上旬)。解析対象日は、米子市内に位置する米子特別地域観測所の気象データから好天静穏日を選定した。好天静穏日の条件は、無降水日かつ、米子特別地域観測所の天候の判定で日中に晴れと判断された日である。さらに、追加条件として前日との日較差が9.0℃以上かつ、平均風速が2.0m/s未満の日とした。

その結果、好天静穏日として抽出された日は、10月27・28日、11月5・6・13・16・24・25日の計8日間であった。

#### 3.2 ヒートアイランド強度の算出

Oke(1973)は、観測された気温から都市内の最も高い気温を $T_u$ 、郊外における最も低い気温を $T_r$ とし、ヒートアイランド強度 $\Delta T_{u-r}$ と定義している。このヒートアイランド強度は以下の(1)式で表される。

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r \quad (1)$$

本研究では、上記のヒートアイランド強度を米子市で発生するヒートアイランド現象の客観的な指標として用いることにする。ここで、都市部と郊外の代表地点をそれぞれ決定する必要があるが、菅原ほか(2006)は都市と郊外の代表地点によってヒートアイランド強度が異なることを指摘している。また、気温を観測するにあたっては、周囲の地形や構造物の影響を受けることを念頭に置かなければならない(気象庁, 2011)。そのため、代表地点を決める際は、観測地点の土地利用を明確にする必要がある。そこで、都市部と郊外をそれぞれ選定するにあたっては、各観測地点の人工被覆率を算出した。

#### 3.3 土地被覆形態の算出

ここでは、土地被覆形態の算出方法について述べる。Google Earthが提供している航空写真を利用して観測地点を250m格子の中心におき分割した。分解能5mであるため、格子内には計2500個のメッシュが存在することになる。このメッシュ内に最も占めている割合を13種類(1. オフィス・集合住宅・学校, 2. 一般住宅, 3. 工業, 4. 駐車場・港湾, 5. 道路, 6. 鉄道, 7. 裸地, 8. 公園・緑地・畑, 9. 山地・樹林地, 10. 水田, 11. 水域, 12. 海域, 13. 墓地)に分類する。そして、2500個中に人工被覆(1. オフィス・集合住宅・学校, 2. 一般住宅, 3. 工業, 4. 駐車場・港湾, 5. 道路, 6. 鉄道, 13. 墓地)が含まれる割合を求め、合計を人工被覆率として算出した。算出された人工被覆率が最も高かった地点を都市部、最も低かった地点を郊外の代表地点として扱うことにする。

その結果、人工被覆率が94.2%と最も高かった地点(第2図:37)を都市部、18.0%と最も低かった地点(第2図:32)を郊外の代表地点とした。

#### 3.4 温位の算出

大山斜面における大気安定度を明らかにするため温位を算出する。しかしながら、大山における観測では各斜面2地点が気温のみの測定である。そこで、大気圧は標高と関連深いことから2地点の大気圧と標高から関数を求め、地点間の大気圧を推定したうえで温位を算出する。温位の算出式を以下の(2)式に示す。

$$\theta = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} \quad (2)$$

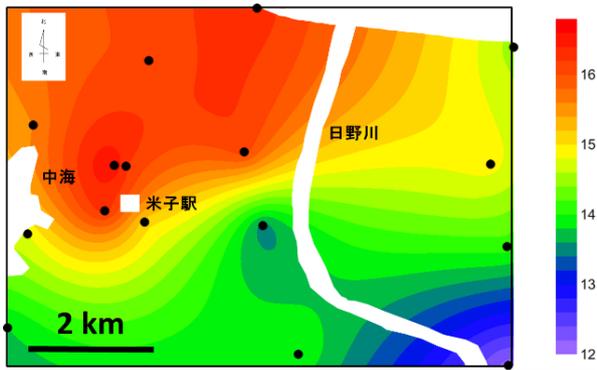
ただし、 $\theta$ :温位,  $T$ :温度,  $P$ :気圧,  $P_0$ :1000 hPa,  $R_d$ :気体定数(8.3145 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>),  $C_p$ :定圧比熱(29.102 Jmol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)とする。

### 4. 結果

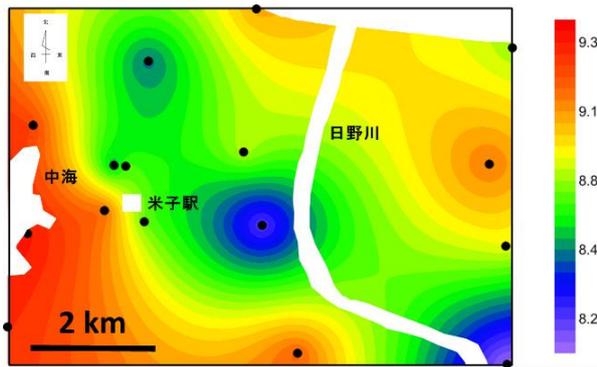
#### 4.1 ヒートアイランド現象

都市部におけるヒートアイランド現象は、高温化だけではなく、同時に乾燥化も発生することが知られている(たとえば、重田・大橋, 2009)。また、気象庁でも、都市化により相対湿度が長期的に低下していることを指摘している。これは、気温上昇にともない空気塊の飽和水蒸気量が増加し、相対湿度が下がることが要因である。他にも、都市域では植物が少なく蒸発散量が減少することで相対的に都市部の水蒸気量が少なくなることが予想される。重田・大橋(2009)は、岡山市を対象としたヒートアイランドの観測で都市部と郊外の比湿について調べ、都市部が乾燥化していることを明らかにしている。

そこで、本研究によって得られたデータから、米子市も同様にヒートアイランド現象による都市部の高温・乾燥化が起きていると推察される。ここで、好天静穏日と判定された8日間で最もヒートアイランドが明瞭に出現した時刻の地上気温・比湿分布図を作成した。その結果、ヒートアイランドが明瞭に出現したのは、2020年11月16日19時10分頃であり、ヒートアイランド強度は4.5℃であった。気温・比湿分布図を第3図、第4図にそれぞれ示す。都市部は米子駅から北側の地点24・33(第2図)にかけて商業施設が広がっている。気温分布図では、郊外よりも約4℃高い領域が地点37(第2図)の都市部を中心に沿岸部にかけて広がっていた。一方、比湿分布図では、都市部で周囲より低い地点も存在するが、都市部と郊外の差は最大でも1.0g/kgであり、明瞭な差は認められなかった。既往研究では都市部の比湿低下による乾燥化が指摘されていたが、晩秋の米子市では明瞭ではなかった。その要因として、季節の違いや、北側と西側が日本海に接しているため海洋の影響を強く受けている可能性が推察される。



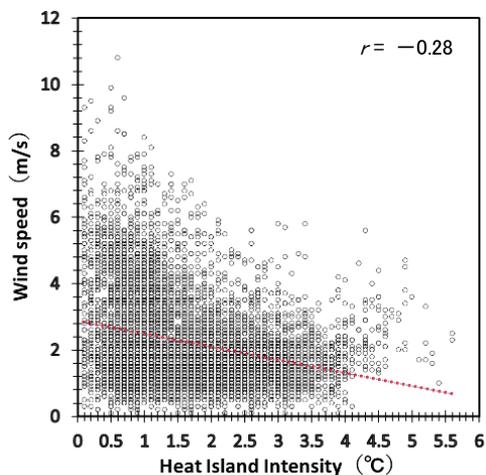
第3図 米子市の地上気温水平分布。  
(2020年11月16日 19時10分)



第4図 米子市の地上比湿水平分布。  
(2020年11月16日 19時10分)

#### 4.2 ヒートアイランド強度と風速の関係性

ヒートアイランドは、一般的に風の弱い夜間に明瞭に出現するとされている。清田ほか(2006)は、都市部と郊外の気温差は風の時間に大きくなると述べている。そこで、ここではヒートアイランド強度と風速の関係性について明らかにする。気温データから10分毎のヒートアイランド強度を算出し、風速データとの相関分析をおこなった。その結果、第5図に米子市におけるヒートアイランド強度と風速の関係を示す。鳥取県米子市においても風速が弱くなるほどヒートアイランド強度は強くなる傾向であり、相関係数は $-0.28$ である。これは、5%有意水準を満たしている。つまり、米子市で出現するヒートアイランドは風速にも依存しているといえる。



第5図 ヒートアイランド強度と風速の関係

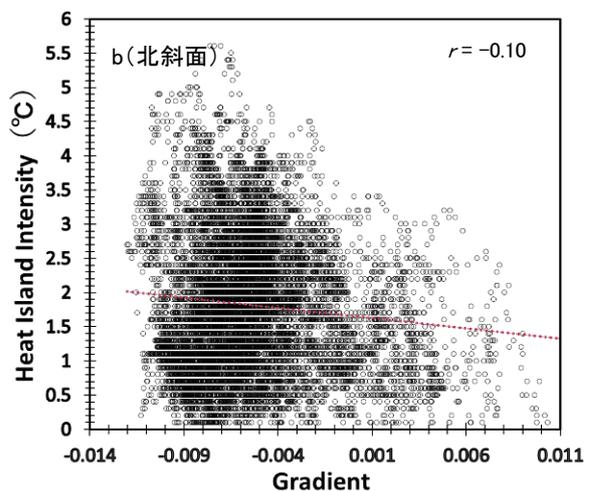
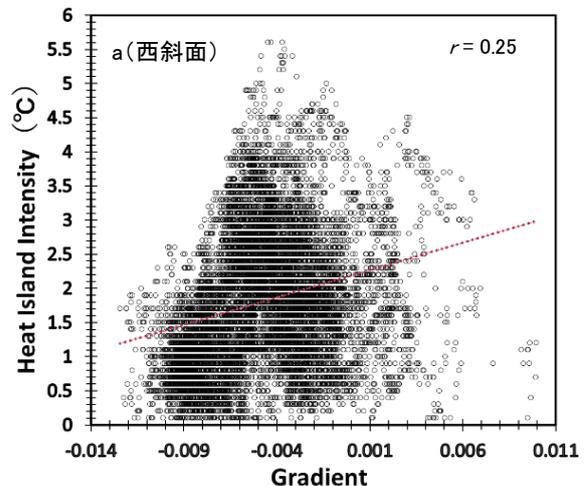
#### 4.3 ヒートアイランド強度と接地逆転層の関係性

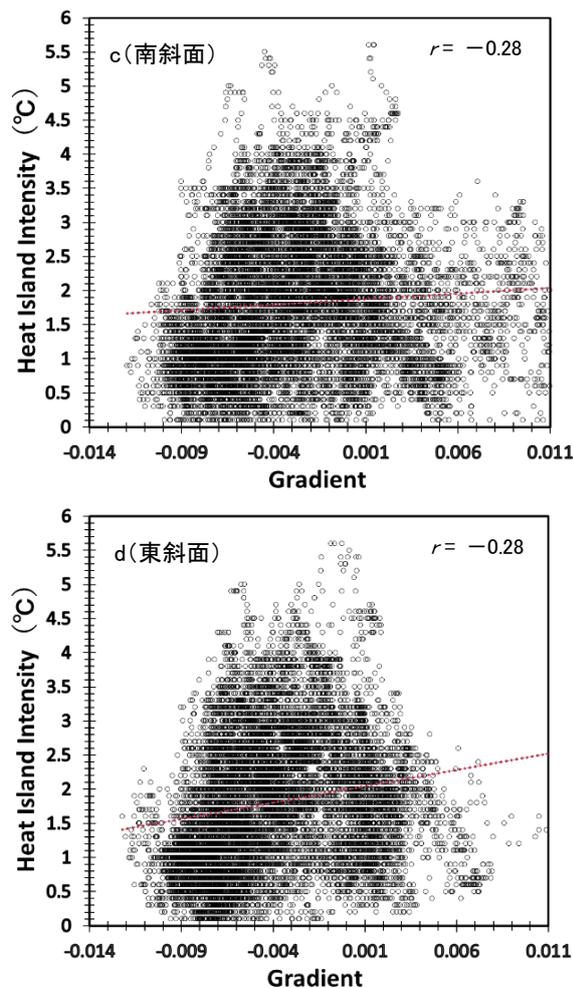
前節において米子市で出現するヒートアイランドは、風速の大小つまり大気安定度具合が重要である。そこで、郊外における鉛直方向の温位勾配を把握するため、大山斜面の温位について解析をおこなった。各観測地点の温位を算出し、各斜面の標高との傾きを求めた。傾きは各観測地点の標高と温位の回帰直線から算出してあり、以下の(3)式で表される。

$$a = \frac{\sum_{n=1}^{n_{max}} \{(x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})\}}{\sum_{n=1}^{n_{max}} (x_n - \bar{x})^2} \quad (3)$$

ただし、 $a$ :傾き、 $n_{max}$ :観測地点数(各斜面の観測地点数は5である)、 $x_n$ :温位、 $\bar{x}$ :温位の平均、 $y_n$ :観測地点の標高、 $\bar{y}$ :標高の平均をそれぞれ示す。

$a$ の値が大きければ大気は安定し、小さければ不安定を意味する。第6図に温位の傾きと米子市のヒートアイランド強度の関係を示す。相関係数は西斜面: $0.25$ (第6図a)、北斜面: $-0.10$ (第6図b)、南斜面: $0.07$ (第6図c)、東斜面: $0.18$ (第6図d)であった。市街地に最も近い西斜面においては、相関係数 $0.25$ であり、5%有意水準で有意な正の相関が認められた。つまり、西斜面に形成される安定成層とヒートアイランド強度は密接な関係がある。





第6図 ヒートアイランド強度と大気安定度の関係  
a(西斜面), b(北斜面), c(南斜面), d(東斜面)  
それぞれを示す。

## 5. まとめ

本研究では、伯耆大山斜面における大気安定度と米子市で発生するヒートアイランド現象の関係性を明らかにするため、定点型の長期的な気象観測をおこなった。それらの結果についてまとめると以下のようなになる

- ①. 秋季の好天静穏日にヒートアイランド現象が明瞭に出現した場合、都市部では郊外に比べて約4℃高い領域が沿岸部にかけて広がっていた。一方で、比湿に関しては都市部と郊外で明瞭な差は認められなかった。
- ②. 米子市のヒートアイランド強度と風速の相関係数は-0.28であり、5%有意水準で有意な負の相関が認められた。つまり、米子市で出現するヒートアイランドは風速に依存しているといえる。
- ③. 米子市のヒートアイランド強度と伯耆大山各斜面の大気安定度との相関は西斜面:0.25, 北斜面:-0.10, 南斜面:0.07, 東斜面:0.18となった。つまり、西斜面に形成される安定成層とヒートアイランド強度は密接な関係がある。

## 引用文献

- 榊原保志, 田中忍, 伊藤由香, 1998: 長野市における夜間ヒートアイランド強度に対する風速と接地逆転層の強さの関係. 天気, 45(2), 119-126
- 堀口郁夫, 小林哲夫, 塚本修, 大槻恭一, 2004: 局地気象学. 208.
- 堀正岳, 植田宏昭, 野原大輔, 2006: 筑波山西斜面における斜面温暖帯の発生頻度と時間変化特性. 地理学評論, 79-1, 26-38.
- 気象庁, 2011: 気象観測の手引き.  
気象庁. 「ヒートアイランド現象」.  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/10/qa.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/10/qa.html), (参照 2020-12-16).
- 清田忠志, 谷口明, 清田誠良, 中村安弘, 2006: 都市域におけるヒートアイランド現象の緩和対策に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, 第602号, 69-75.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island, Atmos. Environ. 7, 769-779.
- 佐藤真由美, 大橋雄太, 2011: 岡山県倉敷市における夏季ヒートアイランド現象の長期観測. Naturalistae 15, 23-30.
- 重田祥範, 大橋唯太, 2009: 岡山市を対象とした細密な気象観測によるヒートアイランド強度の解析. 天気, 56, 37-48.
- 首藤治久, 杉山順史, 泉浩光, 岡建雄, 1996: 土地利用形態と気温形成に関する研究. 日本建築学会計画系論文集, 第479号, 49-56.
- 菅原広史, 成田健一, 三上岳彦, 本條毅, 石井康一郎, 2006: 都市内緑地におけるクールアイランド強度の季節変化と気象条件への依存性. 天気, 53, 393-404.
- 武市伸幸, 2002: 高知県南国市のヒートアイランドと形成要因. 天気, 49(1), 47-56.
- 植田宏昭, 小堀祐人, 大庭雅道, 井上知栄, 釜江陽一, 池上久通, 竹内茜, 石井直貴, 2011: 筑波山東西南北4斜面における高度100m間隔
- 山本桂香, 2005: 都市におけるヒートアイランド現象. 科学技術動向, 2-34.
- 米子市ホームページ電子資料閲覧,  
<https://www.city.yonago.lg.jp/secure/33487/20200430.pdf>.
- 吉野正敏, 1982: 筑波研究学園都市の低温と接地逆転層の発達. 筑波大学水理実験センター報告, (6), 35-44.

# 河川堤防における土壌乾燥過程に基づく蒸発量推定モデル構築

\*南勇銘<sup>1</sup> 秋永拓弥<sup>2</sup> 竹下祐二<sup>1</sup> 岩田徹<sup>1</sup>

1:岡山大学大学院環境生命科学研究科 2:岡山大学環境理工学部

## 1 はじめに

河川増水時の堤防の安全性評価のため、堤体内の水分移動のモデル化が必要とされている。堤体内の水分移動を支配する物性値の把握に必要な、上方への境界面流出である蒸発量の推定精度向上を本研究の目的とし、種々の蒸発量推定方法に現地気象観測データを適用した。本報告では蒸発量推定式のバルク式中のパラメータである蒸発効率と交換速度をそれぞれ土壌含水率と風速の関数で表し、それらを用いて得られた蒸発量推定結果について報告する。

## 2 研究方法

### 2.1 蒸発量推定方法

#### 2.1.1 バルク法

接地気層内の1高度における風速と、その高度および地表面における比湿の差によって蒸発量を表す方法である。蒸発量推定には以下のバルク式を用いる。

$$E_b = \rho\beta C_H U [q_{sat}(T_s) - q_{air}] \quad (1)$$

$E_b$	: 蒸発量 [kg/m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	: 大気密度 [1.225 kg/m <sup>3</sup> ]
$\beta$	: 蒸発効率
$C_H$	: バルク輸送係数
$U$	: 風速 [m/s]
$q_{sat}(T_s)$	: 地表面飽和比湿
$T_s$	: 地表面温度
$q_{air}$	: 大気の比湿

蒸発効率 $\beta$ は地表面の蒸発のしやすさを表し、0~1の値をもつ。水面や積雪面では $\beta \equiv 1$ であり、全く蒸発のない乾いた面では $\beta = 0$ である。また、風速と顕熱に対するバルク輸送係数 $C_H$ の積 $C_H U$ は交換速度といい、顕熱輸送において上下方向に空気塊が交換される速度を意味する。

#### 2.1.2 空気力学的傾度法

乱流拡散係数と比湿の鉛直勾配を用いて蒸発量を算出する方法である。比湿の鉛直勾配

の算出のため気温と湿度を2高度で測定する必要がある。

$$E_g = -\rho K_e \frac{\Delta q_{air}}{\Delta z} \quad (2)$$

$$K_e = \frac{\kappa u^* z}{\phi(z/L)} \quad (3)$$

$E_g$	: 蒸発量 [kg/m <sup>2</sup> /s]
$K_e$	: 乱流拡散係数 [m <sup>2</sup> /s]
$z$	: 代表高度 [m]
$\Delta z$	: 温湿度測定高度差 [m]
$u^*$	: 摩擦速度 [m/s]
$\kappa$	: カルマン定数 [0.4]
$\phi(z/L)$	: 大気安定度関数

#### 2.1.3 土壌水分減少法

土壌含水率の時間減少速度を算出し、単位時間単位面積あたりの蒸発量を算出する方法である。ただし、大気への蒸発に供給される水分を保持する土壌層の深さは0.2 mとし、それより下層との水分のやりとりはないものと仮定した。

$$E_r = \frac{\Delta\theta \times 0.2 \times \rho_w}{\Delta t} \quad (4)$$

$E_r$	: 蒸発量 [kg/m <sup>2</sup> /s]
$\theta$	: 土壌含水率 [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	: 水の密度 [1000 kg/m <sup>3</sup> ]

## 2.2 現地観測データ

岡山県倉敷市真備の小田川堤防 5.6 km 地点右岸川表側（以下、ODR と称する）にて気象観測を行った。測定項目は風速・風向、気温・湿度、地温、土壌含水率、雨量である。気温と湿度は2高度で測定し、地温と土壌含水率は地中深度約5 cmで測定をしている。測定間隔は1分毎で、本解析に使用したデータは2020年7月6日から8月31日までの30分値である。

### 2.3 蒸発の三段階分類

土壌の乾燥過程は大きく三つの段階に分けられ、各段階における蒸発の機構は異なる。第

一段階は蒸発の初期段階で、土壌表面が十分に湿潤しており水の蒸発はほとんど地表面で起こる。第二段階は第一段階と第二段階の移行期で、双方の蒸発機構が共存している。地表面の乾燥が進み、表層土壌内で蒸発が起こる。第三段階では、表層土壌での蒸発は起こらなくなる。

広田・福本 (2009) によると、地表面の湿潤状態は先行降雨指数 API によって定性的に分類することが可能である。J 日目の先行降雨指数  $API_j$  は次のように表す (式 5)。

$$API_j = K_j(API_{j-1} + Pr_j) \quad (5)$$

$API_{j-1}$  : 前日の API [mm]

$Pr_j$  : 当日の降水量 [mm]

$K_j$  : 低減係数

$$K_j = \exp(-Ep_j + W_m) \quad (6)$$

$Ep_j$  : 当日の可能蒸発量 [mm]

$W_m$  : 蒸発可能最大深さ [20 mm]

広田・福本 (2009) に倣って、 $API \geq 30$  の期間を第一段階、 $30 > API \geq 5$  の期間を第二段階、 $5 > API$  の期間を第三段階とした。本研究ではパラメータ算出のため、以下の期間を API に基づいて三段階に分類した (表 1)。

表 1 観測データの各段階分類

段階	期間
第一段階	2020 年 7/6~7/17
第二段階	2020 年 7/18~7/22 2020 年 8/2~8/8
第三段階	2020 年 8/9~8/31

## 2.4 蒸発効率の算出

### 2.4.1 第二段階から第三段階

第二段階から第三段階への移行期における土壌含水率と蒸発効率の関係を確認する。解析には 2020 年 8 月 2 日から 8 月 31 日までのデータを使用した。

近藤 (1994) によると第三段階では土壌中の水が小空隙に点在するため、蒸発量は大気条件に依存しなくなるとされている。そこで、土壌水分減少法とバルク法を組み合わせるバルク式中のパラメータを算出した。土壌水分減少法による蒸発量とバルク式中の  $\beta C_H$  を除いた項の日積算値同士の比から  $\beta C_H$  を算出した (式 7)。

$$\beta C_H = \frac{E_r}{\rho U [q_{sat}(T_s) - q_{air}]} \quad (7)$$

算出した  $\beta C_H$  と土壌含水率の日平均の関係を図 1 に示す。その近似曲線をもとに、第二段階から第三段階にかけての蒸発効率の式を導出した (式 8)。ただし  $C_H = 0.01$  とした。

$$\beta(\theta)_{2,3} = \frac{0.666}{1 + \exp(6.69 - 27.2\theta)} \quad (8)$$

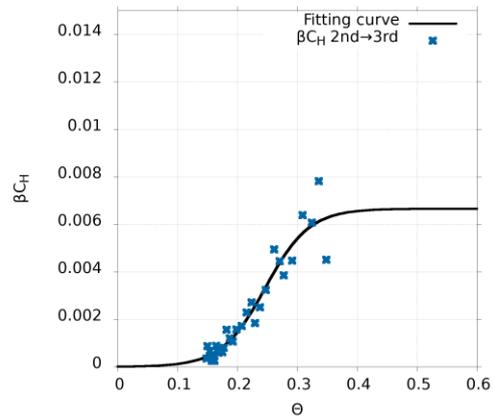


図 1 第二・第三段階の  $\beta C_H$  と含水率の関係

### 2.4.2 第一段階から第二段階

続いて、第一段階から第二段階への移行期における土壌含水率と蒸発効率の関係を確認する。解析には 2020 年 7 月 6 日から 7 月 22 日までのデータを使用した。

Campbell (1986) によると第一段階の蒸発量は含水率によらず、地表と大気との間の水蒸気濃度差と大気境界層抵抗に依存するとされている。そこで、空気力学的傾度法とバルク法を組み合わせるバルク式中のパラメータを算出した。傾度法による蒸発量とバルク式中の  $\beta C_H$  を除いた項の日積算値の比から  $\beta C_H$  を算出した (式 9)。ただし、式 8 と接するように 0.0066 を y 切片として加えている。

$$\beta C_H = \frac{E_g}{\rho U [q_{sat}(T_s) - q_{air}]} + 0.0066 \quad (9)$$

算出した  $\beta C_H$  と土壌含水率の日平均の関係を図 2 に示す。その近似曲線をもとに、第一段階から第二段階にかけての蒸発効率の式を導出した (式 10)。ただし、 $C_H = 0.01$  とした。

$$\beta(\theta)_{1,2} = \frac{0.305}{1 + \exp(227 - 679\theta)} + 0.66 \quad (10)$$

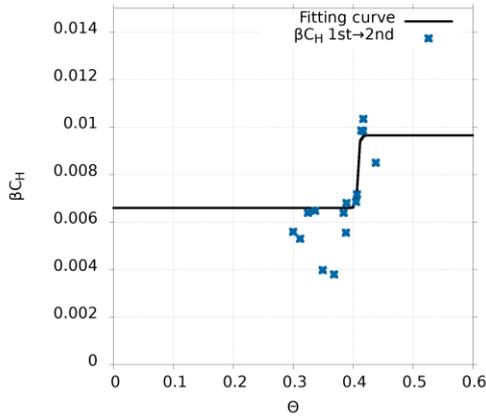


図 2 第一・第二段階の $\beta_{CH}$ と含水率の相関

式 8 と式 10 の曲線が接するときの土壌含水率 $\theta = 0.40$ を二式の使い分けの境界値とした。以上の解析により蒸発効率 $\beta$ は土壌含水率の関数で表せる(式 11)(図 3)。

$$\beta(\theta) = \begin{cases} \beta_{1,2} = \frac{0.305}{1 + \exp(227 - 679\theta)} + 0.66 & (\theta > 0.40) \\ \beta_{2,3} = \frac{0.666}{1 + \exp(6.69 - 27.2\theta)} & (\theta \leq 0.40) \end{cases} \quad (11)$$

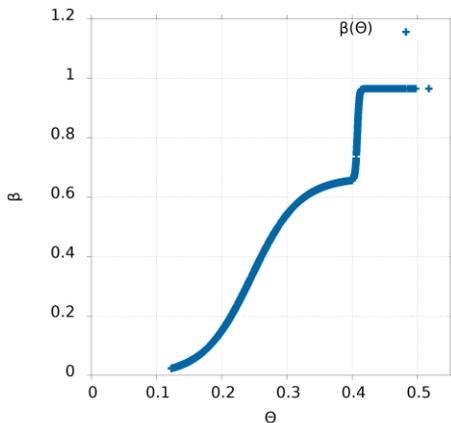


図 3 蒸発効率 $\beta(\theta)$ と土壌含水率の相関

## 2.5 交換速度の算出

交換速度の算出には第一・第二段階に相当する 2020 年 7 月 6 日から 7 月 22 日、8 月 2 日から 8 月 8 日までのデータを使用した。ただし、降水が観測された日と大気-大気間、地表-大気間の比湿の勾配の変動が同期しない日のデータは解析の対象から除外した。

前項で算出した蒸発効率、地表飽和比湿と大気中比湿の差、大気密度の積と傾度法による

蒸発量との比から交換速度を算出する(式 12)。ただし、6:00~18:00 の 30 分データの平均値(日中平均値)同士の比を使用する。

$$C_H U = \frac{E_g}{\rho \beta(\theta) [q_{sat}(T_s) - q_{air}]} \quad (12)$$

算出した $C_H U$ と土壌含水率の日中 12 時間平均の相関を図 4 に示す。この線形一次近似式より交換速度と風速の関係式(式 13)を得た。

$$C_H U = 0.0104U + 0.0033 \quad (13)$$

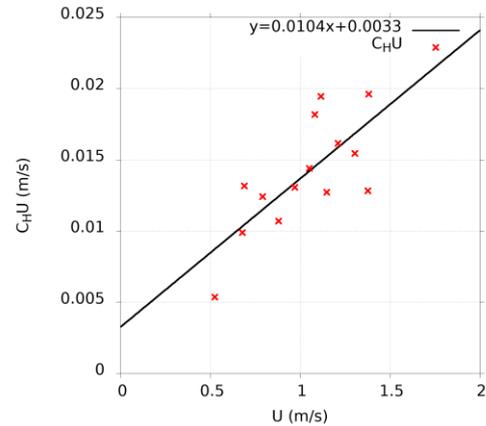


図 4 風速と交換速度の関係

## 3 蒸発量推定結果と考察

図 5 の上から 2 つのグラフに降水量、土壌含水率 $\theta$ 、蒸発効率 $\beta(\theta)$ の時系列を示している。 $\beta(\theta)$ は降水が観測されている期間では 1 程度になっている。この値は水面での蒸発効率におおむね等しく、降水によって地表が湿潤していることを表している。降水直後では土壌含水率の減少に伴って蒸発効率は 0.6 程度にまで急激に減少し、しばらく横ばいになる。それ以降降水が観測されていない場合、蒸発効率は土壌含水率の減少に伴って緩やかに減少する。

前章で導出したパラメータ $\beta(\theta)$ 、 $C_H U$ を用いたバルク式によって算出した蒸発量を $E_b$ と表す。傾度法による蒸発量 $E_g$ 、土壌水分減少法による蒸発量 $E_r$ 、バルク法による蒸発量 $E_b$ の時系列変動を図 5 の下から 3 つのグラフに示している。 $E_b$ は第一・第二段階に相当する 7 月 6 日から 8 月 8 日の降水のない日の日中のピーク値が 0.8~1.0 kg/m<sup>2</sup>/h 程度である。これは傾度法による蒸発量に近い値であり、日中のピーク値の推移も傾度法による蒸発量と同期している期間が長い。

8月上旬の第二段階に相当する期間において、 $E_b$ は日中のピーク値が0.6~0.8 kg/m<sup>2</sup>/h程度である。8月中旬に蒸発効率の減少が前後の期間に比べて大きいため、それに伴い蒸発量も大きく減少し、下旬に入った段階では日中ピーク値が0.2 kg/m<sup>2</sup>/h程度にまで減少している。この変動の仕方は土壌水分減少法による蒸発量に近い。

したがって、本研究で提案したバルク法では、第一から第二段階、第二から第三段階にかけてそれぞれの期間で蒸発効率のパラメータ化のために用いた推定手法による蒸発量と同程度の蒸発量を得られると考えられる。

#### 4 まとめ

先行降雨指数による地表面湿潤度の分類に基づいて、バルク式中の蒸発効率を土壌含水率の関数、交換速度を風速の関数としてパラメータ化した。その結果、観測地点の地表面の湿潤状態によって変動するパラメータを得た。

算出した蒸発効率と交換速度を用いたバルク法による蒸発量は、パラメータの算出時に用

いた推定方法から得られる蒸発量と同期して変動し、日中ピーク値も同程度になるケースが多いことを確認した。本研究によって、バルク法を用いて土壌乾燥過程に基づいた湿潤度の異なる地表面での蒸発量推定が可能になると考えられる。

#### 参考文献

G.P.Campbell (1986) : パソコンで学ぶ土の物理学

近藤純正・柳原あずさ・三枝信子 (1993) : 土壌の蒸発パラメータに関する実験的研究, 天気 40(12), 873-879

近藤純正 (1994) : 水環境の気象学

広田知良・福本昌人 (2009) : ルーチン気象観測データからの裸地面の蒸発効率の推定と土壌水分データを用いないパラメータ化, 農業気象 65(4), 375-386

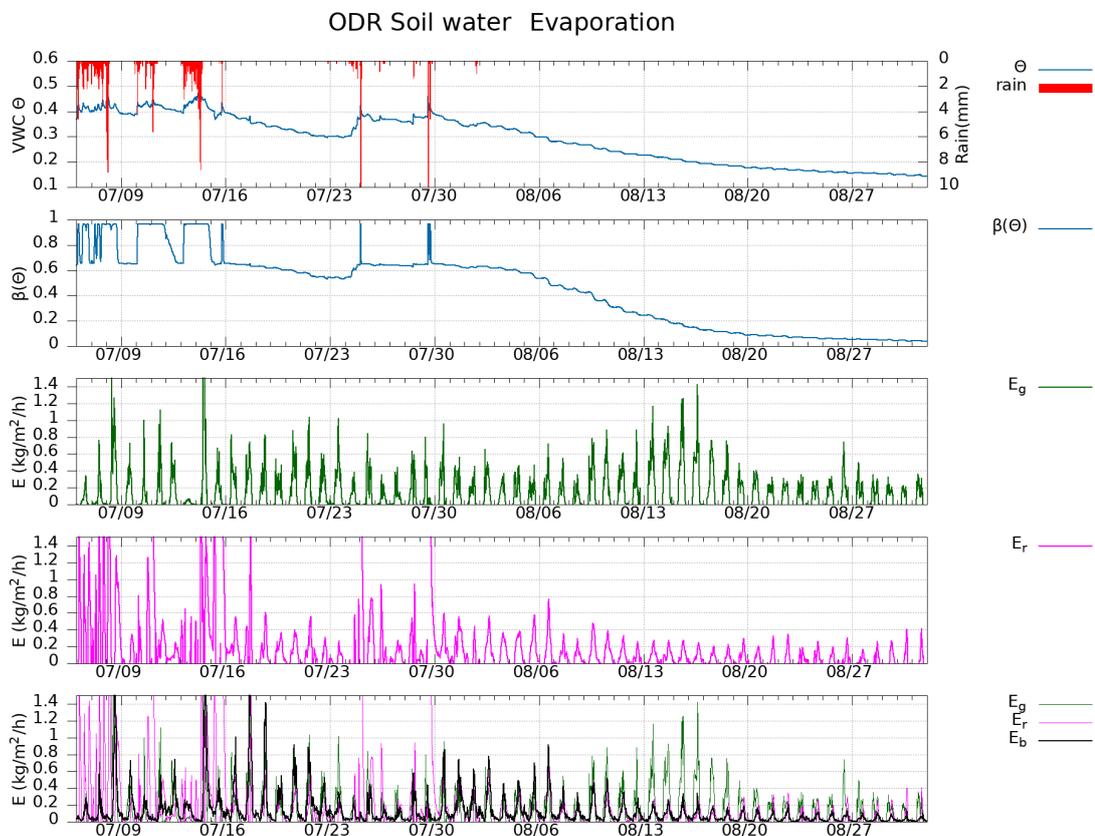


図 5 蒸発量推定結果と蒸発効率の時系列変動

# UAV 及び光学データを用いた沿岸藻場の識別解析

\*白石朗光<sup>1</sup>, 竹内元春<sup>2</sup>, 齋藤光代<sup>1</sup>, 小野寺真一<sup>3</sup>, 岩田徹<sup>1</sup>

1 岡山大学大学院環境生命科学研究科, 2 岡山大学環境理工学部,

3 広島大学大学院先進理工系科学研究科

## 1. はじめに

藻場 (seaweed bed) とは, 水中に生育する植物 (海草及び海藻) が疎生から密生して生えている広い群落あるいは2つ以上の群落を含む広い場のことと定義されている (新井, 2002)。これら, 沿岸浅海域に繁茂する藻場は, 海域の生態系の多様性を代表するものとして知られている (寺脇ら, 2005)。さらに, 開発による浅海域の消失や磯焼けによる藻場の衰退が懸念されている一方で, 近年は再生努力により回復している海域もみられる (綿貫, 2002; 寺脇ら, 2002)。本研究では, 操作や画像データ取得が近年簡便化している UAV (ドローン) を用いて上空から取得した沿岸域藻場の空間分布と現地での地上踏査結果との比較解析を通じて, 藻場生態系の時空間動態の理解を目的としている。

干潟に繁茂する藻場を干上がり藻場, 海水中に繁茂する藻場を沈水藻場として定義し, 広島県尾道市生口島の五本松沿岸を対象地として2019年7月と2020年7月の観測で得られたデータを基に解析を行った。本発表では, 正規化植生指標 *NDVI*: Normalized Difference Vegetation Index を用いた干上がり藻場の解析結果の紹介を行う。さらに, 沈水藻場を識別する指標 *NSWI*: Normalized Sea Weed Index を新たに開発し, ランベルト・ベールの法則に基づいた海水中の光の減衰も考慮した解析結果も紹介する。

## 2. 使用機器及びデータ

### 2.1 使用機器

UAV には DJI 社 Phantom4 Pro+ を使用し, 地上 100 m から, 対象地 (図1) の沿岸域を水平飛行 (2~3 往復) しながら5秒毎に空撮し, 取得した複数の RGB 画像を結合することにより SfM ソフトウェアの Agisoft 社 Metashape Professional 1.6.4 を用いて可視オルソモザイク画像 (図2a) を作成した。さらに, UAV に搭載されたカメラで撮影した可視画像の他に, 近赤外バンドのデータが取得可能な近赤外カメラ, BIZWORKS 社 Yubaflex を用いて取得した画像からフォールスカラー画像の近赤外

オルソモザイク画像も作成した (図2b)。照度計には Onset 社 HOBO MX ペンダントロガーを使用し, 海面上と海水中 (海底) の照度をそれぞれ観測した。解析には GIS ソフトウェアの QGIS 3.4 (フリー) と ESRI 社 ArcGIS pro 2.6.1 を用いた。



図1 広島県生口島五本松沿岸地図.

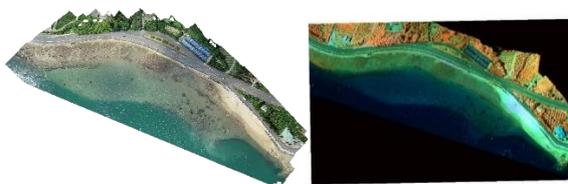


図2 a (左図) 可視オルソモザイク画像, b (右図) 近赤外オルソモザイク画像.

## 2.2 データと方法

### 2.2.1 消散係数の算出

沈水藻場を空撮によって観測した場合, カメラに記録された情報は, 海水によって減衰された, 藻場やその他周囲の底質からの太陽光由来の反射光である。また, 海水 (水) による光の減衰はランベルト・ベールの法則に従い指数関数的に変化する (図3)。よって, 照度と現地でも実測された潮位を用いて式1より可視光の消散係数 ( $\epsilon$ ) を算出した。さらに算出した消散係数と潮位の散布図 (図4a) から指数近似式 (式2) が得られた。

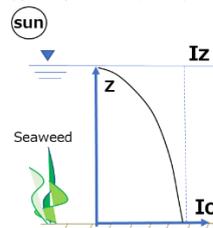


図3 海水中的の光の減衰イメージ.

$$I_0 = I_z \times EXP(-\varepsilon \times z) \dots (1)$$

$I_0$  = 海底照度 [lux/ft<sup>2</sup>]

$I_z$  = 潮位が  $z$  の海面上照度 [lux/ft<sup>2</sup>]

$\varepsilon$  = 消散係数 [m<sup>-1</sup>]

$z$  = 潮位 [m]

また、消散係数は波長により異なる (増田, 1970)。よって、可視光とは別に近赤外の消散係数を近赤外のオルソモザイク画像の放射輝度から算出した。近赤外のオルソモザイク画像から極浅海域かつ沈水藻場の繁茂していない区画を任意で指定し潮位の最も低い観測データ (約 0.3 m) を基準データ ( $I_0$ ) として、式1を用いて消散係数を算出した。さらに算出した消散係数と潮位の散布図 (図4b) から指数近似式 (式3) が得られた。

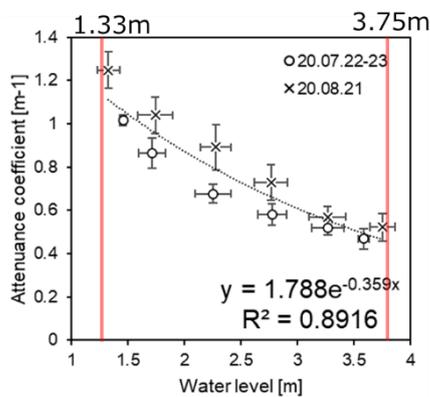


図4a 照度と潮位から算出した消散係数と潮位変化.

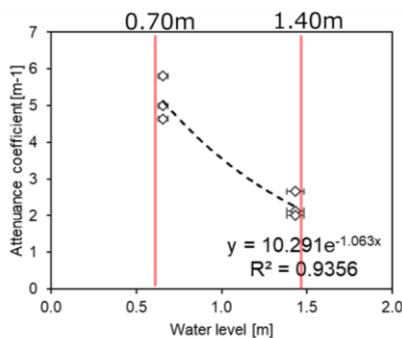


図4b 赤外オルソモザイク画像と潮位から算出した消散係数と潮位変化.

$$y = 1.788 \times EXP(-0.359 \times x) \dots (2)$$

$$y = 10.291 \times EXP(-1.063 \times x) \dots (3)$$

$x$  = 潮位 [m]

算出した可視及び近赤外の各消散係数の補正適応条件を、以下の通り、式2及び式3の導出に使用した潮位の最小値及び最大値とした。

可視光 1.33 m ≤ 潮位 ≤ 3.75 m

近赤外 0.70 m ≤ 潮位 ≤ 1.40 m

## 2.2.2 藻場識別指標

干上がり藻場と沈水藻場を識別するために  $NDVI$  と  $NSWI$  を用いて解析を行った。

$NDVI$  とは、植生の有無や活性度を表す指標で、可視光赤色バンド ( $RED$ ) と近赤外バンド ( $NIR$ ) の反射率の差分を正規化した指標であり、以下のように表現される。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots (4)$$

$NDVI$  は一般的には-1 から 1 の値をとる。本研究では、近赤外カメラで取得した近赤外 ( $NIR$ ) と赤 ( $RED$ ) の DN 値を専用のソフトウェア (Yubaflex3.1) で放射輝度に変換した値を用いた。

沈水藻類を識別する指標として、 $NDVI$  の式を参考に新たに開発した  $NSWI$  を定義する (式5)。 $NSWI$  は UAV に搭載されたカメラで取得した可視光バンド ( $Red$ ,  $Green$ ,  $Blue$ ) の  $Green$  と  $Blue$  の各混色比  $vGr$  (visible Green ratio) 及び  $vBr$  (visible Blue ratio) を用いる。さらに、近赤外カメラで取得した近赤外バンド ( $NIR$ ) の放射輝度と近赤外バンドと同時に取得できる可視光バンド ( $RED$ ,  $GREEN$ ) の放射輝度から算出される  $NIR$  の混色比  $Nr$  ( $NIR$  ratio) を用いて以下のように表現する。

$$NSWI = \frac{Nr - (vGr - vBr)}{Nr + (vGr - vBr)} \dots (5)$$

$$Nr = \frac{NIR}{NIR + RED + GREEN}$$

$$vGr = \frac{Green}{Red + Green + Blue}$$

$$vBr = \frac{Blue}{Red + Green + Blue}$$

本研究で提案する指標  $NSWI$  は、沈水藻類を  $NDVI$  のように簡便で理解しやすい式で藻類を識別できるように考案したものである。また、観測時の潮位が消散係数の補正適応条件に当てはまる場合、算出した消散係数を基に潮位による光の減衰を、式1を用いて補正した各混色比から  $NSWI$  を算出する。

次に、海陸判別として、 $Red$  と  $Green$  の比 (式6) を用いる。式 (6) の値の範囲が 0.8 ~ 0.95 内を沈水藻場の繁茂する極浅海域として陸域と差別化した。

## Red / Green . . . (6)

これらの指標を用いて、干上がり藻場及び沈水藻場を以下のように任意の閾値を設定し求めた。

干上り藻場 (Beach seaweed)

$$= NDVI > -0.25$$

沈水藻場 (Submarine seaweed)

$$= (NSWI > 0.25) \times (0.8 < Red/Green < 0.95)$$

干上り藻場及び沈水藻場の解析値がそれぞれ1になるピクセルに着色してそれぞれの藻場を表現した。

## 3. 結果

### 3.1 消散係数による補正

藻場の識別解析に用いた観測データの諸元と、式2及び式3を用いて算出した各消散係数を表1に示す。それぞれ、観測時の潮位が異なり、期間Aは可視光の補正のみを行い、期間Bは近赤外の補正のみを行う。期間Cは補正を行わない。また、補正結果の検証方法として、オルソモザイク画像中の沈水藻場上約100mで画像切断面解析を行った。隣り合う3本のライン上で断面解析を行い、それぞれ平均を取った(図5)。

図6は、観測期間Aの  $vGr$  及び  $vBr$  の補正結果である。補正後は、全体的に値が増幅していることが分かる。さらに、藻場と周囲の海域との差を補正前より明瞭に区別することができていることが分かる。図7は、観測期間Bの  $Nr$  の補正結果である。 $Nr$  も可視光と同様に全体的に値が増幅していることが分かる。さらに、沈水藻場上では周囲の海域よりも顕著に値が増幅していることが分かる。しかし、 $Nr$  は沈水藻場が示す値と周囲の海域が示す値の差が元々小さいため、補正した  $Nr$  値は、可視光ほど周囲の海域との差を明瞭化することができなかった。

表1 解析に用いた観測データ。

期間	観測日	潮位(近赤外)[m]	潮位(可視)[m]	$\epsilon$ (NIR)[ $m^{-1}$ ]	$\epsilon$ (可視)[ $m^{-1}$ ]
A	2019/7/15	0.64	1.59	-	1.01
B	2020/7/4	1.00	1.00	3.54	-
C	2020/7/22	0.30	0.30	-	-

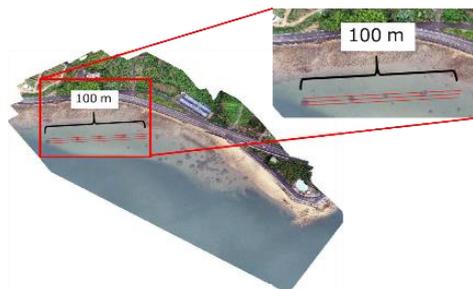


図5 画像切断面解析イメージ。

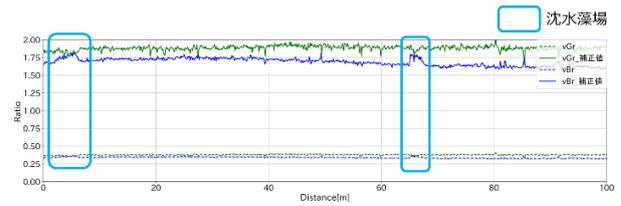


図6 期間Aにおける可視光(緑と青)補正結果。

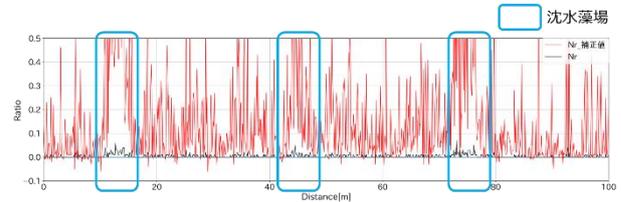


図7 期間Bにおける近赤外の補正結果。

### 3.2 藻場識別結果

図8から図10は、 $NDVI$ を用いた干上がり藻場と $NSWI$ を用いた沈水藻場の解析結果である。

図8は期間Aの解析結果で、 $NSWI$ 解析において  $vGr$  と  $vBr$  は補正値を用いている。ほとんどの干上り藻場を識別できていた。さらに、沈水藻場は西側の一部のみで識別できていた。

図9は期間Bの解析結果で、 $NSWI$ 解析において  $Nr$  は補正値を用いている。干上り藻場、沈水藻場ともに識別できていた。沈水藻場の識別結果について、海域のほとんどのピクセルが藻場として識別されていた。しかし、藻場の海域は青で着色されたピクセルの密度が高くなっていることが分かる。

図10は期間Cの解析結果で、 $NSWI$ 解析において消散係数による補正は行っていない。ほとんどの干上り藻場を識別できていた。沈水藻場もほとんど識別できており、A~Cの3期間の中では最も明瞭な結果であった。

図9の期間Bの干上がり藻場の結果と図10の期間Cの干上がり藻場の結果を比較すると、ほとんど同時期にもかかわらず、全体的に図9の期間Bの方が干上がり藻場を識別できていなかった。

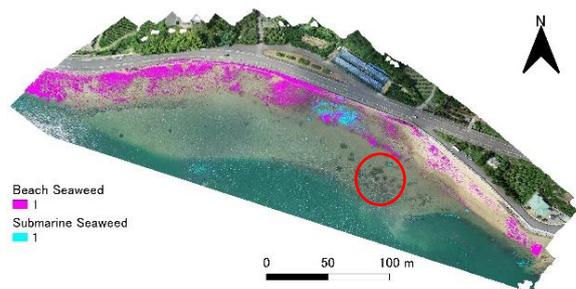


図8 期間Aでの藻場解析結果。

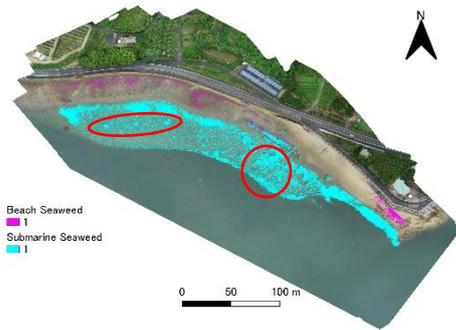


図9 期間Bでの藻場解析結果.

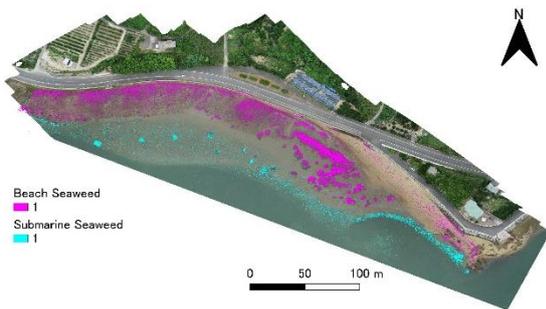


図10 期間Cでの藻場解析結果.

### 3.2 考察

干上り藻場は *NDVI* を用いることで識別可能であることが示された。これは、藻類が近赤外の波長帯の電磁波をよく反射し、赤色の波長帯の電磁波の反射は近赤外の反射より弱いという陸上の植生と同様の反射特性を持つためと考えられる (図 11)。しかし、算出した干上り藻場のほとんどの *NDVI* 値は負の値を示した。これは、本研究で使用した近赤外カメラの感度の特性によるものと考えられる。本研究で使用している近赤外カメラは、近赤外バンドでは 850 nm 付近、赤色バンドでは 600 nm 付近で強い感度を持っているのに対し (図 12)、藻類は近赤外では 700 nm 付近で強い反射を示し、赤では 660 nm 付近で弱い反射を示している (図 11)。さらに、現地観測時、干上り藻場のほとんどは藻場表面が海水で濡れており、少なからず海水による電磁波の吸収があったと考えられる。

沈水藻場は、新たに開発した *NSWI* を用いて識別することができ、*NSWI* の沈水藻場の識別可能性が示された。これは、藻類が持つ近赤外波長の電磁波をよく反射する特性と、海水中の藻場は緑色の波長帯の電磁波の反射が弱く、青色の波長帯の電磁波の反射が強いが大小関係は、 $G > B$  という特性 (図 6) を利用することで藻場を識別できたと考えられる。さらに、可視光と近赤外の消散係数からデータを補正することで、*NSWI* 解析での沈水藻場の識別精度

を向上できる可能性も示唆された。

今後の課題としては、本研究では沿岸浅海域を対象としているため、沈水藻場の識別解析において、濁度の影響も考慮した解析が必要と考える。さらに、干上がり藻場及び沈水藻場の共通の課題として、現地観測時の日射量の差が観測画像データに与える影響が考えられる。特に期間Bの干上がり藻場の識別範囲に、期間Cの干上がり藻場と比較して差があるのは、日射量の違いによる影響が考えられる。

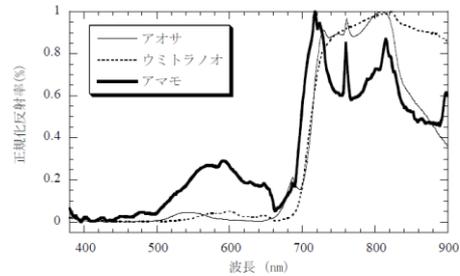


図11 藻の分光反射特性 (作野ら, 2009).

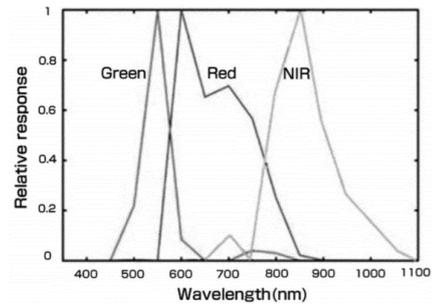


図12 Yubaflex の波長別感度 (濱ら, 2018).

### 参考文献

- 新井章吾, 2002, 藻学, 21 世紀初頭の藻学の現状, 日本藻類学会, pp85-88.
- 作野祐司, ルイ ソチェー, 國井秀伸, 田中義和, 國貞栄二, 若松芳樹, 2009, 気球搭載ビデオカメラによる中海のアマモ場の植被推定, 水工学論文集, 第 53 巻, pp1357-1362.
- 寺脇利信, 新井章吾, 敷田麻実, 2002, 藻場回復, 21 世紀初頭の藻学の現状, 日本藻類学会, pp89-91.
- 寺脇利信, 吉田吾郎, 内田基晴, 浜口昌巳, 2005, 瀬戸内海の干潟・藻場の現状と順応的管理, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp83-88.
- 濱侃, 田中圭, 田寛之, 近藤昭彦, 2018, ドローンに搭載可能な近赤外カメラの比較と検討: RedEdge と Yubaflex, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 38, No. 5, pp451-457.
- 増田譲太郎, 1970, 海洋物理 I, 東海大学出版会, pp. 374.
- 綿貫啓, 2002, 水産工学と藻場研究, 水産工学, Vol. 39, No. 1, pp1-4.

# 非階層クラスター分析を用いた日本の熱中症リスク・マップの作成

\*岩元 勇樹 (岡山理科大学大学院 生物地球科学研究科)  
大橋 唯太 (岡山理科大学 生物地球学部)

## 1. はじめに

2020年8月、静岡県浜松市で過去のタイ記録である日最高気温41.1°Cを観測したことは、記憶に新しい。温暖化や高齢化の影響で今後さらに熱中症被害が拡大すると予想され、熱中症の予測と対策が喫緊の課題である。熱中症リスクの評価に関する研究には、気温と熱中症死亡率の關係に着目したものや(例えば、藤部,2013;星ら,2010)、WBGT(湿球黒球温度)のような熱ストレス指標を用いた国内での分布(福井,2010)、さらには将来予測(鈴木・日下,2015)をおこなった研究などが挙げられる。一方で欧米では、WBGTとは異なるUTCI(Universal Thermal Climate Index)という熱ストレス指標を用いたリスク評価も盛んにされている(Napoli et al.,2018;Zare et al.,2018;Provençal et al.,2016)。

上述の先行研究では、熱中症リスクを10万人あたりの粗死亡率や年齢調整死亡率を用いて指標化している。その熱中症リスクの地域性を生み出す因子として、気候要素が考えられる。国内における気候の地域性は、気温や降水量、日照率をもとに区分した関口(1959)などの研究で明らかにされてきた。また、吉野(2003)は、生気候(植生や動物相の生物学的特徴など)の観点から、日本全体をいくつかのグループに分類できることを示した。しかし、熱中症リスクと気候区分の關係や、気象以外の要因、例えば人間活動との関連性など様々な視点から整理された研究は多くない。そこで本研究では、気温・WBGT・UTCIを熱ストレス指標とした。熱中症リスクの気候学的な地域差を明らかとし、古典的気候区分や、既述の気象要素以外の因子との比較を試みる。

## 2. 方法

### 2.1 熱中症患者

47都道府県を対象地域とし、解析対象期間には2010~2019年(10年間)の夏期7~9月を選んだ。熱中症患者では、総務省消防庁HP([http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9\\_2.html](http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9_2.html))で公開された熱中症による救急搬送人員数データを用いた。この熱中症救急搬送数は、都道府県別・年齢階級別の粗搬送率(人口10万人あたり)へと換算した。そこから年齢階級別人口の経年変化と地域差の両方の影響を排除するため、次に示す年齢調整を施した搬送率(熱中症搬送率

と呼ぶ)を算出する。

年齢層kの搬送率 $m_k$ は $m_k=d_k/p_k$ で定義される。 $d_k$ は年齢層kの救急搬送者数、 $p_k$ はその人口であり、いずれも地域(都道府県)ごと、かつ年ごとの値である。年齢層は、0~6歳の新生・乳幼児、7~17歳の少年、18~64歳の成年、65歳以上の高齢者の4階級に区分した。人口の年齢構成が年・都道府県によって違う影響を除くため、標準的な人口構成 $P_k$ に基づく調整搬送率Mを

$$M = \frac{\sum_k d_k(P_k/p_k)}{\sum_k P_k} = \frac{\sum_k m_k P_k}{\sum_k P_k} \quad (1)$$

で定義した。 $P_k$ としては、藤部(2018)の解析に倣い、近年2015年の全国の年齢階級別人口を、基準人口として用いた。このように求めた人口10万人あたりの年齢調整搬送率を本研究では熱中症リスクとみなした。

### 2.2 熱ストレス指標

本研究で熱中症リスクの評価に用いた熱ストレス指標は、①日最高気温、②日最高WBGT、③日最高UTCIとした。WBGTは、熱中症の予防を目的として1954年にアメリカで提案された指標である。単位は気温と同じ摂氏(°C)で示されるが、その値は気温とは異なる。人体と外気の熱の交換に着目した指標で、乾球温度( $T_a$ )・湿球温度( $T_w$ )・黒球温度( $T_g$ )から、以下の式で計算される(Yaglou and Minard, 1957)。

$$WBGT=0.7 \times T_w + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_a \quad (2)$$

WBGTの値に対応する熱ストレスレベルは、日本生気象学会などによって次のように定められている。

WBGT 31°C以上	危険
WBGT 28~31°C	嚴重警戒
WBGT 25~28°C	警戒
WBGT 25°C未満	注意

UTCIは、人体の熱収支や温熱生理プロセスを考慮したマルチノードモデルとよばれる物理モデルから算出し、Brödeほか(2012)により求められた近似式に、気温・黒球温度・風速・相対湿度を代入することで計算できる。熱ストレスカテゴリーは、表1のように定められている。

表1 UTCI の熱ストレスカテゴリー  
([http://www.utci.org/utci\\_doku.php](http://www.utci.org/utci_doku.php) より一部抜粋)

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress

### 2.3 気象データ

黒球温度と WBGT は、環境省が公開する熱中症予防サイト ([http://www.wbgt.env.go.jp/record\\_dataphp](http://www.wbgt.env.go.jp/record_dataphp)) の暑さ指数 (WBGT) の観測値を用いた。また、UTCI の算出で必要になる気温・風速・相対湿度は、気象庁が公開する気象官署の観測値 (<http://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php>) を用いた。黒球温度は、各都道府県の気象官署によって観測実施期間が異なるため、一部の都道府県では推定値を用いて解析をおこなった。各都市の熱中症による救急搬送数は都道府県単位で集計されているため、用いる気象要素は県庁所在地の気象官署で観測された値を各都道府県の代表値とみなし、用いることにした。ただし、滋賀県と埼玉県は県庁所在地に気

象官署が無かったため、それぞれ彦根市と熊谷市の気象官署で観測されたデータで代用した。

### 2.4 熱ストレス指標に対する熱中症リスクの応答回帰

日最高気温・日最高 WBGT・日最高 UTCI はいずれも1つの都道府県に対して「10年×3か月＝30個」の数値が最終的に得られる。これらの数値に対して、縦軸を熱中症搬送率、横軸を熱ストレス指標 (気温・WBGT・UTCI) にとって都道府県別の相関散布図を作成した。散布図のy座標 (年齢調整搬送率) は対数軸とした片対数グラフであり、これに対して回帰式を作成した (図2左)。これを熱ストレス指標に対する年齢調整搬送率の回帰式と定義した。各熱ストレス指標の代表的な熱ストレスレベル値を、都道府県ごとの応答直線の方程式に代入し、熱中症搬送率の推定値 (以降「推定搬送率」) を求める。得られた推定搬送率は、地図上にカラーマップとして表現した (図2右)。

### 2.5 そのほかの解析データ

気象以外の要素が熱中症リスクにおよぼす影響を調べるため、熱中症リスクに関与しそうな2つの指標、①第1次産業 (農林水産業) の人口比率と②ルームエアコンの非普及率を、パラメーターに加えた。これらに用いたデータは、総務省統計局が公開する e-Stat (<https://www.e-stat.go.jp>) より入手した。

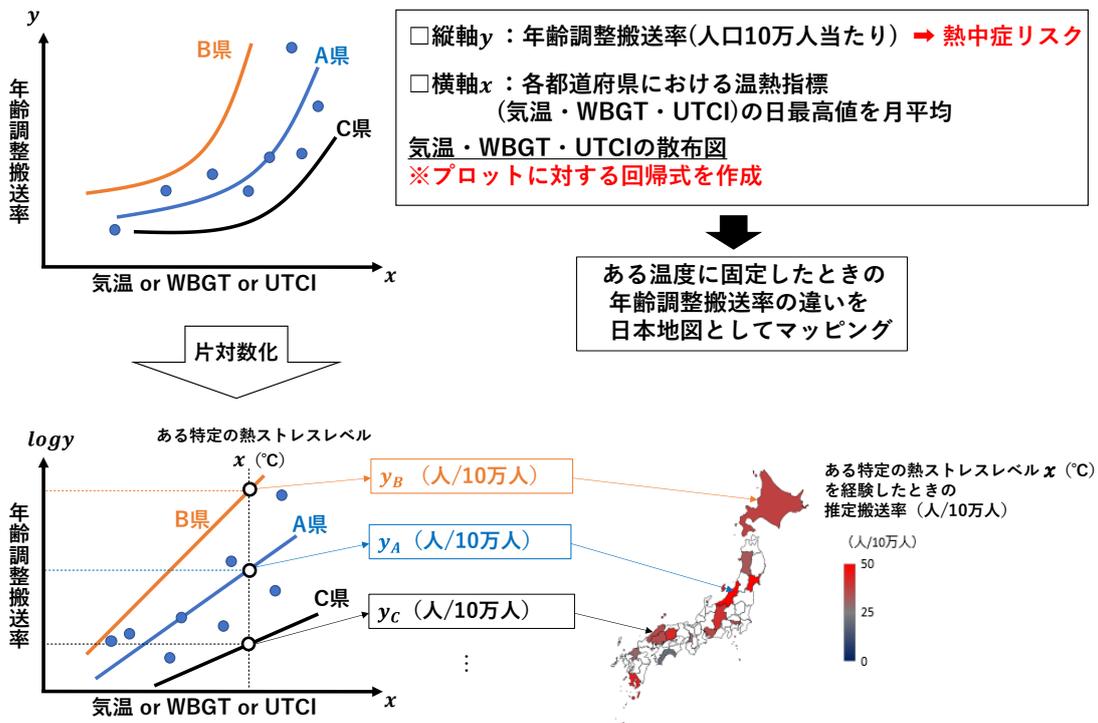


図2 搬送率を推定する近似曲線の決定、推定搬送率のマッピング。

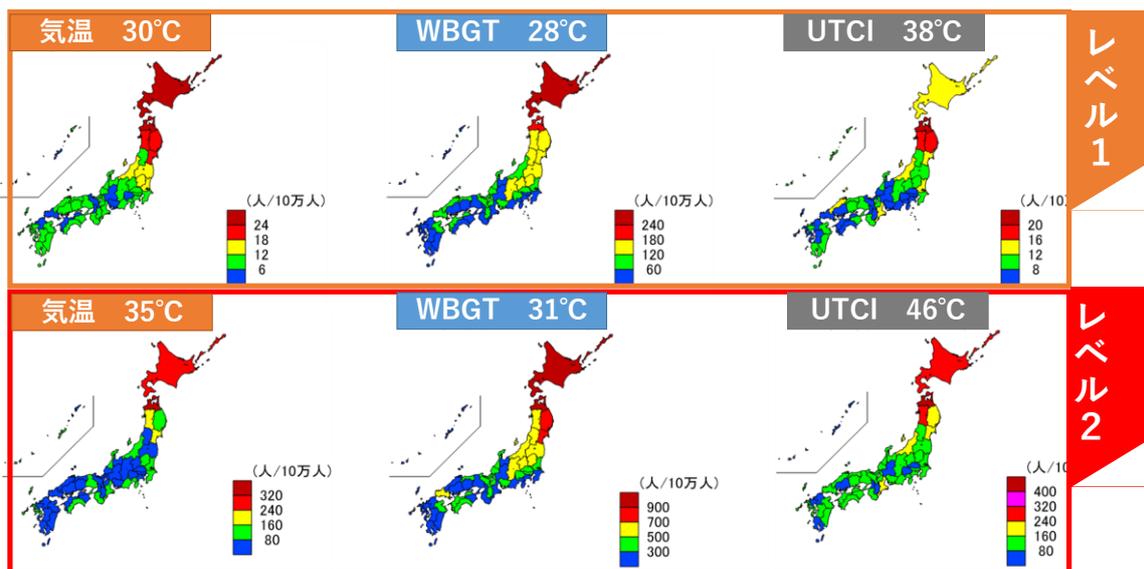


図3 熱ストレスレベル1・レベル2における気温・WBGT・UTCIの基準値を経験したと仮定したときに推定された推定搬送率の都道府県マップ。

## 2.6 非階層クラスター分析

本研究では、機械学習の一種である k-means 法と呼ばれる非階層クラスター分析を採用した。クラスター分析は、異なる要素が混ざり合った集団から、互いに似た特徴を持つものをクラスター化させる統計手法である。手順としては、47 都道府県×6 つの熱ストレスマップの行列から、主成分分析によって2つの主成分得点に算出し、これを平面上にプロットした散布図に対してクラスタリングを行った。なお、この解析には R 言語を用い、stats パッケージの kmeans 関数によって k-means 法を実行した。また、この時必要なクラスター数はエルボー法を用いて推定した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 熱ストレスレベルで分類された推定搬送率マップ

方法で定義した熱ストレスレベル1と2の条件で、推定される熱中症搬送率をマップ化した(図3)。熱ストレスレベル1の場合、気温や UTCI よりも WBGT の分布が全国的に高い搬送率を示しました。とくに、東北から関東の内陸にかけて搬送率の高い地域が明瞭に見られた。熱ストレスレベルが2に上昇した場合には、気温と UTCI では北海道と東北の北部を除く全国で、推定される熱中症搬送率の差があまりみられなくなりました。(熱ストレスレベル2のマップでは、搬送率のカラースケールが上のレベル1と異なることに注意)。

このように、熱ストレス指標による熱中症搬送率の推定にも差が生じることから、熱中症リスクを表現する新しいマップが必要となった。そこで、

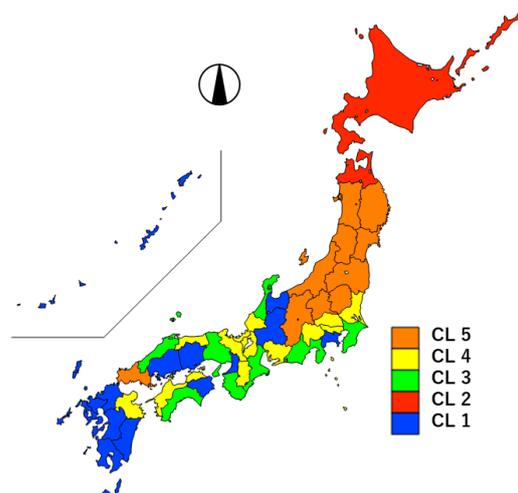


図4 図3の推定搬送率の6つのマップをもとに非階層クラスターによって求められた熱中症リスクの都道府県マップ

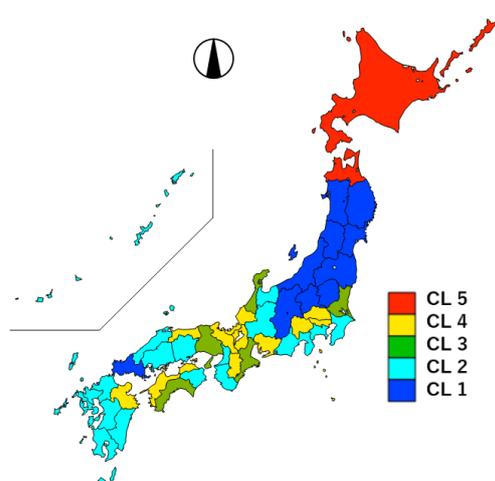


図5 第1次産業とエアコン非普及率をパラメータに加えて作成された熱中症リスクの都道府県マップ。



図6 関口（1959）による気候区分図  
（ただし、一部改変）。

この6つのマップの情報を一元化することによって、最終的な熱中症リスク・マップを作成した。

### 3.2 非階層クラスターで得られた熱中症リスク・マップ

非階層クラスターによって分類された熱中症リスク・マップを図4に示す。エルボー法により、クラスター数は5に分類された。この熱中症リスク・マップを、図6の関口（1959）による日本の気候区分と対比させた結果、クラスター1はすべての気候区分にまたがって分布しており、九州・沖縄から関東まで広く見られた。このうち九州についてはクラスター1が九州型の気候区分と対応していた。クラスター2は日本海型の気候区分のみが該当しており、北海道と青森だけに限定されていた。クラスター3と4は広範囲に分散して気候区分との対応は見られず、クラスター5については、東日本型の気候区分と重なりが多くみえた。

以上の分析結果から、本研究で得た熱中症リスク・マップが日本の古典的気候区分の分布とは乖離がみられることが明らかになった。

### 3.3 気候要素以外の熱中症因子を加えた熱中症リスク・マップの作成

気候以外の熱中症因子として、方法で述べた都道府県別のルームエアコンの非普及率と第1次産業の人口比率を新たなパラメータとして、3.2でおこなったクラスター分析に新たに追加し、再解析をおこなった。エルボー法により、クラスター数は前回と同じく5に分類された。

その結果、北海道と青森に該当するクラスター5と、東日本型の気候区分と重なりが多いクラス

ター1の分布が、3.2で分類されたクラスター2とクラスター5の分布と一致していた。

クラスター2の九州地方は、九州型の気候区分と対応しており、3.2と共通性がみられた。クラスター2の九州以外の分布では特徴的な区分が認められず、クラスター3と4も気候区分との対応していない点が3.2で得られた熱中症リスク・マップとほとんど類似していた。この結果から、ここで含めた気候要素以外の2つの熱中症因子は、熱中症リスクに及ぼす影響は比較的小さいことが明らかとなった。

## 4. まとめ

本研究では、過去10年間における熱中症搬送率と熱ストレス指標の長期情報から、機械学習の一種である非階層クラスター手法を用いて、熱中症リスクの都道府県マップの作成を試みた。その結果、以下の点が明らかになった。

- ・日本の古典的気候区分の都道府県分布と、熱中症搬送率および熱ストレス指標の分布は、大きく異なっていた。

- ・非階層クラスターによって、5つのクラスターに分類された都道府県の熱中症リスク・マップを作成することができた。しかし、気候要素以外の熱中症因子に考えられたルームエアコン非普及率と第1次産業（農林水産業）人口比率をパラメータに含めたクラスターリングの結果からは、これら2つの因子が熱中症リスク・マップの特徴に及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。

## 参考文献

- 環境省：熱中症予防サイト，[http://www.wbgt.env.go.jp/record\\_data.php](http://www.wbgt.env.go.jp/record_data.php)
- 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード，<http://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php>
- 厚生労働省，2007：1.年齢調整死亡率について，<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/ot/her/00sibou/1.html>
- 小野雅司，登内道彦，2014：通常観測気象要素を用いたWBGT（湿球黒球温度）の推定，日生気誌，50（4），147-157.
- 消防庁：熱中症情報，[http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9\\_2.html](http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9_2.html)
- 消防庁，2018：平成30年（5月から9月）の熱中症による救急搬送状況，[http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h30/10/301025\\_houdou\\_3.pdf](http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h30/10/301025_houdou_3.pdf)
- Yaglou,C.P. and Minard,C.D., 1957：Control of heat casualties at military trainingcenters, A. M. A. Arch. Ind. Health, 16, 302-316.
- Bröde P, Fiala D, Błażejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G, 2012：Deriving the Operational Procedure for the Universal Thermal Climate Index UTCI, Int J Biometeorol, 56, 481-494

# 暑熱環境下における熱中症リスクの地域性－鳥取県を対象として－

\*大谷 一貴・重田 祥範（公立鳥取環境大学環境学部）

## 1. はじめに

昨今、地球温暖化やヒートアイランド現象の影響で、夏季日中の気温上昇が懸念されている。それにもない、熱中症発症数も増加し、社会問題となっている（環境省，2018）。そのような中、熱中症に関する研究は多岐にわたりおこなわれてきた。例えば、人口動態統計や救急搬送データと気象庁の観測データより、熱中症死亡者数と熱帯夜・真夏日との関係性や発症リスクが著しく上昇する気温を明らかにしたものがある（中井，1993；入来，2000）。近年では、温熱指標の一つである WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) が暑熱環境を判断する有用な指標として広く認知され、天気予報などで見かける機会も多くなってきた。この指標は、熱中症発生の環境因子とされる気温や相対湿度、輻射熱、気流等を考慮したものであり、熱中症予防の目安として活用されている。既往研究には、特定地域の WBGT を推定したものや、全国的な WBGT の地理的分布を議論したものなどがある（例えば、星ほか，2007；福井，2016）。一方で、熱中症の発生は活動空間ごとに形成される微気象の影響を強く受けるため、その空間ごとに計測した WBGT を考察することが望ましいとされる（大橋ほか，2009）。

日本列島は周囲を海に囲まれ、多くの山地が存在する特異的な地形を有している。なかでも、夏季に日本海側でフェーン現象が発生すると、地域によっては 40℃ 近い猛暑を記録することもある。その日本海側に位置する鳥取県では、過去に人口 10 万人あたりの熱中症発症数が日本一にもなっている。前田（2019）では、標高の高い地域では平野部より日最高 WBGT が低く記録されると述べており、暑熱環境に地域性が認められることを指摘している。しかし、地域性を明らかにするためには、既存の報告では観測地点が少なく、空間代表性の問題が挙げられる。

そこで、本研究では猛暑期の鳥取県全域を対象に沿岸、都市、内陸部を網羅するように定点型の気象観測をおこない、地区ごとの熱中症リスクの時空間変動を定量的に明らかにする。

## 2. 研究概要

### 2.1 対象地域と観測地点

鳥取県は、中国地方北東部に位置し、東西約 126km、南北約 62km と東西に幅広い県である。県西部には、中国地方最高峰の大山（1729m）が存在し、東部には氷ノ山（1510m）や扇ノ山（1310m）が存在している。また、各地区には一級河川（東部：千代川、中部：天神川、西部：日野川）が中国山地から日本海にかけて流れている。3 本の河川の流域には平野が形成され、それぞれ鳥取市（187,620 人）、倉吉市（46,446 人）、米子市（147,322 人）が流域の中心都市として

在している（2020 年 11 月時点）。

本研究では、東・中・西部ごとに沿岸から内陸にかけて、暑熱環境に地域差が認められるか、またどのような気象要因が温熱指標に影響を与えているかを定量的に明らかにする。そのため、定点型による気象観測地点を各地区沿岸部より山間部にかけて約 3km ごとに、計 29 地点設定した（第 1 図）。

### 2.2 対象地域と観測地点

気象観測には、自然通風式シェルターと小型黒球温度計を使用した（重田，2015）。自然通風式シェルターには温湿度センサ（THA-3001；T&D 社）を組み込み、気温と相対湿度を測定した。一方、小型黒球温度計には、温度センサ（TR-5106；T&D 社）を用い、黒球温度を測定した。なお、サンプリング間隔は、気温と相対湿度が 10 分、黒球温度が 5 分である。

観測機器は、対象地点の街区公園や公共施設のポールを利用し、地上高 2.5m に設置した。気象観測は梅雨明け後の 2020 年 7 月下旬から 9 月上旬まで実施した。

### 2.3 解析手法

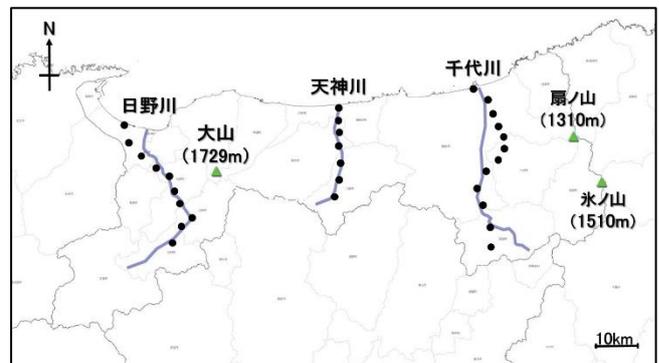
各観測地点の気象データより以下の (1) 式および (2) 式を用いて WBGT を算出した。なお、(1) 式は日中、(2) 式は夜間の WBGT をそれぞれ算出する。

$$WBGT_d = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (1)$$

$$WBGT_n = 0.7 T_w + 0.3 T_g \quad (2)$$

ここで、 $T_w$  は湿球温度、 $T_g$  は黒球温度、 $T_a$  は乾球温度（気温）を示し、単位はすべて℃である。また、本研究では湿球温度の観測をおこなっていないため、中井（2007）により考案された以下の (3) 式より推定値を算出した。

$$T_w = (T_a + 10) (rh / 250 + 0.615) - 10 \quad (3)$$



第 1 図 気象観測地点

rhは相対湿度(%)を示す。なお、WBGTによる熱中症リスクは、日本生気象学会では第1表のように定められている。

### 3. 結果

#### 3.1 日最高 WBGT

観測データより、多地点で日最高気温が 35.0°C以上を記録した 2020 年 8 月 14 日、いずれの地点でも 35.0°Cを超えなかった 8 月 24 日、フェーン現象が生じた 8 月 27 日を事例に挙げる(第2表)。14 日と 27 日は、各地区の WBGT は 31.0°Cを超え、熱中症リスクは危険レベルに達していた。最高値に着目すると、中部の WBGT は他の地区に比べ高くなりやすい。27 日は、西部が最高値を記録したが、中部との差はわずか 0.1°Cであったため、あまり有意ではない。一方、東部は 11 日間を通して、他の地区に比べると最高値が比較的低い日が多く認められた。

#### 3.2 WBGT の日変化

解析対象日の 11 日間のうち、フェーン現象が発生した 3 日間(8 月 6 日、26 日、27 日)を除く 8 日間に対してアンサンブル平均を施した。第2図に WBGT の日変化を示す。なお、地区ごとに任意で 4 地域(沿岸部、都市部、郊外、山間部)の代表地点を決定し、地域ごとの比較をおこなった。各地区とも、6 時頃から昇温が顕著となり、地区ごとに特徴的な傾向が出現した。また、日の出前・日没後はいずれも山間部・郊外の順に低い値を示す傾向が明らかとなった。

西部では、都市部と山間部が 31.0°C以上の危険レベルに達しており、多くの日で熱中症リスクが高くなっていることが予想される(第2図 a)。一方、時間帯によっては、山間部が都市部より高温を示す傾向が認められ、山間部は他の地域に比べて日較差が 9.4°Cと大

きい値を示していた。また、中部では、都市部、郊外が高温傾向を示すことが明らかとなった(第2図 b)。両者の WBGT の変動は、9 時頃から 18 時頃まで同様な傾向を示したが、それ以降は時間経過とともに差が大きくなった。一方、東部では、沿岸部が他の地域より低い値を示す傾向が認められた(第2図 c)。東部の山間部は、夜間に他地域と 1.0°C以上の気温差が生じているが、日中は沿岸部より高い値を示していた。

#### 3.3 気温と地形の関係性

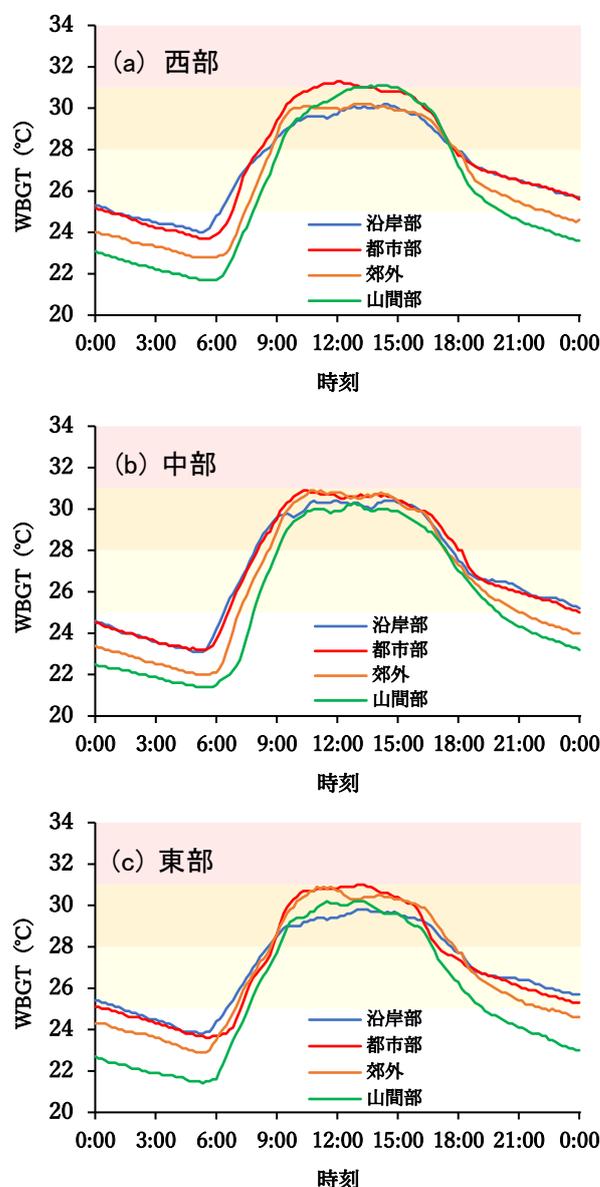
鳥取県は、北側に日本海、南側に中国山地が存在するため内陸に向かうにつれ、標高が高くなっている。そこで、WBGT の変動要因の一つとして考えられる気温と標高ならびに海岸距離との関係性を明らかにした。分析の結果、日最高気温と海岸距離のあいだに計 7 日有意な相関が認められた(p<0.05)。7 日のうち 4 日

第1表 温度基準別熱中症リスク

範囲(X:WBGT)	熱中症リスク
$X \geq 31^\circ\text{C}$	危険
$28^\circ\text{C} \leq X < 31^\circ\text{C}$	嚴重警戒
$25^\circ\text{C} \leq X < 28^\circ\text{C}$	警戒
$X < 25^\circ\text{C}$	注意

第2表 地区別日最高 WBGT

日	西部	中部	東部	最大差 (°C)
	日最高 WBGT (°C)			
8 月 14 日	32.4	33.5	33.0	1.1
8 月 24 日	30.3	31.2	30.1	1.1
8 月 27 日	32.3	32.2	32.0	0.3



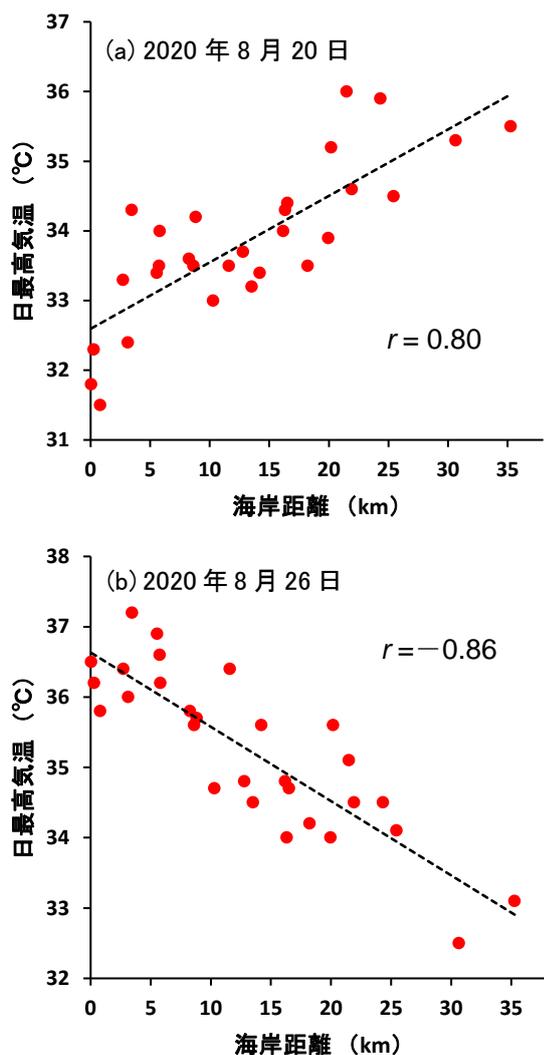
第2図 各地区の WBGT の日変化。  
(a)西部, (b)中部, (c)東部をそれぞれ示す。

間は正の相関(最大  $r=0.80$ )が認められた(第3図 a). 一方で、フェーン現象が発生していた3日間は、明瞭な負の相関(最大  $r=-0.86$ )が認められた(第3図 b). このことから、好天静穏日で海風が卓越した場合は、沿岸に近い地域ほど、海風の冷却効果で気温上昇が緩和されていると予想される。

また、日最高気温と標高のあいだには6日間で有意な相関が認められた。4日間は正の相関(最大  $r=0.70$ )であった(第4図 a). しかしながら、海岸距離と同様にフェーン発現日の3日間は、負の相関(最大  $r=-0.82$ )が認められた(第4図 b). 一般的に、対流圏では高度が100m上昇するにつれ、気温は $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 下がると言われている。しかし、鳥取県は気温減率に関係なく、内陸における日中の気温上昇は顕著である。

### まとめ

本研究では、鳥取県を対象とした定点型の気象観測を実施し、WBGTを用いて夏季の暑熱環境の地域性や各地区の地理的特徴の影響について明らかにすることを試みた。その結果、日最高WBGTは中部が他の地区より高く熱中症の危険性が高まっていた。

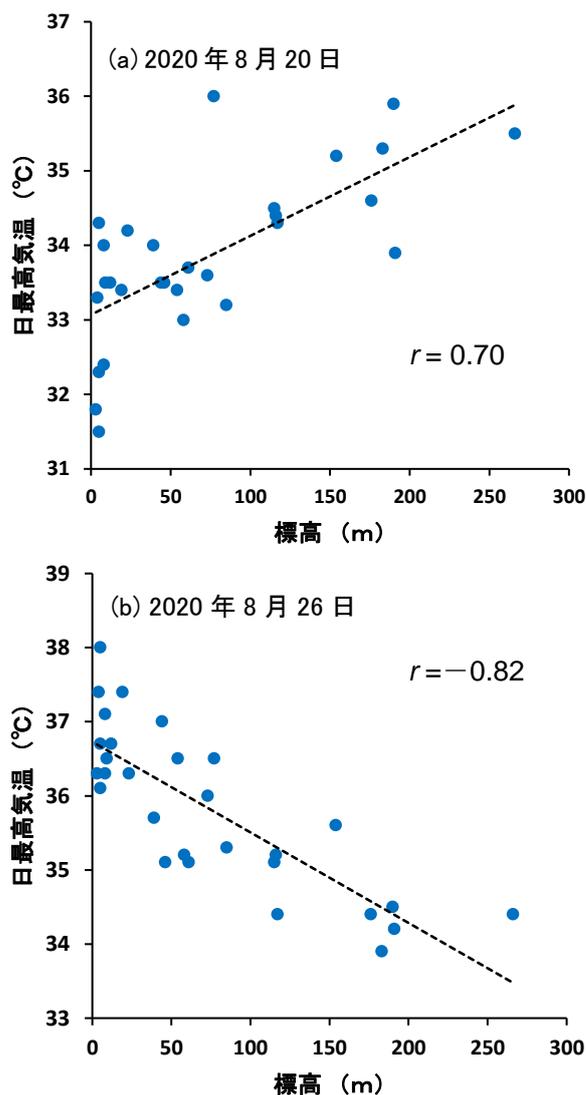


第3図 日最高気温と海岸距離の関係性.

(a) 2020年8月20日,  
(b) 2020年8月26日(フェーン発現日).

一方、各地区内の暑熱環境を明らかにするため、地域で分類したところ、夜間は地区に関係なく、郊外・山間部の順に低い値を示す傾向が認められた。なお、日中は地区により暑熱環境の違いが現れることが明らかとなった。

WBGTの要素の一つである気温と鳥取の地理的特徴の関係性を明らかにするため、日最高気温と海岸距離、標高の相関分析をおこなった。その結果、有意な相関が認められた日のうち、フェーン発現日には負の相関が、それ以外の日は正の相関が認められた。これより、沿岸地域は海風の影響により気温上昇が緩和されていること、そして、鳥取県は一般的な気温減率に準じない日が存在することが明らかとなった。



第4図 日最高気温と標高の関係性.

(a) 2020年8月20日,  
(b) 2020年8月26日(フェーン発現日).

## 引用文献

- 入來正躬, 2000: 1995-1999 夏の山梨県での熱中症に関する研究. 日生气誌, 37(2), 63-72.
- 大橋唯太, 竜門洋, 重田祥範, 2009: 都市域のさまざまな活動空間での WBGT の比較. 日生气誌, 46(2), 59-68.
- 環境省, 2018: 熱中症環境保健マニュアル 2018.
- 中井誠一, 1993: 熱中症死亡数と気象条件-日本における 21 年間の観察-. 日生气誌, 30(4), 169-177.
- 中井誠一, 寄本明, 芳田哲也, 2007: 高温環境とスポーツ・運動-熱中症発生と予防-. 篠原出版新社, 26-33.
- 福井健弘, 2016: 日本の夏季における WBGT の地域性とその経年変化. 法政地理, 48, 61-70.
- 星秋夫, 稲葉裕, 村山貢司, 2007: 東京都と千葉市における熱中症発生の特徴. 日本生气誌, 44(1), 3-11.
- 前田佳奈子, 2019: 鳥取県における気象要素と暑熱障害の関連性-2018 年夏季を対象として-. 公立鳥取環境大学, 学士論文.

# 都市気象・建物空間の連成数値モデルを利用した疾病リスク評価

\*大橋 唯太（岡山理大・生物地球）・井原 智彦（東京大院・新領域創成科学）  
高根 雄也（産総研・環境創生研究部門）・亀卦川 幸浩（明星大・理工）

## 1. 研究の背景

令和2年度の科研費・基盤研究（B）に、研究課題「高温な気候曝露の循環器系疾患リスク評価とAIを利用した予測手法の構築」（代表：大橋 唯太）が採択された。令和2年度から5年度まで4年間に及ぶ計画で今後、実施される。このプロジェクト研究は「衛生学および公衆衛生学」の分野に該当するが、気象学会では馴染み深いメソ気象モデルを利用することもあり、学際領域の位置づけとしての応用気象学といえる。

人間活動が集中する都市域の大気を詳細に再現する目的のため、研究課題で利用する数値モデルは、メソ気象モデルに、多層型都市キャノピーモデルと建物熱収支・エネルギー消費モデルをカップリングさせた独自の体系を有する（図1）。このモデルを以降では、単に「連成モデル」と呼んでいく。今回の前身にあたる平成28年度科研費・基盤研究（B）「都市気候と空調エネルギー需要の相互作用感度（PFB感度）」（代表：亀卦川 幸浩）などのプロジェクト研究を通して、20年近く前から国内外の主要都市に適用可能な連成モデルを著者らは開発してきた。

本発表では、今回の科研費プロジェクトを紹介することで、気象モデルの応用研究、汎用性、将来性について広く

関心をもってもらおうと思う。

## 2. 連成モデルの概要

連成モデルは、① メソスケールの大気現象を再現するメソ気象モデル、② 都市域内の熱環境を再現する都市キャノピーモデル、③ 建物-大気間で生じる熱収支と冷房や暖房消費エネルギー・排熱を再現する建物モデル、の3つのパートから成る。①には、ユーザビリティの高いことで知られるWRF-ARW（Weather Research and Forecasting Model）を著者らは用いてきた（以降、WRF）。これまで、国内は東京や京阪神、海外ではロンドンやデリーといったメガシティを対象に、500~1 kmの水平解像度でメソスケールの気象場を再現した。

②には、近藤・劉（1998）の都市キャノピーモデルをオリジナルとした鉛直多層型のUrban Canopy Model（以降、CM）を用いてきた。WRFの下端とCMの上端のあいだで運動量・熱フラックスを交換させる双方向接続によって、WRF-CM間の情報が授受されるようにしてある。したがってCMの水平解像度もWRFに合致させる必要があるが、CMで扱うサブグリッドの建物群は3次元構造を簡易化し、鉛直1次元のみに非一様性を考えた仕組みになっている。

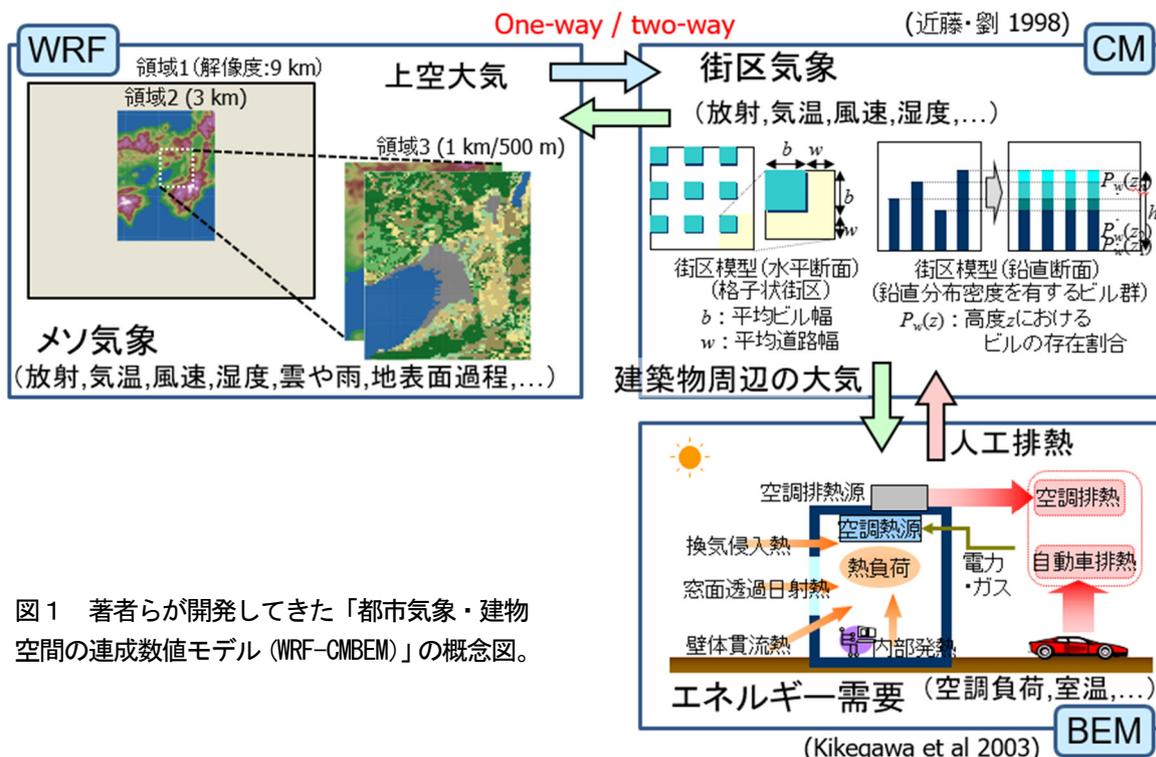


図1 著者らが開発してきた「都市気象・建物空間の連成数値モデル（WRF-CMBEM）」の概念図。

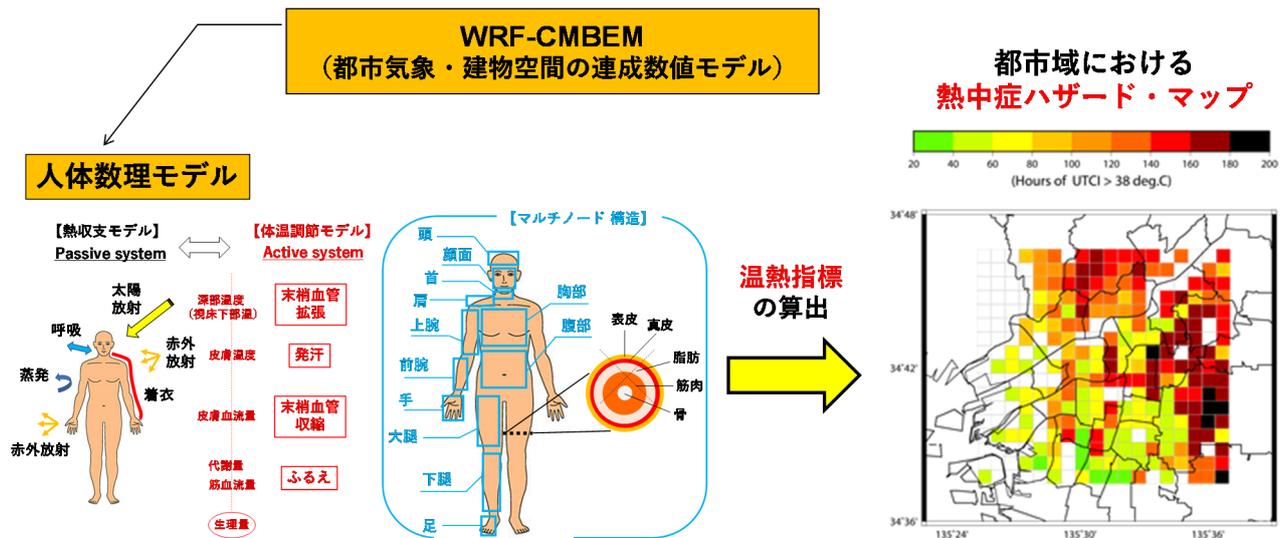


図2 著者らが開発してきた都市の熱中症ハザード・マップまでの計算フロー。

そのなかで各種フラックスや放射計算から、キャノピー内の鉛直方向の気象要素が計算される。

連成モデルのうち③が、最も複雑なモデル設定をもつ。亀卦川ほか(2001)が開発した Building Energy Model (以降、BEM) がオリジナルであり、大気から建物への熱負荷と内部発熱、(夏の場合)それに伴う冷房排熱を計算できる。この BEM は先述の CM に組み込んでおり(以降、CMBEM)、都市大気と建物間の顕熱・潜熱交換、室内熱収支などを通して、各階で部屋の温度や湿度が再現される。

CMBEM の計算で必要となる街区構造や建築物性値などの入力パラメータは、自治体等から提供された GIS ポリゴンデータを解析して事前に得ておく。モデルのグリッドごとに建物用途種別を、事務所および商業街区、木造戸建住宅街区、RC 造集合住宅街区へと分類し、BEM の計算で必要となる冷房運転や内部発熱のタイムスケジュール、空調タイプの構成、室外排熱位置などの設定をおこなう。

### 3. 健康影響評価への拡張

連成モデルはこれまで、都市気温の空間不均一形成を調べる目的(例えば、Ohashi *et al.* 2007)、冷房消費による都市気温の positive feedback (PFB) 感度を定量推定する目的(例えば、Kikegawa *et al.* 2014)、さらにヒートアイランド対策の導入効果を算出する目的(例えば、Ihara *et al.* 2008)で、開発と改良が進められてきた。これらに並行して、人口集中する都市で問題視される夏季の熱中症リスクをマップ化する、健康影響評価を目的とした利用法も考案してきている(例えば、Ohashi *et al.* 2014)。これは、連成モデルの計算出力がグリッド情報という特徴を活かしたものである。そして、将来の気候変動(温暖化シナリオ)において、都市の PFB 作用による高温化と熱ストレスの予測シミュレーションも始めている(Takane *et al.* 2020)。

熱中症リスクを定量化するには、気温・湿度・放射・気流などの気象条件を統合した温熱指標が必要となる。その温熱指標には WBGT (Wet-bulb Globe Temperature)、SET\* (Standard

New Effective Temperature)、UTCI (Universal Thermal Climate Index)などを採用し、モデルグリッドの屋外(日向・日陰)または室内(空調・非空調)での数値を算出する。これを熱中症ハザード・マップとして、可視化することができる(図2)。実際に温熱指標の値がどの程度まで及ぶと、実際に熱中症リスクが人に生じるかを評価するには、疫学分析が中間資料の生成のために必要となる。

熱中症の場合、疫学データには、消防庁が提供する日々の救急搬送人数を用いることが多い。救急搬送数は、ハザードである温熱指標の値を説明変数にした線形または非線形回帰によって関数作成される。この関数によって熱中症リスクがグリッドごとに推定されていく。

### 4. 心疾患・脳血管疾患と気象の関係

近年の気象や気候の急激な変化は、人の健康被害を増加させており、社会問題にもなっている。人体に備わる自律神経機能が関与する血液循環の不調は夏に熱中症を惹起するが、急性的に発症する循環器疾患(心・脳血管疾患)も自律神経の不安定化がしばしばトリガーになる(矢永 1998)。日本では、これら疾患を死因とする年間死者数は、悪性新生物(癌)に次いで多い。熱中症だけでなく、将来の気候シフトと生活様式の変化への対策を考えるうえで、循環器疾患の発症・死亡リスクを予測評価する研究は今後、非常に重要になってくる。

心疾患や脳血管疾患の発症と気象条件の関係を分析した研究は、これまでいくつか存在する(例えば、山中・中村 1996; 徐・稲葉 2003; 羽山ほか 2011; 大橋 2019)。年内変動の分析結果からは、夏季の高温な月および冬季の低温な月ほど死亡率の上昇する二次曲線的な変化が、心疾患で強く現れることが明らかになっている。この傾向は太平洋側や西日本の諸都市で、特に心筋梗塞や脳梗塞といった血液の滞留や血栓に起因する疾患で顕著に現れる(大橋 2019)。

この年内変動には、人体の自律神経や内分泌機能に備わ

8月の心筋梗塞死亡率（2010~2017）

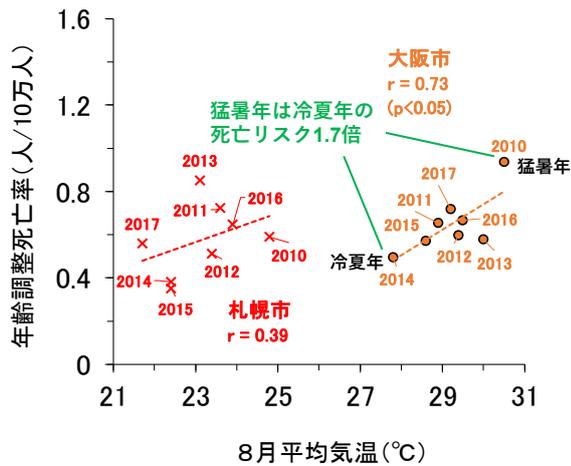


図3 札幌市と大阪市の8月平均気温と心筋梗塞の年齢調整死亡率との関係。2010~2017年の結果。

る概年リズムが関与し、気候の変化とは因果関係がない可能性もある。ところが長期解析からは、年による気候の違いが死亡率に影響することが大橋（2019）では示されており、猛暑になった年ほど心・脳血管疾患の死亡率は上昇していた（図3）。興味深いのは、気温の絶対値として的高温というよりも、その都市にとって例年よりも高温の年になることが、疾患の死亡率上昇につながる点である。

参考までに冬季についても触れておくと、北海道と東北地方を除いた諸都市で、厳冬の年ほど心・脳血管疾患の死亡率に上昇がみられていた。

このように既往研究の結果からも、気温が循環器疾患の発症リスクの一指標として有効だとわかる。

### 5. 心疾患・脳血管疾患リスクの数値シミュレーション

プロジェクト研究で実施する研究フローを、図4に示す。本研究では、厚生労働省・人口動態調査の調査票情報（死亡個票）と、健康保険組合のレセプト情報（診療報酬明細書）を独自に入手し、年齢性別だけでなく発症日時・地域・発症場所などのビッグデータ解析を計画している。当該マイクロデータを気象情報と対比させることで、日々の気象変化と疾患発症の関連性を疫学的に追跡できる。主となる対象疾患は、WHOによる国際疾病分類第10版（ICD-10）に基づくICD大分類「循環器系の疾患」から、12分類（表1）を予定している。また循環器系以外に、下気道感染症（急性気管支炎）や肺炎などの呼吸器系の疾患も、解析に含める予定である。いずれも既往研究では気象・気候の変化に影響を受ける可能性がある疾患とされ、連成モデルを利用した各種疾患リスク・マップによる予測評価が、人口の集中する都市域で重要だと考える。

各種疾患リスクは、年齢層別・性別にわけて評価し、1~2kmメッシュで解像した地域スケールで屋外と屋内の空間平均、メッシュ内の住居スケールでは居住階・部屋種別・空調の有無にわけてシミュレーション結果を出力できる

表1 本研究で解析対象とするICD-10の疾患分類。色付きの部分が解析予定の疾患名称を表す。

ICD大分類名	中分類		小分類	
	ICDコード	分類名	ICDコード	分類名
循環器系の疾患	I10~I15	高血圧性疾患		
	I20~I25	虚血性心疾患	I20	狭心症
			I21, I22	急性心筋梗塞 / 再発性心筋梗塞
			I23	急性心筋梗塞の続発合併症
			I24	その他の急性虚血性心疾患
			I25	慢性虚血性心疾患
	I26~I28	肺性心疾患及び肺循環疾患		
	I30~I52	その他の型の心疾患		
	I60~I69	脳血管疾患	I60	くも膜下出血
			I61	脳内出血
			I63	脳梗塞
	I70~I79	動脈・細動脈及び毛細血管の疾患		

ようにする計画である。

最後に、著者らの関連プロジェクト研究の既往成果を以下に列挙する。本研究に興味のある人は、ぜひ一読頂きたい。

- ① Yuya TAKANE, Yukitaka OHASHI, Sue GRIMMOND, Masayuki HARA, and Yukihiro KIKEGAWA: Asian megacity heat stress under future climate scenarios: impacts of air-conditioning feedback. *Environmental Research Communications*, 2020, Vol.2, No.1, open access (DOI: 10.1088/2515-7620/ab6933).
- ② Yuki HASHIMOTO, Yukitaka OHASHI, Minako NABESHIMA, Yoshinori SHIGETA, Yukihiro KIKEGAWA, and Tomohiko IHARA: Sensitivity of electricity consumption to air temperature, air humidity and solar radiation at the city-block scale in Osaka, Japan. *Sustainable Cities and Society*, 2019, Vol.45 February, pp.38-47.
- ③ Yuya TAKANE, Yukihiro KIKEGAWA, Masayuki HARA, and Sue GRIMMOND: Urban warming and future air-conditioning use in an Asian megacity: importance of positive feedback. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2019, Vol.2, No.39, open access (DOI: 10.1038/s41612-019-0096-2).
- ④ 亀卦川幸浩・山川洋平・徳竹裕也・大橋唯太・高根雄也・井原智彦・鍋島美奈子：日射と電力需要の再現性に着目した都市気象・建物エネルギー連成数値モデルの検証。土木学会論文集G(環境), 2017, Vol.73, No.2, pp.57-69.
- ⑤ Yuya TAKANE, Yukihiro KIKEGAWA, Masayuki HARA, Tomohiko IHARA, Yukitaka OHASHI, Sachiko A. ADACHI, Hiroaki KONDO, Kazuki YAMAGUCHI, and Naoki KANEYASU: A climatological validation of urban air temperature and electricity demand simulated by a regional climate model coupled with an urban canopy model and a building energy model in an Asian megacity. *International Journal of Climatology*, 2017, Vol.37, Issue S1 August, pp.1035-1052.
- ⑥ Yukitaka OHASHI, Makoto SUIDO, Yukihiro KIKEGAWA, Tomohiko IHARA, Yoshinori SHIGETA, and Minako NABESHIMA: Impact of seasonal variations in weekday electricity use on urban air temperature observed in Osaka, Japan. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, Vol.142, Issue 695, pp.971-982.
- ⑦ Yukitaka OHASHI, Tomohiko IHARA, Yukihiro KIKEGAWA, and Nanami SUGIYAMA: Numerical simulations of influence of heat island countermeasures on outdoor human heat stress in the 23 wards of Tokyo, Japan. *Energy and Buildings, Special Issue on Countermeasures to Urban Heat Island*, 2016, Vol.114, pp.104-111.

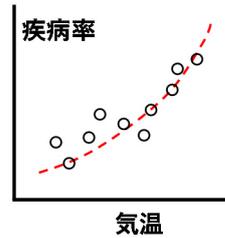
➤ 疫学ビッグデータの入手

- ✓ 健保組合の診療報酬明細書 (レセプトデータ)
- ✓ 厚労省の人口動態調査 調査票 (死亡個票)



統計分析

➤ 各種疾患リスクの気象・気候応答分析



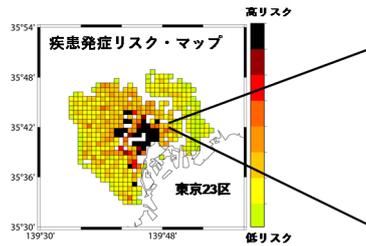
- ✓ 急性心筋梗塞
- ✓ 虚血性心疾患
- ✓ 脳梗塞
- ✓ 脳内出血
- ⋮

年齢層・性別ごとの罹患率の応答関数を作成

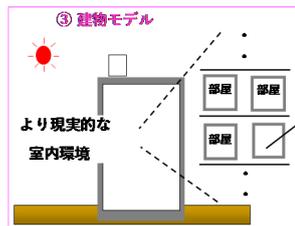
組み込み

➤ 連成数値モデルを利用した疾患発症リスクのシミュレーション

① 地域スケール



② 住居スケール



- ✓ 居住階
- ✓ 部屋 (居間・浴室・寝室)
- ✓ 空調の有無と設定

図4 プロジェクト研究で実施する数値シミュレーションまでの研究フロー。

⑧ 橋本侑樹・鍋島美奈子・重田祥範・亀卦川幸浩・井原智彦：業務および住宅街区の気温・湿度に対する電力感応度の解析と考察 —2013年・大阪市内の観測を通して—。日本建築学会環境系論文集 2016, Vol.81, No.727, pp.827-834.

⑨ Yukihiro KIKEGAWA, Ai TANAKA, Yukitaka OHASHI, Tomohiko IHARA, and Yoshinori SHIGETA: Observed and simulated sensitivities of summertime urban surface air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese major cities Tokyo and Osaka. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, Vol.117, Issue 1-2 July, pp.175-193.

⑩ Yukitaka OHASHI, Yukihiro KIKEGAWA, Tomohiko IHARA, and Nanami SUGIYAMA: Numerical simulations of outdoor heat stress index and heat disorder risk in the 23 wards of Tokyo. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, Vol.53, Issue 3 March, pp.583-597.

⑪ 大橋唯太・亀卦川幸浩・井原智彦：数値気象モデルを利用した屋外熱中症リスクの評価手法に関する研究。環境情報科学論文集 25, 2011, No.25 November, pp.335-340.

⑫ 大橋唯太・亀卦川幸浩・山口和貴・井原智彦・岡和孝：数値気象モデルを利用した屋外活動空間の暑熱評価。日本生気象雑誌, 2010, Vol.47, No.2 July, pp.91-106.

⑬ Yukitaka OHASHI, Hidemasa KUROYANAGI, Yukihiro KIKEGAWA, Kazutaka OKA, Yoshinori SHIGETA, Yujiro HIRANO, Hiroyuki KUSAKA, and Fei CHEN: Influence of Differences in Urban Structure and Electric Power Demand on Atmospheric Thermal Environment in Osaka Urban Area. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 2010, Vol.28, No.1 May, pp.87-101.

⑭ 大橋唯太・畔柳秀匡・亀卦川幸浩・岡和孝：建物用途の異なる複数街区を対象としたヒートアイランド対策の数値シミュレーション。環境システム研究論文集, 2009, Vol.37, November, pp.73-82.

⑮ 亀卦川幸浩・大橋唯太・重田祥範・井原智彦・田川稔・井上達也：東京・大阪における夏季電力消費と都市熱環境の関連性に

関する研究。環境システム研究論文集, 2009, Vol.37, November, pp.113-124.

⑯ 畔柳秀匡・大橋唯太・亀卦川幸浩・岡和孝・重田祥範・平野勇二郎・日下博幸・Fei CHEN：街区構造と電力需要の違いが都市熱環境に及ぼす影響 —大阪市街地を対象にした解析—。水工学論文集 2009, Vol.53 February, pp.289-294.

⑰ Tomohiko IHARA, Yukihiro KIKEGAWA, Kazutake ASAHI, Yutaka GENCHI, and Hiroaki KONDO: Change in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy-saving measures. *Applies Energy*, 2008, Vol.85, Issue 1, pp.12-25.

⑱ 大橋唯太・亀卦川幸浩：都市気象・ビルエネルギー連成数値モデルを利用した熱中症予報システムの開発 —大阪市を対象にした検証例—。環境情報科学論文集 21, 2007, No.21 November, pp.399-404.

⑲ Yukitaka OHASHI, Yutaka GENCHI, Yukihiro KIKEGAWA, Hiroaki KONDO, Hiroshi YOSHIKADO, and Yujiro HIRANO: Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo Office Areas during summer: numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, Vol.46, No.1 January, pp.66-81.

⑳ Takayuki TOKAIRIN, Hiroaki KONDO, Hirosi YOSHIKADO, Yutaka GENCHI, Tomohiko IHARA, Yukihiro KIKEGAWA, Yujiro HIRANO, and Kazutake ASAHI: Numerical study on the effect of buildings on temperature variation in urban and suburban areas in Tokyo. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2006, Vol.84, No.5, pp.921-937.

謝辞

JSPS 科研費・基盤研究(B)「高温な気候暴露の循環器系疾患リスク評価と AI を利用した予測手法の構築」(課題番号 20H03949; 研究代表者 大橋唯太)の助成を受けています。

## 温熱環境の変化が睡眠中のバイタルサイン変動に与える影響

\*森川 裕貴・重田 祥範（公立鳥取環境大学環境学部）

### 1. はじめに

近年では、地球温暖化や都市ヒートアイランド現象の進行にともない、健康への影響が指摘されている(国立環境研究所, 2009). そのなかでも、熱帯夜に代表される夜間気温の上昇は、人の睡眠環境や翌日の活動に大きな影響を及ぼす(大橋ほか, 2014). 特に、寝室の温熱環境が睡眠中の体温調節や睡眠の質そのものに影響していると指摘されている(都築, 2014). さらに、国民生活時間調査(NHK, 2015)によると日本の睡眠時間は、この半世紀に渡って緩やかに減少しているとされている。また、OECD がおこなった世界的な睡眠時間の調査によると、日本の睡眠時間は世界主要国 29 か国の中で韓国に次いで 2 番目に短いことが分かっており、睡眠後進国とされている。一方、総務省統計局(社会生活基本調査, 2016)では、日本全国の平均睡眠時間は約 7 時間 40 分と報告している。特に、学生生活の時期は、自由な時間が増え、かつ生活環境が激変するため、起床・就寝時刻は不規則となり、生活リズムは混乱しやすい。さらに、思春期後半や青年期にあたる大学生は、高校から大学への進学にともなう様々な就学形態の変化によって、就寝時間および起床時間が遅くなる傾向が認められている(Carskadon, 1990). この睡眠時間の減少は、規則的な就学時間や通学手段のための強制的な早朝覚醒による睡眠短縮、社会的制約や夜間アルバイトによる極端な夜型化、門限の消失、カフェインやアルコールの摂取による就床時刻の遅延によるものである。Carskadon(1990)は、上記の問題が行動や情動障害の発生に関連し、生産機能の低下、人間関係の悪化や学業上の問題、集中力欠如による成績悪化などに結びつくと言われている。しかしながら、土井(2012)は、睡眠障害に対して適切な対処をすることで、人々の健康増進や生活の質の向上にも寄与することが期待できると述べている。その結果として実際に規則的な睡眠習慣が大学生の睡眠の質や精神的健康に良い影響を及ぼすことが明らかになっている(城, 2019). しかし実際に睡眠時に被験者のバイタルサインを計測し、温熱環境が睡眠時の人への身体的・精神的影響を明らかにした研究事例はほとんどない。

そこで本研究では、人に与える温熱環境を把握するために夏から秋季にかけての屋内、屋外で気温と相対湿度の測定をおこなった。さらに、心身ともに健康な 20 歳代の男性に心拍センサを装着してもらい、睡眠時におけるバイタルサインの測定を試みる。

### 2. 研究概要

本研究では、鳥取県内に居住している心身ともに健康な男子大学生 11 名を被験者とした。被験者の平均年齢は  $21.0 \pm 0.4$  歳である。身長および体重は、 $172.1 \pm 3.9$  cm,  $61.5 \pm 5.3$  kg である。

温熱環境の測定では、居住者の寝室内に温湿度センサ(おんどとり TR-72wf:T&D 社)を設置し、睡眠時の気温および相対湿度を 5 分毎に測定した。また、屋内外の気温差の拡大によって、血圧が変動し、失神や心筋梗塞、脳梗塞など身体へ悪影響を与えることが指摘されている。そのため、被験者が居住している屋外の温熱環境を把握するため、被験者の居住区域を A, B, C, D, E の 5 か所に区分し、それぞれの住居周辺に位置する街区公園にて屋内と同様の方法で気象データを取得した。さらに、各被験者の睡眠の質を把握するため、起床時においてピッツバーグの睡眠質問票(土井, 1998)を参考にアンケート調査をおこなった。

一方、本研究では自律神経のバランスと温湿度の関係性を明らかにするため、小型心拍センサ(WHS-3:ユニオンツール社)を被験者に装着し、睡眠してもらう。測定日は、2020 年 8 月 18 日~25 日、9 月 19 日~25 日、10 月 20 日~26 日、11 月 19 日~25 日の計 29 日間である。

測定項目は心拍数(bpm)、心拍間隔(m)、自律神経活性度( $m/s^2$ )、体表面温度( $^{\circ}C$ )、三軸加速度( $m/s^2$ )である。本研究では心拍センサを装着するために専用の電極バンドを使用し、入浴中以外の日中胸部に装着してバイタルサイン変動を測定した。また、2019 年 9 月 24 日は被験者が所属する大学において睡眠に関するアンケート調査をおこなった。

解析の際は、ランダムに取得されているデータを 1 分間隔に変換した。なお、心拍周期モードでは、心拍数の測定をおこなっていないため、(1)式より心拍数を算出した。

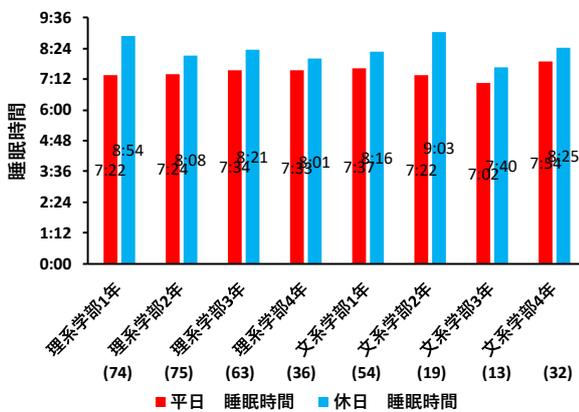
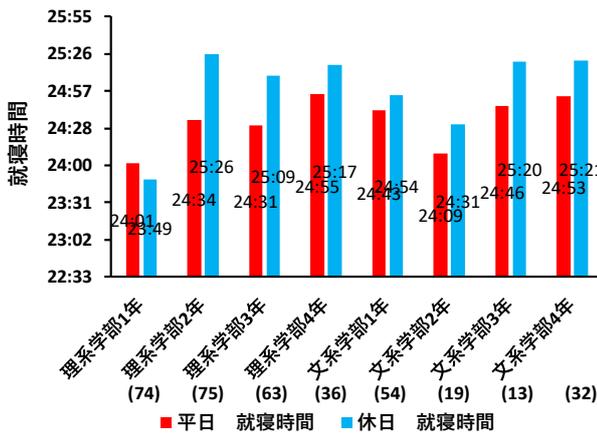
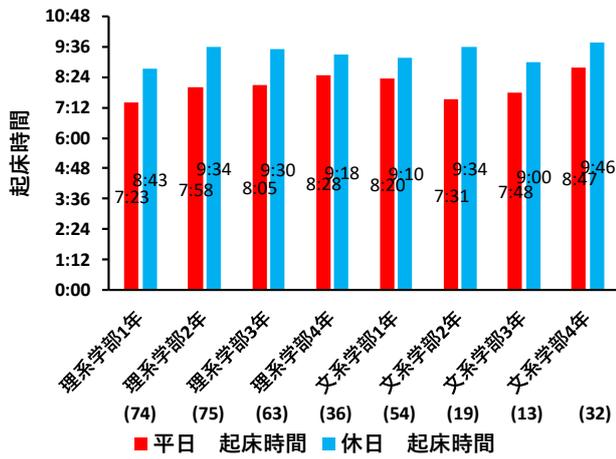
$$\text{心拍数} = 60000 / \text{RRI} \quad (1)$$

RRI は心拍間隔(m)を示す。

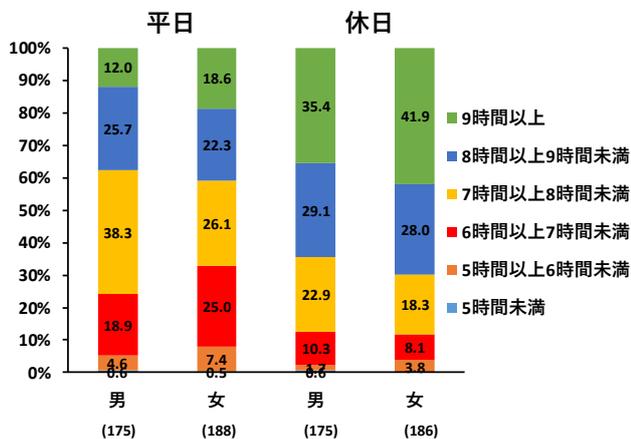
### 3. 結果

#### 3.1 夏季における睡眠アンケート

2019 年 9 月 24 日に実施したアンケートでは、居住環境や睡眠環境、睡眠障害、睡眠時間などの回答を求めた。アンケートから大学生の平均起床時間、平均就寝時間、平均睡眠時間を平日と休日に分けて算出した(第 1 図)。平日の平均起床時間は 8:03 であり、平均就寝時間は 24:34 であり、平均睡眠時間は 7 時間 29 分という結果であった。休日の平均起床時間は 9:19 であり、平均就寝時間は 24:58 であり、平均睡眠時間は 8 時間 21 分という結果であった。総務省統計局(社会生活基本調査, 2016)の調査と比較した場合、全国の平均睡眠時間である約 7 時間 40 分に対して、平日の平均睡眠時間は約 10 分下回っている。さらに男女別の 1 日の平均睡眠時間を求めた(第 2 図)。



第1図. 各学部学年の1日の平均起床時間(上), 平均就寝時間(中), 平均睡眠時間(下)をそれぞれ示す

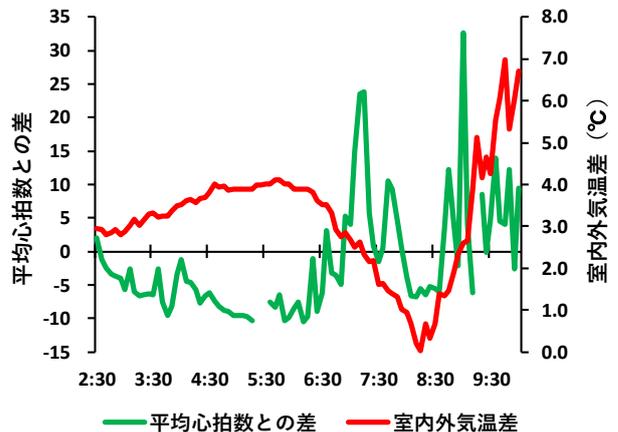


第2図. 男女別1日の平均睡眠時間

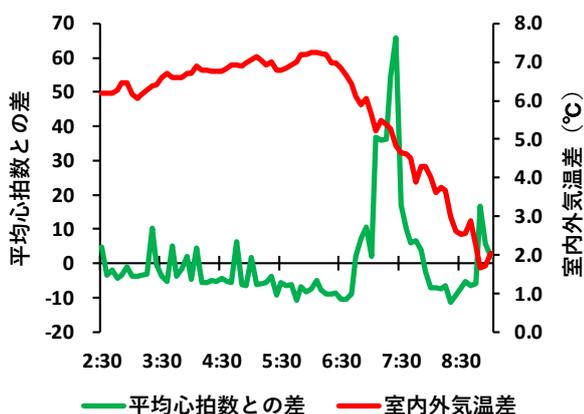
平日では、男性女性ともに「7 時間以上 8 時間未満」の割合が最も高い。休日にも男性女性共に「9 時間以上」の割合が最も高かった平日の睡眠時間が 7 時間未満の割合は、男性は 24.1%、女性は 32.9%であった。休日の睡眠時間が9時間以上の割合は、男性は 35.4%、女性は 41.9%であった。

### 3.2 バイタルサイン変動の測定結果

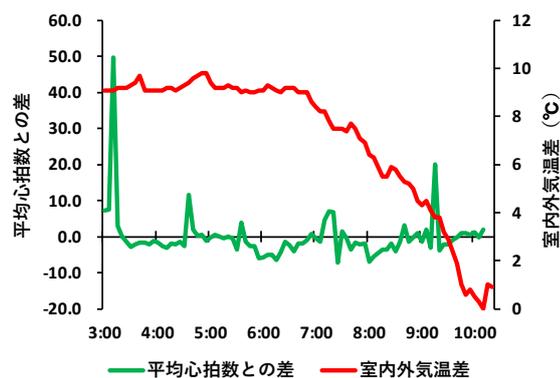
8月～11月の測定期間中、データに欠損がみられた日を除外し、各月の睡眠時の心拍数と室外気温と室内気温との差について明らかにした。被験者 I の平均心拍数は 52bpm であり、被験者 G の平均心拍数は 51bpm であり、被験者 J の平均心拍数は 62bpm であり、被験者 F の平均心拍数は 61bpm であった。8月の被験者 I の睡眠時は、冷房を使用しており、2時間のタイマーをセットして睡眠をしていたようである。そのため 5:30 頃から徐々に気温差がなくなり、8:20 頃に室内外気温差が大きくなるにつれて、心拍数の上昇が認められた(第3図)。一方で、他の被験者には同じような傾向は認められなかった。また、9月の被験者 G に関しては、飲酒の習慣があり、7:00 頃の心拍数上昇の要因は室内環境の変化以外の可能性が高い(第4図)。10月と11月に関しては、両被験者とも空調機器の使用はない。10月の被験者 J は起床後のアンケートで非常に良い睡眠ができたと回答していた。睡眠中の心拍数の変動は定常状態であり、気温差との関係性は認められなかった(第5図)。11月の被験者 F は、起床後のアンケートで睡眠時間が短く、良い睡眠ができなかったと回答していた。被験者 F のバイタルサイン変動は、他の被験者と比べても非常に大きかった(第6図)。



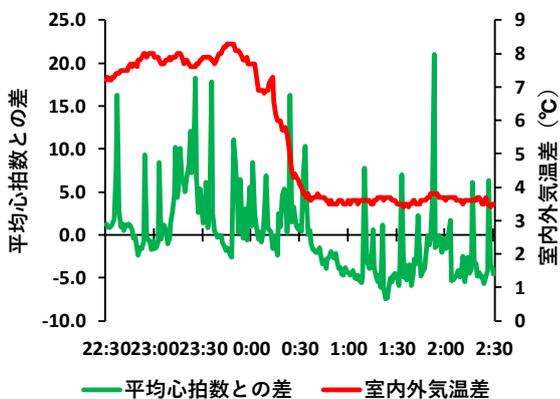
第3図. 8月19日の被験者Iのバイタルサイン変動と室内外気温差との関係性。



第4図. 9月19日の被験者Gのバイタルサイン変動と室内外気温差との関係性



第5図. 10月21日の被験者Jのバイタルサイン変動と室内外気温差との関係性



第6図. 11月19日の被験者Fのバイタルサイン変動と室内外気温差との関係性

## まとめ

本研究では、現在の大学生の睡眠状況を知るために鳥取県内の大学生を対象に睡眠に関するアンケート調査を実施した。その結果、学生の平日の平均睡眠時間は7時間29分となり、総務省統計局の調査(2016)による全国の平均睡眠時間である約7時間40分と比較して、約10分短かった。また、平日の睡眠時間における7時間未満の割合が男性より女性の方が高かった。さらに、休日の睡眠時間における9時間以上の割合が男性より女性の方が高かった。

一方で、温熱環境が大学生の睡眠にどのように影響

しているか検討するため、各月の睡眠時の心拍数と室内外気温差との関係性を明らかにした。その結果、空調機器の使用や飲酒によるものなど外部的要因も関係していることから、心拍数と気温には明瞭な関係が認められなかった。

## 引用文献

大橋唯太, 井原智彦, 玄地裕, 2014: 東京23区を対象とした夏季の睡眠障害と夜間の屋外熱環境の関係について. 環境情報科学, 学術研究論文集, 28, 367-372.

Carskadon, M. A, 1990: Patterns of sleep and sleepiness in adolescents. *Pediatrician*, 17, 5-12.

国立研究開発法人国立環境研究所, 2009: 地球温暖化の影響に関する解説. [https://www.nies.go.jp/escience/ondanka/ondanka02/lib/f\\_03.html](https://www.nies.go.jp/escience/ondanka/ondanka02/lib/f_03.html) (2020. 12. 15 閲覧).

城佳子, 2019: 大学生の睡眠習慣と睡眠感・精神的健康との関連. 日本健康心理学会大会, 大会発表論文集, 32(0), 151.

総務省統計局, 2016: 社会生活基本調査.

<https://www.stat.go.jp/data/shakai/2016/rank/index.html>

(2020. 12. 15 閲覧)

都築和代, 2014: 温熱環境と睡眠. 日本生気象学会雑誌, 50(4), 125-134.

土井由利子, 2012: 日本における睡眠障害の頻度と健康影響. 保健医療科学, 61(1), 3-10.

土井由利子, 箕輪眞澄, 大川匡子, 内山真, 1998: ピッツバーグ睡眠質問票日本語版の作成. 精神科治療学, 13(6), 755-769.

NHK, 2015: 国民生活時間調査報告書.

[https://www.nhk.or.jp/bunken/research/yoron/pdf/20160217\\_1.pdf](https://www.nhk.or.jp/bunken/research/yoron/pdf/20160217_1.pdf)

(2020. 12. 15 閲覧)

# 気候の年次差がウンシュウミカンの品質変化に及ぼす影響 —宇和島・有田・牛窓地域の比較—

\*鶴久森 英輔（岡山理科大学大学院生物地球科学研究科）  
大橋 唯太 千葉 太一 安保 美奈子 藤井 瑛美  
菊池 啓介 松田 拓也 北本 勇也（岡山理科大学生物地球学部）

## 1. はじめに

ウンシュウミカン(以降、ミカン)は、気象の変化に糖度などの品質が強く左右されることで知られる(農山漁村文化協会, 2000)。先行研究(例えば、川野ほか, 1982; 小林ほか, 1968)では、肥大期(7月中旬~9月の果実が大きく成長する時期)や成熟期(10~11月の糖度や酸度が著しく変化する時期)のそれぞれ約2ヵ月間ごとに、果実品質と特定の気候指標(例えば気温)の関係を分析しているものが多い。

本研究では、これらの先行研究に比べて短い10~15日間ごとの期間に、降水量・日照時間(日射量)・気温を気候指標として、ミカンの品質との関係を分析した。このような細かな期間に対して、季節進行する複数の気象変化の年次差が、ミカンの糖酸度などに及ぼす影響を明らかにした。また、愛媛県宇和島市と和歌山県有田郡、さらに独自に調査した岡山県瀬戸内市の3つの地域を解析対象地域とし、この3地域で共通してみられた気候指標との関係から、生産者がミカンを栽培するとき気象環境に注意すべき期間についても考察した。

## 2. 研究方法

### 2.1 果実品質の解析

図1に示す、愛媛県宇和島市(以降、宇和島)と和歌山県有田郡(以降、有田)の試験場(宇和島:



図1 本研究の対象地域。地図は地理院地図より引用。



図2 牛窓で収穫した果実の品質測定の様子。(左)糖度および酸度測定。(右)横径測定。

愛媛県農林水産研究所果樹研究センターみかん研究所、有田: 和歌山県果樹試験場)、岡山県瀬戸内市牛窓地区の一般農地(以降、牛窓)で測定された、ウンシュウミカン品種「宮川早生」の果実データを使用した。果実の品質は、試験場内で栽培されているミカンの糖度・酸度・果実横径の3項目を測定している。

糖度は、調査毎に果実を収穫し、その果汁がデジタル糖度計で測定されている。果実横径はノギスを用いて測定されており、測定対象となる果実を複数個選定し、毎回同じ果実が測定されている(図2参照)。測定個数は、宇和島が5樹木から合計15~20個、有田が2樹木から合計6個、牛窓が5樹木から糖酸度測定は15個、横径測定は50個である。

宇和島と牛窓は7月1日(牛窓の糖度・酸度は10月1日)~11月21日の期間に10日間ごと、有田は7月15日~12月15日の期間に15日間ごとに測定している。本研究では、宇和島は(2012年を除く)2001~2018年の17間、有田は2007~2019年の13年間、牛窓は2015~2019年の5年間に得られた測定データを解析に用いた。

### 2.2 気候指標の解析

本研究では、圃場内で観測されている気象データ、または最寄りのアメダスの気象データを解析に用いた。宇和島は、みかん研究所から約10kmの位置にある宇和島アメダスの2001~2018年(2012年を除く)の17年間のデータ(気温は測定間

隔 10s で分解能 0.1°C、降水量は分解能 0.5mm、日照時間は測定間隔 2min で分解能 0.1hr) を用いた。有田は、最寄りの湯浅アメダス (果樹試験場から約 4km) では降水量(分解能 0.5mm)しか観測されておらず、試験場内では降水量・気温・日照時間が 2012 年以降観測されている。そのため、降水量は湯浅アメダスの 2007~2019 年の 13 年分のデータ、気温 (分解能 0.1°C) と日照時間 (分解能 0.1hr) は試験場内で観測された 2012~2019 年の 8 年分のデータを用いることにした。牛窓は、圃場内に設置した測器から得られた 2015~2019 年の 5 年間のデータ (気温は測定間隔 10min で分解能 0.1°C、降水量は分解能 0.2mm、日射量は測定間隔 10min で分解能 0.01MJ/m<sup>2</sup>) を用いた。

### 2.3 単相関分析

宇和島と牛窓は、2.1 で述べた測定日に合わせて 10 日間隔に区切って解析した。一方の有田も測定日に合わせて 15 日間隔に区切り、解析をおこなった。

3 地域において、上述の区切り期間ごとに、気候指標の変化量 (積算降水量 mm: 各期間の降水量の積算

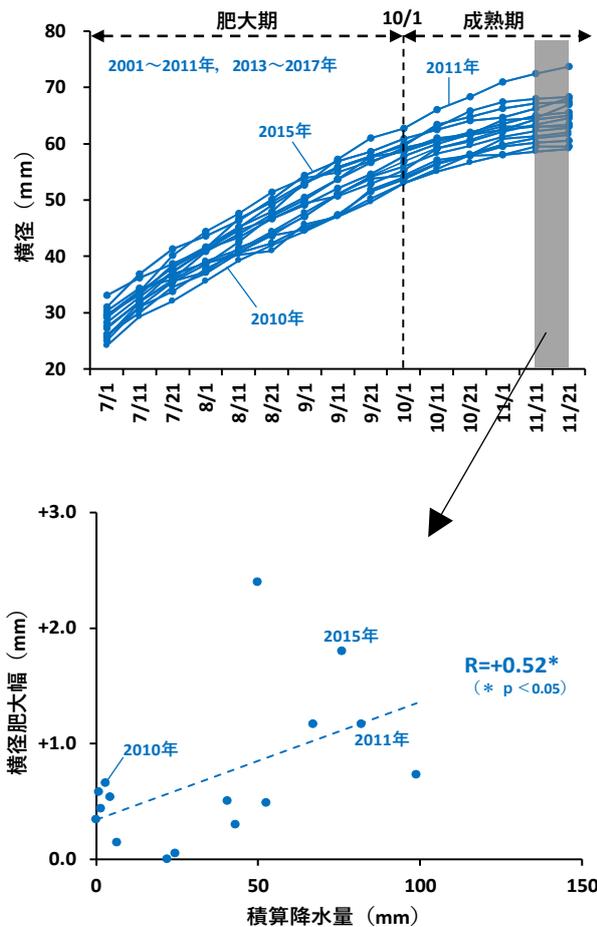


図3 (上) 7/1~11/21 に測定された果実横径の推移。(下) 区切り期間 11/11~11/21 に対する横径肥大幅と積算降水量の相関図。宇和島の例 (2001~2011、2013~2017 年)。

値、積算日照時間 hr: 各期間の日照時間の積算値、適温記録時間 hr: 後述) と果実品質の変化量 (糖度: 増糖量%, 酸度: 減酸量%, 横径: 横径肥大幅 mm) をそれぞれ計算し、各期間に対して単相関分析をおこなった (図3参照)。その結果を先行研究とも比較しながら、ミカンの生理応答との関連性を考察した。

適温記録時間とは、本研究で独自に作成した指標である。これは、ミカンの成長と成熟が気温 20~25°C で促進される事実 (小林ほか, 1968) に基づき、北本 (2015) を参考にして、該当する温度帯を記録した時間数を積算した指標である。

## 3. 結果と考察

### 3.1 糖度と気候指標の関係

10 日または 15 日間ごとに増糖量と気候指標の関係を、ピアソンの積率相関から求めた。その相関係数の変化を表 1 と図 4 に示す。3 地域とも肥大期から成熟期まで通して、増糖量と降水量のあいだに負の相関をもつ期間が多かったが、逆に日照時間または日射量とは正の相関がみられた。これらは特に 7 月後半~8 月と 10 月後半に、危険

表 1 果実の増糖量と気候指標の相関係数の 10~15 日変化。+: 正の相関 - : 負の相関  
 ■ p<0.05 ■ p<0.01 n: サンプル年数

		増糖量と積算降水量			増糖量と積算日照時間			増糖量と適温記録時間					
		先行研究	宇和島 n=17	有田 n=13	牛窓 n=5	先行研究	宇和島 n=17	有田 n=8	牛窓 n=5	先行研究	宇和島 n=17	牛窓 n=5	
肥大期	7/11-7/21												
	7/21-8/1		-0.42			+0.49						-0.39	
	8/1-8/11		-0.64	-0.54		+0.67	+0.90					-0.46	
	8/11-8/15		-0.78	-0.78		+0.70	+0.73					-0.15	
	8/15-8/21		-0.14	-0.14		+0.58						-0.49	
	8/21-9/1		-0.57	-0.68		+0.60	+0.60					-0.29	
	9/1-9/11	-	-0.31	-0.64		+0.85	+0.57			+		-0.50	
	9/11-9/15	伴野ほか 2013	-0.11			+0.36				伴野ほか 2013		+0.12	
	9/15-9/21	川野ほか 1982	-0.36	-0.49		+0.47	+0.44			農山漁村文化協会 2000		-0.15	
	10/1-10/11		-0.33	-0.45	-0.92		+0.19	+0.13	+0.88			-0.031	-0.025
成熟期	10/11-10/15		-0.36		+0.93		+0.57		+1.0			-0.41	+0.62
	10/15-10/21		+0.26	-0.57	-0.70		-0.26	+0.92	+0.18			+0.13	+0.33
	10/21-11/1		+0.22	-0.61	-0.52		-0.17	-0.14	-0.50			-0.05	-0.14
	11/1-11/11		+0.17	-0.47			-0.16		0.0			-0.13	-0.54
	11/11-11/15												
	11/15-11/21												
	11/21-12/1												

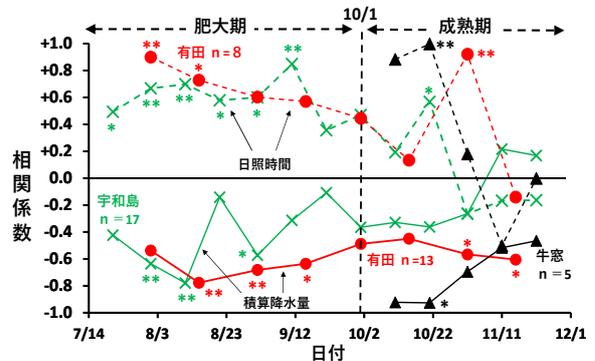


図4 果実の増糖量と積算降水量・積算日照時間の相関係数の期間変化 (表 1 の相関係数)。\*p<0.05 \*\*p<0.01

率5%で統計的に有意な相関が認められた。

糖度の上昇は、光合成によって生産されたショ糖が果実内に蓄積することで起きるが(伴野ほか, 2013)、その際に、土壤の乾燥によって果実内の水分が少なくなると、物理的な濃縮効果や光合成産物の代謝の変化で、糖度が上昇しやすくなる(門屋, 1973; 川野ほか, 1982)。さらに、岩崎(2015)は、7月中旬~8月に土壤の乾燥に起因する糖度の上昇が顕著であることを指摘している。これらの関係から、降水量が少ない(日照条件が良好な)年は土壤水分量が減少し、果実内に蓄積する水分が少なくなるため、糖度が上昇しやすくなると考えられる。この関係が強まる7~8月や10月後半に降水量が多くなってしまふ年には、ミカン生産者は土壤水分の管理に十分注意する必要がある。

### 3.2 酸度と気候指標の関係

10日または15日間ごとの減酸量と気候指標の相関係数の変化を表2と図5に示す。宇和島と有田の両地域とも、肥大期から成熟期まで通して、減酸量は降水量と正の相関をもつ期間が多かった反対に、日照時間または日射量とは負の相関がみられた。この関係は、特に8月前半に危険率5%で有意になっている(図5a)。坂本・奥地(1968)でも、降水量が多い年ほど酸含量が低下することが確認されていることから、降水量が多く日照条件が不良な年ほど酸度は減少しやすいといえる。これらの結果から、ミカン生産者は、酸度の減少に対して特に8月前半の降水量(日照時間)に注意を払う必要がある。

一方、減酸量と適温記録時間の関係は(図5b)、7~9月に正の相関をもつ期間が多くみられた。宇和島では、特に9月1日~9月11日、9月21日~10月1日に危険率5%で有意な正の相関となっ

表2 果実の減酸量と気候指標の相関係数の10~15日変化。+: 正の相関 - : 負の相関

■ p<0.05 ■ p<0.01 n : サンプル年数

		減酸量と積算降水量			減酸量と積算日照時間			減酸量と適温記録時間	
		宇和島 n=6	有田 n=13	牛窓 n=4	宇和島 n=6	有田 n=8	牛窓 n=4	宇和島 n=6	牛窓 n=4
肥大期	7/11-7/23								
	7/21-8/1								
	8/1-8/1								
	8/11-8/15								
	8/11-8/21								
	8/21-8/15								
	8/21-9/1								
	9/1-9/1								
	9/11-9/15								
	9/11-9/15								
成熟期	9/21-10/1								
	10/1-10/1								
	10/11-10/15								
	10/11-10/21								
	10/21-11/1								
	11/1-11/1								
	11/1-11/11								
	11/11-11/15								
	11/11-11/21								

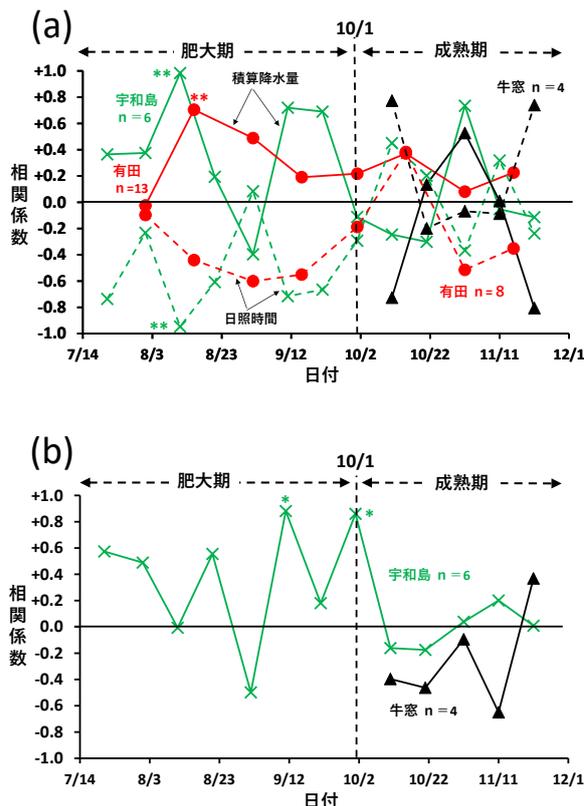


図5 (a) 果実の減酸量と積算降水量・積算日照時間の相関係数の期間変化(表2の相関係数)。(b) 減酸量と気温の適温記録時間の相関係数の期間変化。

\*p<0.05 \*\*p<0.01

ていた。新居ほか(1970)や小林ほか(1968)は20~25°C付近で酸度が減少しやすい結果を示しているため、適温記録時間(気温20~25°Cの積算時間)が多いほど減酸は進むと考えられ、ミカン生産者は9月上旬や下旬に20~25°Cから外れた気温の累積時間に注意を払う必要がある。

### 3.3 横径と気候指標の関係

10日または15日間ごとの横径肥大幅と気候指標の相関係数の変化を表3に示す。表3より、3地域とも肥大期から成熟期までを通して、横径肥大幅と降水量(日照時間)のあいだに正(負)の相関をもつ期間が目立つ。つまり降水量が多く、日照条件が不良な年ほど果実は肥大しやすいことを示唆している。特に肥大期の8~9月は有意な相関を持つ期間が多くなっている。

果実に水分や光合成産物が蓄積することにより肥大は進むが、特に水分の蓄積が肥大を促進させやすいといわれる(農山漁村文化協会, 2000)。今回の解析結果からは、多照による光合成産物の蓄積よりも、多雨による水分蓄積のほうが果実を肥大させやすいと言える。したがってミカン生産者は、横径の成長が著しい肥大期の8~9月の降水

表 3 果実の横径肥大幅と気候指標の相関係数の 10~15 日変化。+ : 正の相関 - : 負の相関

■ p<0.05 ■ p<0.01 n : サンプル年数

	先行研究	横径肥大幅と積算降水量			横径肥大幅と積算日照時間			横径肥大幅と適温記録時間	
		宇和島 n=17	有田 n=13	牛窓 n=5	宇和島 n=17	有田 n=8	牛窓 n=5	宇和島 n=17	牛窓 n=5
肥 大 期	7/11-7/21								
	7/21-7/31								
	8/1-8/11								
	8/11-8/21								
	8/21-9/1								
	9/1-9/11								
	9/11-9/21								
	9/21-10/1								
	10/1-10/11								
	10/11-10/21								
成 熟 期	10/21-11/1								
	11/1-11/11								
	11/11-11/21								
	先行研究								
	宇和島 n=17								
	牛窓 n=5								

量に注意を払う必要がある。

宇和島の横径肥大幅と適温記録時間(20~25°Cの積算時間)のあいだには、肥大期から成熟期まで正の相関の期間が多くみられており、適温記録時間が多い年ほど肥大が促進されているとわかる。特に成熟期の10月21日以降は危険率5%で有意な正の相関となっている。中川ほか(1984)は、晩秋で低温になりつつある11月頃に、晴天で高い気温が横径肥大に有効であると述べていることから、ミカン生産者は、10月下旬以降の気温が低下する時期に、20~25°Cから外れる温度環境をできるだけ避ける必要があると考える。

### 3.4 気候指標どうしの相互相関

これまで解析に用いた3つの気候指標(降水量・日照時間・適温記録時間)のあいだでみられる相関係数を表4に示す。7~11月の全期間を通して、降水量と日照時間、日照時間と適温記録時間のあいだに負の相関、降水量と適温記録時間のあいだに正の相関がみられたことから、それぞれの指標

表 4 宇和島・有田・牛窓で観測された気候指標どうしの相関係数(10~15日変化)。+ : 正の相関 - : 負の相関

■ p<0.05 ■ p<0.01 n : サンプル年数

	先行研究	降水量と日照時間			降水量と適温記録時間		日照時間と適温記録時間	
		宇和島 n=17	有田 n=8	牛窓 n=5	宇和島 n=17	牛窓 n=5	宇和島 n=17	牛窓 n=5
肥 大 期	7/11-7/20							
	7/21-7/31							
	8/1-8/10							
	8/11-8/20							
	8/21-8/31							
	9/1-9/10							
	9/11-9/20							
	9/21-9/30							
	10/1-10/10							
	10/11-10/20							
成 熟 期	10/21-10/31							
	11/1-11/10							
	11/11-11/20							
	先行研究							
	宇和島 n=17							
	牛窓 n=5							

に関係があるとわかる。つまり、降水量が多くなると日照時間が少なくなり、また適温記録時間は多くなる。これは、降雨によって気温の日較差が小さくなり、20~25°Cの温度帯を記録する時間が増えたことが原因と考えられる。したがって、気候指標どうしが強く結びついているため、1つの気候指標を用いることで品質との関係を議論できる可能性がある。3.1~3.3で示したように、降水量と果実品質のあいだに有意な相関がみられた期間が多く、先行研究でも果実内の水分変化が糖度や酸度に強く影響することが指摘されている(例えば、門屋, 1973; 川野ほか, 1982)。土壌中の根から吸収される水分量が降雨によって変化することからも、ミカン生産者は特に降水量に注意を払うことで果実の品質低下を防ぐことが期待できる。

## 4. まとめ

ウンシュウミカンの果実の品質(糖度・酸度・横径)と気候指標の関係について、愛媛県宇和島市、和歌山県有田郡、岡山県瀬戸内市牛窓地区で測定されたデータを用いて、10・15日間ごとに単回帰分析をおこなった。解析で得られた結果から、生産者がミカンを栽培する際に着目すべき、果実の品質と気象の関係をまとめた。

[糖度]: 7月21日~8月31日や10月後半には降水量が多い年ほど糖度は増加しにくくなるため、土壌水分の管理に注意する必要がある。

[酸度]: 肥大期の7~9月は、降水量が多い年ほど酸度は減少しやすくなる。特に相関の強い8月1日~8月10日は降水量に注意する必要がある。また、9月の上旬や下旬では、適温記録時間が多いほど酸度が減少する傾向がみられるため、20~25°C以外の気温の累積に注意する必要がある。

[横径]: 降水量や適温記録時間が多い年ほど、果実は肥大しやすい。特に8~9月の降水量と10月20日以降の適温記録時間に注意が必要である。

一方で、降水量が多くなると日照時間は少なくなり、適温記録時間は多くなることが確認できた。降雨による果実内の水分変化が品質に強く影響することから、気候指標のうち特に降水量に注意すれば、果実の品質低下を防ぐことができる。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、ウンシュウミカンの公開データを解析する許可を頂き、測定方法の情報を提供頂きました愛媛県農林水産研究所果樹研究センターみかん研究所、ならびに和歌山県果樹試験場の関係者皆様に心より感謝申し上げます。

# 近年の豪雨と地球温暖化

## ～最新のイベント・アトリビューション研究の紹介～

\*川瀬宏明, 今田由紀子ほか (気象庁気象研究所)

### 1. はじめに

近年、大規模な災害を伴う豪雨が多発している。記憶に新しいのは令和2年7月に九州を中心に大きな被害が出た「令和2年7月豪雨」である。特に、線状降水帯が形成された球磨川流域では、豪雨により球磨川が氾濫し、甚大な被害が発生した。気象庁は、顕著な災害を起こした自然現象について名称を定めることとしている。ここ数年を振り返ってみると、「令和元年東日本台風」「平成30年7月豪雨」「平成29年九州北部豪雨」「平成29年7月九州北部豪雨」「平成27年9月関東・東北豪雨」「平成26年8月豪雨」など、毎年のように何らかの豪雨が発生している。豪雨の直接の要因は、台風や梅雨前線、線状降水帯など様々であるが、近年観測している地球温暖化の寄与が指摘され始めている。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が2018年に公表した「1.5°C特別報告書」によると、工業化以降、人間活動によって、世界の平均気温が約1.0°C上昇したと見積もられている。日本においては、都市化の影響が少ない地点を用いた解析から、100年で1.24°Cの割合で気温が上昇している (気象庁, 2020)。また、日降水量100mm以上の大雨の年間日数も、100年間に0.29日の割合で統計的に有意に増加してきている。

一方、気温や降水量は年々変動が大きいいため、近年、猛暑や豪雨が多いからと言って、必ずしもそれが温暖化の影響とは限らない。実際に発生した豪雨や猛暑などの極端現象に対する地球温暖化の寄与を調べる手法は、「イベント・アトリビューション (Event Attribution: EA)」 (異常気象の要因分析) と呼ばれる (森, 2013)。EAは、全球気候モデルを用いて、極端現象が発生した時期の状態と、そこから過去の地球温暖化に伴う要素 (温室効果ガスの排出や海面水温の上昇等) を除いた状態で、大量のアンサンブル実験を行い、実際に発生した極端現象に相当する事例の発生確率の変化から温暖化の寄与を評価する手法である (Stott et al. 2004)。EAの研究は既に日本でも行われており、たとえば、Imada et al. (2019)は、2018年7月の日本の

猛暑に対するEAを行ない、実際の2018年7月の気候条件下においては、猛暑の発生確率が約20%であったのに対し、地球温暖化の影響がなかったと仮定した場合においては、ほぼ0%であったと推定した。猛暑に関するEAはこのほかにも実施されてきたが (例えば、Imada et al. 2014)、日本で発生する豪雨に対するEAはこれまで困難とされ、ほとんど行われてこなかった。その理由として、日本の豪雨は急峻な地形の影響を受けるほか、メソスケールの降水システムを解像する必要があるため、一般的にイベント・アトリビューションで用いられる全球気候モデルでは再現が難しいことが挙げられる。また、単に気温上昇に伴う水蒸気の増加だけでなく、その水蒸気を降水として落下させる働きをする循環場の影響を強く受けるため、内部変動による揺らぎ幅が大きい循環場の変動が邪魔をして、温暖化による影響が相対的に検出しにくくなることが挙げられる。

この課題を解決するために、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF)」 (Mizuta et al. 2016)の枠組みを拡張し、気象研究所全球大気モデル (MRI-AGCM) 及び気象研究所非静力学地域気候モデル (NHRCM) を併用したEAを実施することで、地球温暖化が平成29年7月九州北部豪雨及び平成30年7月豪雨の発生に与えた影響を推定した (Imada et al. 2020)。このような従来のEAは、多量のアンサンブル計算を行うことで、極端現象の発生頻度を確率的に評価するため、ここでは「確率的アプローチ」と呼ぶ (Risk-based Event Attributionとも呼ばれる)。

確率的アプローチは、実際に発生した極端現象そのものを忠実に再現するわけではなく、また、たとえ領域モデルを併用したとしても、現状ではモデルの解像度には限界がある。これに対して、発生確率の変化は評価できないが、高解像度モデルを用いて実際の極端現象を忠実に再現した上で、地球温暖化の影響を量的に評価する手法が提案されている。これを量的アプローチと呼ぶ。この手法は、Shepherd et al. (2018)の中で言及されているStoryline Event Attributionの

一つとして位置づけられる。Kawase et al. (2020)は、この手法を用いて、1980 年以降の気温上昇が平成 30 年 7 月豪雨の降水量を 6.7%増加した可能性があることを示した。また、令和元年台風第 19 号 (Hagibis) の大雨についても実施し (Kawase et al. 2021)、令和 2 年 7 月豪雨についても取り組みを始めている。

本講演では EA の 2 つのアプローチの詳細を紹介したのち、近年発生した豪雨に対する確率的アプローチ (Imada et al. 2020) 及び量的アプローチ (Kawase et al. 2021) を用いた研究を紹介する。

## 2. 近年の豪雨を対象とした Risk-based Event Attribution

まず、確率的アプローチを用いて行った豪雨の EA の研究 (Imada et al. 2020) を紹介する。

### 2.1 実験概要

d4PDF の気候再現実験 (HIST) と非温暖化実験 (Non-W 実験；人為起源の外部強制要因を産業革命以前の条件で固定、海面水温と海水分布から長期トレンドを除去) は、1950 年から 2010 年までの 60 年間のデータセットである。現在、d4PDF を準リアルタイムに延長し、解像度 60km の MRI-AGCM および解像度 20km の NHRCM のアンサンブル実験結果を整備している。本研究では、平成 30 年 7 月豪雨 (瀬戸内地域の大雨)、平成 29 年 7 月九州北部豪雨 (九州西部の大雨)、及び台風が連続で九州に接近した平成 5 年の九州東部の大雨を対象に、それぞれの豪雨に対する地球温暖化の寄与を定量的に見積もる試みを行った。

### 2.2 結果

50 年に 1 度レベルの大雨の発生確率を、HIST 実験と Non-W 実験と比較すると、平成 30 年 7 月の瀬戸内地域においては約 3.3 倍に、平成 29 年 7 月の九州西部においては約 1.5 倍になっていた (図 1a および b)。一方で、平成 5 年の台風起因の豪雨については、両実験間に有意な差は見られなかった (図 1c)。

平成 29 年 7 月の九州西部や平成 30 年 7 月の瀬戸内地域の大雨において、発生確率に明瞭な差が見られた要因として、いずれの年も海面水温のパターンがそれぞれの地域に水蒸気を収束させる循環パターンを作り易い状況に固定されていたために、温暖化に伴う水蒸気増加の影響が検出し易い状況になっていたと考えられる。平成 29 年の九州西部の例では、総観場の水蒸気の収束以外に、九州山地による地形効果も、水蒸気増加の効果を際立たせる役目をしていた。一方、HIST 実験と Non-W 実験において、背景場となる循環パターン

(図 2a) の発生確率には、ほとんど違いが見られなかった (図 2b)。

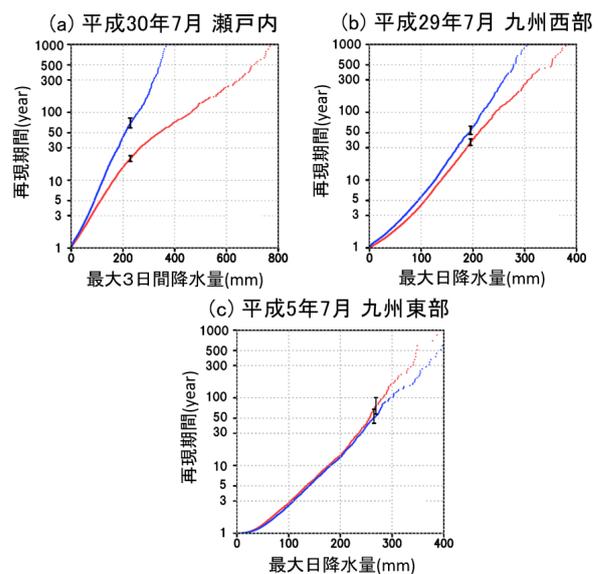
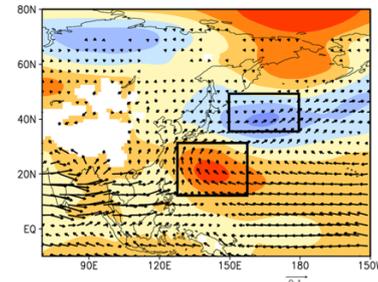


図 1. 確率降水量 (横軸) に対する再現期間 (縦軸)。(a) 平成 30 年 7 月の瀬戸内地域の期間最大 3 日間降水量、(b) 平成 29 年 7 月の九州西部の月最大日降水量、(c) 平成 5 年 7 月の九州東部の月最大日降水量。

### (a) 850hPa のアノマリ (HIST 100メンバー)



### (b) 気圧場の南北パターン指標の出現確率

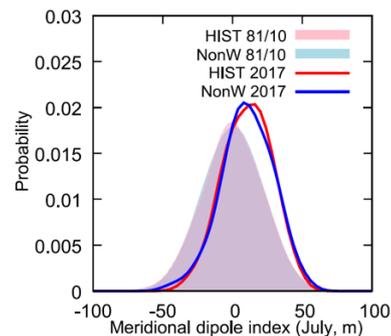


図 2. 平成 29 年 7 月九州北部豪雨時に見られたパターンとその出現確率の変化。(a) 平成 29 年 6 月 28 日-7 月 8 日の 850hPa 高度場と水蒸気フラックスの気候値 (1981-2010 年) からのアノマリ。(b) 850hPa 高度場の南北パターン指標の出現確率。赤は HIST 実験、青色は Non-W 実験の結果を示す。

これに対して、台風起因の豪雨の場合は、台風の接近自体の不確実性が大きいことや、モデルによる台風の再現が不十分であることから、温暖化による影響を検出することは難しいと考えられる。これらの結果は、d4PDF の長期間の気候再現実験と非温暖化実験を比較した Kawase et al. (2019) の結果とも整合的である。

### 3. 令和元年台風第 19 号の大雨を対象とした Storyline Event Attribution

次に、量的アプローチを用いた令和元年台風第 19 号に伴う豪雨に対する温暖化の影響を調べた研究 (Kawase et al. 2021) を紹介する。

#### 3.1 実験概要

令和元年台風第 19 号 (以後、台風第 19 号と呼ぶ) によってもたらされた豪雨を再現するために、気象庁メソ客観解析 (MA) を境界値として、気象庁非静力学モデル (JMA-NHM; Saito et al. 2007) を駆動した (再現実験: CTL)。格子間隔は 5 km、初期値は 2019 年 10 月 9 日 00、03、06、09 UTC の 4 つを用いた。降水量の検証には解析雨量を用いた。

次に、気象庁 55 年長期再解析データ (JRA-55) をもとに、日本周辺 (130E-150E, 25N-40N) で平均した 1980 年から 2019 年までの気温及び海面水温 (SST) の線形トレンドを計算した。ここでは 8 月から 10 月の各月の平均値、8 月から 10 月と 9 月から 11 月の 3 ヶ月平均値を用いる。MA から気温トレンドを抜いたデータを NHM の境界値として与え、近年の気温上昇を除去した実験を実施した。これを気温上昇除去実験 (NonW40) と呼ぶ。また、SST のみを変えた実験も実施した (NonW40\_SST)。

一方、Hagibis の大雨は地形の影響も大きく受けたことが報告されている (気象庁, 2019)。地形の効果を調べるために、地形を除去した CTL 及び NonW40 実験を実施した。それぞれ CTL\_NOTP、NonW40\_NOTP と呼ぶ。

また、2. で用いた d4PDF 拡張版の HIST と NonW40 の差から、工業化以降の気温上昇を求め、NonW40 と同様に MA から気温上昇を除去した実験を行った (NonW\_NAT)。

#### 3.2 結果

CTL は台風第 19 号が南海上から北上し、関東を通過するまでのコース及び強度をよく再現した。ただし、上陸時間が現実よりも 6 時間程度遅かった。CTL と解析雨量を比較すると、CTL は積算降水量の地域分布をよく再現していることが分かる (図 1 a, b)。CTL と NonW40 で計算された降水量を比較すると、台風を中心付近及び東側において、CTL の降水量が多いことが分かる。関東甲信地方で平均した期間積算降水量は、CTL が NonW40

に比べて 10.9% 多くなった。下層の気温上昇量はおよそ 1 度であったことを考えると、降水量の増加率は、気温上昇に伴う飽和水蒸気量の増加率 (7%/1K) よりも大きかった。また、NonW\_NAT との比較では 13.6% の差が見られた。

降水の増加率が大きくなった要因の一つとして、台風の強化が挙げられる (図 2)。CTL の台風を中心気圧は NonW40 に比べて低くなっており、同様の傾向は、SST のみを変えた NonW40\_SST においても見られた。この結果は、台風の発達に SST の寄与が大きかったことを示唆している。

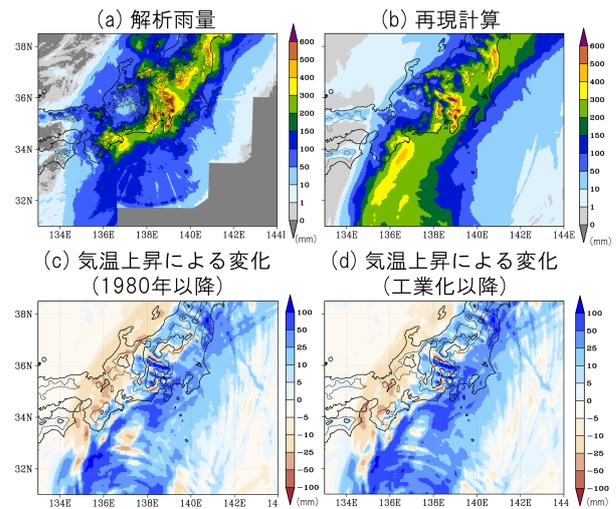


図 3 期間積算降水量と気温上昇による変化 (a) 解析雨量、(b) CTL (4 実験の平均)。等値線は標高 500m と 1000m。 (c) CTL と NonW40 との差、(d) CTL と NonW\_NAT との差。青色は CTL が多い領域を示す。

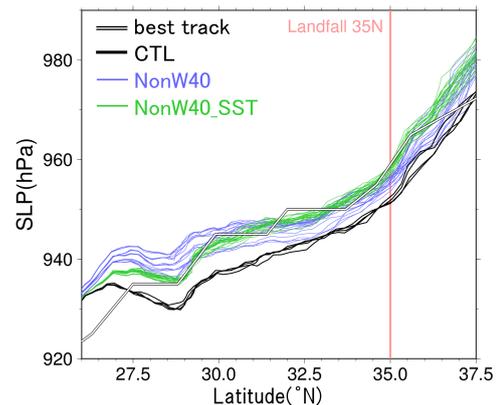


図 4. 台風の中心気圧の緯度変化 初期時刻と気温上昇トレンドを変えた HIST 4 実験 (黒線)、NonW40 (青線) と NonW40\_SST (緑線) の 20 実験の結果を示す。黒縁付白線は台風のベストトラックデータの中心気圧。赤線が上陸時のおよその緯度。

一方、地形を除去した実験(CTL\_NOTP)は、CTL に比べて降水量が減少したことに比べ、気温上昇除去実験(Non40\_NOTP)との差も小さくなった(図省略)。つまり、地形が降水量の増加率を増幅させた可能性がある。

最後に、降水量変化の不均一性について考察する。図 3c や 3d で見られるように、降水量は関東甲信地方では大きく増加したが、中部山岳を挟んだ反対側では減少した。700hPa の上昇流を見ると、台風を中心及びその東側ではもともと上昇流が卓越していた(図 5)。この上昇流は中部山岳による地形性の狭い範囲の上昇流と、台風本体が作り広域の上昇流から成っていた。再現実験では気温上昇除去実験に比べ、いずれの上昇流も強められており、その結果、不均一な降水量の変化が生じたと考えられる。

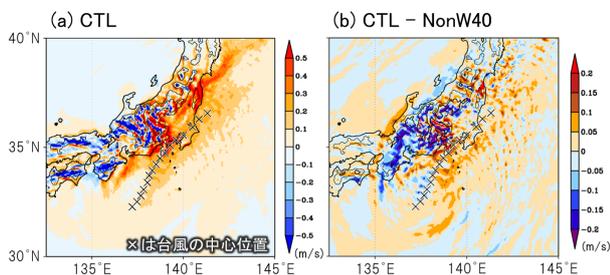


図 5. 台風接近・通過時の 15 時間平均 700hPa 鉛直流 (a) CTL、(b) CTL-NonW40。×印は、初期時刻 00UTC の CTL 実験が計算した台風を中心位置の変化。

#### 4. まとめ

地球温暖化が近年の豪雨に及ぼす影響を、イベント・アトリビューションの確率的及び量的アプローチを用いて評価した。確率的アプローチにより、平成 30 年 7 月の瀬戸内地域の豪雨と平成 29 年 7 月の九州西部の豪雨の発生確率は、地球温暖化によって、それぞれ約 3.3 倍と約 1.5 倍になっていたことが分かった。また、量的アプローチにより、令和元年台風第 19 号による関東甲信地方の大雨は、1980 年以降の気温上昇により 10.9%、工業化前からの気温上昇により 13.6%増加した可能性が示唆された。

確率的アプローチと量的アプローチは、冒頭で述べた通り、それぞれ得手不得手がある。両方の手法を組み合わせることで、地球温暖化の影響をより多角的に捉えることができ、さらには、豪雨増加のメカニズムにまで踏み込んだ研究ができるようになるだろう。

#### 謝辞

本研究は統合的気候モデル高度化研究プログラム

(JPMXD0717935561、JPMXD0717935457) (文部科学省) 及び科学研究費助成事業 (19H05697) の支援を受けて実施しました。

#### 参考文献

- Imada et al., 2014: The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013 [in “Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective”], *BAMS*, **94** (9), S52-S54.
- Imada et al., 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, **15A**, 8-12, DOI:10.2151/sola.15A-002.
- Imada et al. 2020, Advanced risk-based event attribution for heavy regional rainfall events, *NPJ Climate and Atmospheric Science*, **37**, 3-37.
- Kawase et al., 2019: The Heavy Rain Event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming [in “Explaining Extreme Events of 2018 from a Climate Perspective”], *BAMS*, **101**, S109-S114.
- Kawase et al., 2019: Contribution of historical global warming to local-scale heavy precipitation in western Japan estimated by large ensemble high-resolution simulations, *J. Geophys. Res.*, **12**, 6093-6103.
- Kawase et al. 2021, Enhancement of extremely heavy precipitation induced by Typhoon Hagibis (2019) due to historical warming, *SOLA*, in press.
- 気象庁, 2019, 報道発表「令和元年台風第 19 号とそれに伴う大雨などの特徴・要因について」
- 気象庁, 2020, 気候変動監視レポート 2019
- 森正人ほか, 2013, Event Attribution (イベントアトリビューション), *天気*, **60**, 57-57.
- Shepherd, et al., 2018: Storylines: An alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Climatic Change*, **151**, 555-571.
- Stott et al., 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, **432**, 610-613.