

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-1905 気候変動に伴う都市災害への適応
(JPMEERF20192005)

令和元年度～令和3年度

Climate Change Adaptation to Disasters in Urban Environments

〈研究代表機関〉
北海道大学

〈研究分担機関〉
筑波大学
京都大学

〈研究協力機関〉

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5－1. 成果の概要	
5－2. 環境政策等への貢献	
5－3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6－1. 査読付き論文	
6－2. 知的財産権	
6－3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	6
II－1 暑熱に対する都市災害への適応 （国立大学法人筑波大学）	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II－2 強風に対する都市災害への適応 （国立大学法人京都大学）	21
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II－3 豪雨豪雪に対する都市災害への適応 （国立大学法人北海道大学）	37
要旨	

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細		50
-----------------	-------	----

Ⅳ. 英文Abstract		60
---------------	-------	----

I. 成果の概要

課題名 2-1905 気候変動に伴う都市災害への適応

課題代表者名 稲津 将（国立大学法人北海道大学大学院理学研究院教授）

重点課題 主：【重点課題⑦】気候変動への適応策に係る研究・技術開発

副：【重点課題〇】なし

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）

（２－６）地方自治体向けのクラウド型気候変動影響評価ツールの開発

研究実施期間 令和元年度～令和３年度

研究経費 120,000千円（合計額）

（各年度の内訳：2019年度：40,000千円、2020年度：40,000千円、2021年度：40,000千円）

研究体制

（サブテーマ１）暑熱に対する都市災害への適応（国立大学法人筑波大学）

（サブテーマ２）強風に対する都市災害への適応（国立大学法人京都大学）

（サブテーマ３）豪雨豪雪に対する都市災害への適応（国立大学法人北海道大学）

研究協力機関

なし

本研究のキーワード 気候変動、気象災害、都市、台風、暑熱環境、豪雨豪雪、地方自治体、適応策

1. はじめに（研究背景等）

国内外において都市への人口集中が止まらない。そのような都市への人口密集に伴い、気候変動に伴う都市災害への脆弱性の高まりが懸念されている。とくに、2018年は気象がもたらす都市災害が頻発した。1月には、南岸低気圧の通過により、関東平野部で大雪となり、多数の交通障害が発生した。7月上旬の台風と梅雨前線に伴う豪雨は、西日本の多くの都市で浸水等の被害をもたらした。一方、そのとき北海道石狩川下流域で氾濫危険水位に達し、大規模災害の危険度が高まっていた。7月下旬には熊谷市で41.1℃、8月には新潟市で39.9℃を記録し、全国で猛暑により多数の熱中症関連死があり、気象庁は猛暑を一つの災害と認識していた。9月には、台風21号に伴う突風により、大阪都市部で建築物・倒木被害が多発し、広範囲で長期にわたる停電に見舞われた。いずれも気候変動によって激甚化する極端気象に対し、人口と資産が集積する都市は脆弱であることを象徴している。

2. 研究開発目的

上記のリスクに適切に対応するため、高度な科学的知見に基づいた気候変動に伴う都市災害への適応が求められている。これまでの気候変動適応研究では「地域の社会ニーズに細やかに応えられる研究の重要性」が指摘されている。気候変動適応法では、気候変動に伴う影響から国民の生命・財産を守っていくことが謳われている。その目的を達するため、国立環境研究所を核とし、各地方自治体が率先して気候変動適応策の策定と推進にあたることとなった。したがって、人口と資産の集積した都市に着目した気候変動適応研究は、気候変動適応法に即し、かつ地方公共団体の実務に大きく貢献するものとなる。以上の背景に鑑み、本研究の目的は、暑熱・強風・豪雨豪雪という現在から近未来の都市災害に直結する気象に着目し、特定都市に対して都市災害リスクを評価することである。また、各都市のリス

ク評価に基づき、具体的な適応策を地方自治体担当者と協議する。

3. 研究目標

全体目標	本研究の最終目標は、都市災害をもたらす気象に応じたシミュレーションを通じて、気候変動で激甚化する暑熱・強風・豪雨豪雪による都市災害リスクを評価し、対象とする都市に対し実用的な適応策へと昇華させることである。サブテーマ1が暑熱を、サブテーマ2が強風を、サブテーマ3が豪雨豪雪を分担する。また、各サブテーマが暑熱、強風、豪雨豪雪といったハザードに関連する気象を分析し、それぞれで得た知見を共有する。また、各サブ課題の共通点・相違点を意識した「自治体向けの提言書」をアウトプットとして作成する。各サブテーマの研究目標は下記のとおり。
------	---

サブテーマ1	暑熱に対する都市災害への適応
サブテーマリーダー /所属機関	日下 博幸 筑波大学
目標	暑熱都市に対し、フェーンを対象としたダウンスケール計算を実施し、気候変動影響に対するフェーン現象の影響を解明する。暑熱都市に対し、ヒートアイランドを対象としたダウンスケール計算を実施し、気候変動影響に対するヒートアイランド等の影響を明らかにする。暑熱都市における都市型気候変動リスクを評価し、新潟市・熊谷市とその結果を議論し、実現可能な適応策を提案する。

サブテーマ2	強風に対する都市災害への適応
サブテーマリーダー /所属機関	竹見 哲也 京都大学
目標	都市に影響を与える極端現象を抽出し、気象場から都市街区スケールへのダウンスケール手法を構築する。近未来に想定される極端現象に対する擬似温暖化実験を実施し、極端現象による強風災害リスクを街区スケールで解明する。強風災害に直結する最大瞬間風速を定量的に算定し、街区の建物配置など幾何学的形状の影響を評価し、温暖化影響による瞬間風速の増速効果を定量化する。この結果を京都市・大阪市と議論し、実現可能な適応策を提案する。

サブテーマ3	豪雨豪雪に対する都市災害への適応
サブテーマリーダー /所属機関	稲津 将 北海道大学
目標	札幌市における既往上位50例の豪雨豪雪事例を参考に、d4PDF 5km解像度の力学的ダウンスケーリングデータ750年分から札幌市で起こりうる夏季豪雨事例と冬季豪雪事例を抽出し、それらがどの程度の確率で激甚化し、都市災害をもたらすのかを最大可能性として評価する。また、その結果を札幌市に協議し、実現可能な気候変動適応策を提案する。

4. 研究開発内容

都市災害をもたらす気象に応じたシミュレーションを実施し、気候変動影響を調査した。着目する現象のスケールやシミュレーションによる再現性を考慮し、擬似温暖化実験、力学的ダウンスケーリング、都市街区気象モデル計算を行ったほか、既存の気候変動予測データを利用した。また、対象都市を、札幌市、熊谷市、新潟市、京都市、大阪市とし、それぞれの都市における暑熱・強風・豪雨豪雪による都市災害リスクを評価した。さらに、プロジェクト遂行にあたり、対象都市を管轄する地方自治体等と双方向のコミュニケーションを行い、研究成果の逐次の共有とともに、行政利用可能な形での適応策策定に向けた協議を行った。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本研究課題では札幌市、熊谷市、新潟市、京都市、大阪市を対象として暑熱・強風・豪雨豪雪といった極端気象が要因の都市災害に対する気候変動影響を調査した。まず、都市暑熱環境は全国的に悪化することが示され、北海道を中心に将来の盛夏環境において熱中症救急搬送者数、救急車稼働率、及び病床占有率が現在に比べ激増することが予測された。都市の猛暑はヒートアイランド現象が着目されがちだが、新潟市を含む日本海側の都市における極端高温の主因はフェーンであることが示された。また、その形成機構は風上の降雨を伴わないものがほとんどだった。同様に、都市強風環境の変化を、主に京都市と大阪市を対象として調査した。その結果、記録的な台風に伴う強風環境であっても、わずかな経路の違いで都市内における強風場は異なることが示された。また、建物の立地密度が相対的に低く建物高さのばらつきが大きい場合に、突風リスクが顕著になった。つまり、突風リスクは、台風または温帯低気圧の位置・強度と、建物の配置や街区の設計など都市構造に依存することが示唆された。これらの突風リスクは温暖化により増大する。さらに、都市における豪雨豪雪のリスクを調査した。都市特有の豪雨影響として、住宅密集地を流れる都市河川の氾濫がある。都市河川は応答の時定数が短いため、短時間強雨により河川水位が急激に上昇する。本研究課題では札幌市望月寒川における線状降水帯に伴う極端豪雨事例に着目して、将来の氾濫リスクを評価した。気候変動に伴い、日本のほとんどの都市で雪災害のリスクは激減するものの、北海道の日本海側を中心に寒冷都市では豪雪リスクが増加する可能性が示された。以上、暑熱・強風・豪雨豪雪に対する都市災害へのアプローチとして、再現・予測が十分な現象に対し力学的ダウンスケーリングを用いた確率論的評価が、不十分な現象に対しては擬似温暖化実験による極端事例評価が合理的であることが、課題全体の科学的知見として得られた。

本研究課題は対象とした地方自治体等との双方向コミュニケーションの中で実施した。つまり、研究成果を逐次共有しながら、気候変動影響に対する適応策を協議した。例えば、暑熱対策として熊谷市や新潟市で検討されている事例をもとに、大型の日除けや樹木の導入が有効となることを街区シミュレーションによって示した。あるいは、都市河川の氾濫対策として建設中の放水路トンネルの効果は、現在気候のみならず将来気候においても有効であることを示した。このように気候変動影響に対する都市災害を防ぐ適応策は、既存の都市計画や防災整備の一環あるいは延長として位置づけられることが、本研究課題全体の政策的知見として得られた。また、現在の対策では不十分なものについては、将来に向けて迅速に対応することが求められることを、各地方自治体と意識共有し、一部にはその政策に本研究課題の成果を活用していくこととなった。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

- 1) 北海道地域気候変動適応センターにおける北海道を中心とした気候変動適応研究の文献情報収集に協力し、ウェブページにおける文献量が倍増した。なお、本件は環境研究総合推進費2-2009と共同で実施したものである。
- 2) 都市街区LESの計算結果を環境省事業「令和3年度気候変動による災害激甚化に関する影響評価業

務」に提供し、国レベルでの適応策の議論にも貢献した。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

- 1) 熱中症リスク分析の結果を、埼玉県危機管理防災部消防課、熊谷市総合政策部企画課・政策調査課、新潟県環境企画課、新潟県保健環境科学研究所、新潟市環境部と共有し、各地方自治体における熱中症に伴う医療逼迫対策を講じることが見込まれる。
- 2) 現場気象観測に基づく熱中症対策を熊谷市政策調査課に提案した。その結果を受けて、熊谷市において小学生への日傘配布という適応策を実現する見込みとなった。
- 3) 札幌市望月寒川放水路トンネルが同河川における気候変動適応策の役割を果たす点について、北海道庁建設部河川砂防課と情報共有し、今後、研究成果を放水路トンネルの価値に対する住民広報に活用されることが見込まれる。
- 4) 本研究課題にて整理した天気図パターンを用いた1か月豪雪ポテンシャル予測の結果を札幌市雪対策室及び危機管理対策室と共有し、今後、予測技術を利用した雪対策配備が議論されると期待される。
- 5) 強風を伴う吹雪災害に関して、寒地土木研究所、東日本高速道路株式会社と情報共有し、本研究課題で開発したラージエディースミュレーションによる効果的な防雪柵を効率的に設計が見込まれる。
- 6) 強風災害への適応として、市街地の街路樹・公園樹の管理において台風の激甚化への配慮をする必要性が認識され、今後の樹木管理への反映が見込まれる。
- 7) 京都市の環境アセスメントの段階において、風害問題への配慮が答申書に盛り込まれるなど、今後も強風リスクへの配慮が見込まれる。
- 8) 大阪市の大気汚染常時観測網の検討において、都市の風環境にも配慮した適正配置が見込まれる。

5-3. 研究目標の達成状況

本研究課題の到達目標は「①都市災害をもたらす気象に応じたシミュレーションを通じて、気候変動で激甚化する暑熱・強風・豪雨豪雪による都市災害リスクを評価し、対象とする都市に対し実用的な適応策へと昇華させることである。サブテーマ1が暑熱を、サブテーマ2が強風を、サブテーマ3が豪雨豪雪を分担する。②また、各サブテーマが暑熱、強風、豪雨豪雪といったハザードに関連する気象を分析し、それぞれで得た知見を共有する。③また、各サブ課題の共通点・相違点を意識した「自治体向けの提言書」をアウトプットとして作成する。」と分割される。

①に関し、本研究課題では気象災害と対象都市の組み合わせ（暑熱は熊谷市・新潟市、強風は京都市・大阪市、豪雨豪雪は札幌市）を限定し、既存の気候変動情報を活用するなど工夫して、現象のスケールごとに整理する戦略で研究を展開した。その結果、各都市の気象ハザードを効率的に同定した。また、サブ課題ごとに研究成果を交流し、気象災害と対象都市のすべての組み合わせについて気象ハザードを同定した。①については、課題全体としての知見を得た点も含め、当初予定通りに達成した。

②に関し、擬似温暖化、力学的ダウンスケーリング、都市気象計算などを駆使して、確率評価と事例評価を行った。シミュレーションにより予測・再現が可能な現象と困難な現象に分けて近未来における都市気象リスクを評価する方法を確立した。②については、課題全体としての知見を得た点も含め、当初予定通りに達成した。

③に関し、暑熱に対しては熊谷市・新潟市、強風に対しては京都市・大阪市、豪雨豪雪に対しては札幌市・北海道と、気候変動適応策について協議し、地方自治体との双方向コミュニケーションによって創出された本研究課題の知見と気候変動適応策を提言書としてまとめ、各地方自治体と共有した。また、サブ課題を相互に乗り入れた研究成果も含めて地方自治体への適応策を協議し、課題全体を貫く知見として整理した。環境省事業「令和3年度気候変動による災害激甚化に関する影響評価業務」に提供し、わが国全体をカバーする適応策の議論にも貢献した点は特筆される。③については、サブ課題個別成果の地方自治体との協議の枠に留まらず、わが国全体の適応策に指針を与えるものとなった。当初予定通りに達成した。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数> 29件

<主な査読付き論文>

- 1) Asano, Y., Y. Nakamura, A. Suzuki-Parker, S. Aiba, and H. Kusaka: Building and Environment, 213 (2022). Effect of walking in heat-stressful outdoor environments in an urban setting on cognitive performance indoors.
- 2) Takemi, T., T. Yoshida, M. Horiguchi, and W. VandeBauwhede: Urban Climate, 32, 100625 (2020). Large-eddy-simulation analysis of airflows and strong wind hazards in urban areas.
- 3) Takabatake, D., and M. Inatsu: Climate Dynamics (2021). Summertime precipitation in Hokkaido and Kyushu, Japan in response to global warming.

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	1件
その他誌上発表（査読なし）	1件
口頭発表（学会等）	65件
「国民との科学・技術対話」の実施	17件
マスコミ等への公表・報道等	55件
本研究に関連する受賞	5件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

稲津 将

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士後期課程卒業、博士（地球環境科学）
 東京大学気候システム研究センター特任助教、現在、北海道大学大学院理学研究院教授

研究分担者

1) 日下 博幸

筑波大学大学院修士課程環境科学研究科修了、博士（理学）
 （財）電力中央研究所主任研究員、現在、筑波大学計算科学研究センター教授

2) 竹見 哲也

京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了、博士（理学）
 大阪大学大学院工学研究科助手、東京工業大学講師、現在、京都大学防災研究所教授

3) 秋山 千亜紀

筑波大学大学院一貫制博士課程生命環境科学研究科修了、博士（理学）

筑波大学生命環境系特任助教

現在、大東建託株式会社賃貸未来研究所主任研究員 兼 筑波大学生命環境系客員研究員

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１ 暑熱に対する都市災害への適応

国立大学法人筑波大学

計算科学研究センター 教授

生命環境系 特任助教

日下 博幸

秋山 千亜紀

〔要旨〕

熊谷市と新潟市を対象として、気候変動・ヒートアイランド・フェーンが暑熱環境に及ぼす影響を評価した。その結果、新潟市における極端気温の主因がフェーンであり、将来、熱中症救急搬送者数、救急車稼働率、及び病床占有率が激増することが予測された。また、最新の都市街区気象シミュレーションモデルを用いて、新潟駅前と熊谷市星川エリアの暑熱環境を再現し、気候変動適応策として自治体が進めている大型の日除けや樹木の導入が有効となることを示した。さらに、現地気象観測から、街路樹と藤棚が暑熱ストレスに対し効果的であり、日傘でも代替できることを示した。以上の結果を熊谷市、埼玉県、新潟市、及び新潟県の環境政策担当者等と共有し、将来の適応策を協議した。サブテーマ2と連携し、新潟市における強風に伴う火災リスクは0.58倍に減少すると予測された。サブテーマ3と連携し、関東平野における着雪リスク・降雪リスクの減少、並びに熊谷市における集中豪雨及び新潟市における融雪出水による河川氾濫リスクの増大が示唆された。

1．研究開発目的

気候変動により、都市では気候変動とヒートアイランドの2つによる暑熱環境の悪化が懸念されている。これに加え、山脈風下に位置する都市ではフェーンの影響による極端高温がしばしば発生しており、これらのトリプル効果により将来、都市では暑熱環境が極めて悪化する可能性が考えられる。

サブテーマ1では、気候変動・ヒートアイランド・フェーンの3つが都市の暑熱環境に大きく影響すると考えられる熊谷市と新潟市を対象とし、それぞれの現象が暑熱による都市災害リスク、さらには都市で生活する人々の熱中症リスクに与える影響を評価することを目的とする。また、これらのリスクを改善するために有効な適応策について具体的に検討し、その結果を各自治体と協議する。

2．研究目標

暑熱都市に対し、フェーンを対象としたダウンスケール計算を実施し、気候変動影響に対するフェーン現象の影響を解明する。暑熱都市に対し、ヒートアイランドを対象としたダウンスケール計算を実施し、気候変動影響に対するヒートアイランド等の影響を明らかにする。暑熱都市における都市型気候変動リスクを評価し、新潟市・熊谷市とその結果を議論し、実現可能な適応策を提案する。

3．研究開発内容

気象観測データ、アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)、領域気候モデルWRFによる力学的ダウンスケーリングの結果(高解像度気候予測データ)を使用して、気候変動・ヒートアイランド・フェーンの3つが、現在及び将来において都市（特に新潟市）の暑熱環境悪化にどの程度影響するかを定量的に評価する。また、将来の熱中症救急搬送体制・病床占有のリスク評価を実施する。さらに、現地気象観測や大規模被験者実験により、都市で生活する人々に暑熱環境がもたらす熱中症リスクや仕事・学

習能力の低下を実証的に評価する。

これらのリスク評価結果を各自治体と共有して協議し、自治体からの要望や情報提供のフィードバックを受ける。それらを踏まえて、空間分解能1 mの都市街区気象モデルを用いて暑熱環境シミュレーションを実施し、具体的な暑熱適応策の効果を検証する。

サブテーマ2と強風に関する知見を、サブテーマ3と降雨・降雪に関する知見を共有しながら、熊谷市及び関東平野と新潟市におけるリスクを分析する。特に、強風による火災延焼リスク、冬季南岸低気圧に伴う降雪・着雪リスク、強雨による河川の氾濫・水害リスクが現在に対して将来どの程度増大あるいは減少するかに着目して解析を行う。

以上の気候変動に伴う都市災害リスクの情報や研究成果を、熊谷市・埼玉県及び新潟市・新潟県と逐次共有し、より具体的かつ実用的な気候変動適応策となるよう協議する。

4. 結果及び考察

4. 1 暑熱による都市災害をもたらす気象の将来変化

暑熱による都市災害を発生させる気象の代表例として、フェーンとヒートアイランドが広く知られている。ここでは、フェーンが頻繁に発生する北陸地方最大の都市である新潟市を対象に、暑熱による都市災害を発生させる気象現象の現状を把握するとともに、その将来変化を明らかにした。

4. 1. 1 新潟市における顕著な極端高温事例の解析

新潟市の夜間極端高温事例（2018年8月23日夜から24日早朝）に対してWeather Research and Forecasting (WRF)モデルを用いた再現実験（CTRL）を行った。さらに、地形を除去した実験（NoTOPO）、新潟市中心部の土地利用を都市から水田に変更した実験（NoURB）、地形と土地利用の双方を変更した実験（NoURBTOP0）を行い、夜間極端高温事例に対するフェーンとヒートアイランドの寄与の大きさを定量的に評価した。その結果、この極端高温事例発生時にはフェーンとヒートアイランドの双方が発生しており、8月23日21時の新潟市の気温に対するフェーンとヒートアイランドの寄与はそれぞれ、2.8℃と1.9℃であることが分かった（図1.1a、1.1b）。一方で、8月23日24時における両者の寄与は、それぞれ3.2℃と0.8℃であった（図1.1c）。つまり、この夜間極端高温において、フェーンとヒートアイランドの双方が気温に対して十分な寄与を持っており、それぞれの寄与の大きさは時間によって異なっていたことが明らかになった。

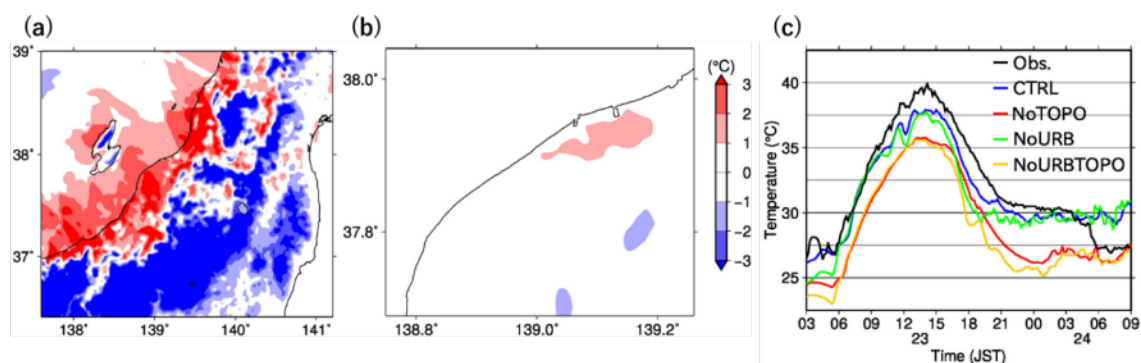


図 1.1 : (a) 2018 年 8 月 23 日 21 時における CTRL と NoTOPO の地上気温の差。(b) 2018 年 8 月 23 日 21 時における CTRL と NoURB の地上気温の差。(c) 極端高温事例前後の新潟における地上気温の時間変化。線の色は図中凡例の通り¹⁾。

4. 1. 2 新潟市の極端高温リスクの現状

新潟市における極端高温リスクの気候特性を分析した。新潟で観測された最高気温データを用いて1990年から2019年までの新潟市における最高気温TOP5、TOP10、TOP30、TOP100の事例を抽出し、それぞれの気圧配置を調査した。その結果、新潟市の極端高温は熱帯低気圧が日本付近に存在する時(台風型)、もしくは高気圧が日本を覆っている時(高気圧型)に多く発生していた。また、新潟で観測された

風データからTOP5、TOP10の極端高温のうち、台風型の多くでフェーンが発生していた(表1.1)。一方、TOP100の高温の場合、台風型でかつフェーンが発生した事例は15%に過ぎなかった。これらの結果は、新潟市における顕著な極端高温は、熱帯低気圧を起因とするフェーンが原因である場合がほとんどであることを意味している。さらに、気象庁ベストトラックデータから、台風の中心が北緯29.0度～45.8度、東経123.2度～139.1度(極端高温ポテンシャルゾーンと名付ける)に位置している時にフェーンが吹くと新潟市の極端高温リスクが増大することが分かった(図1.2)。

表 1.1：新潟市における最高気温上位 5、10、30、100 位の各事例における気圧配置の分類。カンマで区切られた 1 つ目の数字はフェーン無し事例、2 つ目の数字はフェーンあり事例である²⁾。

	台風型		高気圧型	その他
	台風の影響 大	台風の影響 小		
TOP5	0, 4		1, 0	0, 0
	0, 4	0, 0		
TOP10	0, 6		1, 3	0, 0
	0, 6	0, 0		
TOP30	2, 15		7, 4	2, 0
	0, 15	2, 0		
TOP100	12, 23		40, 11	12, 2
	3, 15	9, 8		

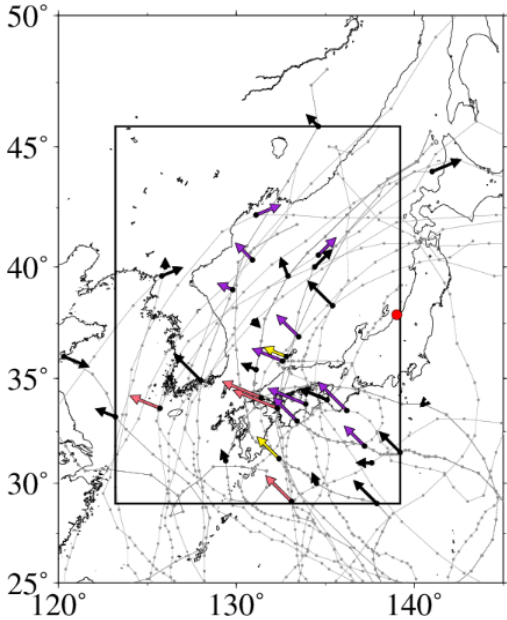


図 1.2：新潟市で発生した台風型の極端高温(35 事例)における熱帯低気圧・台風の経路(灰色の点と線)。黒丸は極端高温発生時の熱帯低気圧の位置を示す。矢印は極端高温発生時の新潟市の風ベクトル。ピンク、黄色、紫、黒の矢印の場所はそれぞれ極端高温上位 5、10、30、100 事例における台風の位置である。赤丸は新潟市の位置。黒い四角はフェーンに伴う極端高温が発生したときの台風の範囲(極端高温ポテンシャルゾーン)である²⁾。

4. 1. 3 新潟市の極端高温(フェーン)リスクの将来変化

表1.2に、現在から将来までの極端高温ポテンシャルゾーンを通過する台風の数と極端高温をもたらすフェーンの数の変化を示す。この表から、将来は現在と比べて、新潟市で極端高温を引き起こす可能性が高い(極端高温ポテンシャルゾーンに入る)台風が減少することが分かる。この減少は、将来気候において台風全体の数が減少したことに起因していた。一方で、d4PDF及びd4PDF (4K上昇実験結果)を解像度5 kmにダウンスケーリングした結果から、特に厳しい極端高温(上位100事例)に対するフェーン事例の割合が16%から24%に増加することが分かった(図1.3)。さらに、新潟の最高気温TOP100のうちフェーンが関連していると思われる事例は70%から82%に増加し、そのほとんどが高気圧型の気圧配

置時に発生することが分かった(表1.3)。将来は日中の海陸間の温度差が小さくなっていったことから、最高気温上位100事例におけるフェーンの割合の増加、及び高気圧型フェーンを起因とした極端高温の増加は、海風を駆動する気圧傾度が小さくなり、新潟市でフェーンが吹きやすくなったためと考えられる。

表 1.2：過去・現在から将来までの台風の変化及び極端高温・フェーンとの関係。

	① 台風総数 (40年/メンバー数)	② 極端高温ポテンシャルゾーンを 通った台風		③ 極端高温ポテンシャルゾーンを通り 山からの風(3m/s以上, NE-E-SSW) をもたらした台風	
		個数	①からの割合	個数	①からの割合
観測 1990-2019	368	215	58.4%	162	44.0%
d4PDF過去実験 1981-2010 (33メンバー)	232	132	56.9%	61	26.2%
d4PDF 4°C上昇実験 2081-2110 (89メンバー)	127	71	55.9%	39	30.7%

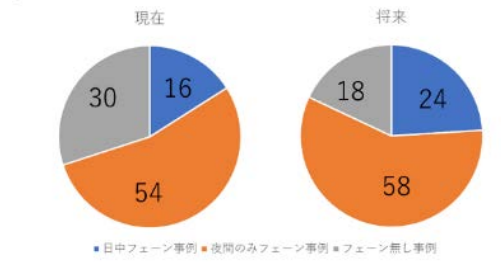


図 1.3：最高気温上位 100 事例発生時のフェーンの有無とその将来変化。青は最高気温発生時にフェーンが吹いていた事例(日中フェーン事例)。オレンジは最高気温発生時にフェーンがなく、夜間にフェーンがある事例(夜間のみフェーン事例)。灰色はフェーンを伴わない事例(フェーン無し事例)。

表 1.3：最高気温上位 100 事例の気圧配置の将来変化。

フェーン事例			フェーンなし事例			新潟最高気温上位100事例		
	低気圧型	高気圧型		低気圧型	高気圧型		低気圧型	高気圧型
現在 (16 事例)	4	12	現在 (30 事例)	5	25	現在 (100 事例)	14	86
将来 (24 事例)	5	19	将来 (18 事例)	3	14	将来 (100 事例)	13	84
将来－現在	1	7	将来－現在	-2	-11	将来－現在	-1	-2

4. 2 暑熱による都市災害リスクの評価

次に、都市で実際に発生する暑熱災害リスク評価を行った。

4. 2. 1 モデル都市における熱中症救急搬送リスク

暑熱による都市災害のリスクの一つとして熱中症救急搬送リスクが挙げられる。将来、日本は気候変動に加え高齢化が進むことによって、熱中症救急搬送者数が増加すると言われている。本研究では、2031～2050年までの近未来における熱中症救急搬送者数を予測し、その熱中症救急搬送者が地域の救急搬送体制へ与える影響を調査した。はじめに、説明変数を日最高WBGT、被説明変数を消防庁が公開している日熱中症救急搬送者数³⁾とした一般化線形モデルを開発し、本課題のモデル都市を有する都道府県を対象に近未来(2031～2050年、RCP4.5シナリオ下)の熱中症救急搬送者数予測を行った(表1.4)。将来気候データセットにはCMIP6をベースとした石崎⁴⁾のものを使用した。解析の結果、新潟県以外の都道府県では一夏あたりの熱中症救急搬送者の合計がBaselineから近未来にかけて2倍以上に増

加すると予測された（表1.4）。Baselineから近未来までの増加率が高い埼玉県、大阪府に着目すると、65歳以上の救急搬送者数が特に増加していることがわかる（埼玉県では10倍以上）。これは気候変動に加え、高齢者の人口が他県よりも多いことに起因する。高齢者は重症化するリスクも高いので一層の救急医療体制の強化が必要であろう。

表 1.4：モデル都市の各道府県における一夏あたりの熱中症搬送者数（65 歳未満・65 歳以上・合計及び中等症搬送者（入院を要する熱中症救急搬送者））。人口は Baseline：1990 年、近未来：2040 年のデータを用いた。気候変動シナリオは RCP4.5 を使用した。

北海道

年代	65歳未満 (人/年)	65歳以上 (人/年)	合計 (人/年)	中等症 (人/年)
Baseline (1981年～2000年)	546.0	207.0	753.0	286.7
近未来 (2031年～2050年)	764.1	1393.4	2157.5	573.9

埼玉県

年代	65歳未満 (人/年)	65歳以上 (人/年)	合計 (人/年)	中等症 (人/年)
Baseline (1981年～2000年)	1712.9	436.5	2149.4	972.3
近未来 (2031年～2050年)	3162.8	4390.3	7553.1	2478.4

京都府

年代	65歳未満 (人/年)	65歳以上 (人/年)	合計 (人/年)	中等症 (人/年)
Baseline (1981年～2000年)	691.7	315.0	1006.6	298.8
近未来 (2031年～2050年)	1005.7	1712.7	2718.4	603.3

新潟県

年代	65歳未満 (人/年)	65歳以上 (人/年)	合計 (人/年)	中等症 (人/年)
Baseline (1981年～2000年)	598.6	253.4	852.0	293.5
近未来 (2031年～2050年)	765.3	1169.9	1935.1	537.4

大阪府

年代	65歳未満 (人/年)	65歳以上 (人/年)	合計 (人/年)	中等症 (人/年)
Baseline (1981年～2000年)	1857.6	472.2	2329.8	677.6
近未来 (2031年～2050年)	2853.9	3921.0	6775.0	1635.0

次に、同様の予測を市町村別に行なった。さらに、二次医療圏（都道府県が医療計画の中で設定する地域単位）ごとに熱中症に起因する救急搬送・病床リスクを評価した。具体的な評価は次の2つを指標とした。1. 医療圏の消防署が保有している救急車の台数（全国消防庁会のデータ⁵⁾）のうち熱中症患者を搬送するために必要な救急車の割合（以下、救急車稼働率）。2. 医療圏内の病院が所有している一般病床数のうち入院を必要とする熱中症患者が占める割合（以下、病床占有率）。現在の病床数には厚生労働省が公開している2018年の一般病床数、近未来の病床数は株式会社ケアレビューが公開している2040年の地域別必要病床数⁶⁾を用いた。対象とする日は医療体制が逼迫する熱中症救急搬送者数が極端に多い日（99パーセンタイル日）とした。COVID-19が流行する現状、病床数は切迫しており、将来も同様な問題が生じる可能性があるため、このような調査は非常に意義があると思われる。

解析の結果、新潟市と熊谷市の近未来の熱中症嚴重警戒日（ $28 < \text{WBGT} < 31$ ）はBaseline（1981～2000年）とそれほど変わらないものの、近未来の熱中症危険日（ $31 < \text{WBGT}$ ）は新潟市ではBaselineの12.6倍、熊谷市では5.2倍になると予測された。近未来の新潟医療圏および埼玉北部医療圏での熱中症救急搬送者数は、それぞれ現在の2.1倍と1.9倍になる。近未来のリスクを示す表1.6を見ると、近未来の極端に搬送者数が多い日では、ほとんどの医療圏で救急車稼働率が30～40%になると予測されている。これは、残りの60～70%の台数の救急車で交通事故や熱中症以外の急病など他の救急搬送を行う必要があることを意味している。また、病床占有率はどの医療圏も3～6%になると予測されている。この数値は高く見えないかもしれないが、中等症患者の中には一刻を争う症状の人も含まれるので決して無視できる数字ではない。埼玉県北部医療圏の病床占有率が高い理由は人口あたりの病床数が他の医療圏とくらべて低いことに起因する。これは埼玉県全体にもいえる傾向である（図省略）。

これらの研究結果を各自治体と共有した。行政担当者によると、本研究で予測された近未来の救急車稼働率は非常に逼迫した状態を意味するとのことである。このことから、近未来においては、熱中症救急搬送者が救急医療体制へ与える影響は非常に大きいと言える。一方、各自治体からは熱中症救急搬送者数に加え、救急医療体制へのリスク評価は具体的な適応策の策定のために非常に有益な情報である

とのフィードバックを受けた。また、救急車の出動回数が増え、臨時で救急搬送に関わる人員を増補するのは暑い日と大雪の日の2パターンであるとの情報を提供してもらった。本研究では、こちらから情報を提供するだけでなく、例えば、一回の救急搬送にかかる所要時間のデータや熱中症救急搬送者以外も含めた救急搬送者数データの提供を受けるなど、自治体から必要な情報やデータの提供を受けることで、一方的な提言になることなく、双方向のコミュニケーションのもと実施することができた。

表 1.5：モデル都市の医療圏における、極端に熱中症救急搬送者数が多い日(99 パーセンタイル日)の救急車稼働率と病床占有率。人口は Baseline：1990 年、近未来：2040 年のデータを用いた。気候変動シナリオは RCP4.5 を使用した。

札幌医療圏			(埼玉) 北部医療圏			新潟医療圏		
年代	救急車稼働率 (%)	病床占有率 (%)	年代	救急車稼働率 (%)	病床占有率 (%)	年代	救急車稼働率 (%)	病床占有率 (%)
Baseline (1981年～2000年)	13.6	1.0	Baseline (1981年～2000年)	17.2	3.5	Baseline (1981年～2000年)	13.9	2.7
近未来 (2031年～2050年)	44.3	3.7	近未来 (2031年～2050年)	25.1	6.3	近未来 (2031年～2050年)	30.0	5.3

京都・乙訓医療圏			大阪市医療圏		
年代	救急車稼働率 (%)	病床占有率 (%)	年代	救急車稼働率 (%)	病床占有率 (%)
Baseline (1981年～2000年)	19.5	1.4	Baseline (1981年～2000年)	17.8	1.4
近未来 (2031年～2050年)	40.6	3.0	近未来 (2031年～2050年)	35.9	2.9

4. 2. 2 日本全国における熱中症救急搬送リスク

次に、前節で開発したリスク評価手法を全国に展開した。気候データセットは西森ほか⁷⁾を用いた (RCP2.6)。その結果、近未来で住民一人一人が熱中症で救急搬送されるリスク (図1.4a)は、全国平均で現在の約2.4倍になることが分かった。また、都道府県毎の熱中症救急搬送者総数 (自治体から見たときのリスクに相当、図1.4b)は、全国平均で2.6倍になる。特にリスクが高くなる都道府県は東京都であり、リスクは4.8倍になる。これは気候変動と人口増加と高齢化が同時進行することによるものである。ただし、暑熱耐性が獲得できれば、リスクは大幅に減少することも分かった (図1.4c)。また、エアコンの普及率が低い道県 (一般家庭の普及率が80%以下) にエアコンの普及が進んだ場合、北海道では近未来のリスクはむしろ現在よりも低下する (Baselineの約63.6%になる) ことが分かった (図1.4d)。本課題により、ライフスタイルの変化は熱中症リスクに対する重要な適応策であることが示唆された。

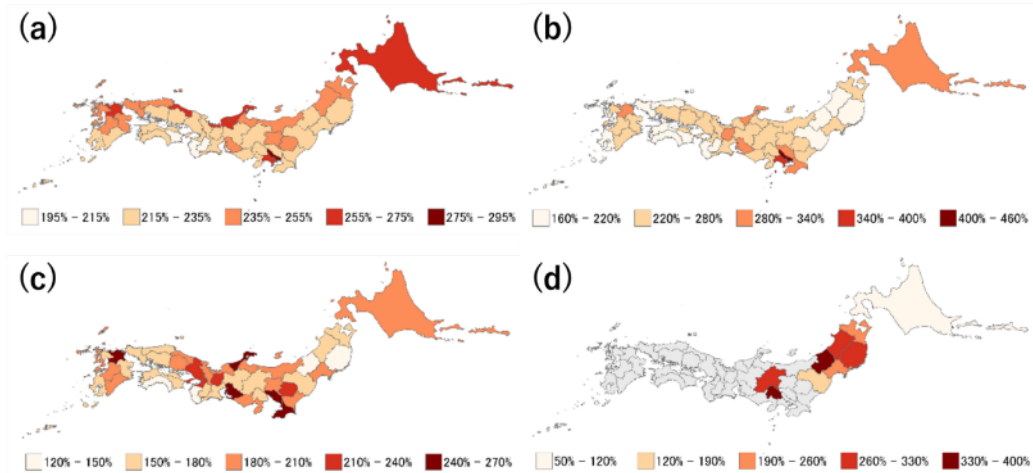


図 1.4：現在から近未来までの熱中症救急搬送数の増加率⁸⁾。将来気候データセットは3)を使用した。気候変動シナリオは RCP2.6 を選択した。(a)人口動態を考慮しない予測、(b)人口動態を考慮した予測、(c)初夏から晩夏と同等の暑熱耐性を獲得していると仮定した予測、(d)エアコンの普及

などライフスタイルの変化を考慮した予測。灰色に塗られた部分は解析対象外。

近年、様々な分野で機械学習を用いた予測モデルが開発されている。本研究でも現在および将来の熱中症予測精度向上を目的として翌日の熱中症救急搬送者数を予測する機械学習モデルを開発した。具体的には11種類の説明変数セットと5種類のモデル化手法(3種類の統計モデルと2種類の機械学習)を組み合わせ、東京における翌日の熱中症救急搬送者数を予測する55種類のモデルを開発し、精度を比較した。対象期間は2010～2019年の10年間である。その結果、6つの説明変数(気温、相対湿度、風速、日射量、6月1日からの日数、1日前の熱中症救急搬送者数)と一般化加法モデルを組み合わせたものが本研究では最良の予測モデルとなることが分かった。このモデルは従来の予測モデル(説明変数として気温、モデル化手法として一般化線形モデルを用いたモデル)と比較して、二乗平均平方根誤差が52.1%減少した(図1.5)。さらに、説明変数とモデル化手法のそれぞれが予測精度にもたらす寄与を調べたところ、二乗平均平方根誤差は上記の6つの説明変数を用いたことにより49.7%、一般化加法モデルを用いたことにより14.6%減少したことが分かった。

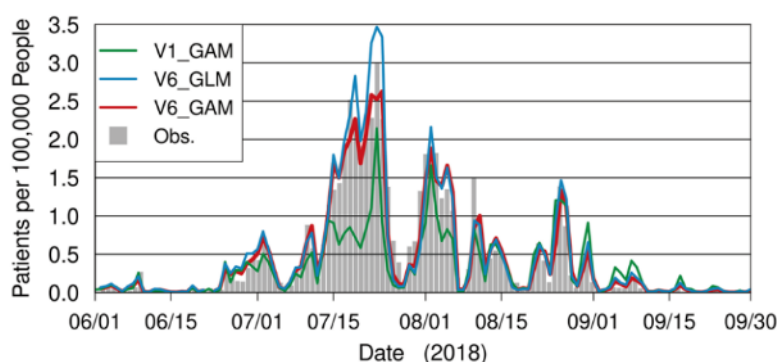


図 1.5 : 2018 年 6 月 1 日から 9 月 30 日までの 1 日の熱中症救急搬送者数⁹⁾。緑線(V1_GAM) : 気温と一般化加法モデルを組み合わせたモデルによる予測。青線(V6_GLM) : 6 つの説明変数(気温、相対湿度、風速、日射量、6 月 1 日からの日数、前日の熱中症救急搬送者数)と一般化線形モデルを組み合わせたモデルによる予測。赤線(V6_GAM) : 6 つの説明変数と一般化加法モデルを組み合わせたモデルによる予測。灰色棒 : 実測値。

4. 3 暑熱による都市災害リスクへの適応

現在および将来の暑熱リスクに対して、具体的にどのような適応策を実施すればよいか、またどのように情報の発信や啓発を進めていけばよいかを検討するため、現地気象観測・高解像度の数値シミュレーションの双方から複数の適応策の効果を比較検証した。

4. 3. 1 現地気象観測による暑熱適応策の効果検証

本課題では、暑熱観測と96人の被験者実験を実施し、人は15分間という短時間の屋外歩行でも熱ストレスを受け、室内に戻った後も1時間程度、仕事・学習能力が低下し、二桁の足し算ですら正答率が有意に下がることを明らかにした¹⁰⁾。さらには、歩行者の熱ストレスを緩和する暑熱適応策として街路樹・日傘・ドライミスト散布を取り上げ、これらの熱ストレス緩和効果を暑さ指数観測の結果を用いて比較評価した¹¹⁾(図1.6, 1.7)。その結果、街路樹は日射を遮ることで熱中症リスクを1段階下げることができ、日傘は街路樹の68%程度の暑さ指数軽減効果を有することが分かった。一方、ドライミスト散布は、風速1 m/s以上の有風時では熱ストレス緩和効果が非常に小さいことも分かった。ドライミスト散布で熱ストレスを緩和するためには、ミストを横からあてる、あるいはミストを連続的に配置してミストが風に流されても歩行者にあたるようにする工夫が必要であろう。夏に屋外を歩く際に日傘

を携帯することは、個人で可能な効果的な暑さ適応策であることから、広く推奨することが重要であろう。

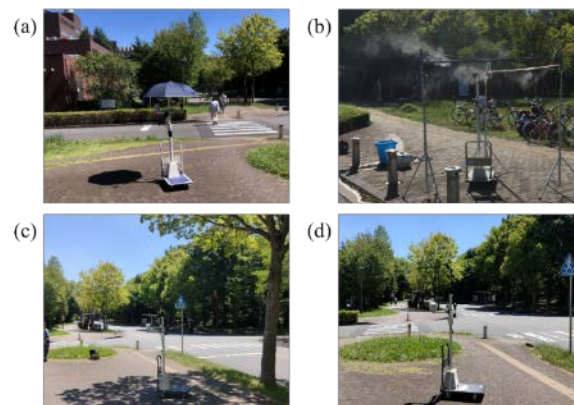


図 1.6：筑波大学キャンパス内での暑さ指数観測の様子¹¹⁾。(a)日傘、(b)ミスト、(c)街路樹、(d)日向。

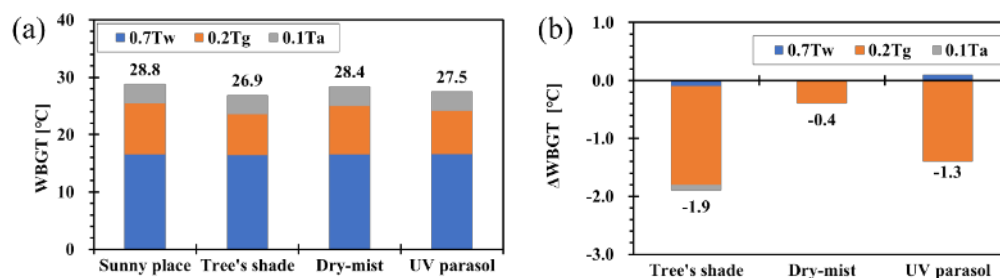


図 1.7：夏の晴天日に実施した暑さ指数観測の結果¹¹⁾。(a)左から日向・街路樹下・ミスト散布下・日傘下での暑さ指数、(b)左から街路樹・ミスト散布・街路樹・日傘による暑さ指数緩和効果。

暑い日に校庭や公園で熱中症になる人がいる。運動会や文化祭などのイベント時に、日除けとしてテントが広く利用されており、校庭や公園には藤棚を利用した日除けも多くあるが、これらの効果はまだ十分に検討されてはいない。本課題では、藤棚の下、テントの下、直射日光下において、暑さ指数（湿球黒球温度またはWBGT）を観測し（図1.8）、被験者の生理測定を実施した¹²⁾。その結果、藤棚下は直射日光下より暑さ指数を1段階低下させることが分かった。また、藤棚の緩和効果はテントよりも大きなことも明らかとなった。これは、藤棚が日射の大部分を遮り、なおかつ葉面温度が高くないのに対して、テントは藤棚より多くの日射を通し、さらにはテント表面の温度を上昇させたためである。アンケートの結果からも藤棚下の方がテント下よりも涼しく快適であるという結論が得られた（図1.9）。藤の花や藤棚はその美しさから景観を向上させ人々に癒やし効果を与えるだけでなく、人々の熱ストレス緩和にも効果があることから、積極的な設置が望まれる。



図 1.8：筑波大学キャンパス内での暑さ指数観測の様子¹²⁾。(a)藤棚、(b)テント、(c)日向。

これらの研究結果を熊谷市政策調査課へ共有した。熊谷市では、登下校時の熱中症発生リスクを低減させるための施策として、小学生への日傘配布が検討されており、本実験で示された日傘による熱ストレス緩和効果は、この施策を進めていく上で非常に有益な情報であるとのフィードバックを受けた。

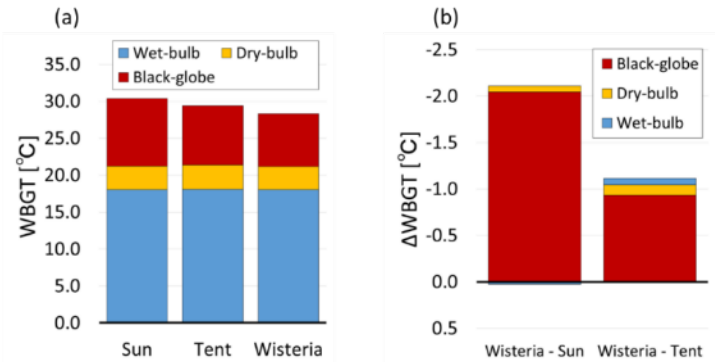


図 1.9：夏の晴天日に実施した暑さ指数観測の結果¹²⁾。(a)左から日向・テント下・藤棚下での暑さ指数、(b)左から藤棚・テントによる暑さ指数緩和効果。

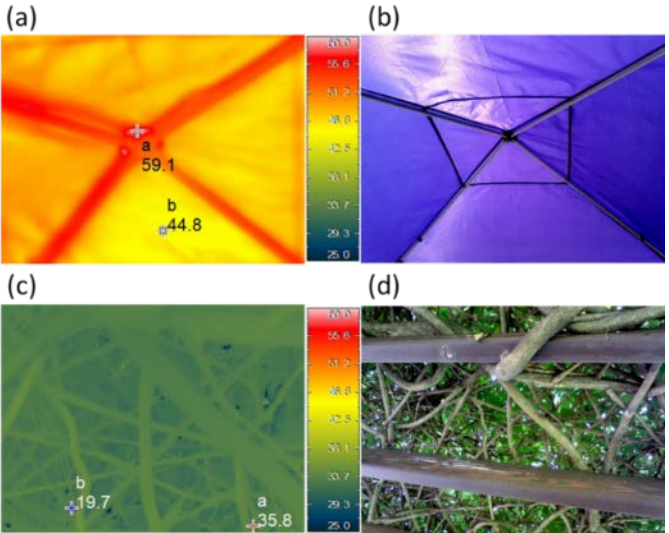


図 1.10：テントと藤棚の表面温度の比較¹²⁾。(a)テントの表面温度、(b)テント表面の写真、(c)藤棚の葉面温度、(d)藤棚の蔓と葉の写真。

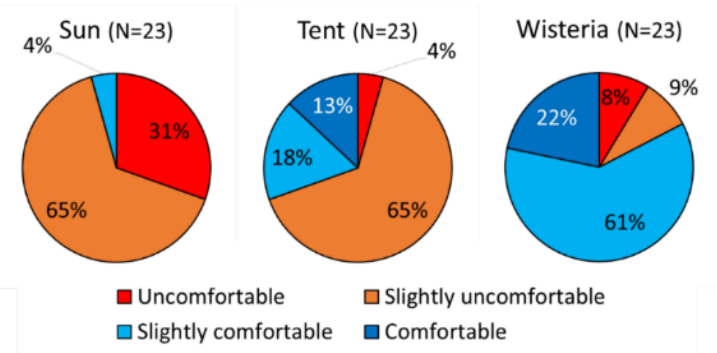


図 1.11：被験者に対するアンケート調査から得られた 3 地点での快適感の比較¹²⁾。(a)日向、(b)テント下、(c)藤棚下。

4. 3. 2 数値シミュレーションによる暑熱適応策の効果検証

筑波大計算科学研究センターで開発中の都市街区気象Large-eddy simulationモデル「City-LES」

を用いて、熊谷市(熊谷駅周辺)・新潟市(新潟駅周辺)の現在及び将来都市シナリオに基づく都市街区を対象に、暑熱環境の数値シミュレーションを行い、街路樹・日除け・ドライミスト散布・遮熱性舗装などの暑熱適応策の効果を検証した。

(A) 熊谷市を対象とした計算

熊谷市中心部に位置する熊谷駅は、駅舎出口付近にドライミストや遮熱性舗装（高反射塗装）道路があり暑熱適応策が施行されている。図1.12は、LESで再現された日最高気温（41.1℃）記録起時（2018年7月23日14:00～14:10）の熊谷駅周辺気温分布と暑さ指数(WBGT)分布である。気温分布を見ると、日向で気温は41℃程度となっており、駅舎のような大きな建物の影になる領域で気温が低くなっている。また、駅舎の南口付近や北口付近などのドライミストが敷設されている箇所で局所的に周囲より0.5～1.0℃程度の気温の低下が見られる。WBGTの分布を見ると、建物の影に入る領域でWBGTが顕著に低下しているが、ドライミストの効果は気温ほど明瞭でない。この理由として、ドライミストは湿度を上げるためWBGTの低下効果が小さくなること、ドライミストは主に日陰に設置されているため日射の遮蔽(建物影)によるWBGTの低下効果が大きくドライミストの効果が顕在化しなかったことなどが考えられる。

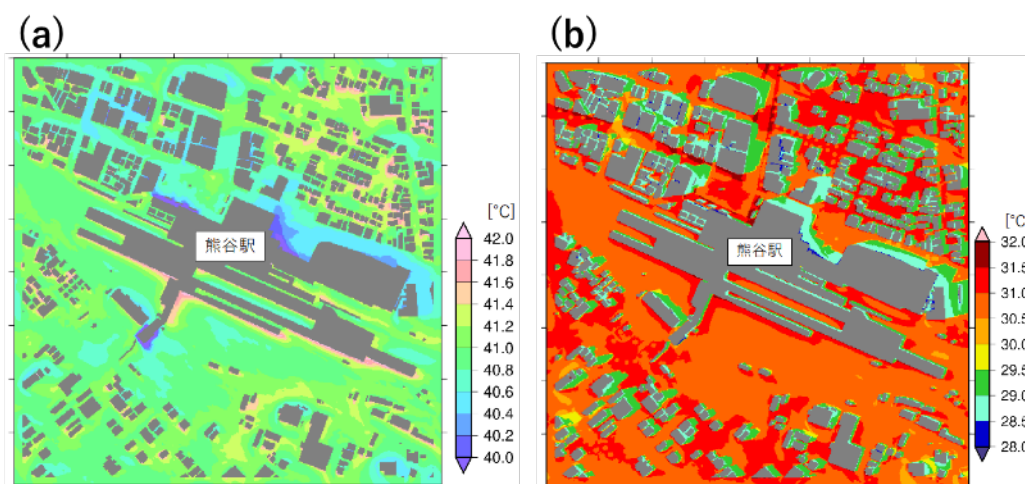


図 1.12：現在の熊谷駅周辺の(a) 気温分布及び (b) WBGT 分布。

この結果を熊谷市政策調査課と共有し意見交換を行った。その結果、星川エリア(熊谷駅からおよそ500 m北側)の商店街と共同で暑さ対策に取り組む可能性があること、当該エリアでどのような暑熱対策が有効なのかの知見が欲しいという意見を得られた。そこで、将来の都市シナリオとして、星川エリアを対象に、街路樹やドライミストなどの暑熱対策を施した場合にどの程度の効果が見込めるかを検討した。シミュレーションによって得られた地上付近の気温分布とWBGT分布を図1.13に示す。現在の気温分布を見ると、星川エリア周辺は概ね一様に40℃程度であった。これに対して日除け、ドライミストを敷設した場合の気温分布をみると、特に星川の南側の道路沿いで明瞭に気温が低下する領域が見られた。次に現在のWBGT分布を見ると、星川の南側の道路に建物の影によるものと思われる低WBGT領域が見られる。しかしながら、建物の影や木陰に入らない領域では全体にWBGTが「危険」に区分される31℃以上となっている。一方、将来の気温分布を見ると、暑熱対策を施した星川沿いの南北の道路で気温が1℃程度低下している領域が見られる。またWBGTも星川南側の道路を中心に、おおまかに0.5℃の低下が確認された。これらの結果から、星川近くの領域においても日除けやドライミストが暑熱対策として有用である可能性が示された。ただし、ドライミストの水量は対象領域以外の地域での導入例からある程度一般的と思われる量を導入したに過ぎないため、注意が必要である。

(B)新潟市を対象とした計算

新潟市中心部に位置する新潟駅では、駅舎とその周辺における大規模な再開発を予定している。この再開発では駅舎の改築のみならず、駅前広場の整備とそれに伴う日除けやドライミスト、街路樹の設置が計画されている。そこで、現在の新潟駅周辺と将来の(再開発を行った)新潟駅周辺の熱環境の変化を数値シミュレーションによって調査した。この際、駅舎建て替えに伴う街路樹やドライミストの施工計画の情報を新潟市環境政策課より提供を受けた。計算対象日時は、新潟において日最高気温の歴代最高値(39.9℃)を記録した日時に近い2018年8月23日13:30~13:40とした。

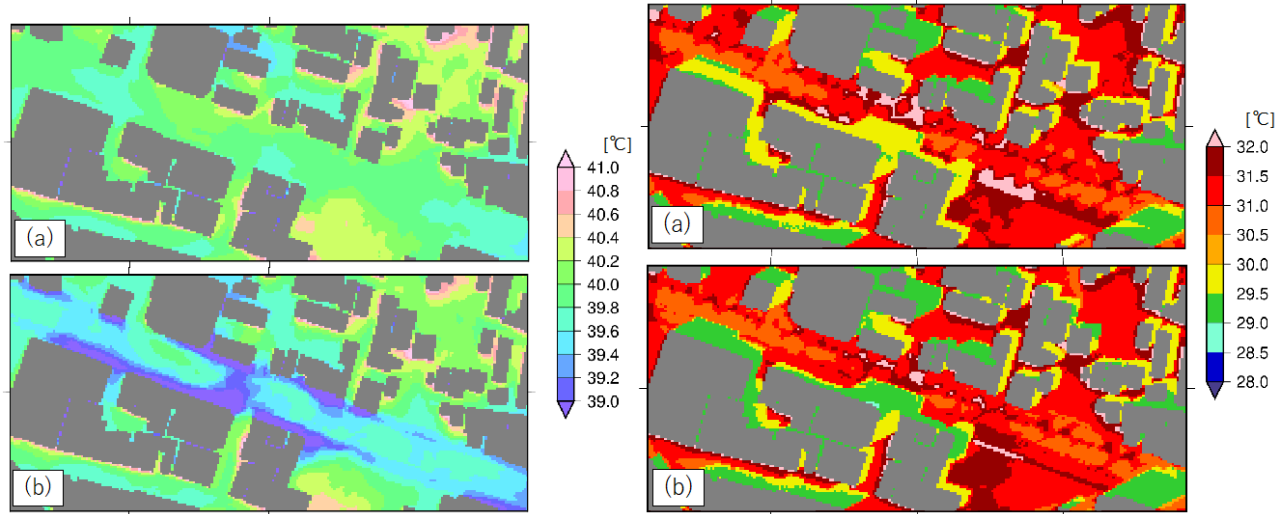


図 1.13：星川エリアにおける地上付近の(左)気温分布と(右)WBGT 分布。(a)現在の星川エリア周辺の場合、(b)将来の星川エリア周辺の場合。

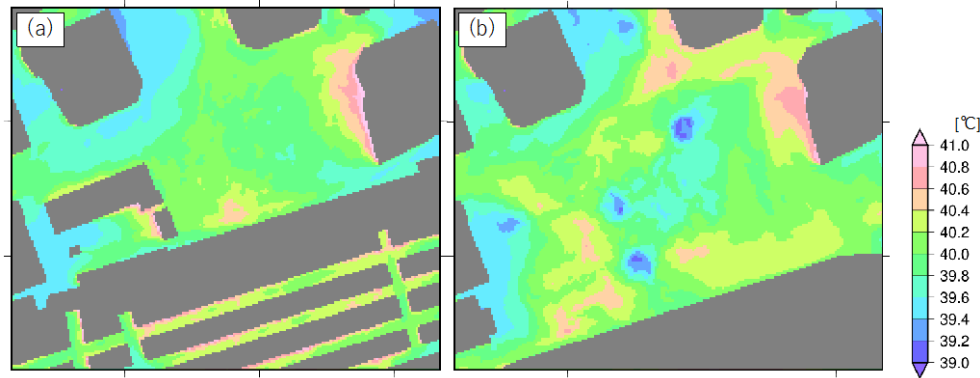


図 1.14：(a)現在及び(b)将来の新潟駅前における地上付近の気温分布。

現在及び将来の新潟駅前の地上付近の気温分布をそれぞれ図1.14(a)・(b)に示す。建て替え後の暑熱適応策を施した領域を見ると、建て替えは全体的に0.3℃程度、顕著な場所では1℃程度の気温低下をもたらすことが分かる。ドライミストの効果が表れたものと考えられる。一方で、計算領域西側のもともと建物があった場所が広場(駐車場)になった領域では、建物の影がなくなり日向になったことで気温が上昇している。次に、現在及び将来の新潟駅前の地上付近のWBGT分布をそれぞれ図1.15(a)・(b)に示す。計算領域西側では、新たに樹木が植えられ木陰となった場所以外で顕著なWBGTの上昇が見られる。これに対して、計算領域中央付近の日除け・街路樹を集中的に施工する予定の領域では、日除けや街路樹の周辺でWBGTが周囲より低下する領域が見られる。これは日除け・街路樹が日陰を作り出したことで日射を遮り、暑熱環境を改善させたためであると考えられる。気温の場合と比べてWBGTの低減効果がわずかである理由は、街路樹や草地、ドライミストの積極的な導入によって湿球温度が上昇

してしまい、日陰創生によるWBGT低下効果を弱めてしまったためであると考えられる。

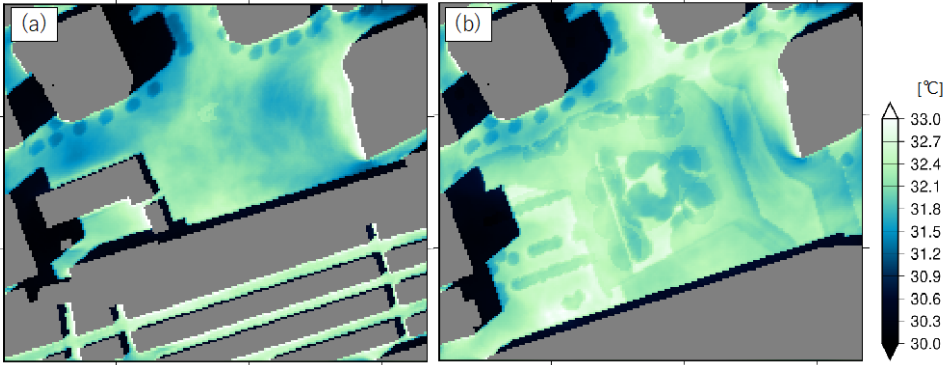


図 1.15：(a)現在及び(b)将来の新潟駅前における地上付近の WBGT 分布。

以上2つの地域のシミュレーション結果から、街路樹や日除け、ドライミストといった暑熱適応策は、いずれの地域においても気温やWBGTを低下させる可能性があることが確認できた。しかし、その効果は地域によって異なる。また、同じ地域でも建物の影や地表面の材質などによって異なる可能性がある。本研究で実施した空間詳細なシミュレーションはこのような暑熱適応策の効果の評価や施工時の効果の見積もりに対して有用な情報を提供しうるものと期待できる。

4. 4 サブテーマ2・3との連携

サブテーマ2及びサブテーマ3と連携し、新潟市・熊谷市の暑熱リスク以外の都市災害リスクについても評価を行った。

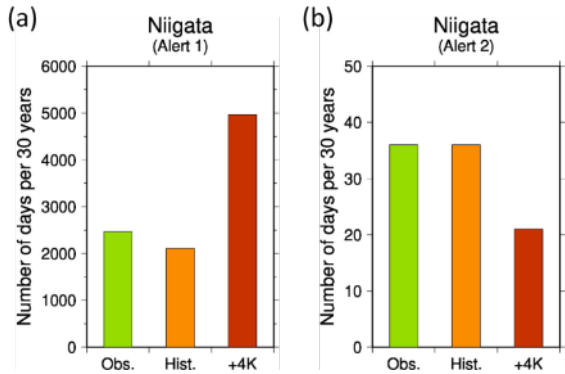


図 1.16：新潟市において 30 年間で(a)通報基準 1、(b)通報基準 2 を満たした日数。横軸は Obs.：観測、Hist.：現在気候、+4K：将来気候である。

4. 4. 1 サブテーマ2との連携による火災リスク評価

サブテーマ2と連携して、気候変動下における都市の火災延焼リスクについて評価した。火災の延焼には乾燥だけでなく強風も大きく寄与することから、その両方を考慮してリスク評価を行うことが重要である。火災リスクが高い日の検出には、気象台などから発表される都道府県ごとの「火災気象通報」の通報基準を用いた。観測・現在気候(d4PDF 過去実験)：1981～2010年、将来気候(d4PDF 4K上昇実験)：2081～2110年の各30年間のデータを使用し、通報基準を満たす日が何日あるかを算出した。

古くから火災の多い地域である北陸地方の新潟市に着目すると、新潟県の通報基準1「日実効湿度65%以下」及び通報基準2「風速15 m/s 1時間以上継続」を満たした日数は、それぞれ図1.16(a)、(b)のようになった。ここから、将来気候下では乾燥に伴う火災リスクは現在の2.35倍に増大するが、強風に伴う火災リスクは現在の0.58倍に減少すると予測された。また、他の都市における火災リスクは、現在と比べて最大で熊谷市で1.85倍、札幌市で5.31倍、京都市で1.40倍、大阪市で0.90倍となる

と予測された。これらの結果は平均的な気候変動の影響によるものであり、フェーンなどの効果も加わることで、将来都市における火災延焼リスクはさらに増大する可能性も考えられる。

4. 4. 2 サブテーマ3との連携による関東平野での降雪・着雪リスク評価

サブテーマ3と連携して、気候変動下における関東平野での降雪・着雪リスクについて評価した¹³⁾。関東平野での降雪・着雪は、そこで暮らす人々の生活に大きな影響があることが知られており、その将来変化についての情報は地方自治体の政策決定者にとって有益である。大規模なアンサンブル実験でシミュレートされた全121、255個の冬季南岸低気圧に対して、それぞれの低気圧が関東平野にもたらす降雪・着雪の有無を調査した(図1.17)。その結果、将来気候下では、関東平野での降雪・着雪リスクは大きく減少することが明らかとなった。21世紀中ごろの降雪頻度は年平均0.47回で、現在に比べて0.70回(58%)減少する。これは、現在では1年に1回程度発生している関東平野での降雪イベントは、21世紀中ごろには2年に1回程度の頻度で発生することを意味する。この降雪頻度減少の85%は気温上昇によるもので、15%は南岸低気圧数の減少によるものであった。また、21世紀中ごろの着雪頻度は年平均0.09回で、現在に比べて0.84回(90%)減少すると予測された。これは、現在では1年に1回程度発生している関東平野での着雪イベントは21世紀中ごろには10年に1回程度の頻度で発生することを意味する。この着雪頻度減少の92%は気温上昇によるもので、8%は南岸低気圧数の減少によるものであった。

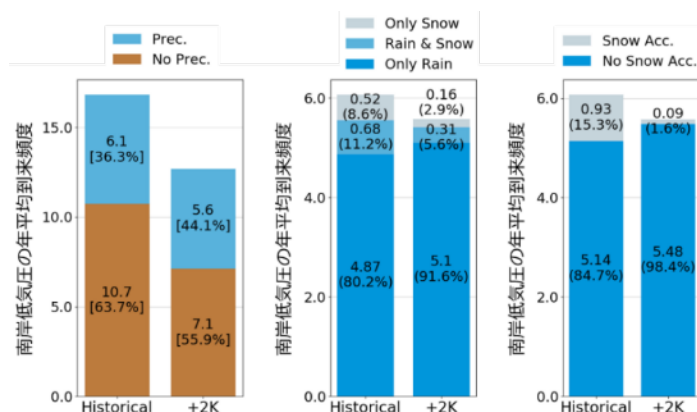


図 1.17：現在(Historical)及び 21 世紀中ごろ(+2K)の冬季における、南岸低気圧の到来頻度。南岸低気圧を降水の有無(左図)によって分類した¹³⁾。降水を伴う南岸低気圧を降雪の有無(中央図)、着雪の有無(右図)によって分類した。各図左側は Historical、右側は 2K 上昇実験の結果をそれぞれ示す。図中の数字は 1 年あたりの到来頻度、括弧内の数字は全ての(左図)または降水をともなう冬季南岸低気圧(右図)に占める割合。Historical、2K 上昇実験ともにアンサンブルメンバー数は 48 で、解析期間は 1、2、3、12 月。

4. 4. 3 サブテーマ3との連携による水害リスク評価

サブテーマ3と連携して、気候変動下における都市の水害リスクを調査した。新潟市は信濃川・阿賀野川、熊谷市は利根川・荒川、といういずれも日本を代表する一級河川が市内を流れる自治体であるため、豪雨とそれによる河川の増水・氾濫は両市において重大な水害リスクとなりうる。これらのリスクを評価するため、サブテーマ3の協力のもと、それぞれの市を対象にd4PDF(過去実験及び4K上昇実験)を使用して、現在気候に対する将来気候の日降水量の増加率を算出した。

図1.18のうち、年間の増加率(最左列)を見ると、両市とも将来は現在より平均で15%ほど日降水量が増加することがわかる。特に、新潟市(図1.18a)は冬季～春季(12～5月)に、熊谷市(図1.18b)は秋季(9～11月)に降水量の増加が顕著である。このことから将来、新潟市では雪解けによる急な増水、熊谷市では台風などによる集中的な強雨が、河川の氾濫や水害を引き起こすリスクを高めることが懸念される。さらに、新潟市については7月の増加率が前後の6・8月より高いことから、例えば2004年7月13日の新潟・福島豪雨のような梅雨末期に発生する豪雨による水害のリスクも、将来にかけて上昇する可

性がある。

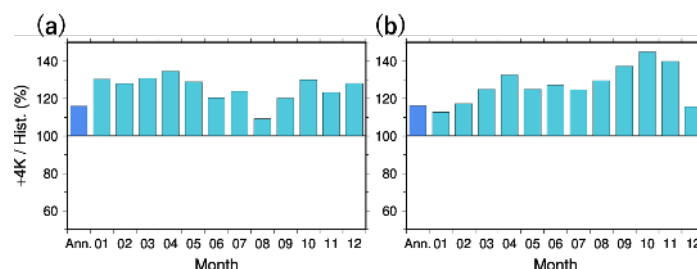


図 1.18：現在気候（Hist.）に対する将来気候（+4K）の日降水量の増加率。(a)新潟市、(b)熊谷市。
横軸は Ann. が年間、01～12 が各月の増加率を示す。

5. 研究目標の達成状況

熊谷市・新潟市で発生しうる将来の都市暑熱環境悪化の要因を、気候変動・フェーン・ヒートアイランドの3つの異なる空間スケールの現象に着目して解析した。また、暑熱環境悪化が住民の健康にどの程度リスクを与えるのかについて評価した。この結果をもとに各自治体と適応策を協議し、自治体から現在取り組んでいる暑さ対策の情報や意見を提供していただき、それらのフィードバックをもとに自治体が実施している暑熱対策の有効性を評価した。加えて、サブテーマ2・3と連携し、都市における火災・洪水・着雪リスクを評価した。都市の暑熱災害に対する適応策の検討において、自治体にとって有効な知見が得られたという点や、学術的に新しい知見が得られたという点で、本研究課題の当初目標を十分に達成できたと言えるであろう。本サブ課題の科学的知見と気候変動適応策を提言書としてまとめ、熊谷市・新潟市と共有した。

以上の成果のみならず、当初予定していなかった次の2つの成果も得られた。1つ目は、暑熱環境悪化が住民の仕事・学習能力に与えるリスクを評価したことである。2つ目は、熱中症救急搬送者の増加が対象自治体の救急医療体制や地域医療圏の病床数に与える負荷を評価し、さらには同様の評価を全国の自治体に拡大したことである。これらは、当初目標を上回る成果である。

6. 引用文献

- 1) Nishi, A., H. Kusaka, L. L. Vitanova, and Y. Imai, 2019: Contributions of Foehn and urban heat island to the extreme high-temperature event in Niigata City during the night of 23-24 August 2018. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 15, 132-136.
- 2) Nishi, A., H. Kusaka, and S. Nakamura, 2022: Mesoscale and local-scale climatology of extreme temperature events in Niigata, Japan. *International Journal of Climatology*, 投稿中.
- 3) 消防庁, 2018: 熱中症による救急搬送人員に関するデータ.
<https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post3.html>.
- 4) 石崎紀子, 2021: CMIP6をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ, Ver. 1. 国立環境研究所, doi:10.17595/20210501.001.
- 5) 全国消防長会, 2019: 平成31年度版消防現勢.
https://www.fcj.gr.jp/info/download/31_syaryou.pdf.
- 6) 株式会社ケアレビュー, 2014: 地域別必要病床数試算(ver. 1.2).
https://hospia.jp/files/141020bedsdetail_marea.pdf.
- 7) 西森基貴, 石郷岡康史, 桑形恒男, 滝本貴弘, 遠藤伸彦, 2019: 農業利用のためのSI-CAT日本全国1km地域気候予測シナリオデータセット(農研機構シナリオ 2017)について(小特集 気候変動への適応にむけたデータセットの開発とその活用). *日本シミュレーション学会誌*, 38, 150-154.
- 8) Nakamura, S., H. Kusaka, R. Sato, and T. Sato, 2022: Heatstroke risk projection in

Japan under current and near future climates. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 100, in print.

- 9) Ikeda, T., and H. Kusaka, 2021: Development of models for predicting the number of patients with heatstroke on the next day considering heat acclimatization. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 99, 1395-1412.
- 10) Asano, Y., Y. Nakamura, A. Suzuki-Parker, S. Aiba, and H. Kusaka, 2022: Effect of walking in heat-stressful outdoor environments in an urban setting on cognitive performance indoors. *Building and Environment*, 213, 108893.
- 11) Kusaka, H., Y. Nakamura, Y. Asano, 2022: UV parasol, dry-mist spraying, and street trees as tools for heat stress mitigation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, in print
- 12) Kusaka, H., Y. Asano, and R. Kimura, 2022: Wisteria trellises and tents as tools for improved thermal comfort and heat stress mitigation: Meteorological, physiological, and psychological analyses considering the relaxation effect of greenery. *Meteorological Applications*, 29, e2046.
- 13) Asano, Y., H. Kusaka, M. Inatsu, 2022: Future projections of wet snow accretion and snowfall in the Kanto Plain, Japan using a large ensemble climate simulation, *Climatic Change*, 投稿中.

Ⅱ－２ 強風に対する都市災害への適応

国立大学法人京都大学
防災研究所 教授

竹見 哲也

〔要旨〕

近畿地方における近年の気象災害の中で顕著な事象であった2018年台風21号に着目し、気象場から都市街区スケールへダウンスケールし、気象モデルによる擬似温暖化実験と都市街区LESモデルを組み合わせ、街区スケールで温暖化による強風災害リスクを評価した。d4PDFデータから算出した温暖化差分を使って擬似温暖化実験を実施し、温暖化時の台風強度変化を評価した。また、軸対称モデルにより、温暖化時の台風強化を大気安定度の変化から定量化した。都市街区LESモデルから、建物の立地密度が相対的に低く建物高さのばらつきが大きい場合に、最大瞬間風速や乱流輸送量が顕著になることが分かった。この傾向は、安定度が中立から不安定の場合に特に明瞭であることも分かった。これら都市の強風災害に対する気候変動影響に対する適応策について、大阪市環境局環境施策部及び建設局公園緑化部、京都市環境政策局地球温暖化対策室と議論し、気候変動適応策への提言としてまとめた。

1. 研究開発目的

近年の極端台風による強風・暴風による被害は、都市域の災害に対する脆弱性を露呈している。地球温暖化の進行により台風の極端化が懸念されており、気候変動に伴う強風に対する都市域での災害への適応がますます重要な課題となっている。本サブテーマでは、近畿地方における近年の台風災害の中でも市街地での強風災害に着目し、気象場から都市街区スケールへダウンスケールし、街区スケールで強風災害リスクを評価する。また、擬似温暖化実験手法を用いて、極端気象現象による外力に及ぼす気候変動の影響を定量的に評価する。街区スケールへのダウンスケールならびに擬似温暖化実験を組み合わせ、街区での建物配置など幾何学的形状に応じた最大瞬間風速の出現特性を示し、温暖化による最大瞬間風速の増速効果を定量的に評価する。これら都市の強風災害に対する気候変動影響に対する適応策について、大阪市及び京都市の担当者と議論する。

2. 研究目標

都市に影響を与える極端現象を抽出し、気象場から都市街区スケールへのダウンスケール手法を構築する。近未来に想定される極端現象に対する擬似温暖化実験を実施し、極端現象による強風災害リスクを街区スケールで解明する。強風災害に直結する最大瞬間風速を定量的に算定し、街区の建物配置など幾何学的形状の影響を評価し、温暖化影響による瞬間風速の増速効果を定量化する。この結果を京都市・大阪市と議論し、実現可能な適応策を提案する。

3. 研究開発内容

2018年台風21号により、近畿地方を中心として広域で強風災害が発生した。特に、都市域での被害が甚大であり、台風21号による損害保険支払額は、過去の風水害の中で最も多くなっている。本サブテーマ2では、大阪市・京都市を対象とし、過去において強風被害をもたらした極端現象を抽出する。特に、台風や低気圧については移動経路によって風の吹き方が大きく異なることに留意し、大阪市・京都市での過去の気象観測データにより強風事例について検討する。抽出された極端現象を領域気象モデルWeather Research and Forecasting (WRF)モデルによるダウンスケール実験により再現し、極端現象発生時の気象状況を解析する。また、領域気象モデルから都市街区LESモデルに接続するハイブリッドモデルを構築し、気象場から都市街区スケールへのダウンスケール手法を構築する。

次に、d4PDFデータから現在気候と将来気候のそれぞれの予測実験から温暖化差分を算出し、抽出した極端現象の事例に対する擬似温暖化実験を実施する。擬似温暖化実験を過去再現実験と比較することで、将来気候条件での極端現象による気象外力が、現在気候からどのように変化するかを調べる。

都市街区LESモデルを用いて、建物の配置や密集度といった幾何学的形状を表す指標によって、街区

内の最大瞬間風速や瞬間的な風速の強まり方を定量的に評価する。この都市街区LESモデルによる風速の評価において、擬似温暖化実験により得られる将来の気象外力変化から、近未来条件での極端現象による強風災害リスクがどのように変化するかを明らかにする。また、サブテーマ1から暑熱の、サブテーマ3から豪雨による都市災害リスクの情報を得て、対象都市における気象災害への適応策を協議する。

4. 結果及び考察

4. 1 強風事例の抽出とダウンスケール実験

2018年9月に近畿地方を縦断した台風21号により、近畿地方の広範囲で強風が吹き、大阪湾沿岸では高潮・高波が発生し、都市域では記録的な最大瞬間風速が生じ、建築構造物の被害、樹木の被害、電力網への被害、交通網への被害、飛散物による被害、さらには関西空港の浸水といった様々な被害が生じた。日本損害保険協会の2021年3月31日付資料¹⁾によれば、台風21号により生じた被害に対する各種損害保険の支払い総額は1兆円を超えており、他の風水害の事象を圧倒している。

ある特定の地点に着目すると、台風による強風は、その地点の台風中心からの距離に応じて異なり、このため経路のわずかな違いが風速の違いとなる。台風21号の経路と近い経路を取った台風のうち、室戸台風・第二室戸台風は近畿地方を中心として各地で強風被害をもたらした。気象官署で保有する長期間の地上観測データから、近畿地方での強風事例を調べてみた。長期のデータを保有する気象官署での風速記録から、表2.1に最大瞬間風速の上位事例をまとめた。京都・大阪での観測史上歴代1位の記録は、室戸台風により生じたものである。大阪では、1961年の第二室戸台風が第2位、2018年台風21号による暴風が第3位である。京都では、2018年台風21号による暴風が第2位となっている。表2.1には示していないが、関西空港では、記録のある2003年以降において、台風21号の通過時に観測史上1位の58.1 m/sの最大瞬間風速が記録された。一方、神戸では、京都・大阪とは様相が異なる。室戸台風・第二室戸台風・2018年台風21号は大阪湾を北上し、中心からある程度離れた東側で強風となったが、神戸は台風の中心近傍に位置しており、これら台風時のものは表2.1の記録には現れてこない。ただし、神戸での2018年台風21号による最大瞬間風速は41.8 m/sで観測史上第5位の記録であり、暴風が吹いたことに違いはない。

表2.1 京都・大阪・神戸における最大瞬間風速の観測上位記録（風速値（単位m/s）及び日付）

	第1位	第2位	第3位
京都市	42.1 (1934/9/21)	39.4 (2018/9/4)	36.7 (1965/9/17)
大阪市	60.0 (1934/9/21)	50.6 (1961/9/16)	47.4 (2018/9/4)
神戸市	48.5 (1965/9/10)	47.6 (1950/9/3)	45.9 (2017/10/23)

表2.1で示す気象観測記録及び被害状況から判断すると、本サブテーマの強風災害事象として取り扱うのは、2018年台風21号が適当であると言える。そこで、この台風21号を対象として、解析を実施した。

特に市街地に着目する理由として、市街地ではビル風など都市特有の風が存在するためである。ビルの配置や高さによって、風速の変動幅の大きさ、瞬間的な風の強まり、風の強まりやすい場所など、風の吹き方に都市の形態の影響が表れる。例えば、建物の高さが一様な場合とばらつきがある場合とで比べると、高さにはばらつきがある場合のほうが風速の変動性が高くなり、上空の高運動量が下方に輸送されることによって、地面付近で瞬間的に風が強まる現象が発生しやすくなる²⁾。このことから、突風率（10分間の平均風速に対する、その10分間の最大瞬間風速の比）は、自然地形上では1.5程度と見積もられているが³⁾、市街地ではその数値を大きく超える場合がある。2009年台風18号通過に伴い東京都心で生じた瞬間風速値の場合には、突風率が2を超える場合が生じた⁴⁾。2018年台風21号の通過時に生じた近畿地方における最大瞬間風速について調べたところ、突風率が1.5を超える地点が多数あり、数カ所で2を超える場合もあった⁵⁾。このように、市街地では特に瞬間的な風の強まりが顕著である。

2018年台風21号による瞬間風速の変化について、京都市を対象として調べてみた。気象庁によるデ

ータを収集したのに加え、大気常時監視網による観測データ（一般環境大気測定局及び気象測定局）を京都市環境局より提供していただいた。京都市環境局による観測データのうち京都タワーでの観測では1分毎の平均風速及び最大瞬間風速のデータが取得されていたため、その観測データを突風の分析に使用した。京都タワーの観測高度は地上高121 mであり、地上付近とは風の吹き方や強さが大きく異なる。図2.1に京都タワー及び地上気象観測点での平均風速及び最大瞬間風速を示す。地上気象観測点でのデータは、10分間隔での平均風速及び最大瞬間風速である。期間中の最大瞬間風速は、地上気象観測点（観測高度17.6 m）では39.4 m/sであったのに対し、京都タワー観測では57.6 m/sに達した。また、図2.1に示した期間中の突風率は、地上気象観測では2.01、京都タワー観測では1.33であった。

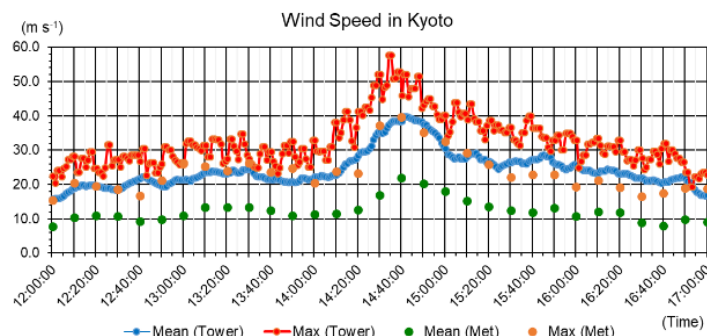


図 2.1 2018 年 9 月 4 日 12～17 時の京都における平均風速（Mean）及び最大瞬間風速（Max）の時系列：京都タワーでの観測（実線）及び気象台での観測（点）

このことから、市街地でも都市キャノピー内部の地上近傍のほうが一時的な風の強まり方が顕著であることが示唆される。さらに図2.2から、地上での最大瞬間風速値は、高度121 mでの平均風速値とおおよそ同程度であることが分かる。このことから、上空の強風が下向きに輸送されることで、地上付近での風が一時的に強まると考えられる。

以上の通り、2018年台風18号による強風の特徴を観測データに基づき示した。次に、領域気象モデルによるダウンスケール実験を実施した。台風など気象場の再現には、領域気象モデルであるWRF⁶⁾を用いた。計算領域は、4.5 km格子幅のDomain 1を設定して日本列島及び周辺の北西太平洋の2500 km×2700 kmの範囲をカバーし、その内側に0.9 km格子幅のDomain 2を設定して近畿地方を中心とした300 km×300 kmの範囲をカバーするようにした（図2.2）。モデルの鉛直上端高度は20 hPaとし、鉛直方向の格子レベル数は56とした。地図投影図法はランベルト図法を用い、モデル地形はGTOP030から作成し、土地利用はMODISに基づき分類された土地利用データを利用して設定した。

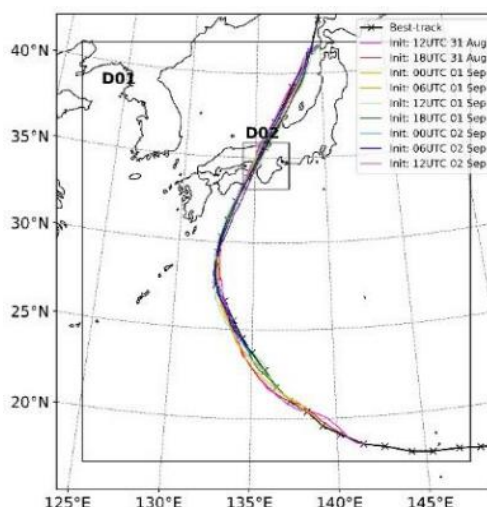


図 2.2 計算領域 Domain 1 (D01)及び Domain 2 (D02)。異なる計算開始時刻からのシミュレーションによる台風経路をカラーで、観測データ（気象庁ベストトラック）を黒の実線で示す。

ここではまず、台風経路の相違によって、ある地点（ここでは大阪市の観測地点とする）において

どのように風速に違いが表れるかについて検証した。台風経路の違いは領域気象計算の初期の値をずらすことで実現する（図2.3左）。その結果、大阪市内のある点における風速は被害をもたらした観測値を中心に弱いものと強いものに分かれた（図2.3右）。この結果はわずかに異なる台風経路をたどった場合に、より甚大な被害を及ぼした可能性があることが示唆される。

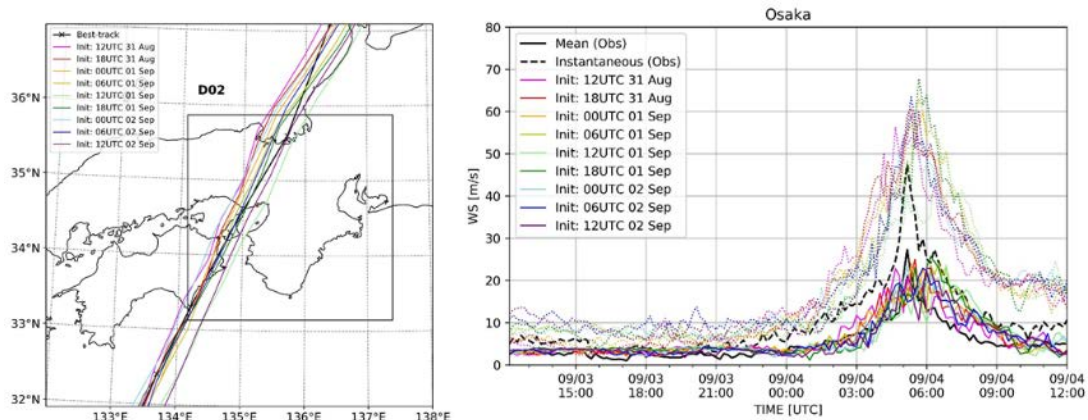


図 2.3 (左) 2018 年台風 21 号の経路がわずかに異なるようにした各種実験における経路と (右) 各実験における大阪での最大強風。

図2.3の結果から、2018年台風21号のように、台風が南西方向から近畿地方に接近し、大阪湾西側を通過し、近畿地方に上陸するコース（室戸コース）の場合、近畿地方で暴風リスクが高まるということが確認できた。この「室戸コース」の中でも、コースのわずかな違いで、大阪市や京都市などでの最大風速が10 %内外で変わることには留意する必要がある。こういった台風経路による風速のばらつきは、最悪シナリオを想定する上では大事な観点であると言える。

4. 2 気象場から都市街区スケールへのダウンスケーリング

都市域における街区規模の風を計算するためには、ビルや住宅、道路、公園といった都市の幾何学的構造を数値モデルに取り込む必要がある。このため本研究では、実際の都市の構造物の地理情報データとして国際航業（株）による3D空間データPAREA-LiDARを用いた。このデータは、2 m分解能で、都市におけるビルや構造物の3次元情報から成るものであり、京都市及び大阪市のデータを収集した。この3次元空間データにより都市街区LESモデル^{7), 8), 9)}の下面境界に実際の建物形状を陽に設置した。

図2.4は、京都市内のうち、京都駅・京都タワー・西本願寺などを含む南北3 km・東西2 kmの範囲での建物高さの空間分布を示す。高分解能データにより、実際の建物形状がLESモデルで設定されていることが分かる。以下に、図2.4で示される範囲でのLESモデルによる気流の解析結果についてまとめる。

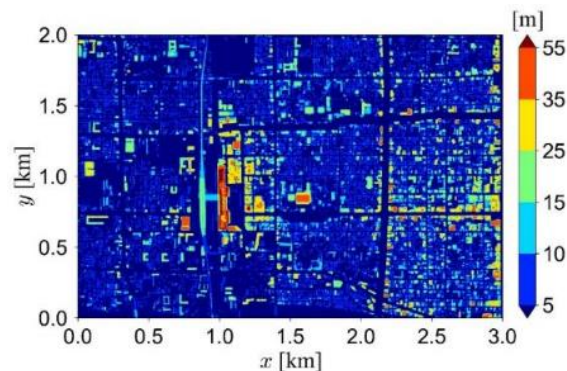


図 2.4 都市街区 LES モデルで与える京都市内の建物の高さ。横軸 (x軸) は南北 (右側が北)、縦軸 (y軸) は東西 (上側が西) を示す。

2018年台風21号の通過に伴い、京都市内でも観測史上歴代第2位の最大瞬間風速が記録された（表3.1）。このときの卓越風向は南風であったため、この条件を想定し、都市街区LESモデルによる気流

のシミュレーションを実施した。図2.4に示す範囲には、京都タワーも含まれている。図2.1に示した通り、京都タワーで観測された時間変動から、風には数分から数十分程度のゆらぎ（乱流）があり、突風においては乱流成分の寄与を無視できないことが分かる。このことから、都市街区内の気流の変動を陽に表現するためには、建物と乱流の両方を表現するLESの手法が必須であることが分かる。

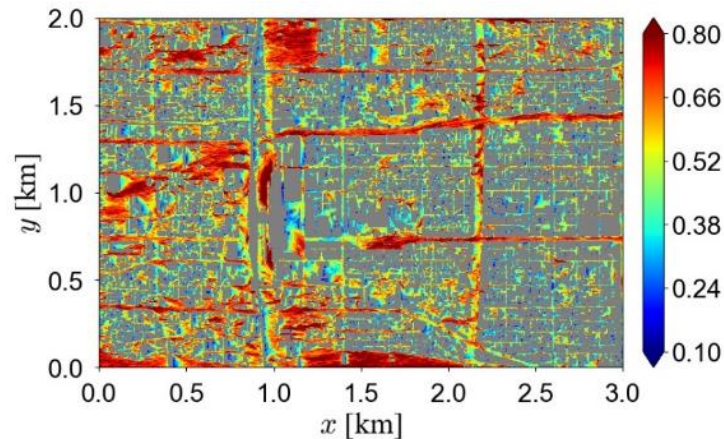


図 2.5 京都市街地の図 2.4 で示した解析対象領域での地上における最大瞬間風速の分布。境界層上端高度 z_∞ での平均風速値で規格化して示す。

図2.5は、LESの計算時間内で見られた計算メッシュ毎の瞬間的な風速変動のうちの最大値の分布を示す。ここで風速値は、シミュレートされた乱流境界層の上端高度（約330 m） z_∞ での平均風速（基準風速）に対する比として示した。つまり、数値が1に近いほど上空の風に近い風速を意味する。この図から、0.7程度を超える場所が多数分布していることが分かる。このような強風は、高層ビルと中低層建物が混在する場所、公園・広場など開けた場所、卓越風向である南北方向に延びる大通りといった場所で生じていることが分かる。この傾向は、大阪市街地を対象とした解析結果¹⁰⁾と合致したものである。京都タワーでの観測（図2.1）によれば、台風21号の接近時において、最大瞬間風速が57.6 m/s、10分平均風速の最大が39.7 m/sもの暴風が吹いていた。このことから、図2.5で示す風速値を実風速に換算すると、場所によっては気象台観測点での最大瞬間風速値（表3.1）を大幅に上回る暴風が吹いていたと考えられる。

図2.6に、最大瞬間風速値の建物密集度に対する依存性を示す。密集度が低いほうが瞬間値は高くなる傾向があることが分かる。これは、図2.5で示す風速値の高い場所が、高層ビルの周辺部、大通り沿い、公園等広場といったように、密集度が他と比べて低いことと対応している。計算対象とした範囲では、さらに密集度が低い街区はないものの、仮に密集度がさらに下がると、逆に瞬間値は下がると考えられる。密集度が下がると、上空からの強風の吹きおろし効果などが低減するためである。このようなことから、密集度が低くも高くもないという中程度の場合において、暴風リスクが最も高くなるのである。

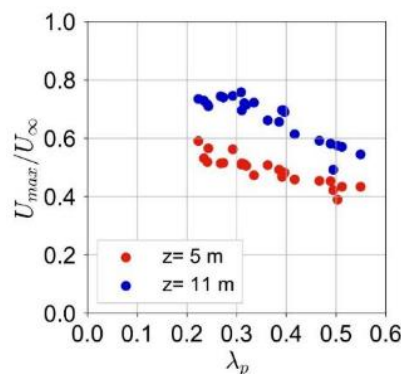


図 2.6 京都市街地での最大瞬間風速の建物密度依存性

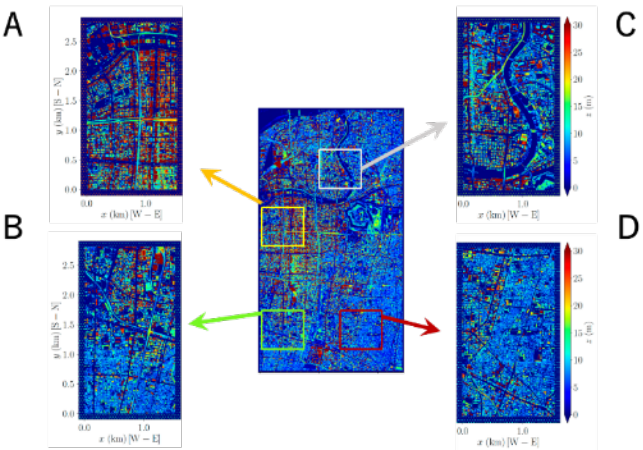


図 2.7 大阪市内における解析対象の拡大

次に、大阪市内の広範囲において、街区の形状と強風との関係についてLESモデルにより解析した。図2.7は、大阪市内の解析対象地域である。図2.7に示したA～Dの地域における地上での最大瞬間風速について、図2.5と同様の水平分布を図2.8に示す。図2.5で示した京都市街地内での特徴と同様に、卓越風向である南風の方向に沿った南北の大通り沿い、高層ビル周辺地域において風速値が大きいことが分かる。また、大きな河川でも大きな最大瞬間風速が算出されている。

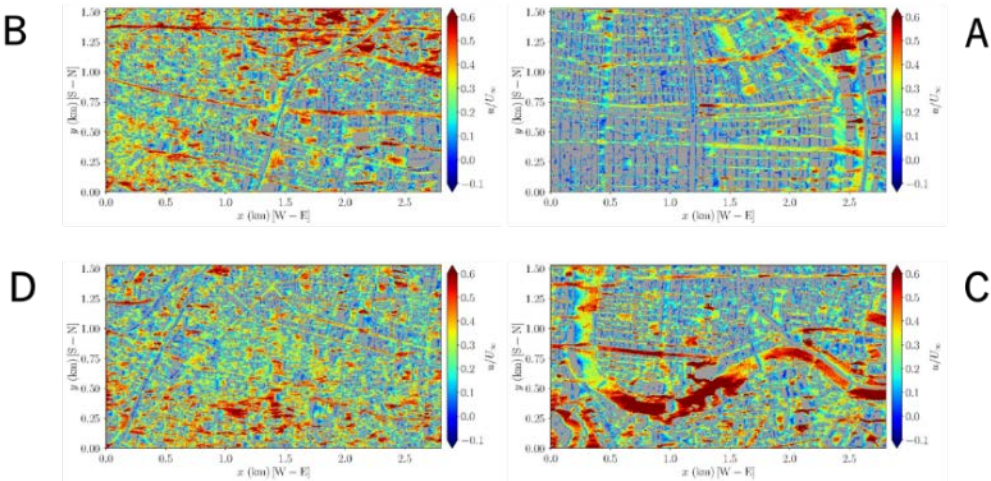


図 2.8 図 2.7 で示した大阪市街地の解析対象領域 A～D における最大瞬間風速の分布。図 2.5 と同様に、境界層上端高度で規格化している。横軸（ x 軸）は南北（右側が北）、縦軸（ y 軸）は東西（上側が西）を示す。

以上の結果は、大気の成層状態（大気安定度）は中立を想定していた。このことにより、大気安定度の影響を除外して、建物高さや配置といった都市の幾何学的な地表面形状に焦点を当てて、都市における最大瞬間風速の分布を調べてきた。一方で、実際の気象場の安定度は大きく変化する。例えば、気候変動に伴い大気安定度も平均的に変わっていくことが予測されていることから、安定度が強風場に及ぼす影響も考慮する必要がある。そこで、大阪市の市街地を解析対象とし、実際に市街地内で吹くと想定される風が、建物の高さ分布や密集度合いに応じてどのように変わるかに着目し、これらに及ぼす大気安定度の違いの影響を解析した。

市街地建物分布の幾何学的特徴を定量化するため、建物平均高さ、建物高さ変動の標準偏差、建物面積密度などの指標により評価した。水平格子幅2 mでのLESの計算負荷は極めて大きいことから、南北3 km（主流方向）・東西1 km（スパン方向）の範囲の大阪市内のある1地区を解析対象とした（図2.9）。なお、鉛直高度は500 mまでとした。この解析対象領域の中で、250 m四方の範囲で各幾何学的指標を算出し、市街地の幾何学的形態と風速変動との関係を調べた。安定度の設定には、上端高度での温度を300 Kとし、地上温度（上端高度での温度差 ΔT ）を7通り（ $\Delta T = -12, -8, -4, 0, +4, +8, +12$ ）に変

化させ、温度の高度分布を線形とした。

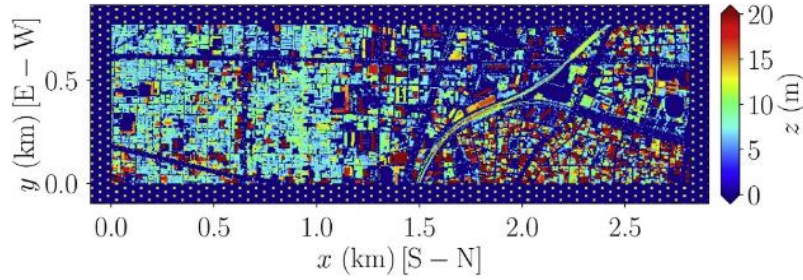


図 2.9 異なる安定度に対する数値実験で対象とした街区と建物高さ分布

本解析においては、市街地の幾何学的形態と風速変動に係る物理量との関係を調べた。風速変動に係る物理量として、gustiness（突風強度）と称し、次式で定義した物理量について調べた。

$$\mathcal{G} \equiv \begin{cases} |u_i|_{\max} / \langle \overline{u_i} \rangle, & \text{風速の最大値} \\ |u'_i|_{\max} / \langle \overline{u'_i} \rangle, & \text{風速の時間平均からの変動成分の最大値} \\ \sigma_{u_i, \max} / \langle \overline{\sigma_{u_i}} \rangle, & \text{風速変動の大きさの最大値} \\ TKE_{\max} / \langle \overline{TKE} \rangle, & \text{乱流運動エネルギーの最大値} \\ -|\psi' \phi'_{(-)}|_{\max} / \langle \overline{\psi' \phi'} \rangle, & \text{乱流フラックスの最大値} \end{cases}$$

また、市街地の建物配置や密度、建物高さといった都市の幾何学的形状を表現するパラメタとして、次のような指標^{11), 12)}を用いた。

- λ_p : 建物の立地密度
- λ_f : 建物の風速に面した壁面の密度
- H_{ave} : 建物の平均高さ
- H_{max} : 建物の最大高さ
- σ_H : 建物高さのばらつき

これら都市幾何学的パラメタの違いによって gustiness がどのように変化するか、また安定度が異なる場合の gustiness の変化具合がどのように変わるのかについて整理する。なお、図 2.9 で示した大阪市内の街区における上記の都市幾何学的パラメタの数値分布を図 2.10 に示す。これらの数値の分布は、世界の様々な都市の場合に見られる数値¹¹⁾をおおむねカバーしている。言い換えると、多様な幾何学的パラメタが見られる街区として図 2.9 を選定した。

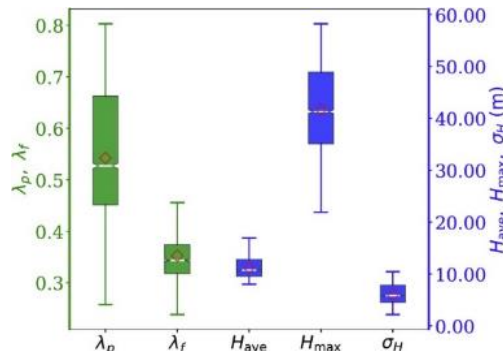


図 2.10 解析対象領域（図 2.9）における都市幾何学的パラメタの数値の分布

最初に、安定時 $\Delta T = -4$ と不安定時 $\Delta T = +4$ の計算結果から、乱流運動エネルギー（TKE）・レイノルズ応力・熱の鉛直フラックスの分布を示す（図2.11）。これら乱流統計量は、不安定時の場合のほうが、より大きな値となっていることが分かる。不安定時の場合には、熱による乱流生成が活発となり、

乱流強度や乱流に伴う輸送量が大きくなるのである。

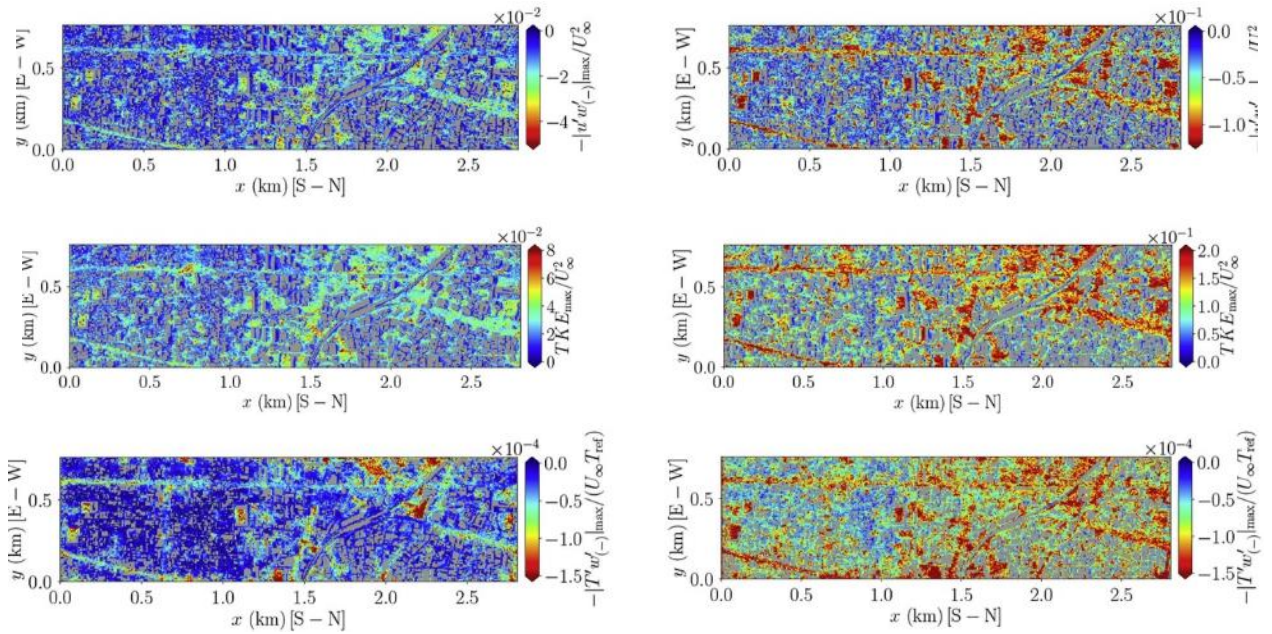


図 2.11 地上高 10 m における（上段）乱流運動エネルギー・（中断）レイノルズ応力・（下段）熱の鉛直フラックスの水平分布。左列は安定時 $\Delta T = -4$ 、右列は不安定時 $\Delta T = +4$ 。

図2.12に、建物の立地密度（ λ_p ）に対する地上高10 mでの突風強度のうち上端高度での平均風速で規格化した最大瞬間風速の関係を示す。異なる安定度条件 $\Delta T = -8, -4, 0, +4, +8$ の5つの場合について、この関係性を表示している。すべての安定度の場合において、建物密度が低くなるほど最大瞬間風速が強くなる傾向があることが分かる。また、不安定になるほど、建物密度に対する最大瞬間風速の強まり方が大きくなる。また、建物立地密度が低い範囲において、高い範囲に比べて、この強まり方が大きくなることも分かる。

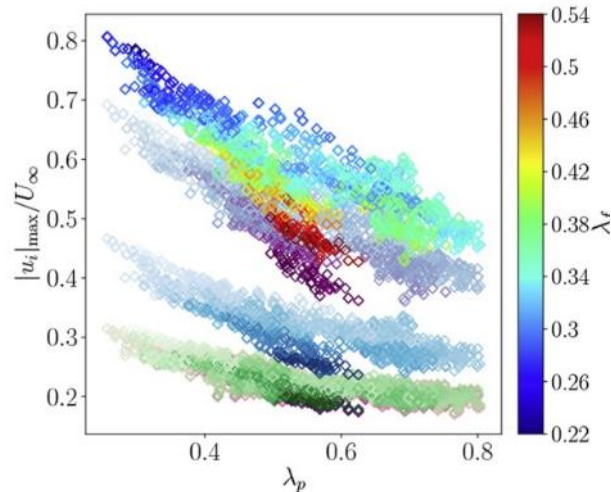


図 2.12 異なる安定度条件での建物立地密度（ λ_p ）に対する突風強度（規格化した最大瞬間風速）の依存性。それぞれの安定度条件は、赤色系（ $\Delta T = -8$ ）、緑色系（ $\Delta T = -4$ ）、青色系（ $\Delta T = 0$ ）、紫色系（ $\Delta T = +4$ ）、赤・緑・青（ $\Delta T = +8$ ）で示す。

次に、建物高さのばらつき（ σ_H ）に着目する。理想化した建物配置のLES数値解析において、建物高さのばらつきが多くなるほど、鉛直方向の運動量輸送が大きくなるなど、乱流輸送がより顕著になることが分かっていることから⁸⁾、本解析で対象とした実在都市の場合において建物高さのばらつきに対する感度を見てみることにする。図2.13に、異なる安定度条件 $\Delta T = -8, -4, 0, +4, +8$ の5つの場合について、

建物高さのばらつきに対する突風強度の変化具合を示す。高さのばらつきが大きいほど、突風が強くなり、この傾向は不安定時により顕著であることが分かる。

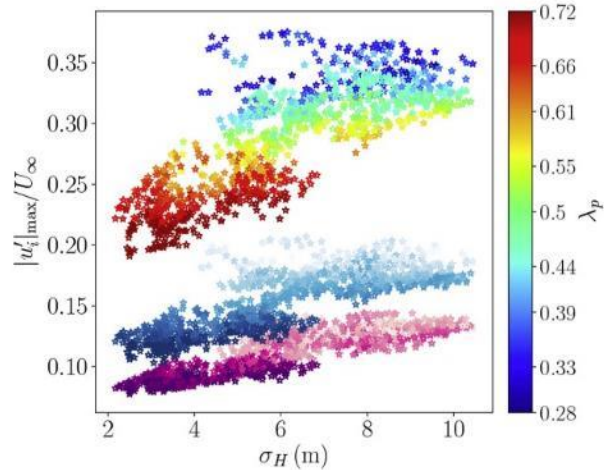


図 2.13 図 2.12 と同じ、ただし建物高さのばらつき (σ_H) への依存性

本解析で調べた異なる安定度条件 ΔT は、バルクリチャードソン数によって表現することができる。突風強度の各指標について、バルクリチャードソン数に対する依存性として整理した関係性を図2.14に示す。バルクリチャードソン数は、負の数値が大きいほどより不安定、正の数値が多いほどより安定であることを意味する。突風強度として、風速の最大値、乱流運動エネルギーの最大値、運動量フラックスの最大値、熱フラックスの最大値を示している。いずれの突風強度パラメータについても、安定側では安定度に対する感度は顕著ではなく、一方、中立から不安定側では不安定になるほど突風強度が大きくなるというように安定度に対する感度は鮮明である。図2.14の結果から、境界層の安定度が中立から不安定になるほど、最大瞬間風速や鉛直方向の乱流輸送量といった突風に係る物理量が大きくなることが分かった。このことから、都市の高温化が進行すると突風が強まる傾向にあることが示唆される。

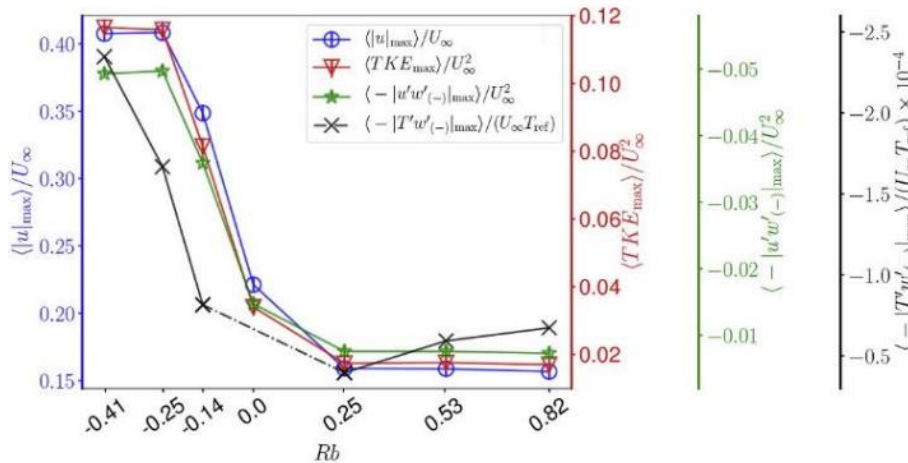


図 2.14 バルクリチャードソン数に対する突風強度の依存性

4. 3 擬似温暖化実験による温暖化影響評価

2018年台風21号は、仮に温暖化した気候条件では、強度や強風ハザードはどのように変化するのか、ということをはっきりさせるため、WRFモデルを用いて擬似温暖化実験^{(13), (14), (15)}を行った。温暖化差分は、d4PDFデータセット⁽¹⁶⁾の過去実験と将来実験それぞれの9月のアンサンブル平均値から作成した。これまでの擬似温暖化実験による解析^{(15), (17)}に基づき、海面水温及び気温の差分のみを対象とする台風21号の解析場に加算した。図2.15に、台風の発達域である東経130～140度・北緯10～20度の範囲で平均した9月の気温の温暖化差分の鉛直分布を示す。

図2.16は、2018年9月の再現実験による台風の経路、擬似温暖化実験での台風経路、ベストトラック

データによる経路を示す。再現実験・擬似温暖化実験ともに、おおむねベストトラックを再現できている。

気象モデルの地表面条件は、本研究のLESで用いたような実際の都市の建物や構造物を陽に表現することはできないことから、地表面から離れた高度で台風の風速場を見ている。図2.17は、850 hPa面での風速場を再現実験及び擬似温暖化実験の結果から示す。擬似温暖化実験の場合において、風速が全般的に強くなっていることが分かる。擬似温暖化実験から再現実験を引いた差を見ると、特に最大風速半径付近において、温暖化条件で風速が10 m/s程度、最大で20 m/s程度も強まっている。

つまり、この台風21号の強度は、2018年9月の実際の気象場が4℃上昇した温暖化したと想定すると、中心付近の最大風速としては10～20%程度強まる、ということである。この温暖化時の強度変化は、伊勢湾台風の擬似温暖化実験（温暖化シナリオはRCP8.5）で得られた結果^{18), 19)}と同程度である。したがって、2018年台風21号クラスの強度の台風が、「室戸コース」の経路を取った場合、その気象外力の強化に応じた災害リスクの増大が懸念されるのである。

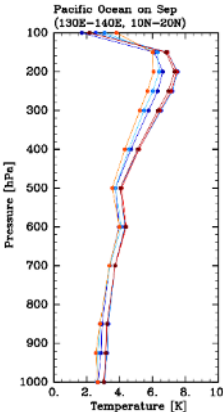


図 2.15 d4PDF による台風発達域の 9 月で平均した気温の温暖化差分の鉛直分布

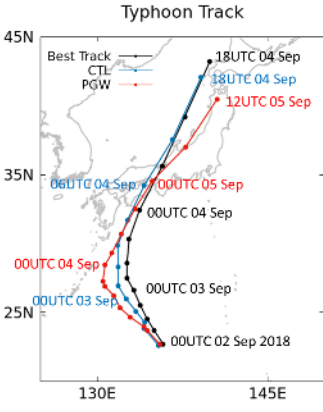


図 2.16 2018 年台風 21 号のベストトラックによる経路（黒）、再現実験（青）、擬似温暖化実験（赤）

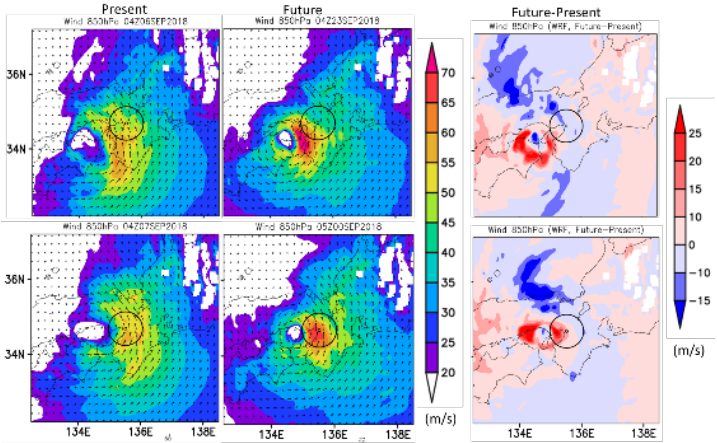


図 2.17 再現実験（左列）及び擬似温暖化実験（中央列）による 850 hPa での風速場（ベクトル）及び風速値（カラー）、温暖化による風速差。大阪最接近時（下段）とその 1 時間前（上段）。

本研究の擬似温暖化実験では、海面水温と気温の温暖化差分を過去の気象場に加算している。このように温度場のみに着目していることから、大気安定度の変化に応じた台風の強度変化はどうなるのかというように問題を一般化することができる。そこで、温暖化気候場を想定し、対流圏の気温減率や対流圏界面高度を様々な変化させた感度実験を実行することで、より広範囲のパラメタ空間において台風強度の変化を把握することが可能となる。一方で、大多数の感度実験を実施するには、完全3次元モデルでの現実場の条件でシミュレーションすることは極めて困難である。そこで、台風が軸対称的な構造

を持つことに着目し、軸対象モデルによって台風の最大発達強度をシミュレーションすることが有効である。

この考えにより、軸対象モデルを用いて、対流圏の気温減率や対流圏界面高度を様々に変化させた感度実験を実施した²⁰⁾。その結果を用いて、気温減率と圏界面高度という広範囲のパラメタ空間において、2018年台風21号の再現実験と擬似温暖化実験を位置づけ、台風の強度変化のロバストな特徴を示す。

図2.18は、気温減率・圏界面高度のパラメタスイープ実験で得られた台風の最大発達強度を示す。海面水温を303.5 K（過去の急発達台風の場合の急発達した海域での平均海面水温）にした場合は図2.18左、海面水温をさらに3 K上昇させた場合は図2.18右に示している。地上での気温はすべての実験で一定としている。まず海面水温を303.5 Kにした場合、同じ圏界面高度では、気温減率が大きくなるほど台風強度が増大することが分かる。一方、同じ気温減率では、圏界面高度が上がるほどに強度は上昇傾向にあるもののあまり明瞭ではない。海面水温を3 K加算した場合では、気温減率や圏界面高度の変化に対する台風強度は、同様に变化するが、やや不規則なパターンも見られる。

d4PDFデータから、過去実験の9月の平均的な対流圏での気温プロファイルを見ると、気温減率は6.5～6.6 K/km、圏界面高度15～15.5 kmである。一方、将来実験の9月の平均場は、気温減率は6.3 K/km程度、圏界面高度は15.5～16 km程度である。これらd4PDFによる大気場を図2.18のパラメタ空間で見ると、台風強度は過去の9月条件で68 m/s程度、将来の9月条件で72 m/s程度である。一方、2018年9月の気温場の条件は、気温減率は6.3 K/km、圏界面高度は15 kmであったため、図2.18のパラメタ空間では64 m/s程度の強度に対応する。2018年台風18号の環境場とd4PDF将来気候の気温場を比べると、気温減率はやや下がる程度（図2.19）で、海面水温の上昇が大きいいため、結果として最大発達強度は強化されると考えられる。このように、理想化した軸対象モデルによる数値実験ではあるものの、温暖化条件では、気温減率の低下に伴う台風の弱化作用と海面水温上昇に伴う台風の強化作用の両者の拮抗により台風の最大発達強度が決まること、両者の拮抗した効果の結果として台風強度は増大すること、が理解できる。以上のことから、理想実験からも、温暖化条件で台風の最大強度は増大することは事実であると言える。

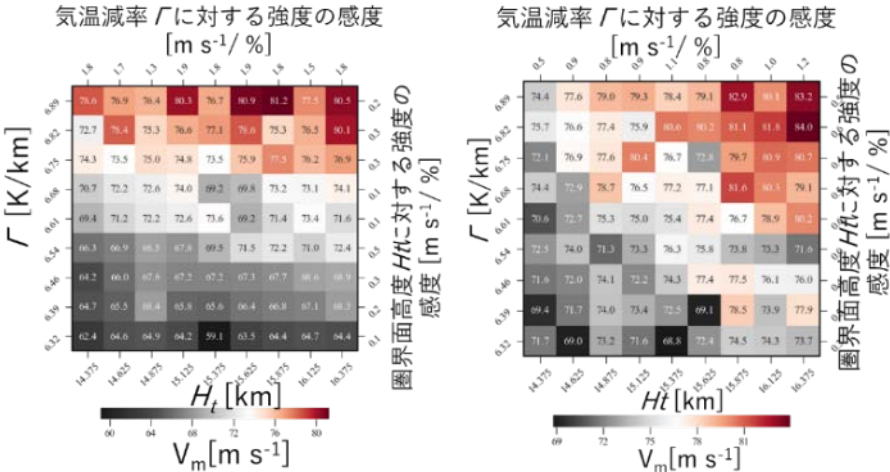


図 2.18 軸対称モデルによる数値実験から得られた台風の最大発達強度 (V_m) : (左) 気温場のみ変化させた場合、(右) 海面水温 (+3 K) と気温場を変化させた場合。横軸は対流圏界面高度 (H_t)、縦軸は対流圏の気温減率 (Γ)。横軸の上の数値は気温減率変化に対する強度変化の割合、縦軸の右の数値は圏界面高度変化に対する強度変化の割合。

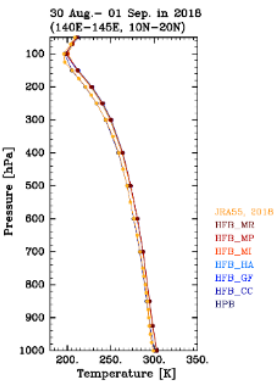


図 2.19 2018 年台風 18 号、d4PDF 過去実験 (HPB)、d4PDF 将来実験 (HFB 系) の気温プロファイル

4. 4 街区スケールでの強風リスク評価

4.2節での都市街区スケールでの強風シミュレーション、4.3節での台風強度の温暖化影響評価に基づき、街区スケールでの強風リスクを本節で評価する。

まず、4.2節で述べた通り、境界層の安定度に応じて突風強度は変化する。そこで、d4PDFデータから、近畿地方の領域（東経134～137度・北緯33～36度）における対流圏下層（1000～850 hPa）での温位の鉛直変化率を表2.2にまとめる。2018年台風21号が近畿地方に上陸した9月で見ると、過去実験でも将来実験でも温位変化は大きく変わらない。すなわち、対流圏下層に限ってみれば、気候場としては安定度の変化は顕著ではない。

表2.2 d4PDFデータセットによる近畿地方での8～10月の1000～850 hPaの月平均温位の鉛直変化率

	HPB	HFB_CC	HFB_GF	HFB_HA	HFB_MI	HFB_MP	HFB_MR
8月	4.920	5.161	5.099	5.099	5.079	5.161	5.124
9月	4.728	4.921	4.975	4.882	4.856	5.118	4.985
10月	4.590	5.11	4.991	4.754	4.890	5.329	5.197

次に、4℃上昇温暖化時の台風としては、軸対象モデル感度実験から最大発達強度が5%程度増加、擬似温暖化実験から上陸時に10～15%増加することから、市街地への気象外力は10%程度増加すると言える。上述の境界層の安定度変化は顕著ではないことと組み合わせて考えると、市街地の暴風のリスクとしては10%程度の増大が見込まれる。

2 m解像度の都市の建物データから、都市の幾何学パラメタを500 m四方の範囲で算出し、大阪市・京都市におけるいくつかの街区を例に取り、暴風リスクの相対的に高い街区・低めの街区を提示する。図2.20及び図2.21はそれぞれ、大阪市・京都市の街区における暴風リスクの特徴を示す。建物の立地密度はそれほど高くなくとも建物高さのばらつきが大きい場合に暴風リスクが高く、建物立地密度が高いものの建物高さのばらつきが小さい場合には暴風リスクは相対的に低くなる。このように、建物データから、ある特定の街区の暴風リスクを診断することが可能となるのである。

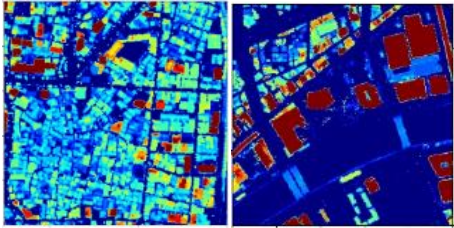


図 2.20 暴風リスクが（左）比較的低い街区（JR 野江駅西側）と（右）高い街区（西梅田南側）

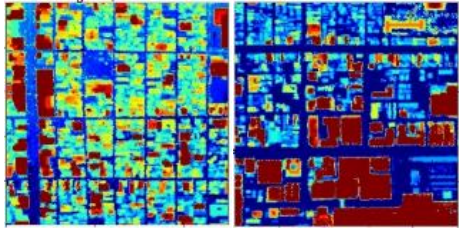


図 2.21 暴風リスクが（左）比較的低い街区（京都御所南側）と（右）高い街区（京都駅周辺）

4. 5 サブテーマ1・3との連携

4. 5. 1 サブテーマ1との連携による暑熱リスク評価

サブテーマ1と連携し、都市の暑熱環境の解析や暑熱リスクの評価を実施した。

都市の暑熱環境を決定する上で地面や物体表面など表面温度は鍵となる。また、表面温度は、熱効果を取り入れた都市街区LESモデルにおける境界条件としても重要である。そこで、都市における表面観測をサーモカメラ搭載のUAV（図2.22）により2019年9月に京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー（京都市伏見区）において実施した。UAVを鉛直方向に飛行させ、京都市街地の熱赤外面像を撮影し、表面温度を算出した。観測は、弱風かつ晴天であった3日間、1日3回（10時、13時、15時）実施した。

図2.22に2019年9月17日の13時に実施した観測で得られた表面温度分布を示す。建物屋根面・壁面や道路部分では高温、植生面は比較的低温であり、人工構造物の表面は一様に高温状態にあることが分かる。

これら市街地での表面温度観測に基づき、サブテーマ1と連携しながら都市街区LESモデルにおける温度条件を考案し、4.2節で述べた大気安定度変化が突風強度に及ぼす影響の定量化研究を実施した。



図2.21 サーモカメラZenmuse TX2搭載のDJI M200：（左）組み立て後、（右）計測地点でセット。

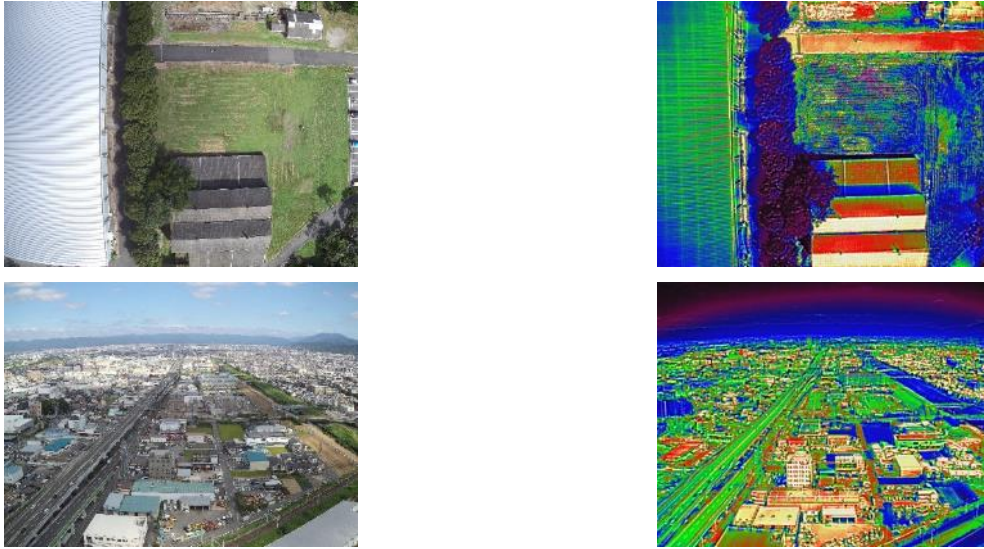


図2.22 UAVによる（左列）可視画像と（右列）赤外画像。（上段）鉛直直下、（下段）京都市街地。

4. 5. 2 サブテーマ3との連携による豪雨リスク評価

サブテーマ3と連携し、d4PDFデータを用いた擬似温暖化実験による豪雨リスクを評価した。

図2.23は、2018年台風21号による雨量が4℃上昇の温暖化シナリオでどのように変化するかを示している。擬似温暖化実験での温暖化差分はd4PDFを用いた。大阪市、京都市を含む近畿地方の都市域において、温暖化により雨量が増加することが分かる。

さらに、日本全国をいくつかの地域に分割し（図2.24左）、地域毎に豪雨災害をもたらす極端降水が気温に対してどのような関係にあるかを調べた。図2.24右は、地域毎に気温と極端降水との関係を過去実験と将来実験から求めた。将来気候での温度上昇に対応して、極端降水の強度が増加することが分かる。近畿地方を含む西日本域（WP）では、将来の豪雨リスクの増大が顕著であることが分かる。

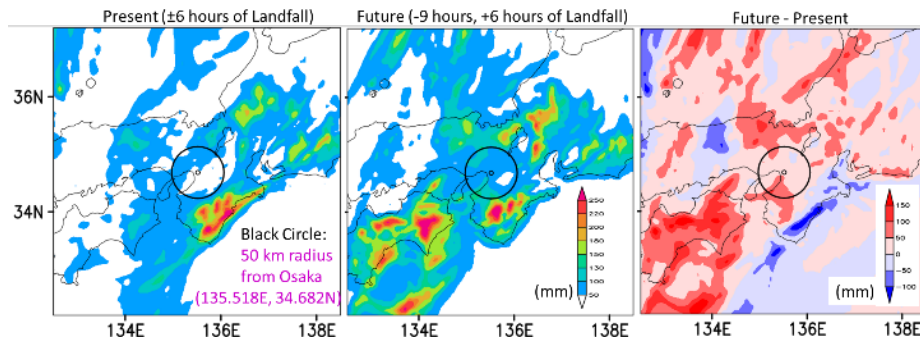


図2.23 2018年台風21号の再現実験（左）及び擬似温暖化実験（中央）による積算雨量、および温暖化による雨量増分（右）

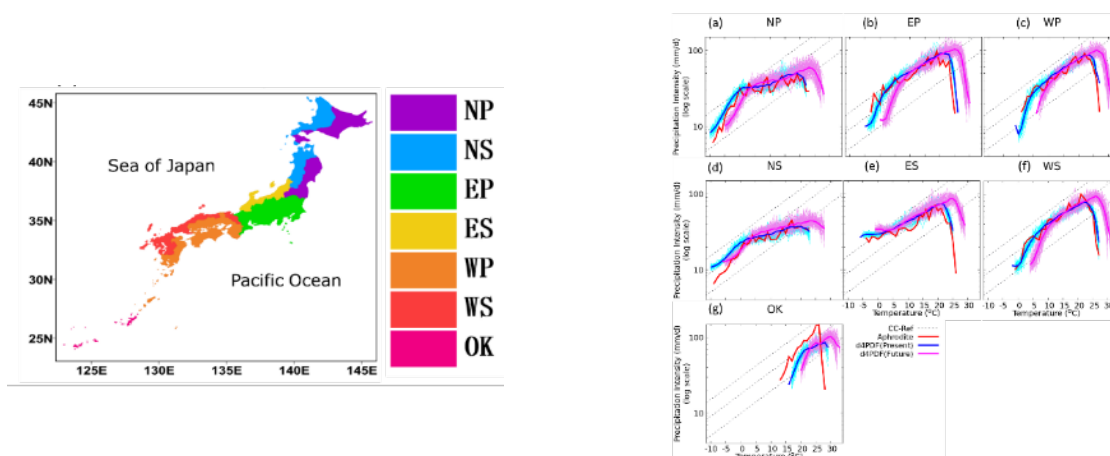


図2.24 d4PDFによる極端降水の温度に対する関係。(左)解析地域の分割、(右)解析結果：赤線はAPHRDITE観測値、青線は過去実験（水色はアンサンブル）、紫線は将来実験（薄紫はアンサンブル）。

5. 研究目標の達成状況

近畿地方の都市として大阪市と京都市を対象として、強風災害をもたらした事象として2018年台風21号を選定し、気象場から都市街区スケールへダウンスケールする手法を構築し、擬似温暖化実験を組み合わせることで、街区スケールで強風災害のリスクを評価することは、目標通りに成果を得た。最大瞬間風速などを定量的に算出し、建物配置や建物高さのばらつきなど都市の幾何学的形状が最大瞬間風速など乱流指標に及ぼす影響を評価し、温暖化による最大瞬間風速の増大なども定量化することができた。

これらの成果に基づき、強風に対する気候変動適応策について大阪市環境局環境施策部及び建設局公園緑化部、京都市環境政策局地球温暖化対策室と協議した。大阪市においては沿岸・河川・内陸部で特徴的な適応策や温暖環境に関連した強風リスク、公園樹や街路樹管理への気候変動適応の考え方について、京都市においては区域毎に建物高さの上限を定めた「京の景観ガイドライン」を考慮した強風災害への適応について意見交換し、気候変動適応に関する提言書としてまとめ、両市に提出した。また、京都市環境影響評価審査会において京都市内で進む再開発によるビルの大規模化や高層化に伴う風害リスクについて答申書で指摘し、大阪市環境局大気汚染発生源調査検討委員会において都市の風環境に配慮した大気汚染常時監視網の適正配置について意見するなど、本研究の知見に基づき自治体の環境行政に貢献することができた。さらに、本研究成果のうち都市街区LESの計算結果を環境省事業「令和3年度気候変動による災害激甚化に関する影響評価業務」に提供し、国レベルでの適応策の議論にも貢献することができた。これら環境行政への貢献は、当初目標を上回る成果である。

6. 引用文献

- 1) 日本損害保険協会：「過去の主な風水災等による保険金の支払い」（2021年3月31日）
- 2) Yoshida, T., and T. Takemi, 2018: Properties of mixing length and dispersive stress in airflows over urban-like roughness obstacles with variable height. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 14, pp. 174-178.
- 3) 光田寧, 堀口光章, 1993：最大瞬間風速と突風率の測定について．京都大学防災研究所年報，第36B-1号，pp. 17-25.
- 4) Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2012: Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 13, pp. 180-186.
- 5) 竹見哲也, 石川裕彦, 2019：2018年台風21号による暴風の解析．京都大学防災研究所年報，第62号B，pp. 386-392.

- 6) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-47 + STR, 113 pp.
- 7) Yoshida, T., T. Takemi, and M. Horiguchi, 2018: Large-eddy-simulation study of the effects of building height variability on turbulent flows over an actual urban area. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 168, pp. 127-153
- 8) Yoshida, T., and T. Takemi, 2018: Properties of mixing length and dispersive stress in airflows over urban-like roughness obstacles with variable height. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 14, pp. 174-178
- 9) Vanderbauwhede, W., and T. Takemi, 2015: Twinned buffering: A simple and highly effective scheme for parallelization of Successive Over-Relaxation on GPUs and other accelerators. *High Performance Computing and Simulation (HPCS)*, 2015 International Conference on, pp. 436-443, 20-24 July 2015
- 10) Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki, and K. Hase, 2019: Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 15, pp. 22-27
- 11) Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2011: LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, pp. 1692-1712
- 12) Takemi, T., T. Yoshida, M. Horiguchi, and W. Vandeauwhede, 2020: Large-eddy-simulation analysis of airflows and strong wind hazards in urban areas. *Urban Climate*, Vol. 32, 100625
- 13) Schär, C., C. Frei, D. Lüthi, and H. C. Davies, 1996: Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, pp. 669-672.
- 14) Sato, T., F. Kimura, and A. Kitoh, 2007: Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *Journal of Hydrology*, Vol. 333, pp. 144-154.
- 15) Takemi, T., Y. Okada, R. Ito, H. Ishikawa, and E. Nakakita, 2016: Assessing the impacts of global warming on meteorological hazards and risks in Japan: Philosophy and achievements of the SOUSEI program. *Hydrological Research Letters*, Vol. 10, pp. 119-125.
- 16) Mizuta, R., et al., 2017: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 98, pp. 1383-1398.
- 17) Kanada, S., T. Takemi, M. Kato, S. Yamasaki, H. Fudeyasu, K. Tsuboki, O. Arakawa, and I. Takayabu, 2017: A multi-model intercomparison of an intense typhoon in future, warmer climates by four 5-km-mesh models. *Journal of Climate*, Vol. 30, pp. 6017-6036.
- 18) Takemi, T., R. Ito, and O. Arakawa, 2016: Robustness and uncertainty of projected changes in the impacts of Typhoon Vera (1959) under global warming. *Hydrological Research Letters*, Vol. 10, pp. 88-94.
- 19) Mori, N., T. Takemi, Y. Tachikawa, H. Tatano, T. Shimura, T. Tanaka, T. Fujimi, Y. Osakada, A. Webb, and E. Nakakita, 2021: Recent nationwide climate change impact assessments of natural hazards in Japan and East Asia. *Weather and Climate Extremes*, Vol. 32, 100309.

- 20) Takemi T., and S. Yamasaki, 2020: Sensitivity of the intensity and structure of tropical cyclones to tropospheric stability conditions. *Atmosphere*, Vol. 11, 411

Ⅱ－３ 豪雨豪雪に対する都市災害への適応

国立大学法人北海道大学
大学院理学研究院 教授

稲津 將

〔要旨〕

札幌市を対象とした豪雨・豪雪事例を参考に、観測データ、d4PDFを中心とした既存の気候変動データ、及び高解像度シミュレーションによって、都市災害を起こしうるハザードの可能性及び気候変動に伴うその変化を現象ごとの特性に応じて整理し、その研究結果を北海道地域気候適応センターはじめとする地方自治体と共有し、適応策を協議した。札幌における夏季豪雨事例は主に台風か線状降水帯によって起こることが整理され、うち線状降水帯で都市河川が氾濫した事例について河川モデリングによって水位を計算した。その結果、気候変動で同事例が起こったときには氾濫の程度が大きいこと、また昨秋竣工した放水路トンネルによって気候変動下でも被害が軽減されることが分かった。一方、札幌における冬季豪雪事例は主に北風系・西風系で起こることが整理され、気候変動下、西風系が北風系よりも卓越することが分かった。その結果、札幌市北部における除雪は、市全体の豪雪よりも高頻度になることが推察された。サブテーマ1と連携し、札幌市の暑熱環境が福岡市程度になること、都市LESにより緑地帯がクールアイランドとして機能することが示された。サブテーマ2と連携し、街区が類似している札幌市における強風のリスクを整理し、吹き溜まりを診断できるモデルの開発を行った。地方自治体との対話により、気候変動適応を現在の行政方針の文脈で理解することがなされ、必要に応じて追加の研究を実施した。

1. 研究開発目的

気候変動によって激甚化する極端気象に対し、人口と資産が集積する都市は脆弱である。このリスクに適切に対応するため、高度な科学的知見に基づいた気候変動に伴う都市災害への適応が求められている。本研究課題では、気候変動適応法に即し、かつ地方公共団体の実務に貢献するべく、研究課題を気候変動に対する都市災害への適応に着眼した。

サブテーマ3の目的は、豪雨豪雪という現在から近未来の都市災害に直結する気象に着目し、札幌市に対して都市災害リスクを評価することである。また、そのリスク評価に基づき、具体的な適応策を札幌市・北海道庁の担当者と協議する。

2. 研究目標

札幌市における既往上位50例の豪雨豪雪事例を参考に、d4PDF 5km解像度の力学的ダウンスケーリングデータ750年分から札幌市で起こりうる夏季豪雨事例と冬季豪雪事例を抽出し、それらがどの程度の確率で激甚化し、都市災害をもたらすのかを最大可能性として評価する。また、その結果を札幌市に協議し、実現可能な気候変動適応策を提案する。

3. 研究開発内容

これまでの観測データ、既存の気候変動データd4PDFを用いて、札幌市における豪雨豪雪をもたらすハザードを検出し、ハザードと大規模な気象との関係を明らかにする。このため必要に応じて、さらに高解像度の力学的ダウンスケーリングを実施する。札幌市における豪雨ハザードの原因を、温帯低気圧や台風のような大規模場と、線状降水帯のような局所的な現象とに分類する。また、札幌市内の都市河川に対して及ぼす影響を擬似温暖化の手法によって評価する。これは年最大時間降水量の確率評価を行い、既存の雨量と流量の関係性から、札幌市内の河川氾濫リスクを分析するものである。同様に、豪雪ハザードを天気図パターンの分類によって明らかにする。これまでの研究でよく知られている風向きにともなう豪雪地帯の降雪・積雪・吹雪・吹き溜まりに着目する。吹雪の評価のため、1 km解像度のダウンスケーリング計算を実施し、吹き溜まりの評価のためLESを開発する。一方、札幌市における既

往の積雪深データや除雪記録と対照し、札幌市内の区域における豪雪リスクを評価する。

サブテーマ1から暑熱環境研究に関する知見を、サブテーマ2から強風研究に関する知見を共有し、札幌市に当てはめたときのリスクを分析する。とくに、暑熱環境に伴う熱中症リスク、現状では極めて稀な台風に伴う倒壊リスク、豪雨に伴う氾濫リスク、及び現状でも頻発する豪雪リスクが近未来でどのようなようになるのかに着目して分析する。

以上の気候変動に伴う札幌市の都市災害リスクの情報は、研究成果を逐次、北海道庁及び札幌市と共有し、気候変動適応策を協議する。

4. 結果及び考察

4. 1 豪雨に対する都市災害リスク

d4PDF 20kmデータ¹⁾及び既存の5 kmダウンスケーリング計算²⁾から、札幌で豪雨をもたらすハザードのうち、天気図スケールとの関係が大きいものを低気圧追跡法³⁾とクラスター分析を組み合わせることで検出した。気候変動時に台風の個数が少なくなることはすでによく知られている⁴⁾が、北海道に到達したときの中心の位置によって、豪雨の起こりやすさが異なることを突き止めた。とくに、都市域である札幌での天気図スケールと関係した豪雨は、北海道南西部に台風のあるときだった。さらに、この豪雨は全球4K上昇時、札幌の豪雨イベントにおける降水量を倍増させることが分かった(図3.1)。なお、温帯低気圧の個数とそれに伴う雨量の変化は、台風と比較すると小さかった⁵⁾。

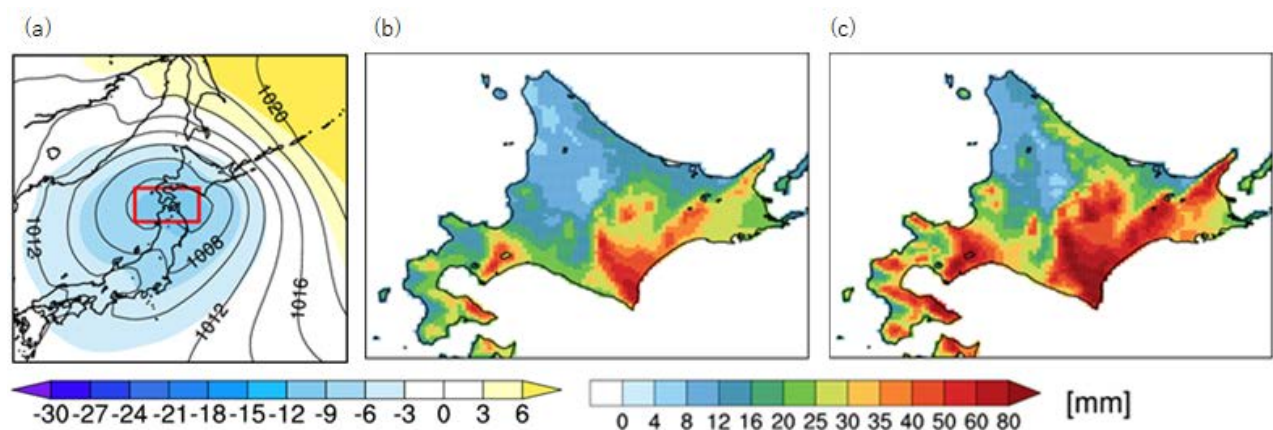


図 3.1 : (a) 北海道の豪雨イベントと連関する海面気圧分布のクラスターの一つ。等値線は海面気圧(4 hPa ごと)でカラーはその偏差(図下のカラーバー, hPa)である。(b) (a)のクラスターのときに生じた d4PDF 過去実験の 5 km 力学的ダウンスケーリングデータにおける豪雨の分布図。カラーバーは図下に示した通りである。(c) (b)と同じ、ただし、d4PDF 4K 上昇実験の結果。

次に、札幌で豪雨をもたらすハザードのうち、天気図スケール以下のメソ対流系、とくに近年着目される線状降水帯を考察した。汎用領域気象モデルSCALEを使った1 km解像度力学的ダウンスケーリング計算によって、過去の気象データを正確に与えれば、線状降水帯がおおよそ再現されることがわかった。しかしながら、位置のわずかなずれや、線状降水帯上における降水量の過小評価など、計算結果を札幌市内の都市河川のリスク分析に利用することは難しい。

そこで、本研究では、サブテーマ2で実施している擬似温暖化実験を河川モデルに適用することとした。本研究では札幌市内での脆弱河川として住宅街を流れる望月寒川(図3.2)を対象とし、簡易な集中型河川流出モデル(多段タンク)を開発した。また、氾濫事例として札幌市周辺で線状降水帯が出現し、豪雨をもたらした2014年9月11日の事例を扱うこととした。まず、d4PDF過去実験・4K上昇実験における統計分布から、札幌の夏季における上位1%降水は将来、1.44倍となることが分かった(図3.3)。このことから、当該事例がもし温暖化時に起こったとすると、降水量は事例においてどの時間も一律1.44倍となる仮定した。開発した河川モデルは、事例で観測された雨量を入力値にして水位を再現す

るように、パラメタを最適化した(図3.4a)。このシステムを利用して、擬似温暖化実験を実施したところ、氾濫危険水位を大きく超えた(図3.4b)。

また、望月寒川は現状においても度重なる水害に見舞われている。その対策として上流部分に放水路トンネルが建設され、昨秋、竣工した(図3.2)。そこで、放水路の効果を入れて事例における実験を実施したところ、氾濫危険水位を下回る結果となった。さらに、放水路の効果を入れた擬似温暖化実験でも、氾濫の程度が大きく抑えられることとなった⁶⁾。この結果は、河川を管轄する北海道庁建設部河川砂防課と共有し、現在の災害に対する対応が気候変動適応策となる一例として認識された。

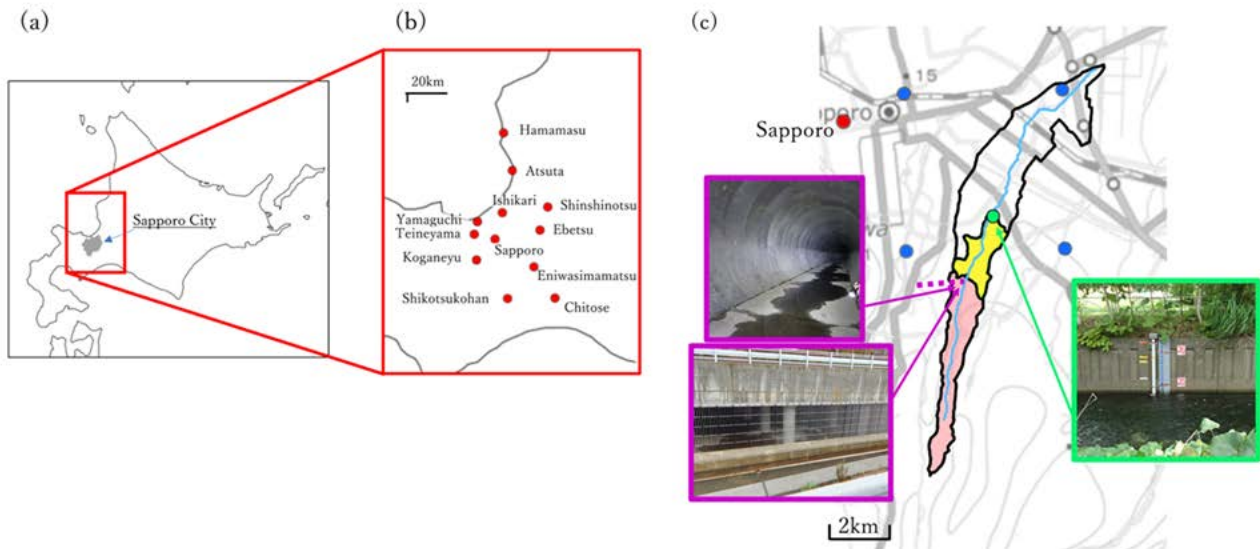


図 3.2 : (a) 北海道における札幌市の位置と (b) 札幌周辺のアメダス気象観測点。(c ; 黒枠) 望月寒川流域の範囲と (色付) 河川モデルで対象とした範囲。桃色は、放水路トンネルによって、過剰な降水が分流される範囲を示す。緑点と緑枠にて水位観測点の位置と写真、紫点線と紫枠にて放水路トンネルの位置と写真を掲載した。

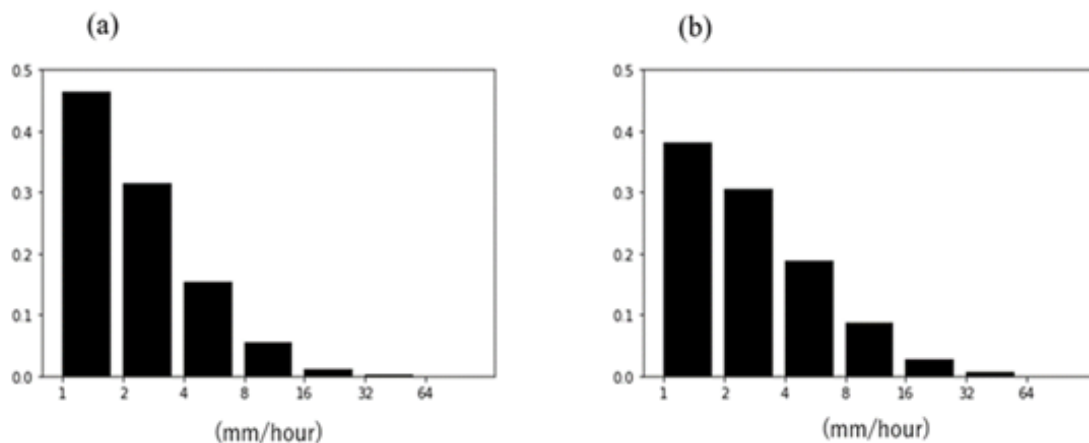


図 3.3 : d4PDF (a) 過去実験及び (b) 4K 上昇実験の 5 km 力学的ダウンスケーリングデータにおける札幌近傍グリッドの時間降水分布。

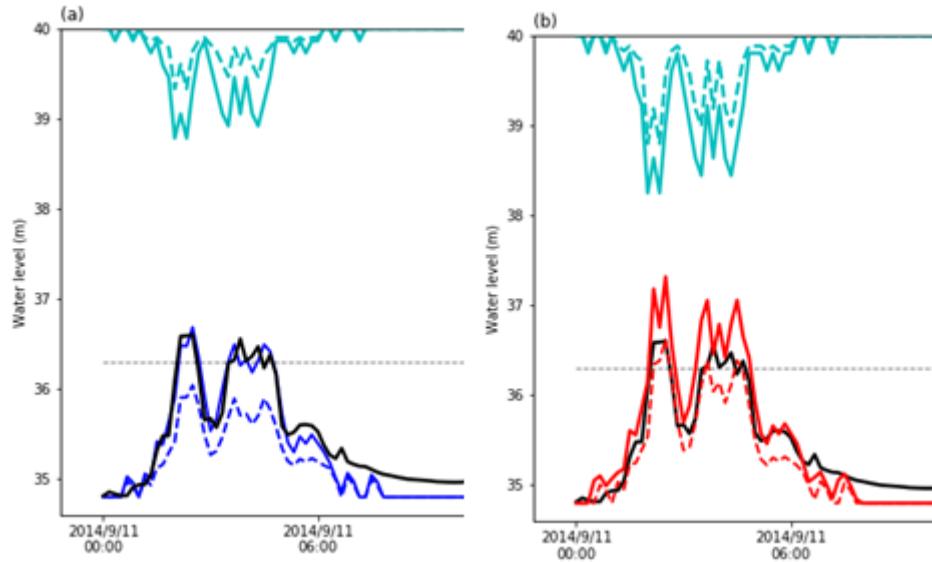


図 3.4 : (a) 2014 年 9 月 11 日における望月寒川観測点で観測された(上実線)降水量と(下黒線)水位。
青線は観測された降水量を河川モデルに入力したときの計算された水位、青点線は放水路トンネルの効果を考慮したときの水位である。また、点線は氾濫危険水位である。(b) 擬似温暖化実験における(a)と同じ事例の降水量と水位。

また、札幌建設管理部とのヒアリングにより、これから起こる（または起こると予測される）災害に対し、その程度の大雑把な見積もりを与える類似天気図検索が現場の利便となることがわかった。そこで、気圧降水間関係式の考え方⁷⁾を応用し、豪雨災害検索に便利な類似分析法を開発した。ある特定の日 t_0 と時刻 t との大規模場の類似に対し、規格化した海面気圧 $\hat{p}(x, t)$ と規格化した 850 hPa 面の比湿 $\hat{q}(x, t)$ の関数として下記の類似度 $I(t; t_0)$ を定義する。

$$I(t; t_0) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \|\hat{p}(x, t-1) - \hat{p}(x, t_0-1)\|^2 dx + \frac{1}{N} \int_{\Omega} \|\hat{p}(x, t) - \hat{p}(x, t_0)\|^2 dx \right\} \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \|\hat{q}(x, t) - \hat{q}(x, t_0)\|^2 dx$$

ここで、 Ω は類似度の計算領域（ここでは北緯35度から50度まで、東経135度から150度までの矩形領域）である。類似度は海面気圧と比湿それぞれの平均二乗誤差に相当するので、値が小さい方が類似している。低気圧などの移動や停滞を捉えて類似を探すため、類似計算に特定日前日の海面気圧も算入する。海面気圧と850hPa面の比湿の類似度に対する寄与は同じとした。類似日は類似度の小さいものから順に第1類似日、第2類似日、... 第50類似日とする。ただし、特定日と類似日とは14日以上の間が離れているとする。つまり、特定日 t_0 の第1類似日 t_1 は $t_1 = \underset{|t-t_0| \geq 14}{\operatorname{argmin}} I(t; t_0)$ で表される。同様に、第 n 類似

日 t_n は $T_n = \{t \notin \{t_1, t_2, \dots, t_{n-1}\} \mid |t - t_0| \geq 14d\}$ に対し、 $t_n = \underset{t \in T_n}{\operatorname{argmin}} I(t; t_0)$ である。

この手法を用いて、札幌における既往最大降水日（1981年8月23日）の類似を分析した。この日の第1類似日として2002年7月11日があった。ともに北海道の南に台風があつて、大量の水蒸気が南からもたらされた場合であった（図3.5）。このように既往最大降水の類似日の多くは台風に関係があり、上位50日の降水の確率分布は解析期間全体における降水の確率分布より、あきらかに多雨傾向を示していた（図3.6）。

このような方法は簡便にハザード傾向を知る手段として有効であるが、気候変動下での「想定外」の災害は網羅しないことから、注意が必要である。これ以上は本研究課題の計画外だが、d4PDFを利用した事例抽出により、近未来におけるハザード傾向を過去の災害事例と結び付けることは「想定外」も含めて可能であることから、現場目線での研究の発展が期待される。

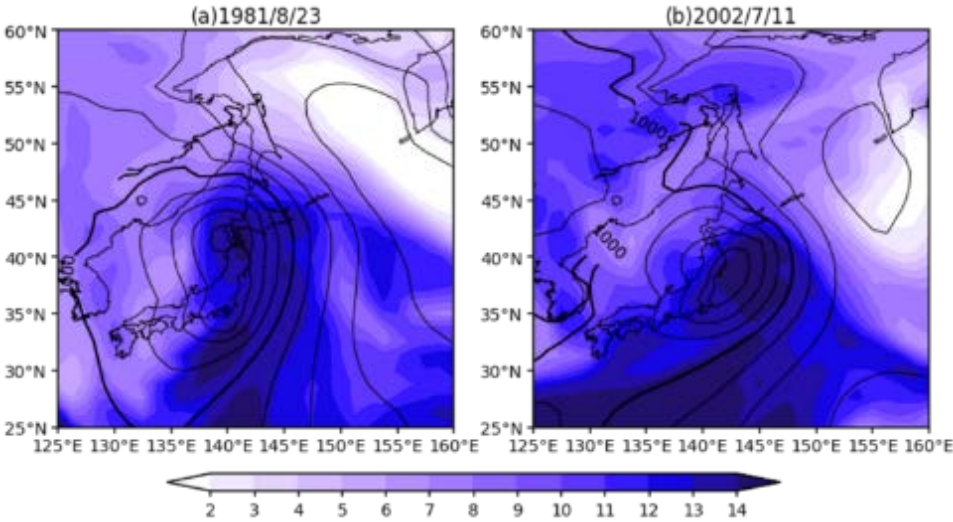


図 3.5 : (a) 1981 年 8 月 23 日と (b) その第 1 類似日である 2002 年 7 月 11 日における (等値線) 海面気圧 [hPa]と (色影) 850 hPa 面の比湿 [g/kg]。等値線間隔は 4 hPa であり、色影は下のカラーバーの示す通り。

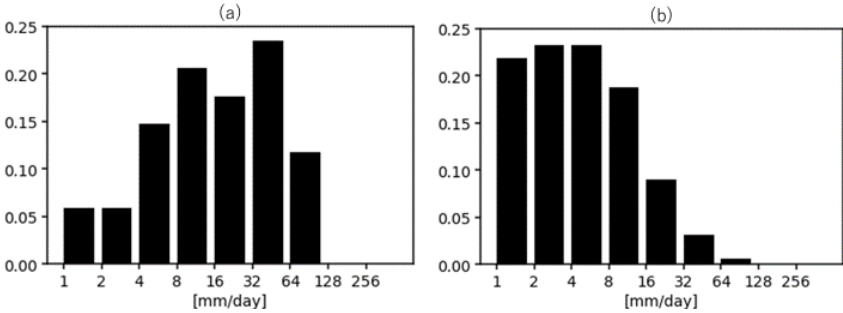


図 3.6 : (a) 1981 年 8 月 23 日の推定確率分布と (b) 1961-2018 年 6-9 月の降水確率分布。降水量が 1 mm 以下であった日を除いた条件付き確率を示している。1981 年 8 月 23 日の第 1-50 類似日の中で日降水量が 1 mm 未満であった日の割合は 0.32 であった。1961-2018 年 6-9 月の日降水量が 1 mm 未満であった日の割合は約 0.61 であった。

4. 2 豪雪に対する都市災害リスク

北海道冬季の豪雪は天気図パターンに大きく依存する⁸⁾。そこで、ニューラルネットワーク型の機械学習の一種である自己組織化写像を利用して、札幌の豪雪と関係がある天気図パターンを抽出した。札幌において典型的に豪雪となる気象状況を機械学習の一種、自己組織化写像を用いて分類したところ、西高東低冬型で北風系の気圧配置となるか、北海道の南を温帯低気圧が通過するかのいずれかといえる。前者においては北または北北西の風で寒気とともに雪雲が流れ込んでくることが多く、後者においては南東の風で暖気とともに雪雲が流れ込んでくることが多い。4K上昇の気候下にあっても前者の気象状況では依然、氷点下であるため、単位体積に含みうる水蒸気量の増加のため降雪頻度はむしろ増加することになる(図3.7b)。一方、後者においては現状の降雪が氷点付近で起こっており、4K上昇の気候下にあっても多く0℃より高い気温となる。このため、現在気候では降雪となっていたものが、将来は降雨となるため、降雪頻度は減少することになる(図3.7c)。なお、初冬や晩冬においては気象状況によらず、豪雪頻度は激減した。これはどのような気圧配置であっても、現在気候下、初冬や晩冬での降雪は氷点前後で起こることに関係すると思われる¹⁰⁾。

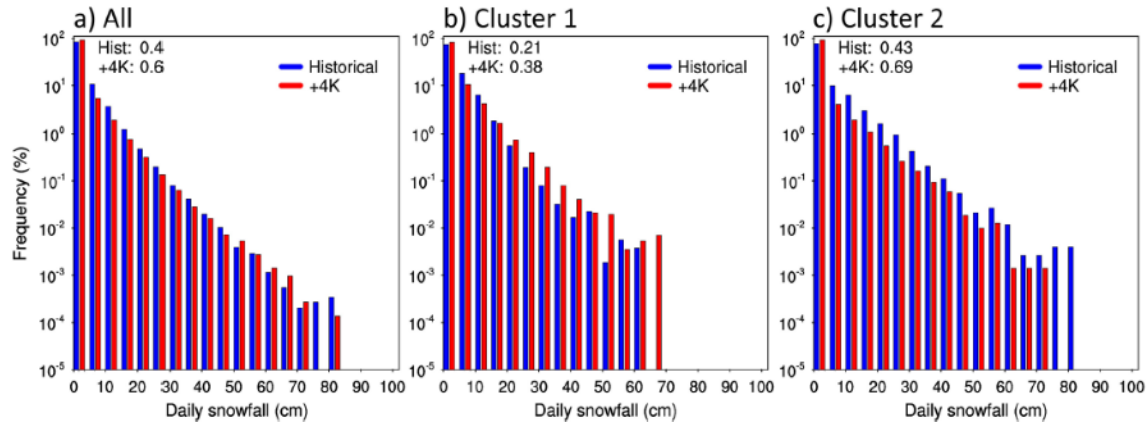


図 3.7：北海道を対象とした(青)d4PDF 過去実験及び(赤)d4PDF 4K 上昇実験における札幌の日降雪量の頻度分布。(a)は冬季におけるすべての日に対する結果、(b)は西高東低冬型の気圧配置となった日に対する結果、(c)は南岸低気圧が通過した日に対する結果である。横軸が日降雪量(cm)で縦軸は確率を表す。横軸の日降雪量は 5 cm ごとに統計をとっており、縦軸の確率は対数軸である。

上記研究を拡張し、北海道各地の豪雪ハザードをもたらす天気図パターンを整理した。その結果、太平洋側の都市に豪雪をもたらす温帯低気圧通過型の天気図(図3. 8a)、日本海側の都市(札幌市においては北部地区)に豪雪をもたらす西風系の天気図(図3. 8b, c)、及び札幌市全域に豪雪をもたらす北風系の天気図(図3. 8d)に分類されることが分かった。また、d4PDF 4K上昇実験と過去実験を比較したところ、西風系の天気図の出現頻度が増加し、北風系の天気図の出現頻度が減少した。西風系と北風系の天気図の違いは、よく知られた全球規模のWPパターン⁹⁾に極めて高い相関性がある。WPパターンはその形成メカニズムにおいて海陸温度差が関係しており、温暖化に伴う海陸温度差の変化が出現確率に影響していると推測される。

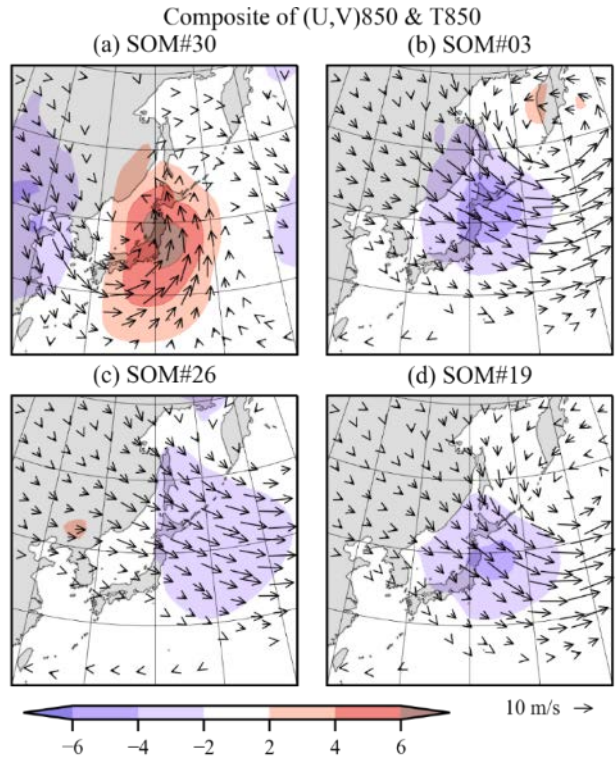


図 3.8：気象庁再解析データに基づいて計算された(a) 太平洋側の都市、(b, c) 日本海側の都市、(d) 札幌に豪雪をもたらす典型的な天気図と 850 hPa 面における(矢羽根)風と(色影)温度偏差(K)。

さらに、天気図パターンによる降雪の気候変動変化とその要因を調べた。当然ながら、どの計算結果においても、山岳地帯を除いて、総降雪量は大幅に減少した(図3.9a)。北海道沿岸部では約50%減少し、南側では減少率が大きかった。しかし、日本海側や内陸では、豪雪頻度はそれほど変わらず、真冬においてはむしろ増加した(図3.9b)。4K上昇実験で70%近い減少を示す太平洋側の都市とは対照的であった。この違いは、どの温度帯で現在における降雪があるかに依存する。西風系で日本海側に降雪がある場合は寒気移流場であるため、温暖化してもなお氷点下である。したがって、日本海側や内陸で豪雪頻度が増加するのは、氷点下の環境で多くの蒸発がもたらされることと、西風系の天気図パターンの増加の両者によって説明できる(図3.9c)。対照的に、太平洋側の都市における豪雪頻度の減少は、気候変動下での降雪から降雨への変換と、温帯低気圧通過パターンの微減の複合効果によって説明できる(図3.9d)¹¹⁾。

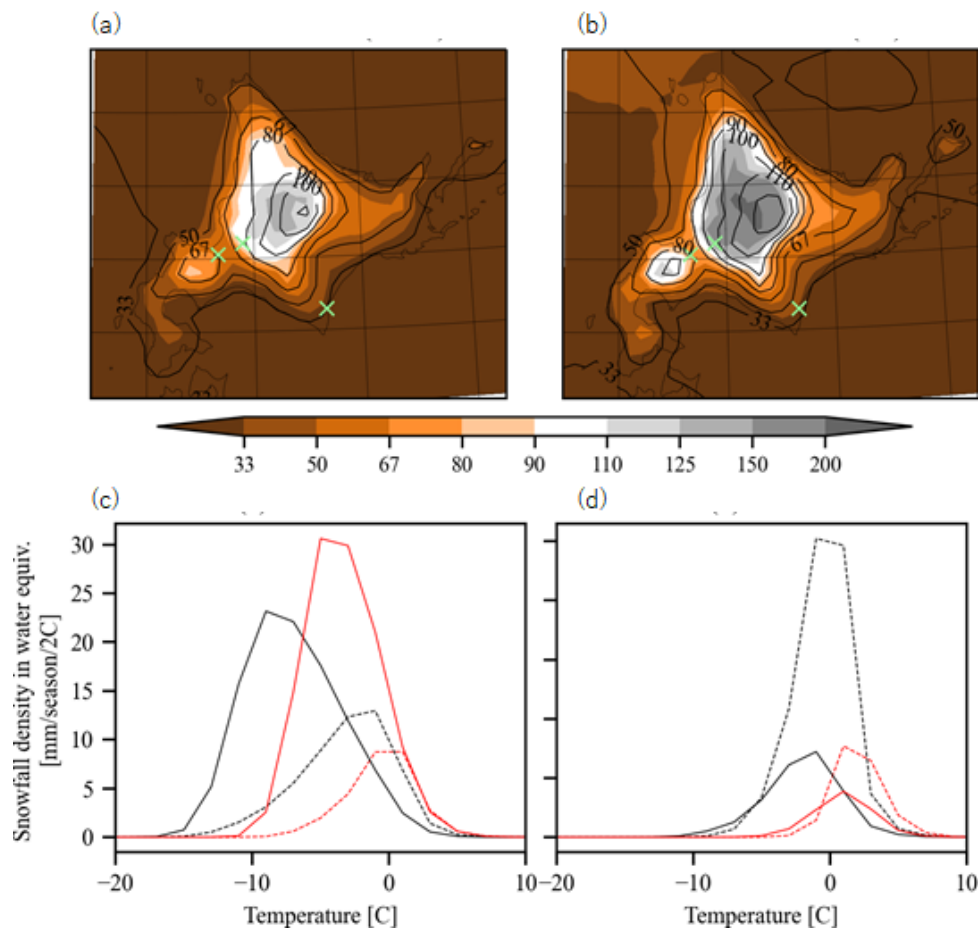


図 3.9 : (a) d4PDF 過去実験と 4K 上昇実験の比。等値線は降雪量の比であり、色影は豪雪頻度の比。
 (b) (a)と同じだが、解析を1月に限定したもの。(c) 太平洋側の都市(広島)と(d) 日本海側の都市(岩見沢)における天気図パターンが(実線)西高東低西風系のときと(点線)温帯低気圧通過型のときにおける降雪頻度分布。黒線が d4PDF 過去実験を示し、赤線が 4K 上昇実験を示す。

以上の結果を札幌市雪対策室及び危機管理対策室と共有し、豪雪に対する都市災害適応の観点から協議を行った。そこで、札幌市における過去5年間の除雪出動記録の分析を行った。除雪出動には、市内北部に限られる場合と、市内全域に広がる場合とがあった(図3.10)。これらは研究で明らかになった豪雪をもたらす典型的なパターンの西風系と北風系に対応する。将来、西風系パターンが増加し、北風系パターンが減少することから、市内北部での豪雪のリスクが高まることが示された。全般的に気候変動における豪雪頻度は減じるものの、豪雪時の降雪分布がこれまでと変わる可能性があり、機動的な除雪体制を当面は継続することを提言した。

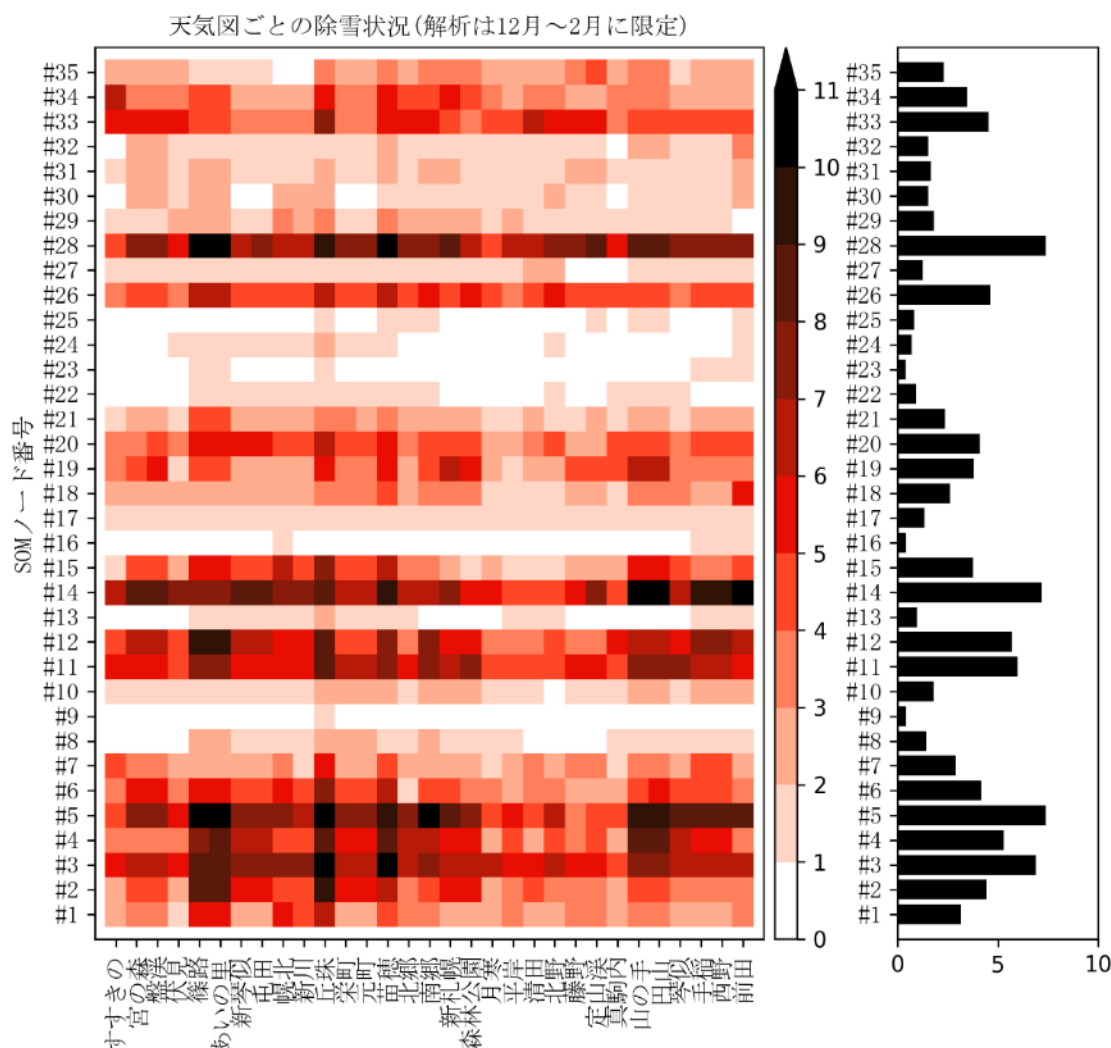


図 3.10： 35 個に細分した天気図パターンでの(左)札幌市内各地区における除雪状況と(右)その合計。

一方、札幌市からは、現在の除雪体制の運用において、1週間以上前からの豪雪可能性予報に期待があることが示された。そのため、本研究課題で計算された天気図パターンを利用し、気象庁1か月アンサンブル予報からどの程度のリードタイムをもって豪雪をもたらす天気図パターンを予見できるかを調べた。図3.11は2020年11月24日からの1か月予報において、札幌市北部に豪雪をもたらす西風系の天気図パターンはアンサンブル予報の中でいくらあったかと、実況の天気図パターンはどれかを示す。決定論的予報が可能な1週間までは、アンサンブル予報の多数が実況と同じ天気図パターンを予測している。驚くべきことは、1週間を超えたとき細分された天気図パターンを正確に予測できないとしても、札幌市内北部に豪雪をもたらすことは、ポテンシャルとして予測できることである。図3.11bでは天気図パターン予測における豪雪確率と、実際の降雪量をグラフにしたものである。これによると気候学的な確率を超えたときに、降雪量が多い状況にあることがわかる。このように2～3週間後の豪雪ポテンシャルがわかることで、現場においた機動的な対処が可能となることを示し、雪対策室にフィードバックした。今冬期における豪雪は北風系の天気図によって生じている。そのことを受けて、急遽、2021-2022年度における豪雪ポテンシャル予測を事後的に検証し、適応策としての社会実装可能性を議論する予定である。

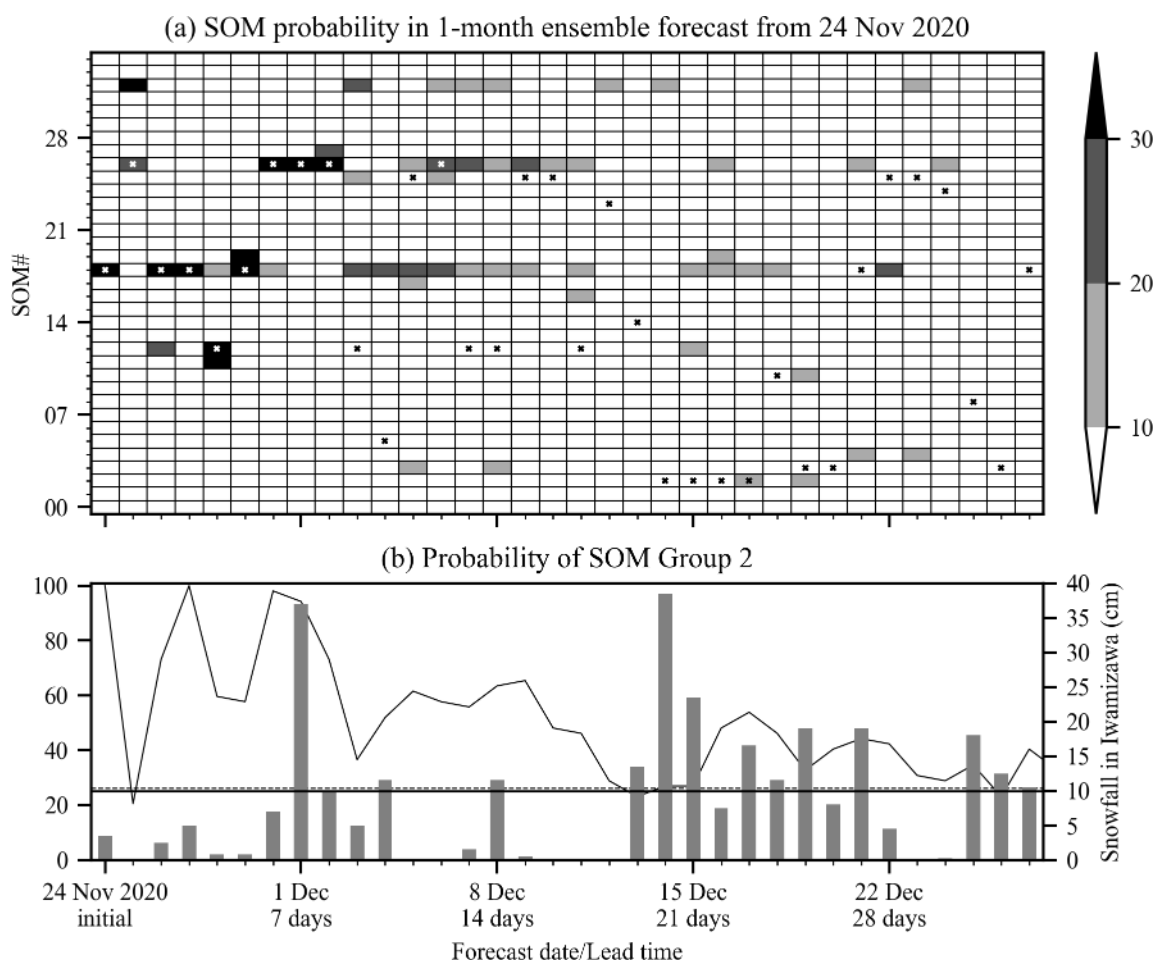


図 3.11 : (a) 2020 年 11 月 24 日初期値の気象庁 1 か月アンサンブル予報を 35 個に細分された天気図パターンに分類した際の確率。×印は実況を示す。(b) 札幌市北部に豪雪をもたらす複数の天気図パターンに分類される確率と、岩見沢市における日降雪量(cm)。点線は気候学的な天気図パターンの確率を、実線は日降雪量 10 cm を表す。岩見沢市と札幌市北部の降雪は相関性が高いことに注意。

なお、豪雪ハザード予測のための高解像度シミュレーションの結果を利用し、吹雪災害可能性を議論した。雪粒子が地表面近くで強風に巻き上げられることで吹雪は生じる。それが視界を遮ることで、交通障害につながる。本研究ではたびたび吹雪での事故や通行止めが発生する高速道路でのリスクを分析した。高速道路が2018年1月6日の18:05から23:40まで新千歳空港ICと札幌ICの間で閉鎖された例を示す。その日の天気図及び衛星画像によると、等圧線に沿った北風により石狩平野に筋状雲が流入していた。前述の北風系の天気図パターンである。この筋状雲に伴う降雪が高速道路上の風雪となって視程悪化をもたらしたと考えられる。水平解像度1 kmに力学的ダウンスケーリングした結果、北西風によって移流された筋雪雲が視程を低くする領域をもたらした(図3.12a)。一方、水平解像度5 kmの気象庁メソ解析データでは、降雪強度・風速とも弱く、高速道路上における視程悪化を診断することはできなかった(図3.12b)。ただし、力学的ダウンスケーリングにおいて視程悪化を示した領域は高速道路の閉鎖区間とずれがあり、筋状雲を決定論的に予測することが難しいことを示唆していた^{12, 13)}。

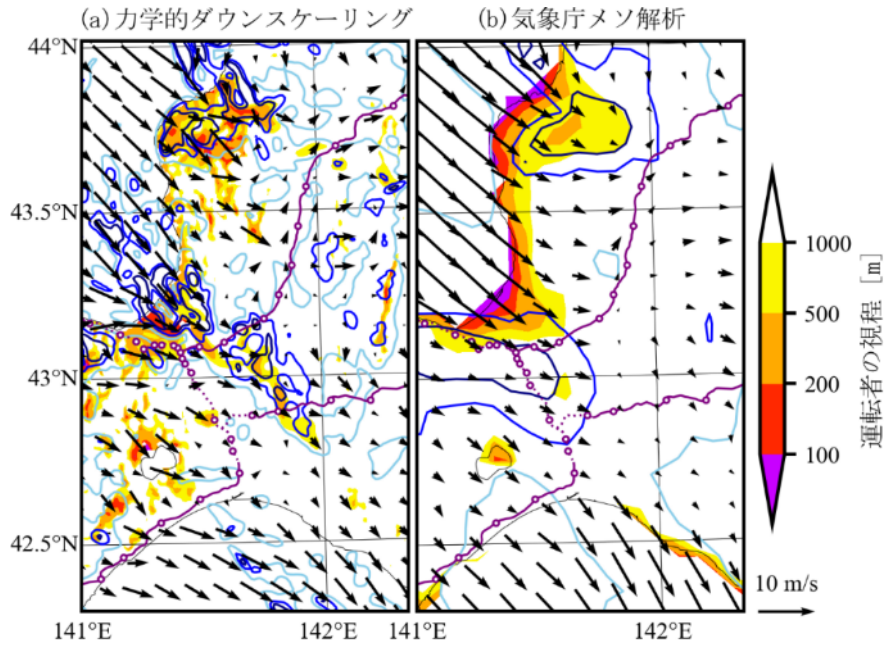


図 3.12 : 2018 年 1 月 6 日 21 時における(色影)1.2 m における運転者の視程(m)と(矢羽)地上 10 m 風(m/s)の(a) 1 km 解像度へ力学的ダウンスケーリングした結果と(b) その元となる 5 km 解像度の気象庁メソ解析データ。水色、青色、藍色の等値線は 6 時間積算降水が 1 mm、5 mm、及び 10 mm を意味する。東日本高速道路株式会社管轄の自動車専用道路を紫線で表し、その時刻、通行止めとなった区間を点線で表した。

4. 3 サブテーマ 1 との連携による暑熱リスク評価

サブテーマ 1 と連携して、気候変動下における都市の暑熱環境について評価した。昨夏、札幌で行われたマラソン・競歩の競技中、高温に見舞われたことは記憶に新しい。本研究ではサブテーマ 1 における暑熱環境評価法を用いて、d4PDF 20kmダウンスケーリングデータに対し、熱中症に対する警戒が必要な暑さ指数が28℃を超える確率を計算した。その結果、現在の札幌市は熱中症リスクがほぼ皆無であるのに対し、未来の札幌市における熱中症リスクは、現在の福岡市と同程度であることが分かった(図3.13)¹²⁾。

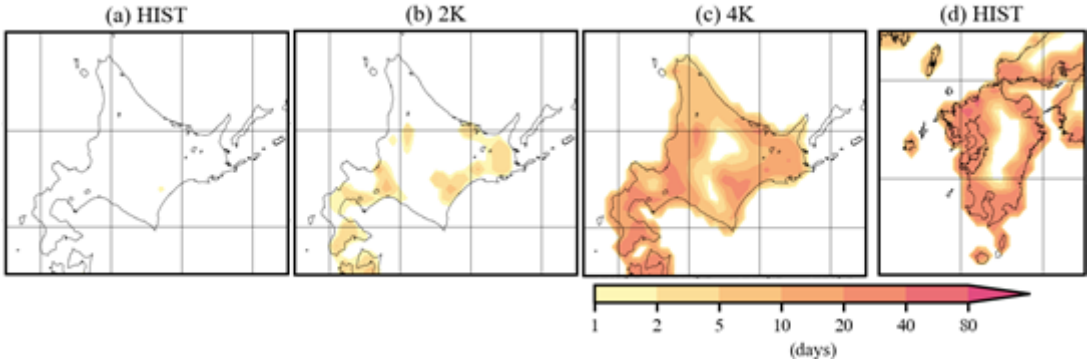


図 3.13 : (a)d4PDF 過去実験、(b)2K 上昇実験、及び(c)4K 上昇実験における北海道の暑さ指数 WBGT が 28℃を超えた 1 夏あたりの日数の平均値。(d)は d4PDF 過去実験で九州の暑さ指数 WBGT が 28℃を超えた 1 夏あたりの日数の平均値。

現在、札幌市は再開発事業を推進しており、都心の多くの場所でビルの建て替えや高層化がなされている。この中でも2030年予定の北海道新幹線札幌延伸に伴う札幌駅周辺の再開発が特筆される。これが暑熱環境に影響を及ぼすことはサブテーマ 1 の研究から明らかである。そこで、サブテーマ 1 で実施

している都市LESシミュレーションと観測を札幌市において実施し、札幌都心の街区における暑熱環境リスクを評価した。その結果、観測・シミュレーションともに、緑地のクールアイランド効果が見られた。本調査はオリンピック開催に伴う交通規制のため、暑熱環境が著しく悪化した日ではなく、夏の平年の日で実施したため、街区間の差異は極めて小さくなった。この結果は今後の気候変動リスクと研究展開の可能性として、札幌市危機管理対策室と北海道地域気候変動適応センターと共有した。



図 3.14 : (左)2021 年 8 月 12 日 13 時 50 分から 14 時における都市 LES による気温の水平分布。(右)ビルが立ち並ぶ北 3 条西 4 丁目交差点付近での観測の様子。

4. 4 サブテーマ 2 との連携による強風リスク評価

サブテーマ 2 では強風に関するリスク評価を京都市と大阪市を対象として実施した。札幌市の街区は、歴史的に京都市をモデルとしたこともあり、およそ 1 辺 120m の碁盤目状になっている。そのことから、強風に伴うリスクをサブテーマ 2 で実施した計算の通りに考えることができる。ただし、札幌市には西日本のように台風が直撃するリスクは極めて小さい。気候変動下でも台風の個数は減るうえに、地理的に見ても札幌市が風の意味で台風の被害を受けることはごくまれである(例外的に 2004 年 9 月に北海道大学のポプラ並木が倒壊する強風を伴う台風が接近した¹³⁾)。このことは、d4PDF 60km データに対する台風トラックによって明らかとなった(図略)。台風トラックは、d4PDF の格子点より時間ごとに最低気圧点を抽出し、時間隣接の最近傍点を取り出すことで行った。なお、現実の台風トラック密度と d4PDF の台風トラック密度は十分に近いといつてよい(図 3.15)。とくに、北海道におよぼす台風の影響を評価するため、温帯低気圧化後のトラックも情報として付帯した。

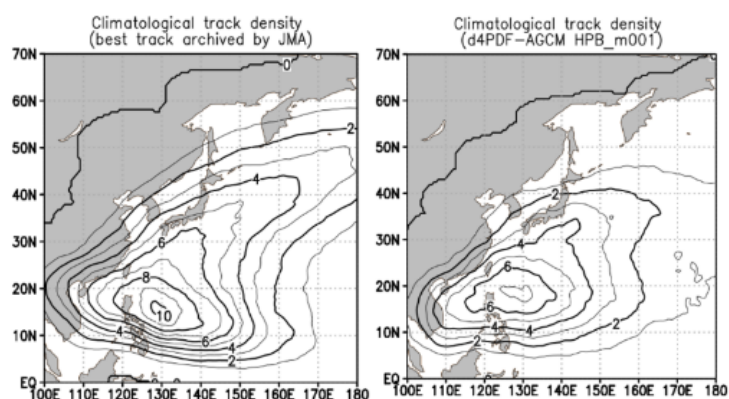


図 3.15 : (左)気象庁ベストトラックデータより計算した台風トラック密度と(右)d4PDF 60km データから計算した台風トラック密度。

札幌市における強風のリスクは、どちらかというと雪粒子の飛散とそれに伴う吹き溜まりの形成にある。そこで、サブテーマ2で利用されたLESに組み込まれているSGSパラメタリゼーション15)を参考にして、乱流・雪粒子モデルを開発した14)。サブテーマ2より助言を受け、モデリングに際し、最新かつ並列化効率の高い格子ボルツマン法を採用し、流入変動風は乱数発生器によってスペクトル分布及び運動量フラックスが現実とあうように調整した。雪粒子の移動などは、確立されている吹雪モデリングの方法16)を実装した。まだ、理想的な環境下の実験しか出来ていないが、うすい壁を模した障害物を鉛直方向にどのように乗り越え、水平方向にどのように回避するかを、きわめて現実的な形で再現できることが分かった(図3.16)。この結果を都心に置き換えると、建物を回避する雪粒子の動向がわかり、建物設計の指針が与えられることが期待される。また、郊外における防雪柵の設計を効率的に行うことも期待できる。本モデルは現実事例への適用がまだできていないが、札幌市雪対策室や北海道地域気候変動適応センターなどと共有し、今後の研究の方向性を議論する予定である。

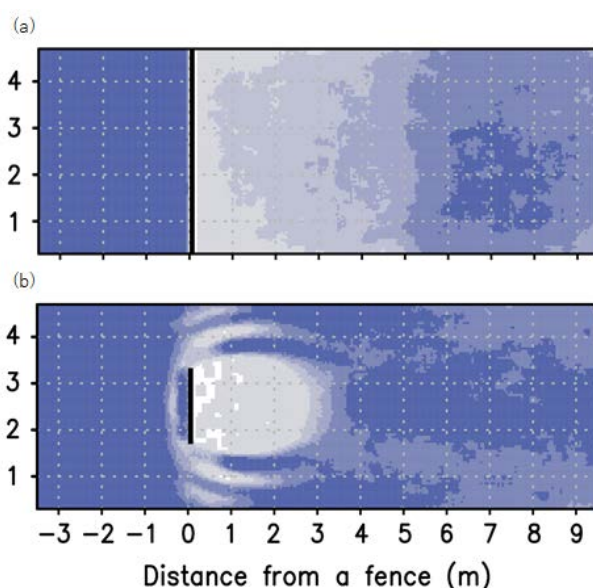


図 3.16：紙面左から右に吹く風向に対して直交する(a)無限長及び(b)有限長のフェンスをおいたときの吹き溜まりの確率。青が濃いほど吹き溜まりの可能性が高いことを示す。

5. 研究目標の達成状況

札幌市で起こりうる夏季豪雨事例と冬季豪雪事例を抽出し、それらがどの程度の確率で激甚化し、都市災害をもたらすのかを最大可能性として評価する点は目標どおりの成果を得た。また、その結果をもとに気候変動適応策を関係地方自治体と協議した。協議の結果、地方自治体がさらに必要とした情報は、本研究課題の応用として提供した。現状の災害に対する対策が気候変動適応策になりえることや、気候変動適応研究を応用して現状の災害や予測を評価する方法が開発されるなど、地方自治体との密なコミュニケーションによって、本研究課題の目標を大きく上回る成果が得られた。

6. 参考文献

- 1) Mizuta R, Murata A, Ishii M, Shiogama H, Hibino K, Mori N, Arakawa O, Imada Y, Yoshida K, Aoyagi T, Kawase H, Mori M, Okada Y, Shimura T, Nagatomo T, Ikeda M, Endo H, Nosaka M, Arai M, Takahashi C, Tanaka K, Takemi T, Tachikawa Y, Temur K, Kamae Y, Watanabe M, Sasaki H, Kitoh A, Takayabu I, Nakakita E, Kimoto M. 2017. Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 1383-1398.
- 2) 星野 剛, 山田 朋人, 2018: 大量アンサンブル気候予測データを用いた日本国内全一級水系を対象とした年最大流域平均降水量の分析. 土木学会論文集B 1 (水工学) 74(4), I_187-I_192.

- 3) Inatsu M. 2009. The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones. *Atmospheric Science Letters*, 10, 267-272.
- 4) Yoshida K, Sugi M, Mizuta R, Murakami H, Ishii M. 2017. Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large ensemble simulations. *Geophysical Research Letters*, 44, 9910-9917.
- 5) Kawazoe S, Inatsu M, Yamada TJ, Hoshino T. 2022. Future projection of widespread, extreme precipitation in Hokkaido, Japan associated with tropical and extratropical cyclones using large-ensemble climate simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, submitted.
- 6) Kanamori Y, Inatsu M, Tsurumaki R, Matsuoka N, Hoshino T, Yamada TJ. 2022, Global warming effect and adaptation for a flooding event at Mutsukisamu River in Sapporo. *Hydrological Research Letters*, to be submitted.
- 7) Inatsu M, Suematsu T, Tamaki Y, Nakano N, Mizushima K, Shinohara M. 2019. Development of pressure-precipitation transmitter. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58, 2453-2468.
- 8) Tachibana Y. 1995. A statistical study of the snowfall distribution on the Japan Sea side of Hokkaido and its relation to synoptic scale and meso-scale environments. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 73, 697-715.
- 9) Tanaka S, Nishii K, Nakamura H. 2016. Vertical structure and energetics of the western Pacific teleconnection pattern. *Journal of Climate*, 2, 6597-6616,
- 10) Kawazoe S, Inatsu M, Yamada TJ, Hoshino T. 2020. Climate change impacts on heavy snowfall in Sapporo with 5-km mesh large ensemble simulations, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 16, 233-239.
- 11) Inatsu M, Kawazoe S, Mori M. 2021. Trends and projection of heavy snowfall in Hokkaido, Japan as an application of self-organizing map. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60, 1483-1494.
- 12) Takabatake D, Inatsu M. 2021. Summertime precipitation in Hokkaido and Kyushu, Japan in response to global warming. *Climate Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05983-7>.
- 13) Katsube K, Inatsu M. 2016. Response of tropical cyclone tracks to sea surface temperature in the western North Pacific. *Journal of Climate*, 29, 1955-1975.
- 14) Tanji, S, Inatsu M, Okaze T. 2021. Development of snowdrift model with the Lattice Boltzmann Method. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 57.
- 15) Smagorinsky J 1963. General circulation experiments with the primitive equations. I. the basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91:99-164.
- 16) Nishimura K, Hunt JCR 2000. Saltation and incipient suspension above a flat particle bed below a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 417, 77-102.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) Nishi, A., H. Kusaka, L. L. Vitanova, and Y. Imai: Scientific Online Letters on Atmosphere, 15, 132-136 (2019). Contributions of Foehn and urban heat island to the extreme high-temperature event in Niigata City during the night of 23-24 August 2018. (IF:2.245)
- 2) Doan, Q. V., H. Kusaka, T. Sato, and F. Chen: Geoscientific Model Development, 14, 2097-2111 (2020). S-SOM v1.0: a structural self-organizing map algorithm for weather typing. (IF:6.135)
- 3) Kusaka, H., A. Nishi, A. Kakinuma, Q. V. Doan, T. Onodera, and S. Endo: International Journal of Climatology, 41, 1-18 (2021). Japan's south foehn on the Toyama Plain: Dynamical or thermodynamical mechanisms? (IF:4.069)
- 4) Sato, T., and H. Kusaka: Journal of the Meteorological Society of Japan, 99, 993-1001 (2021). Statistical intercomparison of similarity metrics in sea level pressure classification. (IF:2.236)
- 5) Ikeda, T., and H. Kusaka: Journal of the Meteorological Society of Japan, 99, 1395-1412 (2021). Development of models for predicting the number of patients with heatstroke on the next day considering heat acclimatization. (IF:2.236)
- 6) Asano, Y., and H. Kusaka: Meteorological Applications, 28(6), e2042 (2021). Numerical simulation study of the effects of foehn winds on white head incidences in Yamagata Prefecture, Japan. (IF:2.119)
- 7) Kusaka, H., Y. Asano, and R. Kimura: Meteorological Applications, 29(1), e2046 (2022). Wisteria trellises and tents as tools for improved thermal comfort and heat stress mitigation: Meteorological, physiological, and psychological analyses considering the relaxation effect of greenery. (IF:2.119)
- 8) Asano, Y., Y. Nakamura, A. Suzuki-Parker, S. Aiba, and H. Kusaka: Building and Environment, 213 (2022). Effect of walking in heat-stressful outdoor environments in an urban setting on cognitive performance indoors. (IF:6.456)
- 9) Nakamura, S., H. Kusaka, R. Sato, and T. Sato: Journal of the Meteorological Society of Japan, 100, in print (2022). Heatstroke risk projection in Japan under current and near future climates. (IF:2.236)
- 10) Kusaka, H., Y. Nakamura, Y. Asano: Journal of the Meteorological Society of Japan, 100, in print (2022). UV parasol, dry-mist spraying, and street trees as tools for heat stress mitigation. (IF:2.236)

【サブテーマ2】

- 1) Nakamae, K, and T. Takemi: International Journal of Climatology, 42, 3076-3093 (2022). Relationships between the development of convective mixed layer and the occurrence of dust weather in arid and semi-arid regions of East Asia. (IF:4.069)
- 2) Duan, G., and T. Takemi: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 60, 999-1018 (2021). Predicting urban surface roughness aerodynamic parameters using random forest. (IF:2.923)
- 3) Duan, G., and T. Takemi: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,

- 208, 10442 (2021). Gustiness in thermally-stratified urban turbulent boundary-layer flows and the influence of surface roughness. (IF:4.082)
- 4) Yoshida, T., and T. Takemi: Environmental Fluid Mechanics, 21, 129-154 (2021) Spatial characteristics of turbulent organized structures within the roughness sublayer over idealized urban surface with obstacle-height variability. (IF:2.551)
- 5) Takemi, T., T. Yoshida, M. Horiguchi, and W. VandeBauwhede: Urban Climate, 32, 100625 (2020). Large-eddy-simulation analysis of airflows and strong wind hazards in urban areas. (IF:5.731)

【サブテーマ 3】

- 1) Takabatake, D., and M. Inatsu: Climate Dynamics (2021). Summertime precipitation in Hokkaido and Kyushu, Japan in response to global warming. (IF : 4.375)
- 2) Inatsu, M., S. Kawazoe, and M. Mori: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 60, 1483-1494 (2021). Trends and projection of heavy snowfall in Hokkaido, Japan as an application of self-organizing map. (IF : 2.923)
- 3) Tanji, S., M. Inatsu, and T. Okaze: Progress in Earth and Planetary Science, 8, 57 (2021). Development of snowdrift model with the Lattice Boltzmann Method. (IF : 3.604)
- 4) 丹治 星河, 稲津 将, 川添 祥, 佐藤 陽祐: 雪氷, 83, 275-284 (2021). 2017/2018年冬季における北海道の吹雪発生マップの作成.
- 5) Katsuyama, Y., and M. Inatsu: Scientific Online Letters on the Atmosphere, 17, 35-40 (2021). Advantage of volume scanning video disdrometer in solid-precipitation observation. (IF : 2.245)
- 6) Sugawara, K., M. Inatsu, S. Shimoda, K. Murakami, and T. Hirota: Scientific Online Letters on the Atmosphere, 17, 24-29 (2021). Risk assessment and possible adaptation of potato production in Hokkaido to climate change using a large number ensemble climate dataset d4PDF. (IF : 2.245)
- 7) Inatsu, M., R. Yoshida, S. Karino, S. Takeuchi, and S. Kobayashi: Agricultural and Forest Meteorology, 29, 108229 (2021). A high-resolution prediction system for birch pollen in Sapporo. (IF : 5.734)
- 8) Kawazoe, S., M. Inatsu, T. J. Yamada, and T. Hoshino: Scientific Online Letters on the Atmosphere, 16, 233-239 (2020). Climate change impacts on heavy snowfall in Sapporo using 5-km mesh large ensemble simulations. (IF : 2.245)
- 9) Inatsu, M., S. Tanji, and Y. Sato: Cold Region Science and Technology, 177, 103-123 (2020). Toward predicting expressway closures due to blowing snow events. (IF : 3.726)
- 10) Katsuyama, Y., and M. Inatsu: Journal of Atmosphere and Ocean Technology, 37, 911-925 (2020). Fitting precipitation particle size-velocity data to mixed joint probability density function with an expectation maximization algorithm. (IF : 2.075)
- 11) Katsuyama, Y., M. Inatsu, and T. Shirakawa: Journal of Glaciology, 66, 83-96 (2020). Response of snowpack to +2° C global warming in Hokkaido, Japan. (IF : 3.142)
- 12) Tamaki, Y., M. Inatsu, and T. J. Yamada: Hydrological Research Letters, 13, 55-61 (2019). Possible hydrological effect of rainfall duration bias in dynamical downscaling. (IF : 不明)

- 13) Inatsu, M., T. Suematsu, Y. Tamaki, N. Nakano, K. Mizushima, and M. Shinohara: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58, 2453-2468 (2019). Development of pressure-precipitation transmitter. (IF : 2.923)
- 14) Aikawa, T., M. Inatsu, N. Nakano, and T. Iwano: Journal of the Atmospheric Sciences, 76, 3151-3167 (2019). Mode-decomposed equation diagnosis for atmospheric blocking development. (IF : 3.184)

<査読付論文に準ずる成果発表>

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

なし

【サブテーマ2】

- 1) 竹見哲也, 石川裕彦: 京都大学防災研究所年報, 第62号B, 386-392 (2019)「2018年台風21号による暴風の解析」

【サブテーマ3】

なし

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】

- 1) Nishi, A., H. Kusaka, L. L. Vitanova, and Y. Imai: Contributions of Foehn winds and urban heat island to the nocturnal extreme high-temperature event in Niigata City, Japan. The 35th International Conference on Alpine Meteorology (ICAM), Riva del Garda, Italy, 2 Sep 2019. (ポスター発表)
- 2) Kusaka, H., A. Nishi, and A. Kakinuma: Climatological study of south foehn in Japan: Dynamic, thermodynamic, or hybrid/scrambling type? The 35th International Conference on Alpine Meteorology (ICAM), Riva del Garda, Italy, 2 Sep 2019.
- 3) 佐藤拓人、日下博幸: 気圧配置分類における類似度計算法の相互比較. 日本気象学会2020年度春季大会, 神奈川, 2020.5.22. ※口頭発表の予定だったが、新型コロナウイルス感染症の感染拡大により現地での会場開催は行わず、予稿集の発行により大会開催とすることになった。
- 4) 西暁史、日下博幸: d4PDF領域モデル実験における局所的な極端高温の再現性. 日本気象学会2020年度春季大会, 神奈川, 2020.5.22. ※口頭発表の予定だったが、新型コロナウイルス感染症の感染拡大により現地での会場開催は行わず、予稿集の発行により大会開催とすることになった。
- 5) 佐藤拓人、日下博幸: 気圧配置分類に有効な類似度計算法の調査. 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン, 2020.10.30.
- 6) 佐藤亮吾、日下博幸、佐藤拓人: 日本全国の各市区町村別を対象とした熱中症救急搬送者数予測の将来予測. 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン, 2020.10.29.
- 7) 中村真悟、日下博幸、佐藤亮吾: 温暖化に伴う熱中症搬送者数の増加が地域救急医療体制へ与える負荷. 日本地理学会2020年秋季学術大会, オンライン, 2020.11.14. (ポスター発表)
- 8) 池田貴史、日下博幸: 暑熱順化を考慮した日々の熱中症搬送者数予測. 日本地理学会2020年秋季学術大会, オンライン, 2020.11.14. (ポスター発表)
- 9) 佐藤亮吾、日下博幸、佐藤拓人: 将来気候下における日本全国市区町村別の熱中症リスクマップの作成. 日本地理学会2020年秋季学術大会, オンライン, 2020.11.14. (ポスター発表)
- 10) 日下博幸、佐藤亮吾、佐藤拓人: 都市構造が都市内部の暑熱環境に与える影響の調査. CSIS DAYS2020全国共同利用研究発表大会, オンライン, 2020.11.20.
- 11) 池田貴史、日下博幸: 暑熱順化を考慮した日々の熱中症搬送者数予測モデルの開発. 第59回日

- 本生気象学会大会, オンライン, 2020.11.28.
- 12) 中村真悟、日下博幸、佐藤亮吾: 将来気候下における熱中症搬送者数の増加が地域の救急医療体制へ与える影響. 第59回日本生気象学会大会, オンライン, 2020.11.28.
 - 13) Nishi, A., and H. Kusaka: Reproducibility of an extremely high-temperature event in d4PDF regional climate model experiment. JPGU-AGU Joint-Meeting, Online, 16 July 2020.
 - 14) 西暁史、日下博幸、Lidia Lazarova Vitanova、今井優真: 新潟で発生した夜間極端高温事例に対するフェーンと都市ヒートアイランドの寄与の定量評価. 日本地理学会2020秋季学術大会, オンライン, 2020.11.7.
 - 15) 日下博幸、西暁史、柿沼亜衣、ドアングアンヴァン、小野寺平、遠藤周平: フェーン昇温の主要なタイプは本当に熱力学理論タイプなのか? 日本地理学会2020秋季学術大会, オンライン, 2020.10.18.
 - 16) 日下博幸、ドアングアンヴァン、リディアビタノバ、中村真悟、ロナルドエストケ: アジアのメガシティの都市気候. 日本地理学会2020秋季学術大会, オンライン, 2020.11.7.
 - 17) Sato, R., H. Kusaka, and T. Sato: Developing prediction model of number of heat stroke patients and future prediction of heat stroke risk in Japan. AGU Fall Meeting, Online, 16 Dec 2020.
 - 18) 中村真悟、日下博幸: まつぼり風の発生メカニズムと阿蘇カルデラ内の冷気層の発達. 日本地理学会2021年春季学術大会, オンライン, 2021.3.26.
 - 19) Asano, Y., and H. Kusaka: Numerical simulation study of the effects of foehn winds on white head incidences in Yamagata Prefecture, Japan. The 13th Japan-China-Korea International Postgraduate Academic Forum, Online, 24 Sep 2021.
 - 20) 日下博幸、佐藤拓人、中村真悟、中村祐輔、軽辺凌太: 都市構造が都市内部の暑熱環境に与える影響の調査(その2) ドライミストの効果. CSIS DAYS2021全国共同利用研究発表大会, オンライン, 2021.11.19.
 - 21) 浅野裕樹、日下博幸、稲津将: d4PDFを用いた関東平野での着雪および降雪の将来変化. 日本気象学会2021年度秋季大会, オンライン, 2020.11.7.
 - 22) 西暁史、日下博幸、中村真悟: 新潟に猛暑をもたらす台風ポテンシャルゾーン. 日本気象学会2021年度秋季大会, オンライン, 2021.12.6.
 - 23) Kusaka, H.: Multiscale modeling for urban climate study. AOGS2021 Virtual 18th Annual Meeting, Online, 2021.8.2.
 - 24) 西場 慧、日下博幸: 富山フェーンの吹き始めに対する海風と風上の大気安定度の影響. 日本地理学会2022年春季学術大会, オンライン, 2022.3.19.
 - 25) 浅野裕樹、日下博幸: 山形県で発生した白穂に対するフェーンの影響. 日本地理学会2022年春季学術大会, オンライン, 2022.3.19.
 - 26) 鎌田 碧、日下博幸: 都市街区気象LESモデルを使用したオフィス街と住宅街の暑熱要因比較解析. 日本地理学会2022年春季学術大会, オンライン, 2022.3.19.
 - 27) 中村祐輔、浅野裕樹、日下博幸: 都市街区における日傘と帽子の熱ストレス緩和効果. 日本地理学会2022年春季学術大会, オンライン, 2022.3.19.
 - 28) 浅野裕樹、日下博幸: 白穂に対するフェーンの影響: 高解像度気象モデルを用いた数値シミュレーション研究. 日本農業気象学会2022年全国大会, オンライン, 2022.3.24.
 - 29) Asano, Y., Y. Nakamura, A. Suzuki-Parker, S. Aiba, and H. Kusaka: Was cognitive performance indoors affected by a short walk in heat-stressful outdoor environments in an urban setting? Japan Geoscience Union 2022. (アブストラクト提出済み)
 - 30) Asano, Y., and H. Kusaka: Numerical simulation study of foehn winds that severely

damaged rice plants in Japan. AMS 20th Conference on Mountain Meteorology, 2022.
(アブストラクト提出済み)

- 31) Kusaka, H., R. Ikeda, T. Sato, T. Boku, and S. Iizuka: New Version of the City-scale Large Eddy Simulation Model (City-LES) to propose better adaptation strategies for uncomfortable thermal environment in urban areas. UGI-IGU Paris 2022, Online, 2022. (アブストラクト提出済み)
- 32) Nakamura, Y., Y. Asano, and H. Kusaka: Effect of heat stress mitigation using parasols and hats on urban streets. UGI-IGU Paris 2022, Online, 2022. (アブストラクト提出済み)
- 33) Nakamura, Y., Y. Asano, and H. Kusaka: Thermal comfort improvement in urban streets using parasols and hats. Japan Geoscience Union, 2022. (アブストラクト提出済み)

【サブテーマ2】

- 1) 竹見哲也, 吉田敏哉, 山崎聖太, 長谷健太郎: 日本気象学会2019年度春季大会, 東京都渋谷区 国立オリンピック記念青少年総合センター (2019) 「2018年台風21号通過時に大阪市街地で生じた暴風の定量的解析」
- 2) Sridhara Nayak, Tetsuya Takemi: 日本地球惑星科学連合2019年大会, 千葉市美浜区 幕張メッセ国際会議場 (2019) “Analysis of typhoon tracks and associated precipitation amount over western Japan: A case study with Typhoon Nancy and Typhoon Jebi”
- 3) Tetsuya Takemi: 11th Asian Aerosol Conference (AAC2019), City University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China, 27-30 May 2019. “High-resolution modeling of atmospheric dispersion in urban districts and complex topography”
- 4) Hiromasa Nakayama, Tetsuya Takemi: 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO-19). Bruges, Belgium, 3-6 June 2019. “Development of the data assimilation method suitable for large-eddy simulation model using the vibration equation”
- 5) Tetsuya Takemi, Sridhara Nayak: The 8th International Conference on Water Resources and Environmental Research (ICWRER2019), Hohai University, Nanjing, China, 14-18 June 2019. “Assessing the impacts of typhoon hazards at local-scales by dynamical downscaling experiments”
- 6) Tetsuya Takemi, Toshiya Yoshida, Shota Yamasaki, Kentaro Hase: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) The 16th Annual Meeting, Singapore, 28 July-2 August 2019. “Quantitative estimation of gusty winds in a densely-built, urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large eddy simulations”
- 7) 竹見哲也, 吉田敏哉: 日本気象学会2019年度秋季大会, 福岡市博多区 福岡国際会議場 (2019) 「市街地における暴風リスクの評価: 2018年台風21号を想定した京都市街地での風速変動のLES」
- 8) Tetsuya Takemi: NCDR-DPRI Joint Workshop. NCDR, Taipei, Taiwan, 25-26 November 2019. “Assessing the impacts of typhoons on local-scale winds in urban districts”
- 9) Tetsuya Takemi, Toshiya Yoshida, Guangdong Duan: AGU 2019 Fall Meeting, San Francisco, California, 9-13 December 2019. “Quantification of wind fluctuations in a densely-built, urban district during a typhoon landfall by merging mesoscale meteorological and large eddy simulations”

- 10) Guangdong Duan, Tetsuya Takemi, Keith Ngan: AGU 2019 Fall Meeting, San Francisco, California, 9-13 December 2019. "Sensitivity of turbulent flow and dispersion around a 3-D regular building array to urban boundary-layer stability"
- 11) Tetsuya Takemi: 8th EU-Japan Workshop on Climate Change Research. Directorate-General for Research and Innovation (DG RTD), CDMA building, Rue du Champ de Mars 21, 1050 Bruxelles, Belgium, 6-7 February 2020. "Impact assessment and adaptation on extreme weather"
- 12) Tetsuya Takemi: The Fifth International Symposium on Flash Floods in Wadi Systems (ISFF2020), Kyoto, Japan, 25-28 February. "Assessing the impacts of tropical cyclone hazards at local-scales by dynamical downscaling experiments"
- 13) Guangdong Duan, Tetsuya Takemi: JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (Virtual), 12-19 July 2020, AAS02-06. "Large-eddy simulations of turbulent flow over urban areas of Osaka, Japan"
- 14) Tetsuya Takemi: International Workshop Convection-Permitting Modeling for Climate Research: Current and Future Challenges, 2-4 September 2020. "Resolution of CPM and its representation of extreme events"
- 15) Tetsuya Takemi: IDRiM Virtual Workshop for Interactive Discussions between Senior and Early-Career Scientists, 23-24 September 2020. "Understanding meteorological hazards and risks for disaster risk reduction under climate change"
- 16) Tetsuya Takemi: International Conference on Meteorology and Climate Science-2020 (ICMCS 2020), the Department of Meteorology, University of Dhaka (Online), 11-12 December 2020. "Assessing the impacts of extreme weather on local-scale hazards under climate change"
- 17) Tetsuya Takemi: International Web series on Frontiers of Meteorology & Oceanography, Department of Meteorology & Oceanography, Andhra University, Visakhapatnam, India, 16 December 2020. "The impact of environmental stability conditions on the evolution and intensity of tropical cyclones"
- 18) 竹見哲也: 日本地球惑星科学連合2021年大会 (2021) "Assessing the impacts of extreme weather on local-scale hazards under climate change"
- 19) Guangdong Duan, Tetsuya Takemi: AOGS 18th Annual Meeting (AOGS2021) Virtual Conference, 1-6 August 2021. "Estimating urban surface roughness aerodynamic parameters using random forest"
- 20) Tetsuya Takemi: AOGS 18th Annual Meeting (AOGS2021) Virtual Conference, 1-6 August 2021. "Benefits of high-resolution downscaling experiments for assessing strong wind hazard at local scales in complex terrain"
- 21) Tetsuya Takemi: The 5th GADRI Global Summit: Engaging Science with Actions, Panel Discussion Session 3 -Contributions to Climate Change Adaption (Virtual), 31 August-1 September 2021. "Assessing the impacts of extreme weather on local-scale hazards in urban areas and complex terrains for climate change adaptation"
- 22) Tetsuya Takemi: International Workshop on Adaptation Research for Climate Change in Asia (ARCC2021), Online, 15-16 November 2021. "Downscaling the impacts of extreme weather at local-scale hazards in cities and in complex topography"
- 23) 竹見哲也: 防災研究所気候変動リスク予測・適応研究連携研究ユニットワークショップ, 京都市左京区 京都大学時計台国際交流ホールⅡ (2021) 「極端台風による都市や複雑地形での暴風リスク評価」
- 24) Tetsuya Takemi: International Conference on Meteorology and Climate Science 2021

(ICMCS 2021), the Department of Meteorology, University of Dhaka (Online), 10-11 December 2021. “Assessing the impacts of extreme weather on local-scale hazards under climate change.”

- 25) Tetsuya Takemi: Joint Seminar on Climate Downscaling and Climate Change Impact Application Sponsored by HEIP of MoEYS, ITC, KU, ITB, JSPS - DG-RSTHE Joint Research Program, online, 14 December 2021. “Downscaling the impacts of extreme weather at local-scales with high-resolution modeling”

【サブテーマ3】

- 1) Inatsu, M., T. Aikawa, N. Nakano: Mode-Decomposed Equation Diagnosis for Atmospheric Blocking Development. Annual Meeting of American Meteorological Society, Boston, USA, 12 Jan 2020.
- 2) Kawazoe, S., M. Fujita, S. Sugimoto, Y. Okada, S. Watanabe, M. Inatsu: Evaluation of Tornadic Environments for Japan Using Multiple Data Sources and Their Potential Responses under Future Climate Change. Annual Meeting of American Meteorological Society, Boston, USA, 12 Jan 2020.
- 3) S. Tanji and M. Inatsu: Case Study of Blowing Snow Potential Diagnosis with Dynamical Downscaling. Annual Meeting of European Geoscience Union, Online, 5 May 2020.
- 4) M. Inatsu, T. Aikawa, and N. Nakano: Mode-decomposed equation diagnosis for atmospheric blocking development. Annual Meeting of European Geoscience Union, Online, 6 May 2020.
- 5) M. Inatsu: Climate change adaptation to disaster in urban areas. Japan Geoscience Union, Online, 16 July 2020.
- 6) 丹治 星河、稲津 将、川添 祥、佐藤 陽祐: 2017/2018年冬季における北海道の吹雪発生マップの作成. 雪氷研究大会(2021・千葉-オンライン), 2021.9.13.
- 7) 川添 祥、稲津 将、山田 朋人、星野 剛: 北海道において強い降水をもたらす低気圧の温暖化解析. 日本気象学会2021年秋季全国大会, オンライン, 2021.12.3.

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 日下博幸、2019年、熱中症予防リストバンドを活用した実証実験の報告会で講演（主催：埼玉県保健医療部、タイトル：「暑さ対策の現状と課題」、2019年10月21日、埼玉県庁4階講堂）
- 2) 日下博幸、2021年、新潟県立佐渡中等教育学校模擬講義 4年生（高校1年生）を対象に、新潟県で発生するフェーンによる高温や暑熱環境対策等について講演（主催：新潟県立佐渡中等教育学校、2021年7月26日、新潟県立佐渡中等教育学校）
- 3) 日下博幸、2021年、今治南高校課題研究部研究発表会 高校生を対象にフェーンによる高温について解説（主催：今治南高校、2021年3月24日、オンライン開催）
- 4) 日下博幸、2022年、熱中症予防声かけプロジェクトにて講演（主催：熱中症予防声かけプロジェクト、タイトル：「最新データに見る！効果的なダブル対策」、2022年4月12日、オンライン開催）

【サブテーマ2】

- 1) 第6回「震災対策技術展」（2019年6月7日、大阪市北区グランフロント大阪内コングレコンベンションセンター、観客約100名）にて「都市にひそむ暴風リスクを理解するために：2018年台風21号による暴風災害」という題目で講演

- 2) 日本防水工法開発協議会夏季研究開発会議（2019年7月11日、大阪市東淀川区大阪コロナホテル、観客約30名）にて「2018年台風21号による大阪市街地での暴風シミュレーションについて」という題目で講演
- 3) 京都大学第20回市民防災講座－災害リスクを考える－「自然災害に備える」（2019年9月23日、京都府福知山市市民交流プラザふくちやま市民交流スペース、観客約100名）にて「台風・豪雨による気象災害への備え」という題目で講演
- 4) 令和2年度秋季建築物防災週間関連行事建築物防災講演会（2020年9月10日、大阪市西区建築交流会館、観客約100名）にて「台風による都市型暴風災害のリスクとその備え」という題目で講演
- 5) 第7回「震災対策技術展」大阪（2020年10月14日、大阪市北区グランフロント大阪内コングレコンベンションセンター、観客約50名）にて「令和元年東日本台風（台風19号）に見られる近年の豪雨災害の特徴」という題目で講演
- 6) 第8回「震災対策技術展」大阪（2021年8月20日、大阪市北区グランフロント大阪内コングレコンベンションセンター、観客約50名）にて「近年の豪雨災害に見られる極端気象の実態と備え」という題目で講演
- 7) 滋賀県立虎姫高等学校SSHフィールドワーク科目「究理I」（オンライン、2021年11月19日、高校生8名）にて、気象災害と気候変動に関する指導・助言
- 8) 環境省「令和3年度災害廃棄物対策推進シンポジウム『気候危機時代の災害廃棄物対策 ～多様なリスクの想定と柔軟な現場対応～』」（オンライン、2022年1月26日、観客約200名）にて「地球温暖化時の風水害の激甚化によるリスクに備える」という題目で講演

【サブテーマ3】

- 1) 一般公開シンポジウム「北海道気象予測技術分野設立記念講演会」（主催：北海道大学・北海道気象予測技術センター、令和元年8月23日、ホテルマイステイズ札幌アスペン2階、参加者約100名）にて講演
- 2) 令和元年度シンポジウム「地球を観る、災害を観る」（主催：富山大学都市デザイン学部、令和2年6月9－10日、参加者約100名以上）にて講演
- 3) 第2期十勝経営者大学「北海道論コース」（主催：北海道中小企業家同友会とかち支部、令和3年3月23日、参加者10名程度）にて講演
- 4) 防災シンポジウム「冬の北海道の広域複合災害」（主催：北海道大学及び読売新聞社北海道支社、令和3年9月9日、参加者60名程度）にて講演
- 5) 一般公開シンポジウム「北海道気象予測技術分野オンラインシンポジウム」（主催：北海道大学・北海道気象予測技術センター、令和4年2月18日、参加者約60名）にて講演

（4）マスコミ等への公表・報道等＞

【サブテーマ1】

- 1) 共同通信（2019年8月5日、オンライン版、「フェーンと都市化で熱帯夜 5度押し上げ、昨夏の新潟」）※1
- 2) 中日新聞（2019年8月5日、夕刊、8頁、「フェーン現象と都市化で+5度」）※1
- 3) 新潟日報（2019年8月6日、日刊、27頁、「新潟市昨年の8月の熱帯夜 フェーン現象+都市化=5度押し上げ」）※1
- 4) 毎日新聞（2019年8月6日、新潟県版、頁数不明、「フェーン現象×都市化=猛烈？ 昨夏の新潟、筑波大教授ら分析 気温5度押し上げか」）※1
- 5) NHK Eテレ（2020年10月11日、全国放送、「サイエンスZERO 暮らしを変える“アスリート科学”最前線」）研究成果の紹介、ビデオ出演

- 6) NHK（2021年1月9日、全国放送、「NHKスペシャル シリーズ「2030 未来への分岐点」第1回「暴走する温暖化 “脱炭素”への挑戦」」）研究成果採用
- 7) 成果のプレスリリース（2021年5月17日、筑波研究学園都市記者会へのリリース文送付/大学HPへの掲載、「フェーン現象は通説と異なるメカニズムで生じていることを解明」）
- 8) NHKラジオ第一（2021年5月20日、全国放送、NHKラジオR1「武内陶子のごごカフェ」（5/20内の企画「ローカル」で日本全国の気候と局地風を紹介（電話出演）、日本全国の気候と局地風を紹介））
- 9) 愛媛新聞（2021年6月8日、朝刊、6頁、「フェーン現象 降雨例少なく」）※2
- 10) 茨城新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、「フェーン現象 降雨少数」）※2
- 11) 河北新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、「フェーン現象 降雨少数」）※2
- 12) 宮崎日日新聞（2021年6月8日、朝刊、2頁、「フェーン現象 実は 降雨少数」）※2
- 13) 京都新聞（2021年6月8日、夕刊、6頁、「フェーン現象で雨降らず？」）※2
- 14) 産経新聞（2021年6月8日、朝刊、20頁、「フェーン現象 降雨わずか」）※2
- 15) 信濃毎日新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、「フェーン現象「実際に雨を降らすことは少ない」」）※2
- 16) 神奈川新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、「フェーン現象 降雨は少数」）※2
- 17) 朝日新聞（茨城版）（2021年6月21日、頁数不明、「フェーン現象 雨なし8割」）※2
- 18) 東奥日報（2021年6月8日、朝刊、3頁、「フェーン現象 実際は雨珍しく」）※2
- 19) 東京新聞（2021年6月7日、夕刊、頁数不明、「フェーン現象 降雨わずか」）※2
- 20) 日本経済新聞（2021年6月7日、夕刊、9頁、「フェーン現象 実は降雨例少数」）※2
- 21) 福島民報（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、「フェーン現象 降雨は少数」）※2
- 22) 福島民友新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、「フェーン現象、降雨少数」）※2
- 23) 北海道新聞（2021年6月7日、夕刊、7頁、「フェーン現象 降雨は少数」）※2
- 24) 毎日新聞（2021年6月11日、夕刊、7頁、「フェーン現象 降雨はまれ」）※2
- 25) 中日新聞（2021年6月7日、夕刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 26) 北國新聞（2021年6月7日、夕刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 27) 北陸中日新聞（2021年6月7日、夕刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 28) 徳島新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 29) 南日本新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 30) デーリー東北（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 31) 秋田魁新報（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 32) 岩手日報（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 33) 埼玉新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 34) 山梨日日新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 35) 新潟日報（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 36) 伊勢新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 37) 北日本新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 38) 福井新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 39) 奈良新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 40) 山陽新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 41) 山陰中央新報（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 42) 高知新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 43) 琉球新聞（2021年6月8日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 44) 中国新聞（2021年6月9日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 45) 沖縄タイムス（2021年6月10日、朝刊、頁数不明、タイトル不明）※2
- 46) 西日本新聞（2021年6月10日、夕刊、頁数不明、タイトル不明）※2

- 47) 東京大学海洋アライアンス連携研究機構HP（2021年6月2日公開、「フェーン現象の「常識」は常識ではなかった」）
- 48) NHK「首都圏ナビ」Webレポート（2021年8月30日、NHK HP、「熱中症患者あふれる将来の東京 気候変動は社会的弱者に被害集中」）
- 49) NHK NEWS おはよう日本（2021年9月16日、翌日の熱中症搬送者数予測モデルの紹介と将来の熱中症搬送者数に関する予測結果について）
- 50) 信濃毎日新聞（2021年9月20日、長野県を対象とした将来の熱中症搬送者数予測について）
- 51) 成果のプレスリリース（2022年2月22日、筑波大学（リリース文章の配信のみ）、「炎天下での短時間歩行が直後の学習・仕事のパフォーマンスを低下させることを実証」）

※1 2019年6月における共同通信社の新潟県新潟市における夜間高温の発生メカニズムに関する取材による記事。

※2 2021年5月20日における共同通信社の「日本のフェーン現象の主要メカニズムについて」の取材による記事。オンラインニュース（毎日新聞や日経新聞など45件）、Wikipediaやヤフーニュースにも掲載（タイトル・日付不明）。

【サブテーマ2】

- 1) 読売新聞（2020年8月31日、大阪本社、1頁、「ビル風 台風時に威力増」）
- 2) NHKワールド（NHK国際放送）（2021年1月11日およびオンライン配信中、“BOSAI: Science that Can Save Your Life”）

【サブテーマ3】

- 1) 読売新聞（2021年9月10日、北海道支社、ページ数不明、「北大シンポ防災研究の現状を紹介」）
- 2) 読売新聞（2021年10月8日、北海道支社、30-31ページ、「北大・読売防災シンポ『冬の北海道の広域複合災害』」）

（5）本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

- 1) 第59回日本生気象学会大会優秀発表賞、日本生気象学会、2020年11月29日、筑波大学生命環境科学研究科 中村真悟
- 2) The Helmut E. Landsberg Award、American Meteorological Society（アメリカ気象学会）、2021年1月11日、筑波大学計算科学研究センター 教授 日下博幸
- 3) 第14回日本ヒートアイランド学会大会ベストポスター賞、日本ヒートアイランド学会、2019年9月22日、筑波大学生命環境科学研究科 佐藤亮吾・佐藤拓人・同計算科学研究センター 教授 日下博幸・同生命環境科学研究科 清水麻未・同計算科学研究センター 研究員 荒木貴光
- 4) CSIS DAYS 2021 優秀共同研究発表賞、東京大学空間情報科学研究センター、2021年11月20日、筑波大学計算科学研究センター 教授 日下博幸・研究員 佐藤拓人・同生命環境科学研究科 中村真悟・同アイソトープ環境動態研究センター 特任助教 中村祐輔・同生命環境学群地球学類 軽辺凌太
- 5) 2020年度日本気象学会北海道支部発表賞、2021年1月12日、北海道大学大学院理学院 川添祥

IV. 英文Abstract

Climate Change Adaptation to Disasters in Urban Environments

Principal Investigator: Masaru Inatsu

Institution: Hokkaido University, N10W8, Sapporo, JAPAN

Tel: +81-11-706-3549 / Fax: +81-11-706-3549

E-mail: inaz@sci.hokudai.ac.jp

Cooperated by: University of Tsukuba, and Kyoto University

[Abstract]

This project investigated the impacts of climate change on extreme heat, winds, snow, and rain events in the urban environments of Sapporo, Kumagaya, Niigata, Kyoto, and Osaka. First, it was found that urban heat stress is projected to worsen future climates, and in the case of Sapporo city, the number of heat-related illnesses was projected to increase significantly. While much attention has been given to urban heat island effects in major metropolitan environments, cities such as Niigata that border the Sea of Japan was also shown to experience extremely high temperatures due to the Foehn effect, often without the presence of precipitation. Next, high wind events in urban environments were examined in Kyoto and Osaka. For strong winds associated with approaching typhoons, subtle shifts in the storm track were shown to affect the distribution of the wind field. In addition, areas with low building density and varying heights were clearly shown as areas prone to strong wind gusts. Therefore, it was revealed that strong winds in urban environments are dictated by several factors, such as storm tracks, intensity, and urban layout. Lastly, weather risks associated with extreme rain and snow events were investigated. As a case study, the impacts of an extreme rain event associated with “senjo-kousuitai” on the Mutsukisamu river in Sapporo were analyzed for the potential risk of flooding in the present and future climates. For extreme snow events, future projections showed that while the overall risk of record snow events will decrease throughout much of Japan, in areas such as the Sea of Japan side in Hokkaido, a potential increase was seen even toward the end of the 21st century.

Consistent dialogue with local municipalities on adaptation strategies was conducted throughout the project. For example, urban model simulations were performed to convey the benefits of large, shading structures or more densely planted trees in cities such as Kumagaya and Niigata, where such measures are already being considered to reduce heat stress in urban environments. In Sapporo, the effectiveness of a drainage tunnel in smaller river basins to reduce flooding disasters was validated for present and future extreme rain events. These studies provided supporting evidence on the effectiveness of improved building codes and disaster prevention measures planned in urban environments. For regions where further improvements can be suggested, this project’s accomplishments can provide pertinent information for adaptation and mitigation measures in response to climate change.

Key Words: Climate change, weather disasters, urban environments, typhoons, heat stress, extreme precipitation, regional municipalities, adaptation.