

平成 30 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：屋外環境

研究期間：平成 30 年度

課題番号：172010

研究課題名（和文）：気候数値解析に基づく都市空間における顕熱・潜熱収支構造の将来変化の分析

研究課題名（英文）：A Study of Future Changes in Sensible and Latent Heat Balance in Urban Space Based on Climate Analysis

研究代表者：持田 灯

交付決定額（当該年度）：330,000 円

1. 研究の目的

① 研究の背景

- 1) 気候変化、特にこれに伴う海面温度の上昇により、日本近辺で大型台風や集中豪雨の被害が増加している。さらに、極端気象による猛暑が頻発し、従来のヒートアイランド対策の枠組み(ヒートアイランド現象の緩和)とは異なる暑熱化・蒸暑化への適応という観点からの検討が必要とされる状況になっている。
- 2) 日本建築学会の「GCM を活用した近未来標準気象データ作成 WG」では、IPCC の温暖化シナリオを用いた全球気候モデル GCM(Global Climate Model)の解析結果を境界条件とした領域気象モデル WRF(Weather Research and Forecasting)での力学的ダウンスケーリングを行い、日本の主要都市における 2030 年代の標準気象データを整備した。申請者もこの活動の一環として 2030 年代の仙台の気候予測を行った。同 WG の後継と位置づけられる「気候変動モデリング WG」では、2015 年度より、2050 年代の標準気象データ作成に向けて取り組んでいる。
- 3) 2)の活動成果により、将来、仙台沿岸部では熱中症発症との相関が高い WBGT(Wet Bulb Globe Temperature)が大きく上昇することが確認された。要因分解分析の結果、その主因は海面温度の上昇により海上で湿度が上昇し、これが海風により沿岸部に輸送されることによると推定された。この結果は、沿岸都市では冷涼な海風の流入により気温が大幅に低下し、温熱快適性が改善するという、従来の考え方の再検討を迫るものであった。従って、将来における海風導入による都市の冷却効果を詳細に分析する必要がある。

② 研究の目的

- 1) メソ気象モデル WRF (Weather research and forecasting)を用いて仙台の現在と 2050 年代の気象を再現し、顕熱・潜熱収支構造の 3 次元空間分析を行う。この結果から、気候変化に伴う都市空間の熱収支構造の変化を高エンタルピー化・蒸暑化に着目して 3 次元的に分析する。
- 2) 現在及び将来の熱中症 Risk を評価するため、日本の 13 都市を対象として、Hazard（蒸し暑さ）に対する都市・建築及び人体の熱的脆弱性（熱中症 Risk カーブ）を分析する。ここから、都市ごとの暑さに対する脆弱性の特徴を把握する。
- 3) 平成 29 年に整備したメソ・ミクロー貫解析手法を用いてメソスケールの気象解析結果をミクロスケールの温熱・風環境解析へ接続し、実街区内の気候分布を高解像度に予測・分析する。ここから、将来のミクロスケールの温熱快適性を評価する。

2. 研究の方法

- 1) WUDAPT 法により作成した仙台市街地の Local Climate Zone map (LCZ map)を土地利用条件とした WRF 解析を行い、解析結果を AMeDAS による気象観測データと比較するとともに、WRF 解析における人工排熱量や建物の熱容量などの物性値を見直すことにより、WRF 解析の予測精度を向上させる。
- 2) 1)で確立した解析手法を用いて、現在と 2050 年代の仙台の気候の将来予測を行う。この結果から、現在と 2050 年代の都市・市街地空間の移流・乱流拡散による顕熱、潜熱、全熱の 3 次元構造と熱収支構造の変化を分析する。
- 3) 全国 13 都市の消防局及び消防庁から 2008 年から 2017 年までの熱中症搬送データ(合計約 6 万 8 千件)を収集し、熱中症 Risk カーブ（日最高 WBGT と熱中症搬送率の関係）を作

成及び分析する。また、将来の人口統計予測結果に基づいて作成した将来の昼間人口分布を使用し、将来の熱中症 Risk を評価する。

- 4) 仙台の中心市街地に 2 台のドップラーライダーを設置し、1 台は風速の 3 成分の鉛直分布、もう 1 台は風速の鉛直成分の鉛直分布を計測する。ここから、海風流入時の上空気流性状を時系列的に解明する。
- 5) 既に実施している気象解析結果を教師データとして、Neural Network により気象の長期予測を行うシステムを構築する。
- 6) 新橋の実街区を対象に、WRF の解析結果から作成した流入変動風や表面温度などの諸量を入力条件とした LES 解析（メソ・マイクロ貫解析）を行う。また、この結果に基づき、街区内の温熱快適指標 SET* を評価する。

3. 研究成果

- 1) WUDAPT 法を用いて仙台市中心部の LCZ map（図 1）を作成した。また、各 LCZ 区分の妥当性を The final confusion matrix により確認した。

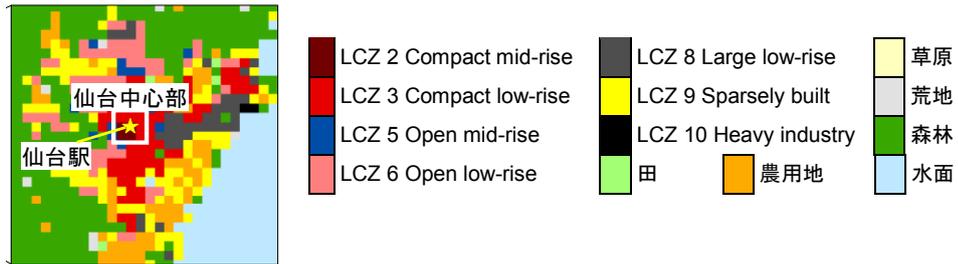


図 1 仙台中心部の LCZ map

- 2) 仙台市街地の Local Climate Zone map (LCZ map) を土地利用条件とした WRF 解析を行い、気温の空間分布を AMeDAS による気象観測データと比較することで精度を検証した。このとき、空調運転による室温・湿度の制御と、それによる排熱を考慮した建物の熱収支を解くモデルである Building Energy Model (BEM) を WRF 解析に連成させ、地球温暖化による空調排熱の増加を再現した。

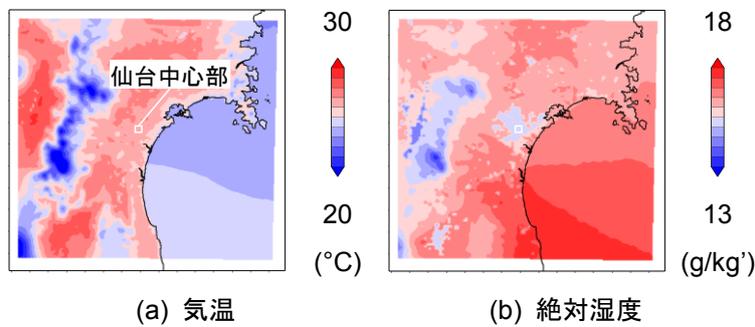


図 2 2000 年代の気温と絶対湿度の空間分布
（日中（10 – 15 時）の平均、地上 2 m）

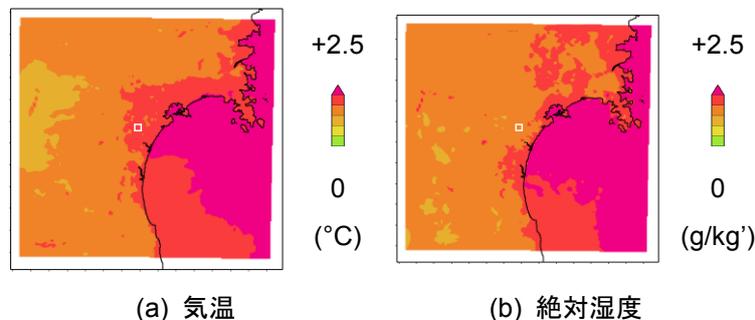


図 3 気温と絶対湿度の 2050 年代と 2000 年代の差
（日中（10 – 15 時）の平均、地上 2 m）

3) 地表に接する各計算メッシュ (1 km×1 km×約 60 m) を Control Volume (C.V.)とし、熱収支構造の各成分により C.V.に流入出する正味の熱量を評価した。2000年代の仙台駅地点の C.V. (図 1 ★印)の顕熱収支を図 4 に示す。移流成分は、日中は大きな負の値を示している。すなわち、風上からの顕熱流入量よりも風下への顕熱流出量の方が大きい。このことから、海風の移流が気温低減に大きく寄与していることが分かる。2000年代の日中の熱収支構造の移流成分の空間分布を図 5 に、2050年代と2000年代の差を図 6 に示す。図 4 と同様に、顕熱収支構造の移流成分は陸地のほぼ全域で負の値を示している (図 5 (a))。一方、顕熱収支構造の移流成分は 2050年代にかけて増加し (図 6 (a))、これによって、図 1 に白枠で示す仙台中心部 3 km×3 km の範囲の C.V.における正味の流出量は 4%減少した。つまり、風上からの顕熱流入量と風下への顕熱流出量の差が小さくなり、海風による気温低減効果が減少した。潜熱収支構造の移流成分も、2050年代にかけて沿岸部で特に増加し (図 6 (b))、仙台中心部では 59%の増加となっている。つまり、風上からの潜熱流入量と風下への潜熱流出量の差が大きくなり、海風による湿度上昇の影響が強まったといえる。

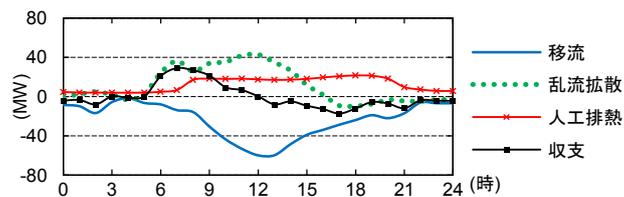


図 4 2000年代の仙台駅地点の C.V.における顕熱収支の時間変化

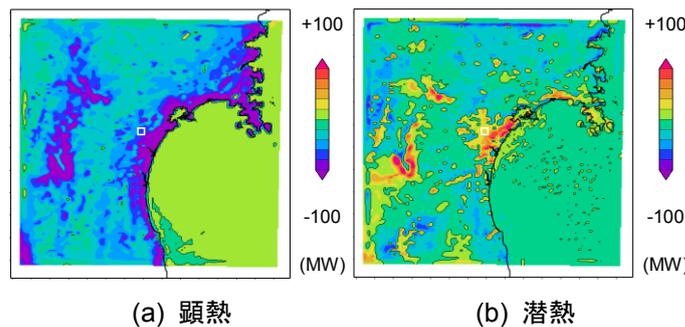


図 5 2000年代の日中 (10-15時の) 熱収支構造の移流成分

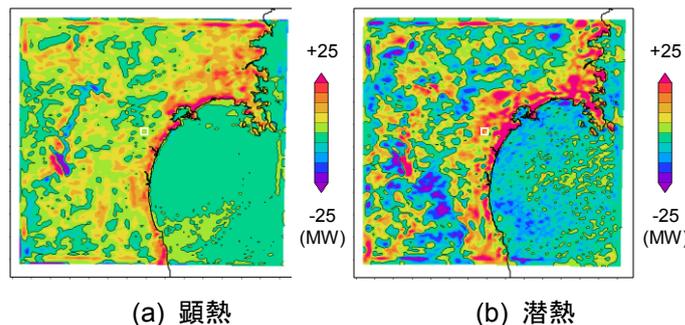


図 6 日中 (10-15時) の熱収支構造の移流成分の 2050年代と2000年代の差

4) 全国 13 都市の消防局及び消防庁から 2008 年から 2017 年までの熱中症搬送データ (合計約 6 万 8 千件) を収集し、Hazard に対する都市・建築及び人体の熱的脆弱性 (Vulnerability) を表す熱中症 Risk カーブを作成した。札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、福岡の 6 都市の熱中症 Risk カーブ (発生場所: 屋外) を図 7 に示す。北に位置する札幌と仙台は熱中症搬送率が他の 4 都市よりも高いことが明らかとなった。

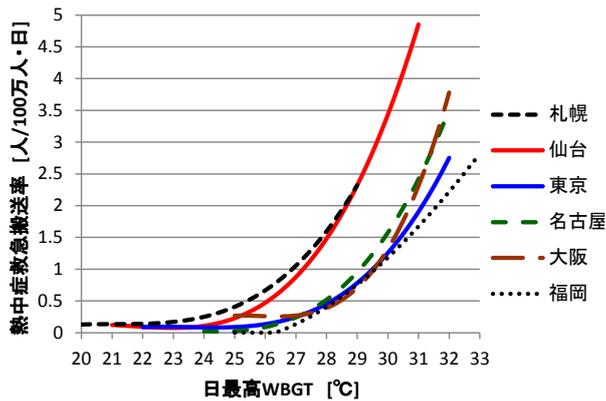


図7 6都市の熱中症 Risk カーブ（発生場所：屋外）

5) 日最高 WBGT によって評価される都市の蒸し暑さ (Hazard) と、熱中症 Risk カーブによって評価される Hazard に対する都市・建築及び人体の熱的脆弱性 (Vulnerability) を組み合わせることで評価される、その場所の潜在的な熱中症危険性 (熱中症 Incidence Rate、人口 100 万人当たりの 8 月 1 か月間の熱中症搬送者数) を現在 (Case1) と将来 (Case4) について評価した。このとき、仮に、気候は現在と同条件で人口分布及び人口構成分布だけが将来変化した場合 (Case2) と、人口分布及び人口構成分布は現在と同条件で気候だけが将来変化した場合 (Case3) の熱中症 Incidence Rate も同時に評価し、高齢化と温暖化がそれぞれ将来の熱中症 Incidence Rate の増加に与える影響度を比較した (図 8)。この結果、将来の熱中症 Incidence Rate は人口変化及び人口構成変化よりも気候変動が主要因となって上昇することが明らかとなった。

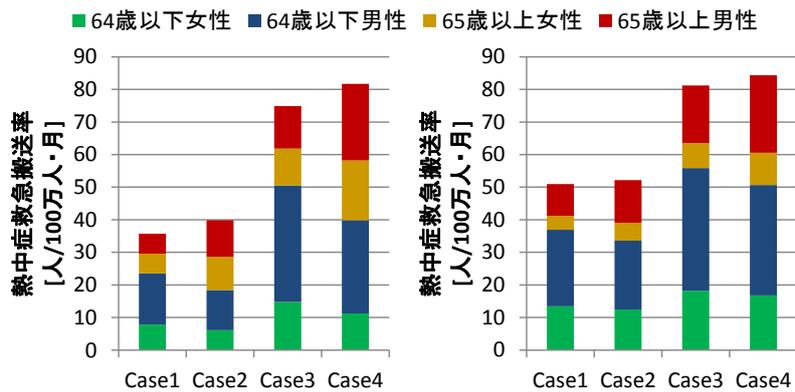


図8 各ケースの熱中症 Incidence Rate

6) 2 台のドップラーライダーを用いて、仙台上空の約 30 秒の時間解像度の風向・風速の鉛直分布及び 5 秒以下の解像度の風速の鉛直成分の鉛直分布を計測した (図 9)。気象台で内陸側からの風が観測された時間帯には、屋上高さ付近から上空 1000m 以上まで連続して内陸側からの風が吹いており、弱い上昇流と下降流が見られた。また、気象台で日中に海風が継続して観測された日は、8 時半より前には内陸側からの風が支配的で、混合はあまり生じないが、8 時半以降、海側と内陸側からの風が交互に吹き、これと同時に比較的強い上昇流が度々発生していた。12 時半以降には海風の層の上に明確に内陸側からの風の層が存在しており、大気の混合は弱くなっていた。以上より、仙台における海風の性質として、①海風の層の上には西風の層が存在することや②地表付近の混合は基本的には海風の層内で発生することが確認された。

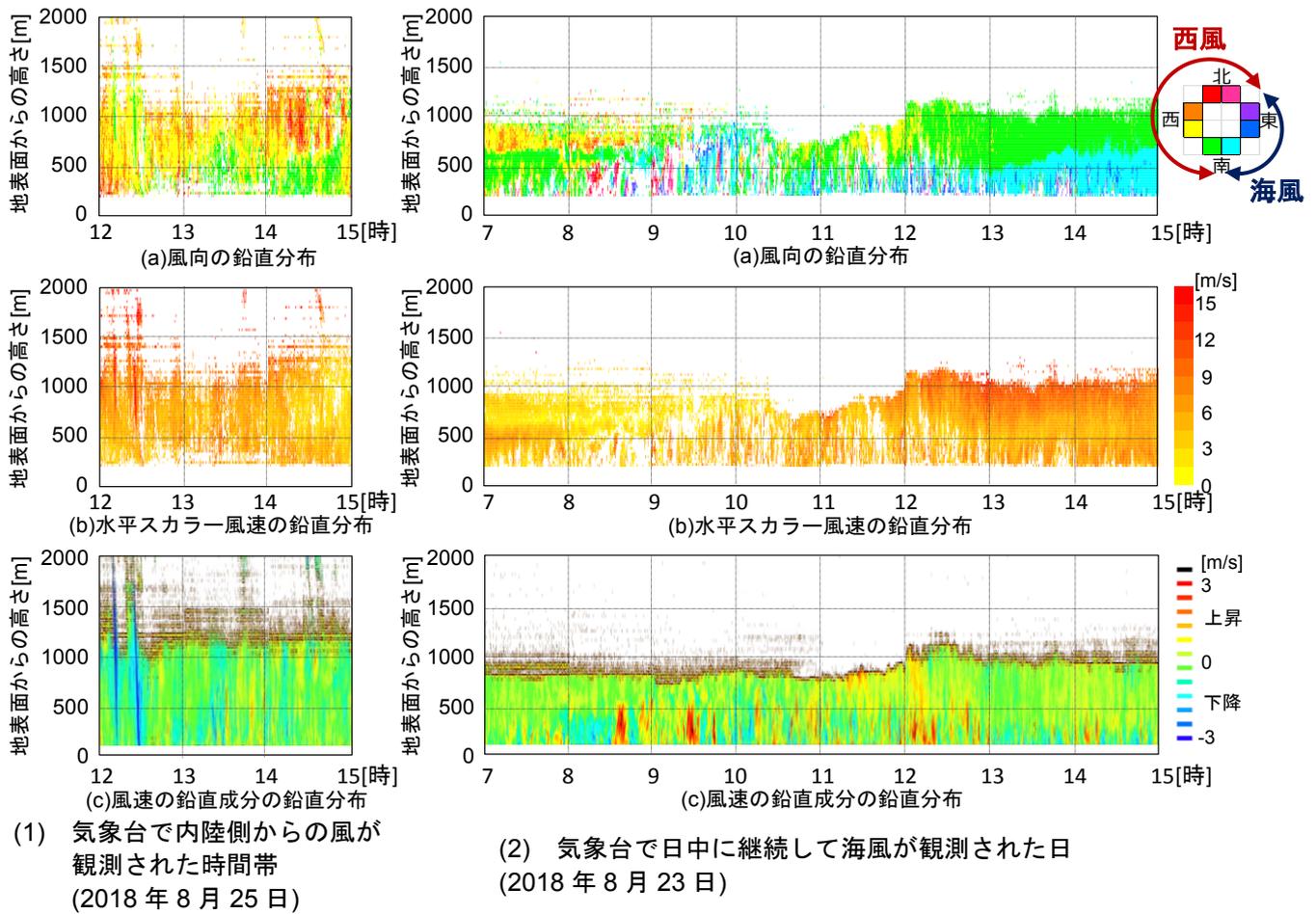


図9 ライダー計測の結果

7) Neural Networkにより算出した建物周辺のMRT分布を分析し、Neural Networkによるミクロ気象の長期予測システムの現時点における実用性を検証した (図10~図12)。

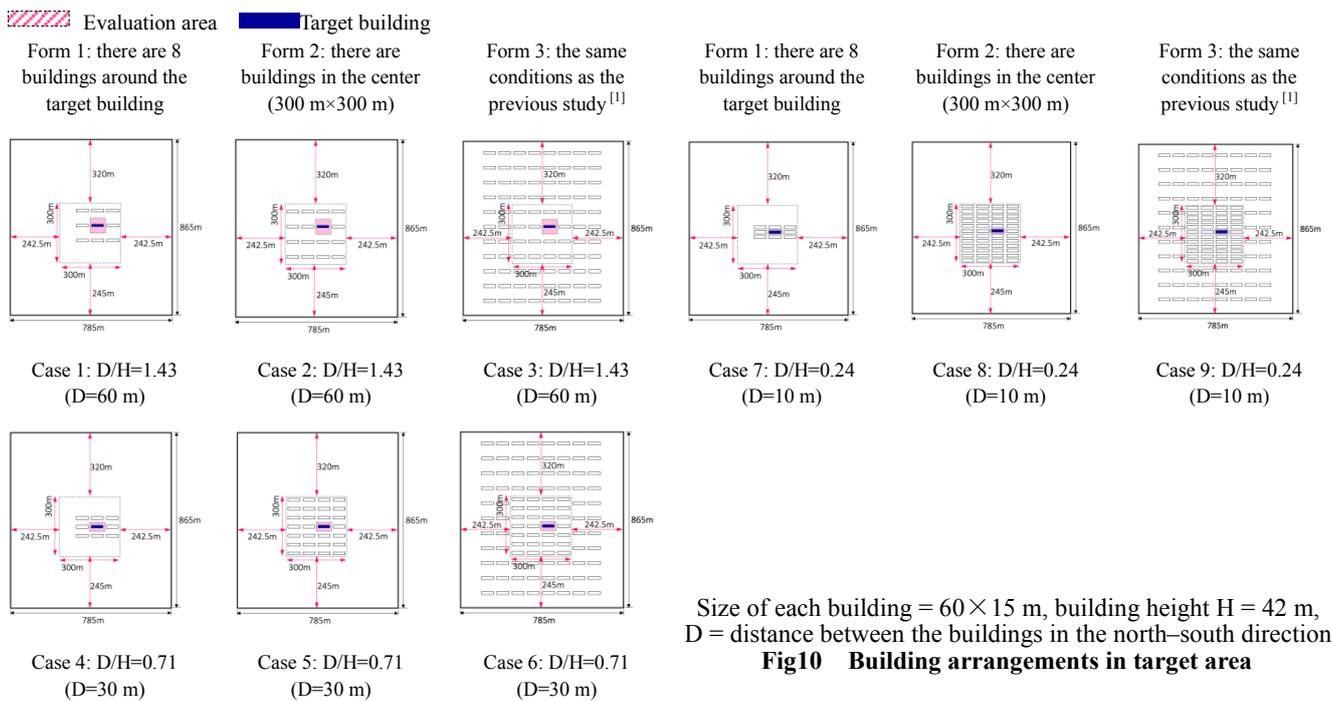


Fig10 Building arrangements in target area

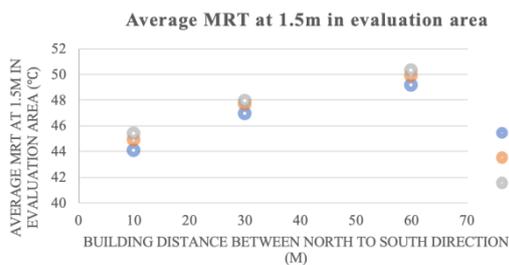


Fig. 11 Averaged MRT in evaluation area at 1.5 m

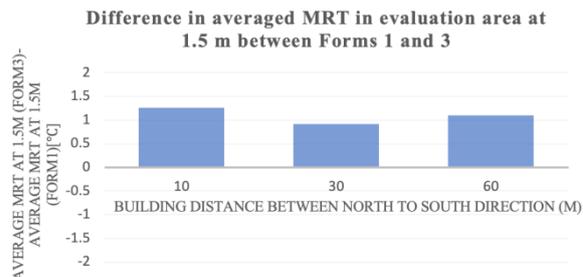
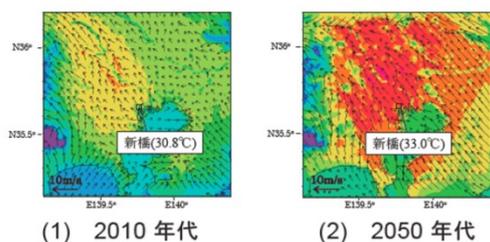


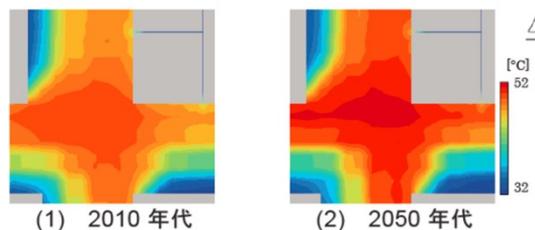
Fig. 12 Averaged MRT in evaluation area at 1.5 m

8) メソ・マイクロ気象一貫解析によりミクロスケールの MRT 分布や SET*分布を算出し、地球規模の気候変化が人間の快適感へ及ぼす影響を定量的に評価した (図 13~図 16)。また、SET*上昇への各要素の寄与率を算出した。



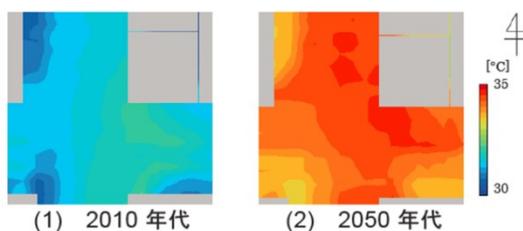
(1) 2010 年代 (2) 2050 年代

図 13 気温 (地上 2m) と風速ベクトル (地上 10m) の水平分布 (13 時)



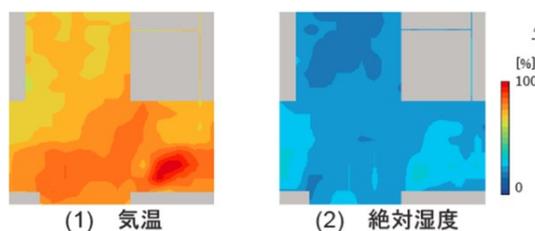
(1) 2010 年代 (2) 2050 年代

図 14 評価領域の MRT 分布 (13 時、地上 1.5m)



(1) 2010 年代 (2) 2050 年代

図 15 評価領域の SET*分布 (13 時、地上 1.5m)



(1) 気温 (2) 絶対湿度

図 16 SET*上昇への各要素の寄与率 (13 時、地上 1.5m)

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Miguel Yamamoto, Masataka Kasai, Tsubasa Okaze, Kazumasa Hanaoka, Akashi Mochida, "Analysis of climatic factors leading to future summer heatstroke riskchanges in Tokyo and Sendai based on dynamical downscaling of pseudo global warming data using WRF", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.183, 2018, p.187-197.
2. 河西昌隆, 大風翼, 石田泰之, 山本ミゲイル, 持田灯, "WRF と LES を結合したメソ・マイクロ気象一貫解析手法の開発と実街区における温熱環境の将来予測", 第 25 回 風工学シンポジウム論文集, 2018, p.223-228.
3. 王正, 布川啓徳, 山本ミゲイル, 石田泰之, 持田灯, 大風翼, 花岡和聖, "領域気象モデル WRF による都市の温熱環境の数値予測(その 11) 地域特性及び年齢に着目した暑さに対する脆弱性の分析", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.(投稿済)
4. 布川啓徳, 山本ミゲイル, 石田泰之, 持田灯, 大風翼, 花岡和聖, "領域気象モデル WRF による都市の温熱環境の数値予測(その 12) 温暖化と高齢化によって増大する将来の熱中症リスクの予測とその要因分析", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済)
5. 山本ミゲイル, 持田灯, 渡辺浩文, 小林光, 周希霖, 石田泰之, "領域気象モデル WRF による都市の温熱環境の数値予測(その 13) 2050 年代と 2000 年代の仙台都市大気部熱収支構造比較", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済)
6. 小野田真帆, 石田泰之, 渡辺浩文, 上田裕洋, 持田灯, "仙台市における温湿度の多点同時測

定とドップラーライダーによる上空気流性状の計測(その 3) 2 台のドップラーライダーによる風向・風速の鉛直分布の詳細計測”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済)

7. Xilin Zhou, Tsubasa Okaze, Yasuyuki Ishida, Hironori Watanabe, Akashi Mochida, “Analysis of the spatial distributions of surface and air temperatures in Sendai based on Local Climate Zones Classification”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済)

8. Yuquan Xie, Jialong Hu, Yasuyuki Ishida, Akashi Mochida, “Feasibility of simplified model for long-term prediction of micro-climate around building using neural network”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019. (投稿済)

〔学会発表〕(計 2 件)

1. Xilin Zhou, Tsubasa Okaze, Yasuyuki Ishida and Akashi Mochida, “Mapping Local Climate Zones for Japanese Major Cities using WUDAPT Method: Part1: A case study of Sendai”, 日本建築学会大会(北陸), 2018.

2. 河西昌隆, 大風翼, 石田泰之, 山本ミゲイル, 持田灯, “WRF と LES を結合したメソ・マイクロ気象一貫解析手法の開発と実街区における温熱環境の将来予測”, 第 25 回 風工学シンポジウム, 2018.

〔図書〕(計 0 件)

〔その他, 産業財産権, ホームページ等〕
無し

5. 研究組織

(1) 研究代表者

持田灯 (東北大学・大学院工学研究科・教授)

(2) 研究分担者

1. 玄英麗 (東京工芸大学・建築学科・助教)
2. 胡家龍 (東急建設株式会社・技術研究所)
3. 周希霖 (東北大学・大学院生)
4. 謝育全 (東北大学・大学院生)
5. 山本ミゲイル (東北大学・大学院生)
6. 小野田真帆 (東北大学・大学院生)
7. 謝育全 (東北大学・大学院生)

平成 30 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

6. 要約(Abstract)

気候数値解析に基づく都市空間における顕熱・潜熱収支構造の将来変化の分析

持田 灯 (東北大学)

1. 目的

- 1) メソ気象モデル WRF (Weather research and forecasting)を用いて仙台の現在と 2050 年代の気象を再現し、顕熱・潜熱収支構造の 3次元空間分析を行う。この結果から、気候変化に伴う都市空間の熱収支構造の変化を高エンタルピー化・蒸暑化に着目して 3 次元的に分析する。
- 2) 現在及び将来の熱中症 Risk を評価するため、日本の 13 都市を対象として、Hazard (蒸し暑さ) に対する都市・建築及び人体の熱的脆弱性 (熱中症 Risk カーブ) を分析する。ここから、都市ごとの暑さに対する脆弱性の特徴を把握する。
- 3) 平成 29 年に整備したメソ・ミクロ一貫解析手法を用いてメソスケールの気象解析結果をミクロスケールの温熱・風環境解析へ接続し、実街区内の気候分布を高解像度に予測・分析する。ここから、将来のミクロスケールの温熱快適性を評価する。

2. 成果

- 1) 仙台市街地の Local Climate Zone map (LCZ map)を土地利用条件とした WRF 解析を行い、気温の空間分布を AMeDAS による気象観測データと比較することで精度を検証した。このとき、空調運転による室温・湿度の制御と、それによる排熱を考慮した建物の熱収支を解くモデルである Building Energy Model (BEM) を WRF 解析に連成させ、地球温暖化による空調排熱の増加を再現した。
- 2) 地表に接する各計算メッシュ (1 km×1 km×約 60 m) を Control Volume (C.V.)とし、C.V. に流入出する正味の顕熱・潜熱量を評価した。2050 年代と 2000 年代の熱収支構造の移流成分の差を図 i に示す。顕熱収支構造の移流成分は 2050 年代にかけて増加し (図 i (a))、これによって、仙台中心部 3 km×3 km の範囲の C.V.における正味の流出量は 4%減少した。つまり、風上からの顕熱流入量と風下への顕熱流出量の差が小さくなり、海風による気温低減効果が減少した。潜熱収支構造の移流成分も、2050 年代にかけて沿岸部で特に増加し (図 i (b))、仙台中心部では約 60%増加する結果となった。つまり、風上からの潜熱流入量と風下への潜熱流出量の差が大きくなり、海風による湿度上昇の影響が強まったといえる。
- 3) 全国 13 都市の消防局及び消防庁から 2008 年から 2017 年までの熱中症搬送データ (合計約 6 万 8 千件) を収集し、Hazard に対する都市・建築及び人体の熱的脆弱性 (Vulnerability) を示すグラフである熱中症 Risk カーブを作成した。札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、福岡の 6 都市の熱中症 Risk カーブ (発生場所: 屋外) を比較した結果、北に位置する札幌と仙台は熱中症搬送率が他の 4 都市よりも高いことが明らかとなった。
- 4) 日最高 WBGT によって評価される都市の蒸し暑さ (Hazard) と、熱中症 Risk カーブによって評価される Hazard に対する都市・建築及び人体の熱的脆弱性 (Vulnerability) を組み合わせることで評価される、その場所の潜在的な熱中症危険性 (熱中症 Incidence Rate、人口 100 万人当たりの 8 月 1 か月間の熱中症搬送者数) を現在と将来について評価した。
- 5) メソ・ミクロ気象一貫解析を行い、地球規模の気候変化が人間の快適感へ及ぼす影響を定量的に評価した。

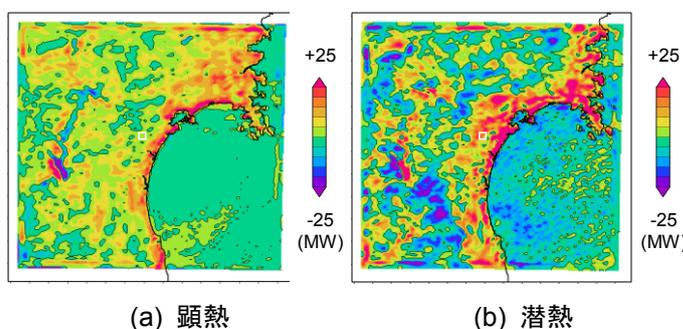


図 i 日中 (10-15 時) の熱収支構造の移流成分の 2050 年代と 2000 年代の差