

領域気象モデルWRFを用いた
岡山のヒートアイランド現象に関する研究

岡山大学 理学部 地球科学科
05501516 高木 恒佑

2023/02/10

要旨

ヒートアイランド現象は郊外に比べ都市部の気温が上昇する現象である。ヒートアイランド現象の対策として都市部の緑地を増加させるという試みがある。本研究ではヒートアイランド現象の要因の1つである土地利用に着目し、土地利用の変更が都市の気候に及ぼす影響を調べるため、岡山を対象に領域気象モデル WRF を用いた気候シミュレーションをおこなった。計算は、現存の土地利用の場合と岡山市中心部の土地利用を混交林に変更した場合の2通りについておこなった。2017年から2021年各年の12月について1か月の計算をおこない、12月下旬の10日間を解析した。土地利用を混交林に変更すると、変更した領域で1~2.5℃の気温低下が見られた。地表の熱収支を解析した結果は、地表から大気への顕熱輸送の減少によって、気温が低下したことを示唆した。顕熱輸送量の変化は、土地利用の変更によって、保水力、アルベド、熱慣性、が変化したためであるとして説明することができる。

目次

第1章 序論	2
第2章 研究手法	3
2.1 領域気象モデル WRF	3
2.2 計算設定	3
2.2.1 計算期間	3
2.2.2 計算領域	3
2.2.3 物理過程	4
2.2.4 初期値と境界条件	5
2.2.5 土地利用	5
第3章 結果	7
3.1 アメダス気温との比較	7
3.2 都市ありと都市なしの気温の比較	9
3.3 地表の熱収支	13
3.3.1 熱収支	13
3.3.2 保水力, アルベド, 熱慣性	14
第4章 まとめ	15

第1章 序論

都市化が進んでいる地域では、郊外に比べ都市部の気温が高くなる。この現象はヒートアイランド現象と呼ばれ、岡山でも観測されている(重田・大橋, 2009)。ヒートアイランド現象の主な要因として、アスファルトなどの熱を溜め込みやすい人工土地利用、建物の密集による風通しの悪さ、建物や車の排熱などが挙げられている(環境省, 2012)。対策のひとつとして、都市部に緑地を増やす試みがなされている。本研究はヒートアイランド現象の要因の一つである土地利用に着目し、領域気象モデル WRF を用いて、岡山市中心部の土地利用を変更した時にどの程度の気温低下が生じるのか調べた。また、地表面の熱収支を解析して、土地利用の変更が気温低下を引き起こすメカニズムを考察した。

第2章 研究手法

2.1 領域気象モデルWRF

領域気象モデルWRFは、アメリカ大気研究センター(NCAR)やアメリカ環境予測センター(NCEP)などにより共同で開発が行われているメソ気象モデルである(<https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>)。数mから数千kmまで様々なスケールの現象を扱うことができ、都市気候の研究にもよく用いられている(日下, 2011)。WRFは完全圧縮の非静力学モデルで、運動方程式、連続の式、状態方程式、エネルギー保存の式、混合比の保存式といった基礎方程式に、水蒸気・雲水・雨水・雪などを考慮した雲微物理モデル、グリッドスケール以下の対流を表現する積雲対流モデル、日射量・大気放射量を計算する放射モデルなどを組み合わせて、大気現象をシミュレーションする。また、WRFはネスティングを利用することができ、高い空間解像度の計算を実行することができる。

2.2 計算設定

2.2.1 計算期間

ヒートアイランド現象の強度が強いとされる冬季(重田・大橋, 2009)を対象とし、2017~2022年における12月1日1:00~12月31日18:00(UTC)の1か月について計算を行った。

2.2.2 計算領域

計算領域は岡山駅(緯度:34.666, 経度:133.918)を中心にして設定した(図2.1)。4段階のネスティングをおこない、各ドメインの水平格子間隔、水平格子点数、時間ステップなどは表2.1に示した通りである。最も解像度の高いドメイン4の水平格子間隔は1kmで、土地利用データもこの解像度で与えた。

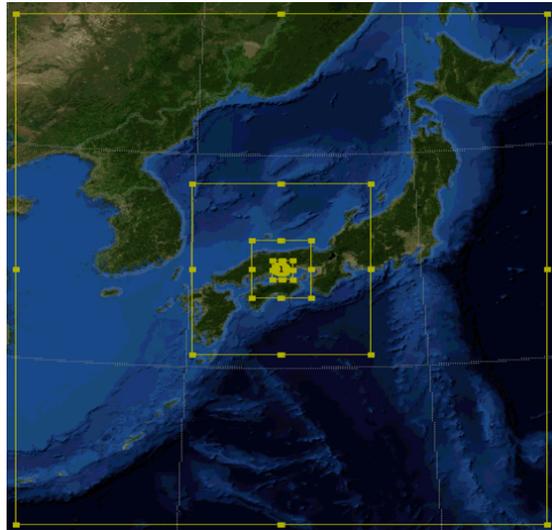


図 2.1: 計算領域. 4段階のネスティングをおこなっていて, 外側の領域から順にドメイン1, ドメイン2, ドメイン3, ドメイン4.

表 2.1: 領域サイズと解像度

	ドメイン1	ドメイン2	ドメイン3	ドメイン4
領域サイズ (km × km)	2700 × 2700	900 × 900	300 × 300	100 × 100
水平格子点数	100 × 100	100 × 100	100 × 100	100 × 100
鉛直格子点数	50	50	50	50
水平格子間隔 (km)	27	9	3	1
時間ステップ (秒)	135	45	15	5

2.2.3 物理過程

物理モデルはWRFの公式ホームページ (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wrf.htm) で標準とされている組み合わせを用いた(表2.2). グリッドスケール以下の対流を表現する積雲対流は, ドメイン1と2で用いられ, ドメイン3と4では使用しない. 地表面モデル Noah(Tewari et al.,2004) は, 地表を21のカテゴリーで区別して, 表面温度, 土壌温度, 土中水分量などを計算するモデルで, 土地利用の違いを反映したシミュレーションを実行することができる.

表 2.2: 物理モデル

雲微物理	WSM 3-class simple ice scheme (Hong et al., 2004)
積雲対流	Kain-Fritsch Scheme (Kain et al., 2004)
長波放射	Rapid Radiative Transfer Model (Mlawer et al., 1997)
短波放射	Duddia scheme (Duddia et al., 1989)
大気境界層	Yonsei University Scheme (Hong et al., 2006)
接地層	Revised MM5 Scheme (Jimenez et al., 2012)
地表面モデル	Unified Noah Land Surface Model (Tewari et al., 2004)

2.2.4 初期値と境界条件

気象に関する物理量の初期値と境界条件は、全球客観解析データ NCEP Final Analysis を用いた。このデータは、空間解像度 0.5 度、時間解像度 6 時間で、初期値として用いられるとともに、計算中はネスティングの一番外側の境界における境界条件を与えるために使用した。

標高と土地利用のデータは、WRF に付属して配布されているアメリカ地質調査局 USGS のデータを用いた。土地利用データは MODIS の観測に基づいており、土地利用は緑地、都市、海、畑など、21 のカテゴリーで表現される。これらのデータの解像度は 30 秒角、おおよそ 1km である。

2.2.5 土地利用

都市と緑地が気候に及ぼす影響を評価するため、2通りの土地利用を設定して気象シミュレーションをおこなった。ひとつは USGS の土地利用データをそのまま用いるもので、以後これを「都市あり」と呼ぶ。図 2.2 の左の図は USGS の土地利用データで、航空写真 (図 2.3) と比較すると現存の岡山の土地利用分布がよく表現されていることが分かる。もうひとつは、図 2.3 の黄色で囲まれた領域の土地利用を全て混交林に変更したものである (図 2.2 右)。以後、岡山市中心部の土地利用を混交林に変更したものを「都市なし」と呼ぶ。

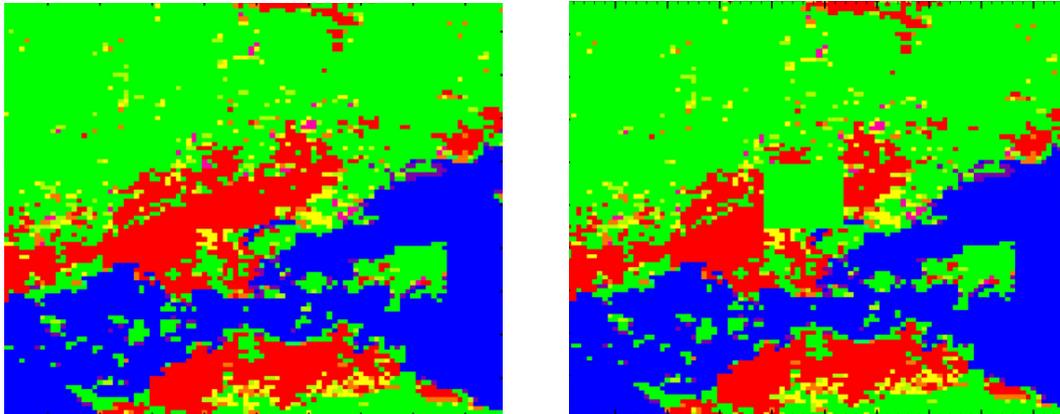


図 2.2: (左) 「都市あり」の土地利用分布. USGS の土地利用データをそのまま用いる. (右) 「都市なし」の土地利用分布. USGS の土地利用データから, 岡山市中心部の土地利用を混交林に変更した.



図 2.3: 岡山の航空写真 (<https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>). 黄色で囲んだ領域は, 「都市なし」の設定で土地利用を混交林に変更した領域.

第3章 結果

3.1 アメダス気温との比較

図3.1は2017~2021各年の12月の日平均気温で、黒は岡山市北区津島中にあるアメダスの観測値(気象庁)、赤は「都市あり」の計算結果、緑は「都市なし」の計算結果である。計算結果は、アメダスの露場を含む格子における地上2mの気温を表示している。図3.2の左は「都市あり」の計算結果とアメダスの差、右は「都市あり」の計算結果と「都市なし」の計算結果の差である。「都市あり」と「都市なし」どちらの計算結果も、1ヶ月間の気温はアメダスの気温と似たような変化を示している。「都市あり」とアメダスの気温の差(図3.2(左))は、だいたい+3度以内に収まっていて、時間の経過とともに差が大きくなるといった傾向は見られない。現存の土地利用を用いたシミュレーションは、現実の気候をシミュレーションできているように見える。「都市あり」と「都市なし」の気温の差(図3.2(右))は、-3から0度の範囲にあり、こちらについても、時間の経過とともに差の大きさが変化していく傾向はみられない。解析には、初期値の影響がほぼ消えているように見える、12月22日から31日の10日間を用いた。

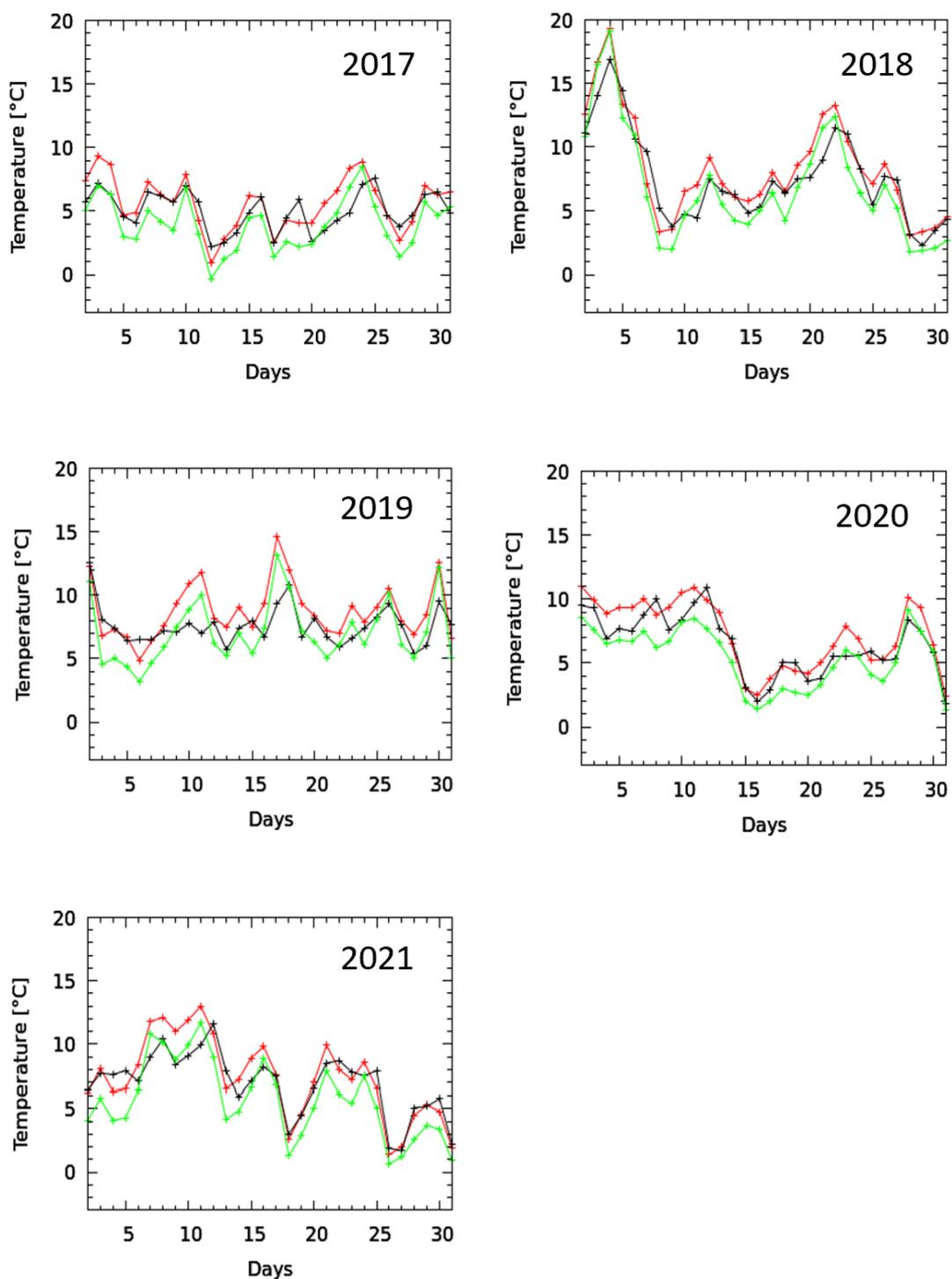


図 3.1: 2017~2021 年の 12 月 2 日~12 月 31 日の日平均気温。横軸は時間(日), 縦軸は気温 (°C)。黒はアメダス岡山の気温, 赤は「都市あり」, 緑は「都市なし」のアメダス岡山の露場を含む格子における地表 2m の気温。

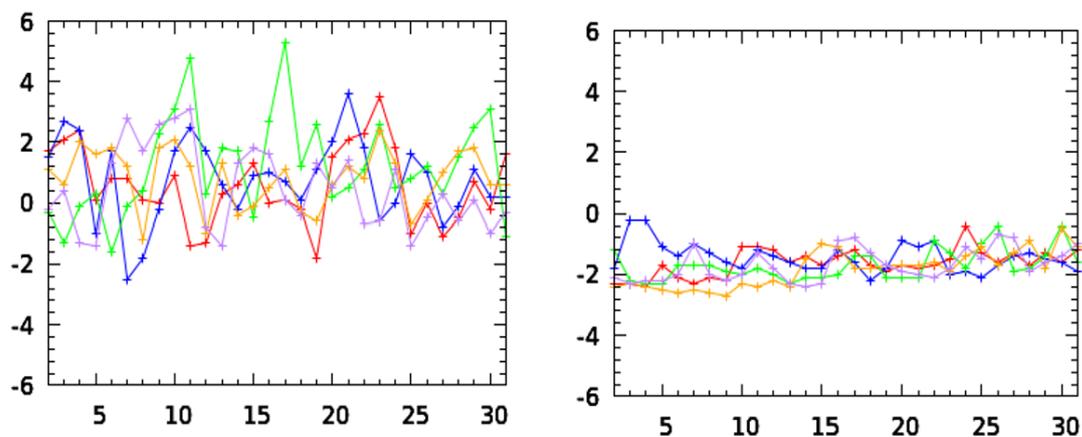
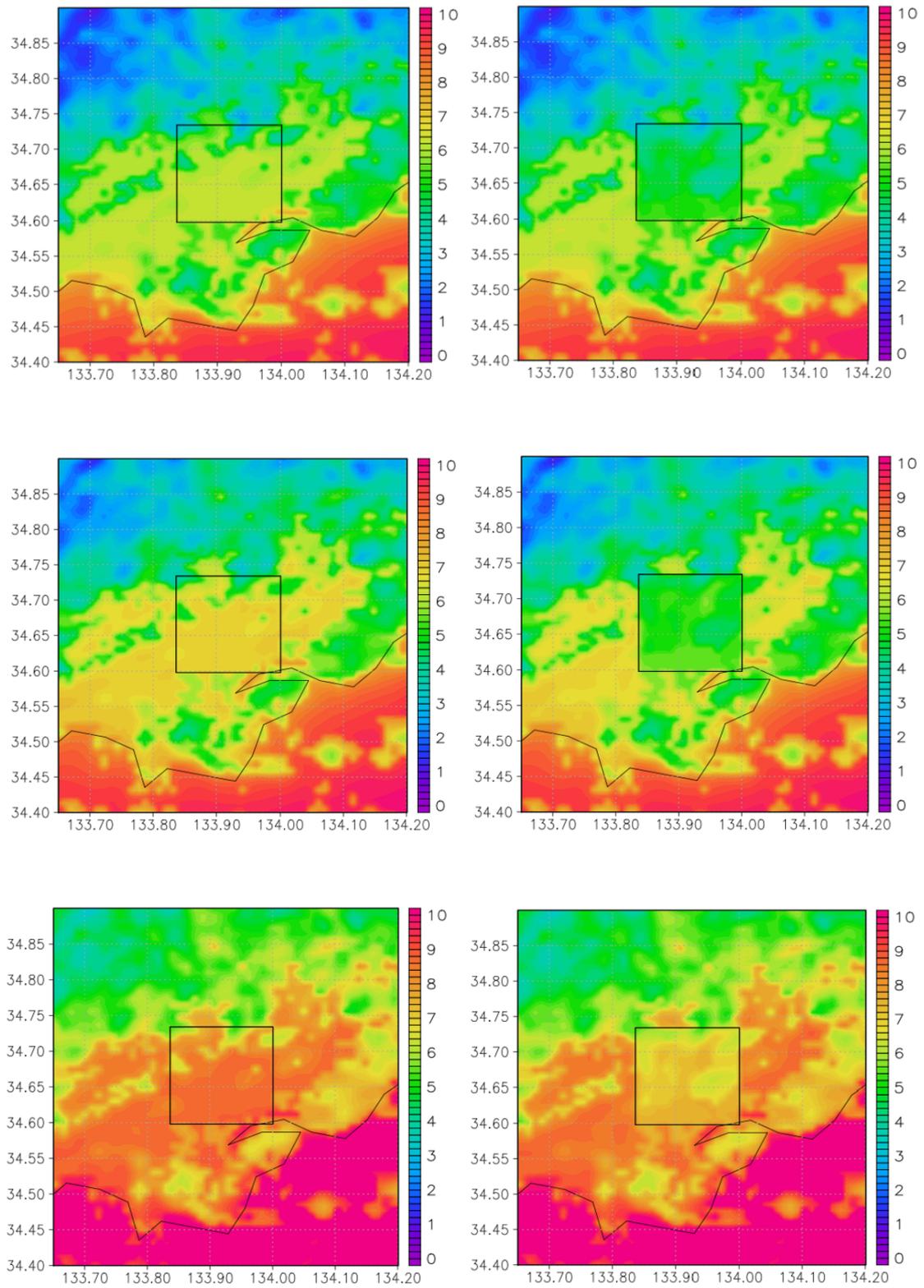


図 3.2: 2017 年～2021 年各年における 12 月 2 日～12 月 31 日の日平均気温の差. (左)「都市あり」とアメダス観測値の気温差(「都市なし」が「都市あり」より高温のとき正), (右)「都市なし」と「都市あり」の気温差(「都市なし」が「都市あり」より高温のとき正). 赤は 2017 年, 青は 2018 年, 緑は 2019 年, オレンジは 2020 年, 紫は 2021 年.

3.2 都市ありと都市なしの気温の比較

計算された, 岡山周辺の 12 月下旬 10 日間の平均気温の分布を図 3.3 に示す. 図 3.3 の左の列は, 現存の土地利用で計算した「都市あり」の結果で, 土地利用の状況(図 2.2 左)と比べると, 都市の分布に合わせて気温が高くなっていることを確認することができる. 「都市あり」の計算で, 都市がある場所の気温が高くなっているのは, ヒートアイランド現象に依るものと推察される. 図 3.3 の右の列は, 岡山市中心部の土地利用を混交林に変更した「都市なし」の計算結果で, 左の列と比較すると, 土地利用を変更した領域(黒い四角で囲まれた領域)の気温が低くなっている. 「都市あり」と「都市なし」の計算は, 土地利用だけが異なっているので, この気温の低下は土地利用の変更によるものである.

図 3.4 は, 「都市なし」と「都市あり」の気温の差(都市なしの気温が高いときに正)である. 土地利用を変更した領域で 1～2.5℃の気温低下が確認される. また, 土地利用を変更した領域の外でも, 年によっては, 南側と東側に 0.5℃程度の気温低下が生じている. 冬季には北西からの風が卓越することを考えると, 南側と東側で生じた気温低下は, 土地利用を変更した領域の冷気が風で輸送されたことで生じた可能性がある.



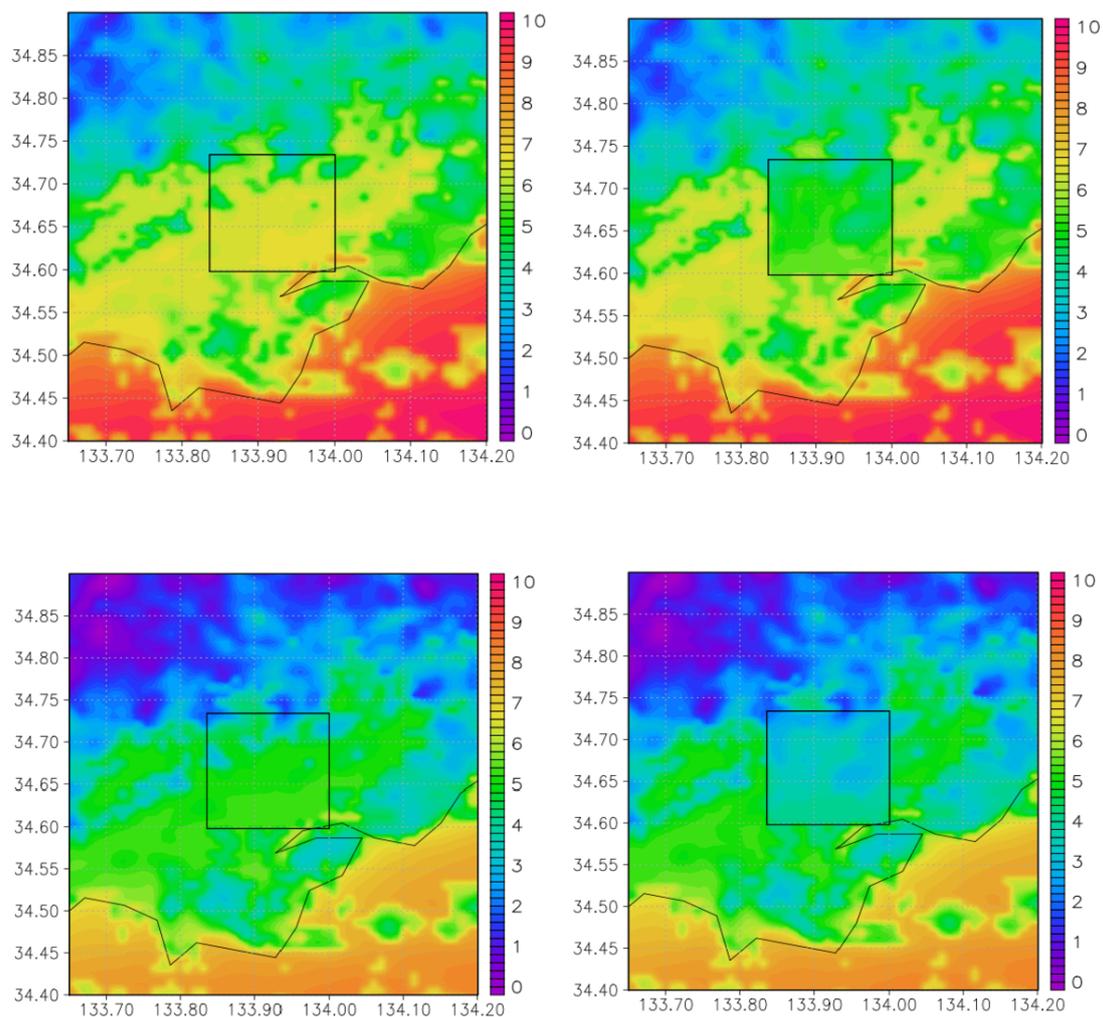


図 3.3: WRF で計算された岡山周辺の気温 (地表 2m) の分布. 12 月下旬 10 日間の平均. 左は「都市あり」, 右は「都市なし」. 1 段目から順に, 2017 年, 2018 年, 2019 年, 2020 年, 2021 年. 黒の正方形は土地利用を変更した領域, 細い黒線は海岸線.

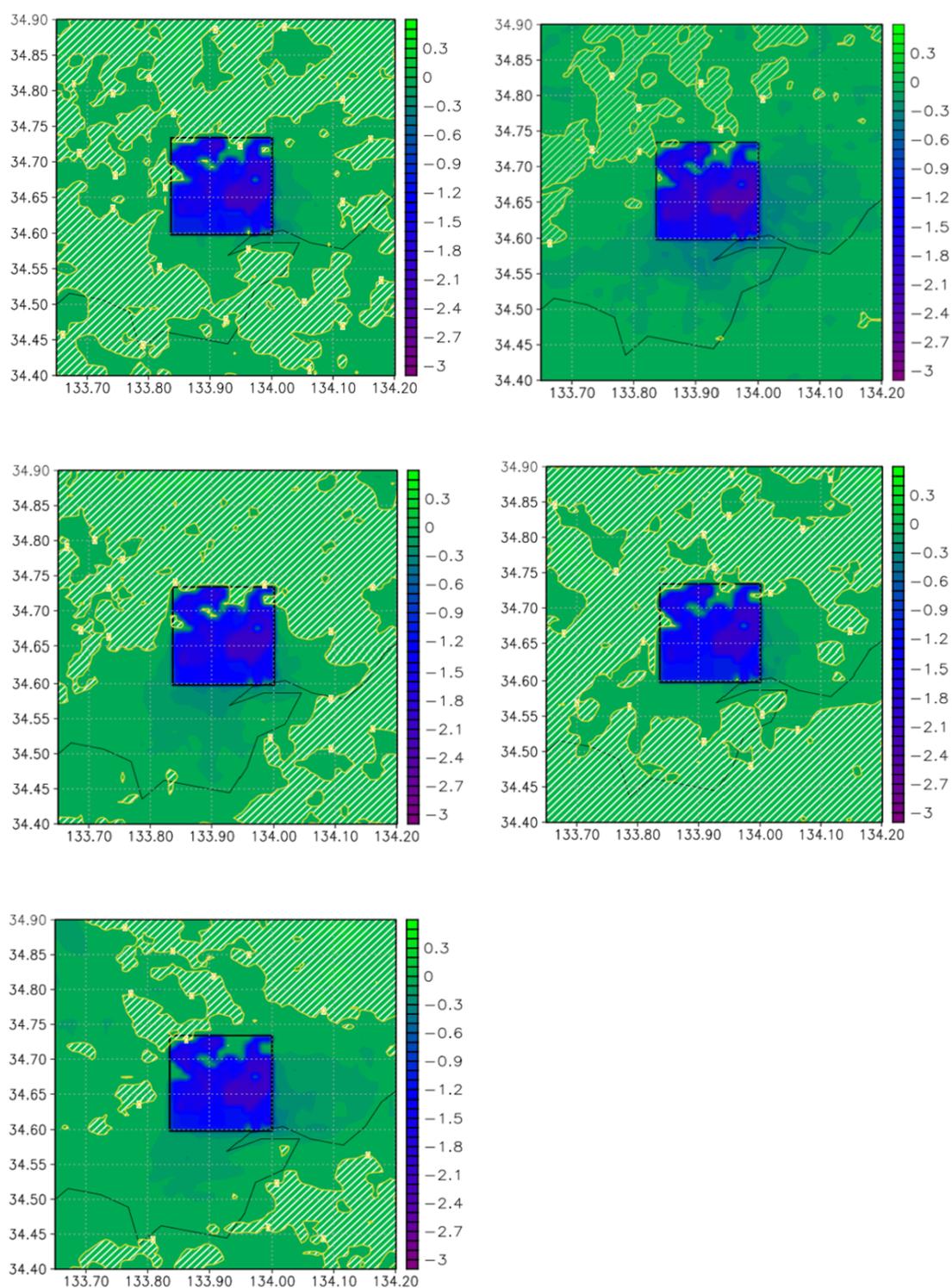


図 3.4: WRF で計算された「都市あり」と「都市なし」の気温(地上2m)の差. 12 月下旬 10 日間の平均. 「都市あり」の方が低温のとき正, 「都市なし」の方が低温のとき負. ハッチは温度変化が正の領域. 黒の正方形は土地利用を変更した領域, 黒の細線は海岸線. 1 段目から順に, 2017 年, 2018 年, 2019 年, 2020 年, 2021 年.

3.3 地表の熱収支

土地利用を混交林に変更したことで引き起こされた気温低下の要因を調べるため、地表面の熱収支を都市ありと都市なしで比較した。

3.3.1 熱収支

地表面の熱収支は以下の式で表される。

$$F_s^\downarrow(1 - \alpha) + \epsilon F_l^\downarrow - \epsilon \sigma T_s^4 - H - L = G \quad (3.1)$$

F_s^\downarrow は地表における下向き短波放射、 α はアルベド、 ϵ は放射率、 F_l^\downarrow は地表における下向き長波放射、 σ はステファンボルツマン定数、 T_s は地表面温度、 H は地表における上向き顕熱輸送、 L は地表における上向き潜熱輸送、 G は地中から地表への熱輸送である。各項の物理的意味は、左辺第1項が地表における下向き短波放射吸収、第2項が地表における大気からの下向き長波放射吸収、第3項が地表における上向き長波放射射出、第4項は蒸発による顕熱輸送、第5項が地表から大気への顕熱輸送。右辺は地中から地表への熱輸送である。ここで示されている6つの熱のフラックスのうち、大気を直接加熱するのは左辺第3項の顕熱輸送である。

地面に出入りする熱を土地利用を変更した領域について平均し、各成分ごとに分けて値を書いたものが図3.4である。「都市あり」「都市なし」どちらの場合も顕熱が地表面から大気へと輸送されており、大気は地面によって加熱されているが、その輸送量は「都市なし」の方が「都市あり」に比べ約 20W/m^2 小さい。この顕熱輸送による大気加熱の違いは、「都市あり」と「都市なし」で気温差を生じた原因のひとつと推察される。

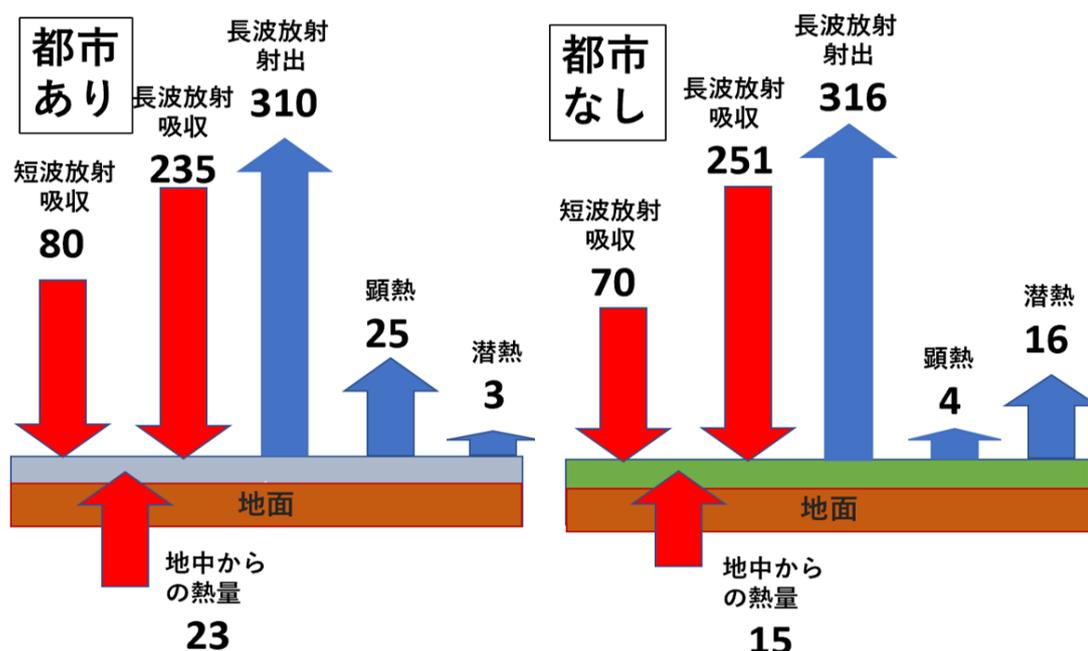


図 3.5: 地表に出入りする熱のフラックス (W/m^2)。土地利用を変更した領域の平均。2018年12月下旬10日間の平均。

3.3.2 保水力, アルベド, 熱慣性

土地利用を都市から混交林に変更したことで、地表から大気への顕熱輸送が減った(3.3.1節)。その原因も地表の熱収支から推察することができる。地表の熱収支はつり合いをとるため、顕熱輸送量の変化は他の熱輸送量の変化によって補われる。地表利用を都市から混交林に変えた場合には、潜熱による地表の冷却の増加、下向き短波放射吸収による加熱の減少、地中からの熱による加熱の減少、以上3つが、顕熱輸送による地表冷却の減少とつり合うように変化した。

3つの過程による熱輸送の変化は、いずれも土地利用の変更によって説明することができる。混交林は都市に比べて保水力が大きいため、地表には水分が多く存在し、それが蒸発することで、都市よりも効率よく地表が冷却される。混交林は都市に比べてアルベドが大きいため、短波放射吸収は小さく、地表の加熱が小さい。また、混交林は都市よりも熱慣性が小さいため、地中から熱輸送が小さく、地表の加熱が小さい。

第4章 まとめ

領域気象モデル WRF を用いて、岡山市中心部の土地利用を都市から混交林に変更し、2017年～2021年各年の12月について空間解像度 1km の気象シミュレーションをおこなった。いずれの年も土地利用を変更した領域で 1～2.5℃の気温低下が見られた。地表面の熱収支の解析から、都市と混合林で保水力、アルベド、熱慣性が異なることが気温低下の原因と推察された。

謝辞

本研究を進めるにあたって、ご指導いただきました主指導教官であるはしもとじょーじ教授には心より深く感謝申し上げます。また同研究室の桑山さんには本研究に関してたくさんの助言等をいただきました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 重田・大橋, 岡山市を対象とした細密な気象観測によるヒートアイランド強度の解析, 日本気象学会 天気 56 (6), p443-454, 2009-06
- [2] 環境省 (2012) ヒートアイランド対策, 1章2節 ヒートアイランド現象の要因について, https://www.env.go.jp/air/life/heat_island/manual_01/02_chpt1-2.pdf
- [3] NCAR, WeatherResearchForecastingModel, <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>.
- [4] 日下博幸, 領域気象モデル WRF の都市気候研究への応用と課題, Journal of Geography120 (2) , p285-295, 2011.
- [5] Google Earth, <https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>
- [6] 気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [7] WRFUSERSPAGE, https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wrf.htm