都市における冬季夜間の気温低下抑制の要因に関する感度実験

Sensitivity experiments for the factors of temperature decrease inhibition during winter night in urban area

川端 康弘*¹ 清野 直子*¹ 田中 泰宙*¹ 青栁 曉典*² Yasuhiro Kawabata Naoko Seino Taichu Y. Tanaka Toshinori Aoyagi

*1 気象庁気象研究所 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency *2 気象庁地球環境・海洋部 Global Environment and Marine Department, Japan Meteorological Agency

Corresponding author: Yasuhiro KAWABATA, kawabata@ mri-jma.go.jp

ABSTRACT

We analyzed the factors of temperature decrease inhibition in urban area by sensitivity experiments of surface air temperature for changes of urban surface, using the Japan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model with the Urban Canopy scheme. Numerical experiments were performed in Kanto-Koshin area at a winter night in clear weather condition. For the control experiment, the urban heat island was well reproduced. The results of sensitivity experiments with various urban surface parameters were compared to those of the control experiment. The existence of buildings and its type effected mostly temperature decrease inhibition. From the experiment changed aspect ratio of buildings, the higher building inhibited temperature decrease than the lower building.

キーワード: ヒートアイランド, 最低気温, 単層都市キャノピースキーム, 建物アスペクト比, 顕熱フラックス

Key Words : Urban heat island, Minimum surface air temperature, Single layer urban canopy scheme, Aspect ratio of buildings, Sensible heat flux

1.はじめに

都市化の進展に伴い、都市と郊外に温度差が生じるヒー トアイランドが注目されるようになり、都市気象に関する 様々な研究が行われるようになってきた(1). 日本において もヒートアイランド研究は精力的に行われており⁽²⁾⁽³⁾,ヒ ートアイランドの実態や形成要因の解明に重点が置かれた 理学的研究から、ヒートアイランド緩和策といった工学的 な研究に至るまで多岐に渡っている(4)(5).近年では、病態 生理学的観点から熱中症に対しても関心が高まっており, 夏季のヒートアイランドに着目した研究も多い(6)(7).また、 都市周辺での短時間強雨に起因する災害の発生とあいまっ て、ヒートアイランド現象の一側面である熱的局地循環と 降水の関係に着目した研究も精力的に行われてきた (3)(8)(9)(10). 暖候期の日中においては都市の大気構造や熱収支 を把握するためにラジオゾンデ観測が行われた(11)(12). 一方 で、夜間にもヒートアイランドが見られ、移動観測からそ の要因が調べられた(13).

このように都市が大気に与える影響は小さくない. ヒー トアイランドの成因は都市化に伴う蒸発散の減少や人工排 熱,都市キャノピー内の熱収支変化などが挙げられる⁽⁶⁾⁽¹⁴⁾. 都市においても地表面フラックス観測が行われるようにな り、熱収支の定量的な把握が進んできた⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾.しかし、都 市では建物による放射の多重反射や人工排熱の影響など複 雑な様子を示しており、都市境界層の更なる理解が望まれ ている.

観測事実は都市境界層内の様々なプロセスを反映してい るが、それらを切り分けて把握することは困難である(4). そこで、ヒートアイランドのメカニズム解明には観測だけ でなく、数値モデルが有効なツールとなる.研究の目的や スケールに応じて、様々な数値モデルが用いられる(17).数 値モデルの再現性を高め、更には天気予報の精度を上げる ためには、都市大気についての理解を深めることが重要で あり、この知見がさらなる数値モデルの精度向上やプロセ ス解明に寄与する. コンピュータ技術の進展に伴い, 数値 モデルを用いたヒートアイランド研究が盛んに行われるよ うになった(18). 数値実験を行う際は粗度や熱特性などの地 表面パラメータを与えて、大気の流れの下部境界条件を決 定するが,物理的な凹凸や熱的な慣性が大きいとされる都 市域地表面の役割は大きく,気温などの計算結果を大きく 左右する. これらの計算設定を変更し, 再現性を把握する ことは、今後の数値モデルを用いた研究において有用な情

報を与える.

メソ気象モデルにおいては、都市の特徴を再現するスキ ームが開発されてきた. 領域気象モデルの一つである WRF (Weather Research and Forecasting) モデル⁽¹⁹⁾には単層都市 キャノピースキームが導入された⁽²⁰⁾⁽²¹⁾. WRF を用いた研 究では、入力データおよび地表面パラメータの変化に対す る感度実験⁽²²⁾や東京湾の海面水温の変化が都市大気環境 に及ぼす影響⁽²³⁾が調べられた.

また、気象庁では非静力学モデル JMA-NHM (Japan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model)⁽²⁴⁾ に単層都 市キャノピー (SPUC: Square Prism Urban Canopy) スキー ムが導入された⁽²⁵⁾. 気象庁はこの数値モデルを用いて、ヒ ートアイランド現象の観測及び監視に資する情報や最新の 科学的知見を、ヒートアイランド監視報告として 2005 年か ら毎年発行している⁽²⁶⁾. 数値モデルを用いた感度実験では 各々が与える寄与を見積もることができるものの、これま で JMA-NHM を用いて、都市地表面のパラメータを変更し て地上気温に与える影響を詳細に調査した研究は限られる ⁽¹⁰⁾⁽²⁷⁾.

数値モデルを用いた研究において,冬季 (寒候期) 夜間 のヒートアイランドについては,季節平均場の特徴を調べ るために晴天日や曇天日も含めた長期間の数値実験が行わ れてきた⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾.しかし,典型的なヒートアイランドが見ら れやすい冬季の晴夜⁽²¹⁾⁽²⁹⁾のみを扱った研究は少ない.そこ で,本研究ではあらためて冬季晴夜を対象とし,JMA-NHM を用いた感度実験を行い,ヒートアイランドを引き起こす 都市部夜間の地上気温低下抑制の要因を調査することとし た.

2. 方法

2.1 解析日

本研究では典型的なヒートアイランドが顕著に現れる冬 季晴天日を対象とし、夜間の気温低下に着目した.解析日 は2017年2月15日から16日である.当時の気象場を見る ために、天気図を図1に示す.本州付近では冬型は緩み、 関東地方は高気圧に覆われて快晴で、風速は弱い環境場で あった.

2.2 数值実験

本研究では気象庁非静力学モデル JMA-NHM⁽²⁴⁾⁽³⁰⁾を用 いた.計算領域を図 2 に示す.水平解像度は 2 km とし, 関東地方を解析対象領域とした.初期時刻は日本時間 2017 年 2 月 15 日 12 時 (JST) であり, 15 時以降を解析対象期間 とした.境界値は気象庁メソ解析を用いた.数値モデルの 仕様として,大気境界層は改良 Mellor-Yamada Level 3 スキ ーム⁽³¹⁾,地表面フラックスは Beljaars and Holtslag のスキー ム⁽³²⁾を用いた.また,都市の影響を評価するため単層都市 キャノピースキーム⁽²⁵⁾を用いた.この都市スキームでは格 子内に仮想的に配置された直方体の建物群を想定し,天空 率や日光率を用いて放射の計算を行う.本稿では,建物に よる影の影響を考慮した短波放射の分配を表現するために, 地面に日光が当たる面積割合を日光率と定義する.また, 大気と地表面・建物壁面・建物屋上面との熱や水蒸気の交 換を表現している.地表面種別は国土交通省の国土数値情



図1 地上天気図 (2017年2月16日6時 [JST]).



図2 数値モデルの計算領域.

赤色で示した領域は都市地表面の面積割合が 80 %以上 である都市格子を示す. (a) 2014 年版土地利用, (b) 1976 年版土地利用.

表1 基準実験および感度実験における条件設定.

感度実験については、基準実験から変更した設定のみを示している.なお、建物用地の 地表面熱拡散係数は基準実験、感度実験ともに同じ値である.

基準実験	表示	条件	設定	
基準	CTL (Control)	都市キャノピースキーム	あり	
		人工排熱	あり	
		土地利用	2014年版	
		建物種別	オフィスビル (熱物性値は表2)	
		建物アスペクト比(高さ/幅)	0.5	
		建物用地の粗度	3 m	
		建物用地の地表面熱拡散係数	7.5×10 ⁻⁷ m ² /s	
感度実験	表示	条件	設定	
都市化軽減	ModerateURB	都市キャノピースキーム	なし	
人工排熱なし	NoANTH	人工排熱	なし	
土地利用1976	KKD1976	土地利用	1976年版	
木造住宅	WOOD	建物種別	木造住宅 (熱物性値は表3)	
低アスペクト比	H/B=0.25	建物アスペクト比(高さ/幅)	0.25	
低粗度	Low z0	建物用地の粗度	0.2 m	

表2 建物種別におけるオフィスビルの熱物性値.

使用 [m] [W/(m K)] [J/(m ³ K)] 軽量コンクリート 0.06 0.779 1.607×10 ⁶ スチレン発泡板 0.025 0.037 3.516×10 ⁴ アスファルト類 0.01 0.11 9.209×10 ⁵ 産上 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 非密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ² プラスター 0.009 0.791 1.633×10 ⁶ 岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 衡電コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ²	建物	****	層厚	熱伝導率	体積熱容量
軽量コンクリート 0.06 0.779 1.607×10 ⁶ スチレン発泡板 0.025 0.037 3.516×10 ⁴ アスファルト類 0.01 0.11 9.209×10 ⁵ 産油 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 非密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ² プラスター 0.009 0.791 1.633×10 ⁶ 岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 簡通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ²		1/3 1-1	[m]	[W/(m K)]	[J/(m ³ K)]
スチレン発泡板 0.025 0.037 3.516×10 ⁴ アスファルト類 0.01 0.11 9.209×10 ⁵ 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 非密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ² プラスター 0.009 0.791 1.633×10 ⁶ 岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 簡通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶	屋上	軽量コンクリート	0.06	0.779	1.607×10 ⁶
アスファルト類 0.01 0.11 9.209×10 ⁵ 屋上 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 非密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ² プラスター 0.009 0.791 1.633×10 ⁶ 岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 簡通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ²		スチレン発泡板	0.025	0.037	3.516×10 ⁴
屋上 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 非密閉中空層 0.01 0.0241 *1 1.19×10 ³ *2 プラスター 0.009 0.791 1.633×10 ⁶ 岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 簡通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ²		アスファルト類	0.01	0.11	9.209×10 ⁵
非密閉中空層 0.01 0.0241 *1 1.19×10 ³ *2 プラスター 0.009 0.791 1.633×10 ⁶ 岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 簡量コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 *1 1.19×10 ^{3 *2}		普通コンクリート	0.15	1.395	1.934×10 ⁶
プラスター 0.009 0.791 1.633×10 ⁶ 岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 創壁 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241* ¹ 1.19×10 ^{3 *2}		非密閉中空層	0.01	0.0241 *1	1.19×10 ³ * ²
岩綿吸音板 0.012 0.064 2.512×10 ⁵ タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 創壁 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ²		プラスター	0.009	0.791	1.633×10 ⁶
タイル 0.008 1.279 2.009×10 ⁶ モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 側壁 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ²		岩綿吸音板	0.012	0.064	2.512×10 ⁵
モルタル 0.02 1.512 1.591×10 ⁶ 側壁 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 ^{*1} 1.19×10 ^{3 *2}	側壁	タイル	0.008	1.279	2.009×10 ⁶
側壁 普通コンクリート 0.15 1.395 1.934×10 ⁶ 密閉中空層 0.01 0.0241 * ¹ 1.19×10 ³ * ²		モルタル	0.02	1.512	1.591×10 ⁶
密閉中空層 0.01 0.0241 *1 1.19×10 ^{3 *2}		普通コンクリート	0.15	1.395	1.934×10 ⁶
		密閉中空層	0.01	0.0241 *1	1.19×10 ³ * ²
プラスター 0.012 0.791 1.633×10 ⁶		プラスター	0.012	0.791	1.633×10 ⁶

*1 空気0 ℃での値 *2 空気25 ℃での密度と空気の定圧比熱より算出



Evaluation of reproducibility

図3 東京大手町と我孫子の地上気温時系列. 地上1.5mの気温. 点は観測値(黒丸:大手町,白丸:我 孫子),線は基準実験の値(実線:大手町,破線:我孫子). 観測点の位置は図2を参照.

表3 建物種別における木造住宅の熱物性値.

建物	材料	層厚	熱伝導率	体積熱容量
		[m]	[W/(m K)]	[J/(m ³ K)]
屋上	スレート	0.012	1.198	1.821×10 ⁶
	合板	0.012	0.186	7.137×10 ⁵
	非密閉中空層	0.01	0.0241 *1	1.19×10 ³ * ²
	石こうボード	0.012	0.174	1.029×10 ⁶
側壁	モルタル	0.03	1.512	1.591×10 ⁶
	合板	0.009	0.186	7.137×10 ⁵
	非密閉中空層	0.01	0.0241 *1	1.19×10 ³ * ²
	石こうボード	0.012	0.174	1.029×10 ⁶

*1 空気0 ℃での値 *2 空気25 ℃での密度と空気の定圧比熱より算出

報土地利用3次メッシュデータを用いた.地表面種別のうち,「建物用地・幹線交通用地・その他の用地」を都市地表面とみなし,各格子における都市地表面の面積割合が80%以上の場合に,その格子に都市スキームを適用した(図2). 建物用地の建蔽率は60%とした.

都市地表面状態が変化した時の気温への影響を調べるため、地表面パラメータを変化させた感度実験を行った(表 1). 基準実験では、都市スキームを適用し、人工排熱⁽³³⁾も 付加した現実に近い設定とした.建物の熱特性はオフィス ビルとし、その熱物性値⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾を表2に示す.建物のアスペ クト比(高さH/幅B)は0.5と仮定した⁽²⁷⁾.各格子におい て建物の占める割合は前述の土地利用状況に応じて与えて いる.

次に比較対照実験を示す.「都市化軽減」実験では都市キ ャノピースキームを適用せず,都市格子の熱特性はコンク リートに近い値とした⁽¹⁰⁾.この実験は立体的な建物を配置 しない平板とした実験である.「人工排熱なし」実験は都市 キャノピースキームを適用するが,人工排熱は付加しない 実験である.「土地利用 1976」実験は土地利用データを 1976 年版とし,過去の土地利用状態を表現する.「木造住宅」実 験は建物の熱特性を木造住宅とした.その熱物性値⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ を表3に示す.「低アスペクト比」実験は建物アスペクト比 を基準実験の 1/2 である 0.25 とした.この実験は建物の立 体構造が基準実験よりも扁平な実験である.「低粗度」実験 は都市格子における建物について,地表面パラメータの一 つである粗度長を3mから0.2mに小さくした実験である. この粗度長は土地利用の地表面種別「その他の農用地」に 用いられている値と同じである.この感度実験により建物 による粗度長の増加の効果の違いを調べる.

3.結果と考察

基準実験と地上観測値との比較について、都市部に位置 する大手町と郊外の我孫子における地上気温時系列を図 3 に示す.地上観測値は気象庁のアメダス⁽³⁶⁾データを用いた. 大手町は観測場所の移転(2014年12月)に伴い「東京」ア



図4 地上気温と風向・風速分布図 (2017年2月16日6時 [JST]).

地上 1.5 m の気温および地上 10 m の風向・風速. 左から基準実験,感度実験,それらの気温差. 感度 実験においては,(a)「都市化軽減」実験,(b)「人工排熱なし」実験,(c)「土地利用 1976」実験. メダスではなくなったが,移転後も継続して研究観測が行われた⁽³⁷⁾.図3に示す基準実験の結果は観測値と良く対応している.大手町では我孫子よりも最低気温が約6℃高く, 夜間にかけての気温の下がり方が小さい.これは都市の気温の特徴を示しており,明け方6時の気温分布図(図4の 左図)を見ても,基準実験ではヒートアイランドの構造がよく再現されている.

ヒートアイランドの広がりを見るため,図4に2017年2 月16日の明け方6時の地上気温と風向風速の分布図を示す. 左から,基準実験,感度実験,それらの差であり,基準実 験と感度実験の気温を比較する.「都市化軽減」実験 (図 4a) と「人工排熱なし」実験 (図 4b) では、いずれも基準 実験の方が大手町周辺の都市部において高温域となってい る.風速は弱く、ヒートアイランドが現れやすい気象場と なっている.しかし、基準実験と感度実験の気温差に着目 すると、「都市化軽減」実験の方が、気温差が1.2 ℃以上と なる領域が広い.このことは人工排熱よりも、建物の配置 を考慮することによる気温への寄与が大きいことを示して いる.また、図5に示すように人工排熱が大きい領域は都 市部に限られているため,基準実験と「人工排熱なし」実 験の気温差が 1.2 ℃以上となる領域も都市部の狭い範囲に 集中している. 次に、「土地利用 1976」 実験 (図 4c) では、 基準実験との気温差が大手町周辺の都市部で0.4 ℃以下と ほとんどなく、その周辺部で大きくなっている.郊外で都 市化が進み、ヒートアイランドの領域が拡大したことを示 している. 曇天日も含めた冬季2か月間の実験(「土地利 用1976」実験と同じ土地利用で行った実験)を平均した結 果(27)では、明け方6時の気温低下抑制の効果は小さい.し かし、放射冷却の効果が大きく現れる冬季晴天夜間では気 温差が大きく,郊外の都市化の影響が強く効いていると考 えられる.

表1に示したすべての感度実験について,基準実験との 気温差を時系列に示したものを図 6aに示す.なお,都市部 の平均的な気温を調べるため図 6bの領域平均値を用いた.



図 5 人工排熱分布図 (2017 年 2 月 16 日 6 時 [JST]).

各感度実験の最低気温が現れる明け方6時頃において,基 準実験との気温差が最も大きいのは「都市化軽減」実験と 「木造住宅」実験である.しかし,気温差の開き方は異な り,「都市化軽減」実験では16時頃から急速に差が大きく なっていくのに対し,「木造住宅」実験では緩やかである. これは「都市化軽減」実験では急速に気温が下がっていく ためである.気温差が最も大きくなる時刻以降の気温差の 減少傾向にも違いが見られる.「木造住宅」実験では7時頃 から気温差が急速に小さくなっており,日の出以降気温が 急上昇したことを示している.

続いて、基準実験との気温差が大きいのは「人工排熱な し」実験と「低アスペクト比」実験である.これら2つの 差が同程度であることは興味深く、人工排熱だけでなく建 物の形状の違いが重要であることを示している.一方、「人 工排熱なし」実験においては、9~12 時頃に全ての感度実 験のなかで最も気温差が大きい.日中は人間活動が活発に なり、当時間帯では人工排熱による寄与が大きいことを示 している.

残りの「土地利用 1976」実験と「低粗度」実験は,夜間 それらの寄与は小さく,ほとんど気温差を生じない.「土地 利用 1976」実験において,図 6b で示した領域は 1976 年版



図 6 (a) 基準実験と感度実験との気温差時系列 (凡例の 略称は表1を参照). (b) 気温差の平均値を求めた都市部 の領域 (斜線部).

土地利用では既に都市化が進んでおり,2014年版土地利用 においても都市の状況が変化していないことを反映してい る.都市化が郊外で進んでいることは図4cで示した.「低 粗度」実験においても気温差が小さいのは,夜間風速が弱 く,鉛直方向の熱交換が基準実験とともに小さかったこと が考えられる.

図 6a に示した結果では、基準実験との気温差が「低アスペクト比」と「人工排熱なし」実験で同程度となっている. 建物の形状は気温に与える影響が大きいと考えられるため、

「低アスペクト比」実験のほか、様々なアスペクト比に設 定した感度実験を行う.アスペクト比 (H/B) を変更すると, 地表面から見た天空開放度, すなわち天空率も変化する. 天空率が変化することによって最低気温にどの程度違いが 見られるかは、都市の気温の特徴を把握する上でも重要と なる.図7に天空率と最低地上気温との関係を示す.図7 にプロットしたデータは図 6b に示した領域平均値である. 基準実験のアスペクト比は 0.5,「低アスペクト比」実験は その半分の 0.25 である. さらにアスペクト比を 0.75 と 1 にした実験を追加した. 図7に示すように、アスペクト比 が大きいほど天空率は小さく、最低気温が高い. このこと は建物の高層化によって最低気温が下がりにくくなること を示している.アスペクト比が 0.25 の実験における最低気 温と、比が1の時の最低気温の差は、2.8 ℃の開きがある. また、天空率と最低気温の分布はほぼ直線関係になってい る.図3において都市部と郊外の気温時系列を示したが、 都市部の観測点である大手町では周囲がビルに囲まれてい る (天空率が小さい) が, 我孫子では周囲に高い建物が存 在しない (天空率が大きい). そのため, 最低気温の観測値 は大手町の方が高く、図7に示した結果を支持している. なお、アスペクト比を変更した実験間の気温時系列を見た ところ、最低気温が現れる時刻に差はなかった.表1に示 した「都市化軽減」実験は都市の建物群の存在を考慮しな





い実験であるため、天空率は1と想定される. その場合の 最低気温は - 1.4 ℃となり、基準実験よりも4.4 ℃低い.

地上気温は地表面温度と密接に関連しているが、仮想的 な都市の平均的な表面温度を評価するために、都市多層放 射スキームを用いた実験から都市表面温度上昇ポテンシャ ルが調べられた(38). これは放射平衡状態において、建物が 配置された都市表面の日平均放射温度と平坦な表面の日平 均放射温度の差で定義され、立体的な建物による温度上昇 の寄与を評価する指標である. その結果, 天空率の減少と ともに都市表面温度上昇ポテンシャルは大きくなる結果を 得ており、アスペクト比が大きくなるほど、すなわち建物 が高層化するほど、都市の表面温度は大きくなることを示 している.既存研究(38)では日平均放射温度を扱っているが、 本研究の天空率と最低地上気温の関係も同様の結果を得て おり、都市における最低気温は放射収支の変化に強く影響 することを示唆している. また, 実際の都市部で夜間ヒー トアイランドの成因を観測的に調べた研究(13)では、大気の 混合とともに天空率の低下による長波放射損失の減少が重 要であることが示された.図 6a より「都市化軽減」実験は 気温に与える寄与が最も大きく、本研究においても都市部 に存在する建物群が、都市の気温を決める上で大きな要因 であることを裏付けている.

建物の形状や熱特性が気温に与える要因を調べるため, 都市キャノピー内の顕熱フラックスを比較する.図8は建 物各面 (屋根面,壁面,地表面) からの顕熱フラックスと 人工排熱を示す.示した値は図 6b と同じ領域平均値である. 建物による熱輸送に着目するため、基準実験 (図 8a) にお いて建物各面から顕熱フラックスを比較する. 夜間におい ては壁面からのフラックスが屋上面や地表面よりも大きく, 正の値となっているため都市キャノピー内へ熱が輸送され ていることを示している.夏季夜間を想定したヒートアイ ランド要因分析の研究では,建物各面の表面温度を比較し ているが、日中から夜間にかけて壁面の表面温度の冷却率 が最も小さく、明け方において表面温度が最も高くなって いる(39). 本研究において、夜間に壁面からのフラックスが その他の面よりも大きいということは、壁面の表面温度も 高いことを示しており、既存研究(39)とも整合的である.こ の建物各面からのフラックスが、都市部の気温を決定する のに大きく影響していると考えられる.

建物の形状による違いに関して,基準実験(図 8a)と「低 アスペクト比」実験(図 8b)を比較すると,夜間において はともに人工排熱からの寄与が大きい.しかし,実験間の フラックスの違いに着目すると,屋根面,地表面からの各 フラックスと人工排熱に差は見られず,壁面からのフラッ クスは基準実験の方が大きい.さらに,図7におけるアス ペクト比を1にした実験でも同様に調べたところ,やはり 屋根面,地表面からの各フラックスと人工排熱の差はほと んどなく,壁面からのフラックスは基準実験よりも大きい 結果となっていた.すなわち,建物の高層化は夜間の壁面 から大気に向かう熱輸送を増加させ,都市キャノピー内の



図8 建物各面からの顕熱フラックスと人工排熱. (a) 基準実験,(b) 「低アスペクト比」実験,(c) 「木造 住宅」実験.各グラフの凡例は上から屋根面,壁面,地 表面からの各フラックス,人工排熱.値は図6bに示した 領域平均値.

大気を暖めることを示している.このことは図7に示した 天空率が減少するほど,最低気温が高くなる要因の一つと 考えられる.

図 6a に示すように、「木造住宅」実験の寄与は「都市化 軽減」実験と同様、最低気温への寄与が最も大きい.建物 の熱特性による違いを比較するため、「木造住宅」実験にお ける都市キャノピー内の顕熱フラックスを図 8c に示す.壁 面からのフラックスに着目すると、18 時頃から夜間はほぼ 負の値となっている.これは大気から建物に向かって熱が 輸送されていることを意味している.キャノピー内の各フ ラックスの合計でも夜間は負の値となり、都市キャノピー 内の大気を冷やす方向に寄与している.オフィスビルを想 定している建物の基準実験と比較して、建物の熱特性が気 温に与える影響が大きいことを示唆している.

4.結論

本研究では,気象庁非静力学モデルを用いて,都市キャ ノピースキームの都市地表面パラメータを変化させた感度 実験を行い、都市の特徴が地上気温に与える影響を調査し た. 特に、冬季夜間晴天日における都市の気温低下抑制に 着目して解析した.都市化に伴う地表面状態の変化は夜間 の冷却を抑制する.最も寄与が大きかったのは、建物の有 無と建物の熱特性による違いであった. さらに、建物の形 状による違いを調べたところ、建物のアスペクト比が大き いほど、すなわち建物が高層化するほど夜間の気温低下が 抑えられていた. また, 天空率が小さいほど最低地上気温 も高くなっていた.このことは、建物の立体構造による寄 与が大きいことを示している.そして、都市キャノピー内 の顕熱フラックスの変化を比較したところ、建物の高層化 や熱特性の違いが熱輸送に影響していることがわかった. 特に建物壁面からの熱輸送が大きく寄与しており、都市域 の気象場の数値解析においては建物の立体構造を考慮する 必要性があらためて示唆された.

解析日が1日と短期間であるが,弱風晴天日の夜間とい う気象場で問題を単純化し,ある種の理想実験として本研 究は意義がある.ヒートアイランドの解明には個々の事例 解析の積み重ねが重要である.一方,都市気候研究や統計 的な精度検証という面では長期間における数値実験も必要 であり,季節的な違いを調べることも今後の課題である. 近年では都市と短時間強雨の関係にも注目が集まっており, 複雑なプロセスを有する都市気象の基礎的な研究を継続す る必要がある.

謝辞

本研究において気象研究所の五十嵐康人博士 (現所属: 茨城大学),新藤永樹主任研究官,山本哲主任研究官,志藤 文武技術専門官 (現所属:網走地方気象台)に有意義なコ メントを頂いた.本研究の一部は JSPS 科研費 JP17H02964 の助成を受けたものである.

参考文献

- M. Kanda, Progress in urban meteorology: a review, Journal of the Meteorological Society of Japan, 85B (2007), pp.363-383.
- (2) F. Fujibe, Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring, International Journal of Climatology, 31 (2011), pp.162-173.
- (3) J. Matsumoto, F. Fujibe and H. Takahashi, Urban climate in the Tokyo metropolitan area in Japan, Journal of Environmental Sciences, 59 (2017), pp.54-62.
- (4) 中川清隆,わが国における都市ヒートアイランド形成要因,と くに都市ヒートアイランド強度形成要因に関する研究の動向, 地学雑誌,120(2) (2011), pp.255-284.
- (5) Md. Nuruzzaman, Urban heat island: Causes, effects and mitigation measures - a review, International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 3(2) (2015), pp.67-73.
- (6) 藤部文昭, 都市のヒートアイランド, 天気, 54 (2007), pp.9-12.
- (7) 佐藤真由美・大橋唯太、岡山県倉敷市における夏季ヒートアイ ランド現象の長期観測, Naturalistae, 15 (2011), pp.23-30.
- (8) F. Fujibe, H. Togawa and M. Sakata, Long-term change and spatial anomaly of warm season afternoon precipitation in Tokyo, SOLA, 5 (2009), 17-20.
- (9) H. Kusaka, K. Nawata, A. Suzuki-Parker, Y. Takane and N. Furuhashi, Mechanism of precipitation increase with urbanization in Tokyo as revealed by ensemble climate simulations, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53 (2014), pp.824-839.
- (10) N. Seino, T. Aoyagi and H. Tsuguti, Numerical simulation of urban impact on precipitation in Tokyo: How does urban temperature rise affect precipitation?, Urban Climate, 23 (2018), pp.8-35.
- (11) 吉門洋・中島虹・川本陽一・大岡龍三,東京の市街化地域を 通過する海風の熱収支,天気,61 (2014), pp.541-548.
- (12) 菅原広史・相曽豪夫・小田僚子・清野直子,都市と郊外にお ける日中の大気加熱量の比較,日本ヒートアイランド学会論文 集,10 (2015), pp.1-5.
- (13) 榊原保志・三枝あかね,晴天日と曇天日のヒートアイランド 強度の違いと夜間ヒートアイランドの成因,天気,49 (2002), pp.533-540.
- (14) T. R. Oke, Boundary Layer Climates. 2nd ed. (1987), Methuen, Co. Ltd., London, 435pp.
- (15) 森脇亮,都市におけるフラックス観測,水文・水資源学会誌, 29(1) (2016), pp.57-67.
- (16) H. Sugawara, R. Oda and N. Seino, Urban thermal influence on the background environment of convective precipitation, Journal of the Meteorological Society of Japan, 96A (2018), pp.67-76.
- (17) P. A. Mirzaei, Recent challenges in modeling of urban heat island, Sustainable Cities and Society, 19 (2015), pp.200-206.
- (18) 日下博幸,都市気候モデリング研究の取り組みと今後の課題, 天気, 55 (2008), pp.227-240.
- (19) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note

NCAR/TN-475+STR, (2008), p.126

- (20) 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,地学雑誌,120(2) (2011), pp.285-295.
- (21) H. Kusaka, F. Chen, M. Tewari, J. Dudhia, D. O. Gill, M. G. Duda, W. Wang and Y. Miya, Numerical simulation of urban heat island effect by the WRF model with 4-km grid increment: An inter-comparison study between the Urban Canopy Model and Slab Model, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90B (2012), pp.33-45.
- (22) 秋本祐子・日下博幸,入力データおよび地表面パラメータの 変化に対する領域気象モデル WRF の感度実験-夏季晴天日の 関東平野を対象として-,地理学評論,83-3 (2010), pp.324-340.
- (23) 小田僚子・神田学・森脇亮,直接測定に基づく東京湾海表面 温度が都市の気温へ及ぼす影響,水工学論文集,52 (2008), pp.283-288.
- (24) K. Saito, T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model, Monthly Weather Review, 134 (2006), pp.1266-1298.
- (25) T. Aoyagi and N. Seino, A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50 (2011), pp.1476-1496.
- (26) 気象庁, ヒートアイランド監視報告 (2005), p.26
- (27) T. Aoyagi, N. Kayaba and N. Seino, Numerical simulation of the surface air temperature change caused by increases of urban area, anthropogenic heat, and building aspect ratio in the Kanto-Koshin area, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90B (2012), pp.11-31.
- (28) 原政之・日下博幸・木村富士男・若月泰孝,気候変動が首都 圏の都市ヒートアイランドに及ぼす影響-冬季を対象として-, ながれ,29 (2010), pp.353-361.
- (29) 藤部文昭, 観測データから見た日本の都市気候, 気象研究/ ート, 224 (2012), pp.1-23.
- (30) Japan Meteorological Agency, Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency (2013), pp.71-93.
- (31) M. Nakanishi and H. Niino, An improved Mellor-Yamada level-3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog, Boundary-Layer Meteorology, 119 (2006), pp.397-407.
- (32) A. C. M. Beljaars and A. A. M. Holtslag, Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models, Journal of Applied Meteorology, 30 (1991), pp.327-341.
- (33) 妹尾泰史・神田学・木内豪・萩島理, 潜熱割合を考慮した人 工排熱時空間分布の推計と局地気象に対する影響,水工学論文 集,48 (2004), pp.169-174.
- (34) 青栁曉典・清野直子,メソ数値予報モデルと都市,気象研究ノ ート,224 (2012), pp.273-301.
- (35) 財団法人省エネルギーセンター,平成16年度ヒートアイラン ド現象緩和に対する省エネ等の効果に関する調査報告書 (2005),

pp.149-155.

- (36) 来海徹一,運用を開始した地域気象観測システム,測候時報,42 (1975), pp.135-167.
- (37) 志藤文武・清野直子・山本哲・藤部文昭・青栁曉典, 植栽・ 周辺構造物による風通しの変化が気温観測に与える影響, 風工 学シンポジウム論文集, 24 (2016), pp.91-96.
- (38) T. Aoyagi and S. Takahashi, Development of an urban multilayer radiation scheme and its application to the urban surface warming potential, Boundary-Layer Meteorology, 142 (2012), pp.305-328.
- (39) H. Kusaka and F. Kimura, Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model, Journal of Applied Meteorology, 43 (2004), pp.1899-1910.

(Received July 12, 2018, Accepted Nov 9, 2018)