70. 広島市における夏季の気温・湿度分布推定および冷房負荷の分布特性に関する研究

—メソ気象モデル WRF を用いた検討—

Cooling load mapping using the summer temperature and humidity distributions in Hiroshima

- Simulation using the meso-scale meteorological model WRF-

大田修平* 松尾薫** 横山真* 佐々木唯* 田中貴宏***
Shuhei OTA* Kaoru MATSUO** Makoto YOKOYAMA* Yui SASAKI* Takahiro TANAKA***

In recent years, temperatures in urban areas have risen because of climate change and urban heat island effects. As one measure, cooling effects of sea breezes have attracted attention, but sea breezes cause high humidity in coastal areas. Consequently, this study was conducted to map the cooling load potential of business and residential buildings using summer temperature and humidity distribution maps in Hiroshima to propose future land use. First, all city areas are classified into zones using the local climate zone concept. Then, summer temperature and humidity distributions are estimated using the meso-scale meteorological model WRF with using the map produced in the prior step. Finally, cooling load potentials are calculated for business and residential buildings using summer temperatures and the humidity distribution described above.

Keywords: meso-scale meteorological model, cooling load, cooling enthalpy hour, urban heat island, local Climate Zone

メソ気象モデル, 冷房負荷, 冷房エンタルピーアワー, 都市ヒートアイランド, ローカルクライメートゾーン

1. はじめに

近年、わが国の多くの都市部で、地球温暖化および都市ヒートアイランド現象による都市高温化が発生している¹⁾。この都市高温化緩和を意図して、その実態とメカニズム把握を目的とした都市気温分布調査はこれまでに数多く行われてきた。例えば岡田ら²⁾は多治見市周辺域を対象に気温定点観測（15 地点）を行い、その結果から盆地底に位置する多治見市中心部の気温が昼夜ともに相対的に高いことを示している。また、武市³⁾は南国市において夜間気温移動観測を行い、市街地中心部と郊外との気温差が最大で 4.0℃ あること、それは主に人為的要因（建築物・人口密度等）により形成されていることを明らかにしている。斉藤ら⁴⁾は、熊本市内 160 地点にて気象観測（気温・湿度）を行い、市中心部の夜間、明け方の気温が比較的高く、またそれは周辺土地被覆の影響であることを示している。岩井ら⁵⁾は長野市、松本市、前橋市、岐阜市、甲府市を対象に行った気象観測（気温・湿度）結果から、いずれの都市においても公園周辺域は相対的に気温が低く、これは主に植生によることを示している。

特に夏季の高温化は、冷房エネルギー消費の増大等を引き起こすと言われており、例えば鳴海ら⁶⁾は、大阪府域を対象に電力およびガスの供給・消費実績データ等を用いて、都市高温化がエネルギー消費（住宅・業務建物）に及ぼす影響を大阪市・大阪府を除く大阪府・大阪府全域別に定量化しており、業務建物は夏季・冬季ともに昼間の影響が大きく、住宅は地域により変動傾向が異なること等を明らかにしている。しかし、都市内気温分布は場所によりその特性が異なるため、各場所の気温変化に応じたエネルギー消費変動量を把握する必要があると考えられる。平野ら⁷⁾は、

気象モデルを用いて緑被率の異なる土地被覆データから気温分布を推定し、それらの比較分析結果から気温変化がエネルギー消費量に与える影響を地図化して示している。

ところで、夏季の都市高温化緩和策の一つとして、海風の導入が有効と考えられる。例えば十二村ら⁸⁾は、仙台市を対象に夏季気温観測を行い、その結果を用いて海風による気温緩和効果の定量化を行っている。また谷口ら¹⁰⁾は、広島市大田川周辺域にて行った気象観測（気温・湿度・風向・風速）結果を用いて、海風が持つ都市高温化緩和効果と都市内に形成される風の道の存在を明らかにしている。一方、海風は絶対湿度の上昇をもたらすと言われており¹¹⁾、海風の影響の大きい沿岸部は内陸部に比べて、建物に対する外気負荷（顕熱および潜熱による負荷）の増大が予想される。

以上の研究背景をふまえ、本研究では広島市を対象に建物に対する外気負荷特性を考慮した土地利用配置の提案を行うことを意図し、メソ気象モデル WRF による数値シミュレーションを通して、夏季日中の気温・湿度・風分布の推定を行い、一般的な規模の住宅・オフィスビルを想定した冷房負荷を把握し、その分布特性を明らかにすることを目的とした。なお本研究の成果は、最終的に広島市の都市環境気候図¹²⁾¹³⁾作成に活かすことを意図している。

2. 研究概要

2-1. 対象地の概要

本研究は、広島県広島市を対象とした。広島市の地形はデルタ平野を中心に形成され、それを取り囲むように東部・西部・北部に丘陵地が広がり、南は瀬戸内海に接している。また広域でみると、この地域は中国山地、および四国山地

* 学生会員・広島大学大学院工学研究科（Graduate School of Engineering, Hiroshima University）

** 正会員・東京大学大学院工学系研究科（The University of Tokyo）

*** 正会員・広島大学大学院工学研究科（Graduate School of Engineering, Hiroshima University）

に囲まれているため一般風が弱く、海陸風がよく発達する地域と言われている。参考として、広島地方気象台の典型的夏季晴天日⁽¹⁾の風配図を図1上段右に示す。この図より、広島市沿岸部では南西方向からの海風が卓越していることがわかる。

2-2. 数値計算概要

WRF (Weather Research & Forecasting) は、米国大気研究センター (NCAR) 等の研究機関により開発されたメソスケールの気象モデルで、気象モデル MM5 の後継モデルである。本研究では WRF version 3.7.1 の ARW を用いた。計算対象領域を図1上段左に示す。ネスティング手法を用い、Domain1 は解像度 3km の 120×120 格子、Domain2 は解像度 1km の 103×103 格子とした。なお、分析対象は Domain2 内の図1下段に示す範囲とした。

計算条件を表1に示す。計算期間は、典型的な夏季晴天日が一定期間続く 2013 年 8 月 4 日 0 時 (UTC) ～8 月 17 日 0 時 (UTC) までの 13 日間とした。また土地利用データは、国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ、および都市地域土地利用細分メッシュデータを用いて作成した。なお土地利用は「都市」・「混合林」・「不毛/疎らな植生」・「水面」・「草地」・「灌漑された耕作地」・「乾燥した耕作地」に分類し⁽²⁾、それぞれ物性値⁽³⁾等を設定した (図2)。さらに、地表面過程に都市キャノピーモデル (UCM) を用いるため「都市」の土地利用区分を 3 分類とした。具体的な「都市」の分類方法は次章にて述べる。

2-3. 研究の流れ

本研究は、以下の手順で進めることとした。

- (1) メソ気象モデル WRF の入力条件作成方法の検討
- (2) メソ気象モデル WRF による数値計算
- (3) 数値計算結果の精度検証
- (4) 冷房エンタルピーパワーの算出
- (5) 冷房負荷 (ポテンシャル) の算出、および分布作成

3. メソ気象モデル WRF の入力条件作成方法の検討

本章では 2-2 で述べた「都市」の土地利用区分の細分類方法の検討を行うこととする。なお、3-1 でその分類方法を示し、3-2、3-3 で具体的な分類結果を示す。

3-1. LGZ の概要、および分類方法の検討

既往研究⁽¹³⁾では、都市地域土地利用細分メッシュデータ (国土数値情報) 等を用いて、各メッシュ内の建物高さ別 (高層・低層) 面積割合を算出し、それを指標として都市の分類が行われている。しかし本来、都市の気候は建物高さ種別だけではなく、様々な要因により形成されると考えられる。

そこで本研究では Local Climate Zone (LCZ)⁽¹⁴⁾ の概念を参考に、分類方法を検討することとした。LCZ とは「都市や地域における気候特性が一樣とみなせる最小領域」であり、森山ら⁽¹⁵⁾の「クリマトープ」とほぼ同様の概念と考えられる。さらに Brousse ら⁽¹⁶⁾は従来の土地利用データと比

図-1 上段左:計算対象領域 下段:対象地
上段右:典型的夏季晴天日の風配図 (10時～20時)

表-1 計算条件

計算期間	2013年8月4日0時 (UTC) ～2013年8月17日0時 (UTC)
鉛直格子	30層 (地表～100hPa)
水平格子	Domain1: 3km (120×120格子), Domain2: 1km (103×103格子)
気象データ	気象庁メソ気象観測値 (3時間間隔, 10km格子, 20層) NCEP再解析全球気象観測データ (6時間間隔, 1°格子, 17層)
土地データ	標高データ: 国土数値情報一標高・傾斜度5次メッシュデータ (空間解像度約250m) 国土数値情報一土地利用細分メッシュデータ (空間解像度約100m): 平成21年度作成 国土数値情報一都市地域土地利用細分メッシュデータ (空間解像度約100m): 平成21年度作成 広島市都市計画基礎調査 (建物用途データ): 平成12年度 ArcGIS データコレクション (ESRIジャパン(株)) の建物データ: 平成23年発行 現存植生図 (環境省): 第2回 (昭和58～62年度)、第3回 (昭和58～61年度)、第4回 (平成元～5年度)、第5回 (平成6～10年度) の自然環境保全基礎調査結果を重ね合わせたもの
雲物理過程	Purdue Lin scheme
放射過程	長波: Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave 短波: MM5 (Dudhia) Shortwave
大気境界層過程	Mellor-Yamada-Janjic PBL
地表面過程	都市域: Single Layer Urban Canopy Model (UCM) 非都市域: Noah LSM
積雲パラメタリゼーション	なし
四次元同化	なし

図-2 土地利用図 (Domain2)

較して、LCZ の概念を参考に作成した土地利用データを用いた数値計算結果の精度が改善されたことを明らかにしている。LCZ の概念、および文献 17 を参考に作成した分類方法を以下に示す。

- ① 図 2 の土地利用図 (Domain2) で「都市」に分類した 1km メッシュ (以降都市メッシュとする、455 個) を抽出し、それらのメッシュ毎に都市地域土地利用細分メッシュデータの土地利用別の面積を算出。
- ② 都市メッシュから図 1 に示す気温観測点 (48 地点⁽⁴⁾) が位置するメッシュ (48 個) を抽出。
- ③ ②で抽出したメッシュ内の土地利用別面積を説明変数、気温観測点 (48 地点) の時刻別平均気温 (典型的夏季晴天日) を目的変数とした重回帰分析を行い、気温と相関が高い土地利用を抽出。
- ④ 都市メッシュを対象に、抽出した土地利用別面積を変数としたクラスター分析結果を用い、細分類。

3-2. 重回帰分析結果

本節では重回帰分析結果 (分類方法③) を示す。なお、重回帰分析はステップワイズ法を用い、説明変数作成に用いた土地利用は「芝生・緑地」、「水面」、「森林」、「荒地」、「空地」、「道路・鉄道」、「高層建物」、「低層建物」、「低層建物 (密集地)」、「工場」、「公共施設等用地」、「海浜」の 12 種類⁽⁵⁾とした。時刻別の重相関係数を図 3 に示す。

まず、22 時～1 時の重相関係数が 0.7 程度と高いことから、夜間の気温分布に対して、ここで選択された説明変数による重回帰式はある程度の説明力を有していると考えられる。一方、17 時～18 時の重相関係数は 0.3 程度と相対的に低い。これは、この時間帯の気温は土地利用よりも海風の影響を受けるためと推察される。これらの結果より、重相関係数の高い時間帯で選択された土地利用を用いて、都市の気候特性を表現できると考え、最も重相関係数が高い時刻 (22 時) の気温との相関が高い土地利用である「荒地」、「森林」、「低層建物」を抽出した。

3-3. クラスター分析

本節ではクラスター分析結果 (分類方法④) を示す。なお、クラスター分析は Ward 法を用い、都市メッシュ (455 個) を 3 つのグループに分類することとした。

分類結果のうち広島市の都市メッシュ (189 個) を図 4 に示す。この結果と都市地域土地利用細分メッシュデータを比較し、各グループ内の土地利用割合の傾向を参考に各グループの呼称を下記のとおりとした。

「高層建物」：「高層建物」が多く存在。

「低層高密」：「低層建物」が多く存在。

「低層中密」：「低層建物」、「荒地」、「森林」が同程度存在。

4. 数値計算結果の精度検証と考察

4-1. 計算精度の確認

計算精度の確認を行うため、数値計算結果と観測値の比較を行った。気温・絶対湿度・風速の観測値は大気汚染常時監視測定局、広島地方気象台、および特別地域気象観測

図-3 重相関係数と標準偏回帰係数

図-4 LCZ に基づいた都市分類

表-2 計算精度 (気温)

観測点		Bias (°C)	RMSE (°C)
大気汚染	3 三篠小学校	0.59	1.08
常時監視測定局	7 可部小学校	-0.83	2.22
気象台	8 広島	0.27	1.03

表-3 計算精度 (絶対湿度)

観測点		Bias (g/kg)	RMSE (g/kg)
大気汚染	3 三篠小学校	1.83	1.08
常時監視測定局	7 可部小学校	0.86	2.22
気象台	8 広島	1.04	1.03
特別地域気象観測所	9 呉	0.29	1.12

表-4 計算精度 (風速)

観測点		Bias (m/s)	RMSE (m/s)
大気汚染 常時監視測定局	1 井口小学校	-0.02	0.52
	2 皆実小学校	0.08	0.51
	3 三篠小学校	-0.31	0.64
	4 安佐南区役所	0.32	0.86
	5 伴小学校	-0.02	0.63
	6 福木小学校	-0.07	0.72
	7 可部小学校	0.23	0.91

図5 風向・風速分布

図6 気温分布

図7 絶対湿度分布

所(図1)の1時間値を用いた。具体的には以下の Bias、RMSE、2つの指標を用いて、気温(3地点)、絶対湿度(4地点)、風速(7地点)の比較を行った。

$$(\text{Bias}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{yi} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{xi} \quad \cdots (4-1)$$

$$(\text{RMSE}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_{xi} - u_{yi})^2} \quad \cdots (4-2)$$

(N: サンプル数, u_{xi} : 観測値, u_{yi} : 計算値)

結果を表2、3、4に示す。風速は計算結果と観測値の差は比較的小さい。気温、絶対湿度はRMSEが最大で2.22とやや過大評価の傾向にあるが、計算値と観測値の差は概ね小さいと判断した。なお絶対湿度の過大評価は、都市メッシュ内の人工排熱(潜熱)の再現、および海水温分布の再現が不十分であることによるものと考えられるが、計算精度の向上は今後の課題としたい。

4-2. 計算結果の概要、および考察

計算結果の一部である2013年8月13日14時の風向・風速(地上10m)、気温(地上2m)、絶対湿度(地上2m)の水平分布を図5、6、7に示す。以下に、それぞれの主な傾向を記す。

・風向・風速分布(図5)

沿岸部の風速が相対的に大きく、南西方向からの風が卓越している。また広島市西部の沿岸部では南東方向からの風が卓越している。

・気温分布(図6)

沿岸部の気温が相対的に低く、内陸部では高温となる傾向が見られる。これは海風の進入による気温低減効果が沿岸部で大きいためと考えられる。特に沿岸部でも風速が大きいエリアで気温低減効果が大きい傾向が見られる。

・絶対湿度分布(図7)

沿岸部の絶対湿度が相対的に高く、内陸部にかけて徐々に低湿となる傾向が見られる。これは水蒸気を含む海風が沿岸部で吹いているためと考えられる。一方、内陸部西側の平野周縁部では絶対湿度が高く、これは市西部の森林の蒸散作用等によるものと推察される。

これらの計算結果から、海風の進入により沿岸部では相対的に気温は低く、絶対湿度は高くなる傾向にあると考えられる。

5. 冷房エンタルピーアワーの算出、および考察

5-1. 冷房エンタルピーアワーの算出方法

本章では冷房負荷(ポテンシャル)算出に用いる冷房エンタルピーアワー分布の算出を行う。本研究では文献18を参考に、冷房エンタルピーアワーを「気温 t 、絶対湿度 x の空気のエンタルピーが基準エンタルピー以上となる場合のエンタルピー差の時間積分」と定義し、以下の式より算出することとした。なお、基準エンタルピーは気温 $26[^\circ\text{C}]$ 、相対湿度 $50[\%]$ の空気エンタルピー $0.053[\text{MJ/kg}]$ とした。また冷房エンタルピーアワーは24時間の積算値であるため、24時間空調の建物冷房負荷と特に相関が高いとされている¹⁸⁾。

$$h = \sum_{t=1}^n \{1.006T_t + (1.805T_t + 2501)X_t - 0.053\} [\text{MJ} \cdot \text{h/kg}']$$

…(5-1)

(h : 冷房エンタルピーアワー $[\text{MJ} \cdot \text{h/kg}']$ 、 T_t : 各時刻の気温 $[^\circ\text{C}]$ 、 X_t : 絶対湿度 $[\text{kg/kg}']$)

5-2. 冷房エンタルピーアワー分布算出結果、および考察

図8 冷房エンタルピーアワー分布

2013年8月10~16日の計算結果(気温・絶対湿度)を用いて、都市メッシュの冷房エンタルピーアワー分布の日積算を算出した(図8)。この結果から、冷房エンタルピーアワーは、沿岸部で相対的に高く、内陸部では低いことが

図-9 住宅平面図 上段：2階 下段：1階

表-5 左：冷房運転時間（住宅）
右：冷房運転時間（オフィスビル）

平日	6時～9時, 12時～14時, 16～23時	平日	8時～18時
休日	7時～14時, 16時～23時	休日	8時～13時

わかる。これは水蒸気を含む海風の影響が、沿岸部で大きいためと考えられる。一方、沿岸部内中央部（図8 赤枠内）の冷房エンタルピーは比較的低いことがわかる。これは1日を通して、この地域が低温低湿であることによるものと推察されるが、これについては今後、既往研究¹³⁾の成果との比較から詳細な検討が必要と考えられる。

6. 冷房負荷（ポテンシャル）の算出、および分布作成

本章では4章、5章で算出した気温、絶対湿度、冷房エンタルピーアワーの1時間値をもとに1つのメッシュに住宅、オフィスビルそれぞれ1棟建てた場合の冷房負荷（ポテンシャル）の算出を行った。なお、今回は設定温湿度を26℃、50%の場合のみで行っているため冷房負荷のポテンシャルと表現することとした。6-1に計算概要、6-2に結果の考察をそれぞれ記す。

6-1. 冷房負荷計算概要

ここでは日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジウム（1985）で提案され、オフィス用・住宅用標準問題として作成された建物モデル¹⁹⁾²⁰⁾を用いて条件を

図-10 オフィスビル平面図

表-6 住宅の各室スケジュール条件設定（平日）

機器・照明発熱

室		6時	7時	8時	12時	13時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時
LD	照明	180W			0W		300W						
	機器	100W											
MB	照明	100W		0W								100W	
CB1, CB2	照明	0W	80W	0W						180W		0W	

在室人数

室	6時	7時	8時	12時	13時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時
LD	1	4		1				3				1
MB	1						0					1
CB1, CB2	1				0						1	

表-7 住宅の各室スケジュール条件設定（休日）

機器・照明発熱

室		7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時
LD	照明	180W			0W				300W						
	機器	100W													
MB	照明	100W	0W										100W		
CB1, CB2	照明	0W	80W	0W						180W				0W	

在室人数

室	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時
LD	4				3					4				1
MB	1	0			1					0				1
CB1, CB2	1						0							1

設定し、冷房負荷計算を行った。なお、本研究では室内熱負荷（貫流負荷、日射負荷、照明負荷、機器負荷、人体負荷）と外気負荷（顕熱、潜熱）の合計値を冷房負荷とすることとした。なお、蓄熱負荷およびすき間風負荷は夏季の冷房負荷への影響が比較的小さいと判断し、本研究では考慮しないこととした。住宅、オフィスビルの平面図を図9、10に、スケジュールを表5、6、7に示す。なお表5、6、7は文献²¹⁾を参考に設定した。またモデルの概要を以下に記す。

住宅

- ① 地上2階で階高2.7mの標準的な住宅で4人家族とした。
- ② 窓は厚さ3mmの吸熱ガラスで、室内側に明色のブラインドを設置するとし、日射遮蔽係数SC=0.53、熱貫流率K=4.49とした。また実効温度差ETDについては外壁構成から文献22、23の実効温度差ETD表の「中量外壁および

表-8 部材の物性値 (住宅)

部位	材料	熱伝導率 λ (W/m・K)	材厚 (m)	熱抵抗 R (m ² ・K/W)
屋根	外気側熱伝達抵抗 (Ro)	—	—	0.040
	アスファルト防水	0.11	0.01	0.091
	A種硬質ウレタンフォーム 保温板2種1号	0.023	0.07	3.043
	コンクリート	1.6	0.15	0.094
	空気層	—	—	0.090
	せっこうボード	0.22	0.0095	0.043
外壁	室内側熱伝達抵抗 (Ri)	—	—	0.090
	外気側熱伝達抵抗 (Ro)	—	—	0.040
	タイル	1.3	0.01	0.008
	コンクリート	1.6	0.15	0.094
	建築物断熱用吹付け硬質 ウレタンフォーム A種1	0.032	0.07	2.188
	空気層	—	—	0.090
内壁	せっこうボード	0.22	0.0095	0.043
	室内側熱伝達抵抗 (Ri)	—	—	0.110
	室外側熱伝達抵抗 (Ro)	—	—	0.150
	モルタル	1.5	0.02	0.013
	PC板	0.19	0.1	0.526
	モルタル	1.5	0.02	0.013
床	室内側熱伝達抵抗 (Ri)	—	—	0.150
	外気側熱伝達抵抗 (Ro)	—	—	0.150
	コンクリート	1.6	0.15	0.094
	空気層	—	—	0.090
	高性能グラスウール断熱材24K相当	0.036	0.15	4.167
	せっこうボード	0.22	0.0095	0.043
	室内側熱伝達抵抗 (Ri)	—	—	0.150

屋根」とした。

③ 冷房運転スケジュールは平日を6時～9時、12時～13時、16時～23時とし、休日を7時～13時、16時～23時の運転とした。

④ 人体発熱の顕熱量および潜熱量はそれぞれ52W/人、40W/人とした。

オフィスビル

① 地上7階で階高3.6mの標準的なオフィスビルとした。事務所の開口部（ガラス窓）の各ユニットは全階 1.8m×1.8m、厚さ 3mm の吸熱ガラスで、室内側に明色のブラインドを設置するとし日射遮蔽係数 $SC = 0.53$ 、熱貫流率 = 4.49 とした。また実効温度差 ETD については外壁構成から文献22、23の実効温度差ETD表の「軽量外壁および屋根」とした。

② 冷房運転スケジュールは平日を朝8時～夕方18時、土曜日を朝8時～昼13時までの一定運転とした。室内発熱スケジュール（照明）は、朝9時～夕方17時まで点灯状態とした。

③ 照明器具、機器発熱はともに20W/m²とした。

④ 在室人数は0.2/m²とした。顕熱量および潜熱量はそれぞれ53W/人、64W/人とした。

また、住宅、オフィスビルそれぞれの部材の物性値を表8、表9に示す。なお、値は文献21、22を参考に設定した。

冷房負荷計算に用いた式を以下に記す。

外気負荷

$$H_{HF} = 0.33 \cdot Q_F \cdot \Delta h \quad \cdots (6-1)$$

(Q_F : 外気量 (在室者1人当たりの必要換気量を30[m³/h]とし、これに在室者数Nを乗じた値) [m³/s]、 Δh : 室内外の

表-9 部材の物性値 (オフィスビル)

部位	材料	熱伝導率 λ (W/m・K)	材厚 (m)	熱抵抗 R (m ² ・K/W)
外壁	外気側熱伝達抵抗 (Ro)	—	—	0.040
	スパンドレルパネル	0.35	0.003	0.009
	ロックウール	0.045	0.05	1.111
	空気層	—	—	0.090
	プラスターボード	0.6	0.012	0.020
	室内側熱伝達抵抗 (Ri)	—	—	0.110
内壁	室外側熱伝達抵抗 (Ro)	—	—	0.150
	モルタル	1.5	0.02	0.013
	PC板	0.19	0.1	0.526
	モルタル	1.5	0.02	0.013
	室内側熱伝達抵抗 (Ri)	—	—	0.150
	外気側熱伝達抵抗 (Ro)	—	—	0.150
床	コンクリート	1.6	0.15	0.094
	空気層	—	—	0.090
	高性能グラスウール断熱材 24K相当	0.036	0.15	4.167
	せっこうボード	0.22	0.0095	0.043
	室内側熱伝達抵抗 (Ri)	—	—	0.150

エンタルピー差 [kJ/kg])

室内発生負荷

・日射負荷・貫流負荷 (窓)

$$H_G = A_G (SC \cdot q_{GI} + q_{GK}) \quad \cdots (6-2)$$

$$q_{GK} = K_G \cdot \Delta t \quad \cdots (6-3)$$

$$\Delta t = t_o - t_r \quad \cdots (6-4)$$

(A_G : 窓ガラスの面積 [m²], SC : 日射遮へい係数 [-], q_{GI} : 標準ガラス日射取得 (東京の標準ガラス (3mm 透明ガラス) 日射取得 (夏季)¹⁹⁾ の値) [W/m²], K_G : 窓の熱貫流率 [W/(m²・K)], t_o : 外気温度 [°C], t_r : 室内設定温度 [°C])

・貫流負荷 (外壁)

$$H_W = A_W \cdot K_W \cdot ETD \quad \cdots (6-5)$$

(A_W : 外壁の面積 [m²], K_W : 外壁の熱貫流率 [W/(m²・K)], ETD : 実効温度差 (東京都の夏季の値^{19) 20)} [K])

・貫流負荷 (内壁)

$$H_{Wi} = A_{Wi} \cdot K_{Wi} \cdot \Delta t_n \quad \cdots (6-6)$$

$$\Delta t_n = t_{rx} - t_r \quad \cdots (6-7)$$

(H_{Wi} : 内壁の面積 [m²], K_{Wi} : 内壁の熱貫流率 [W/(m²・K)], t_{rx} : 隣室温度 (外気温度と室内設定湿度との平均値⁶⁾) [°C], t_r : 室内設定温度 [°C])

・照明負荷

$$H_L = A_F \cdot q_L \quad \cdots (6-8)$$

(A_F : 床面積 [m²], q_L : 床面積当たり照明発熱 [W/m²])

・機器負荷

$$H_{AL} = A_F \cdot q_{AL} \text{ (潜熱負荷)} \quad \cdots (6-9)$$

(A_F : 床面積 [m²], q_{AS} : 床面積当たり顕熱による機器発熱 [W/m²], q_{AS} : 床面積当たり潜熱による機器発熱 [W/m²])

[人体負荷]

$$H_{HS} = N \cdot q_{HS} \text{ (顕熱負荷)} \quad \cdots (6-10)$$

$$H_{HL} = N \cdot q_{HL} \text{ (潜熱負荷)} \quad \cdots (6-11)$$

(N : 在室人数 [人], q_{HS} : 1人当たり発生顕熱量 [W/人], q_{HS} : 1人当たり発生潜熱量 [W/人])

6-2. 冷房負荷分布 (ポテンシャルマップ) の考察

都市メッシュ内の標高50m以下のメッシュを対象に、外

図-11 住宅の冷房負荷分布（ポテンシャルマップ） 左：外気負荷 中：室内熱負荷 右：冷房負荷

図-12 オフィスビルの冷房負荷分布（ポテンシャルマップ） 左：外気負荷分布 中：室内熱負荷 右：冷房負荷

気負荷分布、室内熱負荷分布、および冷房負荷分布（ポテンシャルマップ）を住宅、オフィスビル別に算出した。その結果を図 11、12 に示す。外気負荷分布について、住宅は沿岸部内中央部および内陸部で小さいことがわかる。これは沿岸部内中央部では相対的に気温が低く、内陸部では絶対湿度が低いことによると考えられる。オフィスビルは沿岸部で大きく、これはオフィスビルの冷房運転時間が海風の卓越する日中であり、沿岸部では海風による絶対湿度上昇が気温低下より大きいためと推察される。一方、沿岸部内の外気負荷が小さいエリアでは気温低下が絶対湿度上昇より大きいと考えられる。室内熱負荷については、住宅、オフィスビルともに沿岸部で大きく内陸部で小さいことがわかる。冷房負荷分布については、住宅は沿岸部で小さく、内陸部で大きい。これは住宅では外気導入量が比較的少なく、外気負荷よりも室内負荷の影響が大きいことによるものと考えられる。一方、オフィスビルは沿岸部内でも場所により外気負荷が異なる。これは同じ沿岸部内でも風速の大きさが異なり、気温低下の程度も異なるためと推察される。

このように住宅では室内熱負荷分布が外気負荷分布よりも冷房負荷分布への影響が大きく、オフィスビルでは外気負荷分布が室内熱負荷分布よりも冷房負荷分布への影響が大きく、そのため互いに分布特性が異なることがわかった。

7. まとめ

本研究では、メソ気象モデル WRF による数値シミュレーション結果を用いて、夏季の広島市の冷房負荷分布を算出した。得られた主な知見を以下に記す。

- ・夜間気温と関連が大きい土地利用（都市地域土地利用細分メッシュデータ）は「荒地」、「森林」、「低層建物」で

ある。

- ・日中、沿岸部は南西方向からの海風が卓越し低温高湿であり、内陸部では高温低湿である。
- ・冷房エンタルピーアワー分布は、沿岸部で相対的に高く、内陸部で低い。しかし沿岸部内中央部では比較的強く、1 日を通して低温低湿である。
- ・外気負荷については、住宅は沿岸部内中央部および内陸部で小さく、オフィスビルは沿岸部内東部、西部で大きい。室内熱負荷は住宅、オフィスビルどちらにおいても沿岸部で大きく、内陸部で小さい。冷房負荷分布は、住宅は沿岸部で小さく、内陸部で大きい。またオフィスビルでは沿岸部内中央部で小さく、東部・西部で大きい。

今後は、絶対湿度の計算精度向上が必要と考えられる。

また、今回は設定温湿度を 26℃、50%に設定した場合の冷房負荷であるため、今後は異なる設定温湿度においても冷房負荷を算出し、総合的な冷房負荷特性を把握したい。

【補注】

(1) 本研究では、文献 12 で抽出された典型的夏季晴天日（35 日間）を典型夏季晴天日とした。

(2) 本研究では、まず Domain2 内の全メッシュから「都市」の抽出を行い、次に「都市」以外の土地利用分類を行った。具体的な抽出・分類方法を以下に示す。なお、WRF の土地利用データは、米国地質調査所 (USGS: U.S. Geological Survey) 発行の地表面データがあらかじめ設定されており、その土地利用種に対応させることを意図して、抽出・分類を行った。

①「都市」の抽出

まず、都市地域土地利用細分メッシュデータの土地利用種別から 8 つの土地利用（「道路」・「鉄道」・「高層建物」・「低層建物」・「低層建物（密集地）」・「工場」・「公共施設等用地」・「空地」）を「都市部」として統合した。次に、1 メッシュ内面積の半分以上が「都市部」であるメッシュを「都市」とした。

②「都市」以外の土地利用分類

まず、土地利用細分メッシュデータの土地利用種を USGS のそれと対応させた。次に 1 メッシュ内の最大面積を有する土地利用種を代表土地利用とし、分類を行った。

(3) 土地利用区分別の物性値等は表 10、表 11 に、都市 3 分類の仮定値は表 12 に、それぞれ示す。

(4) 都市メッシュの細分類では、2013 年夏季に気温分布調査¹⁾を行った観測

点 (60 地点) から都市メッシュに位置する観測点 (48 地点) のデータを用いることとした。気温分布実測調査の概要は以下のとおりである。

観測方法：広島市内の小学校 60 地点の百葉箱に、データロガー付き温度センサーを設置した定点観測

観測期間：2013 年 7 月 20 日～9 月 23 日

測定間隔：20 分

環境条件：風通しが良く、地面からの熱放射を受けにくい地上 1.5m の高さ

(5) 本研究は、都市地域土地利用細分メッシュデータの土地利用 (17 種類) を再分類した 12 種類の土地利用別に面積を算出し、それら説明変数とした。

(6) 隣室の空調の状況から隣室温度を推定するが、本研究では外気温と設定温度との平均値を用いた。なお、隣室も同じ温度で冷房されている場合には、内壁熱取得は考えない。

【参考文献】

1) 三上岳彦 (2006), 「都市ヒートアイランド研究の最新動向ー東京の事例を中心にー」, E-journal GEO 1(2), pp.79-88

2) 日本建築学会 (2007), 「ヒートアイランドと建築・都市ー対策のビジョンと課題」, 技報堂

3) 岡田牧・日下博幸・高木美彩・阿部紫織・高根雄也・富士友紀乃・永井徹 (2014), 「夏季における岐阜県多治見市の気温分布調査」, 天気, 61(1), pp.23-29

4) 武市伸幸 (2002), 「高知県南国市のヒートアイランドと形成要因」, 天気, 49(1), pp.47-56

5) 斉藤郁雄・久保隆太郎・酒井孝司・石原修 (2007), 「熊本市における気温・湿度分布の長期定点観測 第 1 報 中規模都市のヒートアイランド現象に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 72(611), pp.59-66

6) 岩井一博・高木直樹・三谷弘真・山下恭弘 (2003), 「内陸の地方都市における都市気候の実態に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 68(569), pp.33-39

7) 鳴海 大典・二浦尾友佳子・下田 吉之・水野 稔 (2007), 「昇温が大阪府域のエネルギー消費に及ぼす影響」, 日本建築学会環境系論文集, 72(613), pp.71-78

8) 平野勇二郎 (2005), 「ヒートアイランド緩和策の気温低下効果とそのエネルギー消費量への影響ー東京都心部の地上緑化を対象とした夏季・冬季のケーススタディー」, 日本建築学会環境系論文集, 第 591 号, pp.75-82

9) 十二村佳樹・渡辺浩文 (2008), 「海風の夏季都市気温緩和効果に関する研究ー気温の長期多点同時測定と観測データに基づく分析」, 日本建築学会環境系論文集, 73(623), pp.93-99

10) 谷口明・清田 誠良・清田 志志 (2008), 「沿岸都市における海風が有する都市域の高温化現象の緩和効果に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 73(625), pp.379-384

11) 佐藤大樹・大岡龍三・村上周三 (2008), 「メソスケール数値解析による海風の進入経路に沿った移動領域の顕熱・潜熱・平均運動エネルギー収支分析」, 日本建築学会環境系論文集, 第 630 号, pp.1029-1035

12) 松尾薫・田中貴宏 (2013), 「海風影響下の沿岸都市における夏季日中の気温分布に関する研究ー広島市における気温の長期多点同時観測に基づく分析」, 都市計画論文集 48(3), pp.819-824

13) 松尾薫・田中貴宏 (2016), 「広島市における夏季日中の海風が気温分布に及ぼす影響に関する研究ー海風の気温緩和効果の地図化を目的として」, 日本建築学会環境系論文集, 第 721 号, pp.283-293

14) I.D.Stewart・T.R.Oke (2012), 「Local Climate Zones for urban temperature studies」, Bulletin of the American Meteorological Society 93(12), pp.1879-1900

15) 森山正和・竹林英樹 (1999), 「正規化植生指標 (NVI) と一次元熱収支モデルに基づいたクリマトープ図の作成手法に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, 第 518 号, pp.61-65

16) O.Brousse・A.Martilli・M.Foley・G.Mills・B.Bechtel (2016), 「WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid」, Urban Climate 17, pp.116-134

17) 松尾薫・中村愛・田中貴宏 (2014), 「広島市の都市環境気候地図の作成に関する研究ーその 2 実測調査に基づく地域類型区分」, 日本建築学会中国支部研究報告集, 37, pp.393-396

18) 高正明・森山正和・田中貴宏・竹林英樹 (2010), 「大阪地域における夏季の気象要素による人と建物への影響の地域特性に関する研究」, 日本建築学会近畿支部研究報告集 環境系(50), pp.273-276

19) 滝沢博 (1985), 「標準問題の提案 (オフィス用標準問題)」, 日本建築学会環境工学委員会 熱分科会第 15 回熱シンポジウム pp.35-42

20) 宇田川光弘 (1985), 「標準問題の提案 (住宅用標準問題)」, 日本建築学会環境工学委員会 熱分科会第 15 回熱シンポジウム pp.23-33 1985

21) 武田仁・稲沼貫・吉沢望・磯崎恭一郎 (2005), 「標準気象データと熱負荷計算プログラム LESCO」, 井上書院

22) 空気調和・衛生工学会編 (2009), 「熱負荷のしくみ」, オーム社

23) 田中俊六・斎藤忠義・宇田川光弘・大塚雅之・秋元孝之・田尻陸夫 著 (2010), 「最新 建築設備工学 改訂版」, 井上書院

表-10 土地利用分類別物性値

土地利用分類	アルベド	蒸発効率	放射率	粗度長	熱慣性
	[%]	[%]	[%]	[cm]	[kJ/m ² Ks ^{0.5}]
1. 都市	15	10	88	80	1.67
2. 乾燥した耕作地	17	30	98.5	15	2.71
3. 灌漑された耕作地	18	50	98.5	10	2.2
7. 草地	19	15	96	12	2.37
15. 混合林	13	30	97	50	2.11
16. 水面	8	100	98	0.01	0
19. 不毛・疎かな植生	25	2	90	1	0.81

表-11 UCM における都市域の屋根面・壁面・地面に
共通の物性値等

表面分類	熱容量 [MJ/m ² K]	熱伝導率 [W/m K]	アルベド [%]	放射率 [%]	運動量についての 粗度長[m]	熱についての 粗度長[m]	表面温度の 最低条件[K]
屋根面・壁面	1.0	0.67	20	90	0.01	0.01	293
地面	1.4	0.40	20	95	0.01	0.01	293

表-12 UCM で使用する都市域 3 カテゴリーの仮定値

都市域 カテゴリー	建物高さ [m]	建蔽率 [%]	都市化割合 [%]	人工排熱 [W/m ²]
都市<高層建物>	11.9	21.8	0.89	70.8
都市<低層高密度>	6.7	21.9	0.67	16.5
都市<低層中密>	6.9	15.9	0.58	13.0