

# 都市温暖化緩和のための都市環境デザインガイドラインの作成：将来都市気候特性に基づく福山市のゾーニングと気温形成要因分析

課題責任者

田中 貴宏

広島大学大学院先進理工系科学研究科

著者

横山 真\*<sup>1</sup>, 田中 健太\*<sup>2</sup>, 田中 貴宏\*<sup>3</sup>, 松尾 薫\*<sup>4</sup>, 杉山 徹\*<sup>5</sup>

\*<sup>1</sup> 福山市立大学都市経営学部, \*<sup>2</sup> 復建調査設計株式会社, \*<sup>3</sup> 広島大学大学院先進理工系科学研究科, \*<sup>4</sup> 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科, \*<sup>5</sup> 海洋研究開発機構付加価値情報創生部門

本研究では地球シミュレータを用いた都市熱環境の大規模数値計算の結果から都市温暖化緩和に配慮した都市づくり実現のために、「どのようなエリア」に「どのような都市環境デザイン」を用いれば良いかを示す「都市環境デザインガイドライン」を国内外のいくつかの都市域を対象として作成することを最終目的とする。本稿では地方の沿岸都市である広島県福山市を対象に、MSSG と d4PDF を用いて将来都市気候を計算し、この計算結果に基づく都市気候ゾーニングとゾーン毎の気温形成要因分析を行い、夏季屋外熱環境に対する情報提供ツールを作成した結果を報告する。

キーワード：都市温暖化, MSSG, d4PDF, 将来都市気候, 計画支援ツール

## 1. はじめに

近年、都市ヒートアイランド現象と地球温暖化に伴う都市温暖化が各地の都市域で見られ、これらの影響に配慮した都市づくりが求められている。都市温暖化対策には多数の手法が存在するが、効果的な対策は対象地の気候特性により異なるため、気候特性を踏まえた適材適所の対策導入が重要である。そこで本研究では地球シミュレータ上の大気海洋結合モデル Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment<sup>2)</sup> (MSSG) による都市熱環境の大規模数値計算の結果を用いて対象エリアの高温域および気候特性を広域かつ高解像度に把握し、この結果をベースに「どのようなエリア」に「どのような都市環境デザイン」を用いれば良いかを示す「都市環境デザインガイドライン」を国内外のいくつかの都市域を対象として作成することを最終目的としている。

本稿では地方の沿岸都市である広島県福山市を対象に、MSSG と球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) を用いて将来都市気候を計算し、この計算結果に基づく都市気候ゾーニングとゾーン毎の気温形成要因分析を行い、夏季屋外熱環境に対する情報提供ツールを作成した結果を報告する。

## 2. d4PDF に基づく将来都市気候計算

福山市の都市計画区域を対象エリアとし、d4PDF を境界条件とした MSSG による数値計算を行った。具体的には、まず3段階のネスティングを行い、対象エリア全体の将来都市気候を 100m 解像度で計算した（以下、メソ気象計算）。なお d4PDF の内、ここでは2°C上昇実験の中から 2071 年 8 月 8 日（モデル：CCSM4、摂動：102）を抽出し、計算対象日とした。助走計算を含め、2071 年 8 月 6 日 21 時～8 月 8 日 15 時の計算を行い、8 月 8 日 14 時の結果を以降の分析に用いることとした（図 1）。

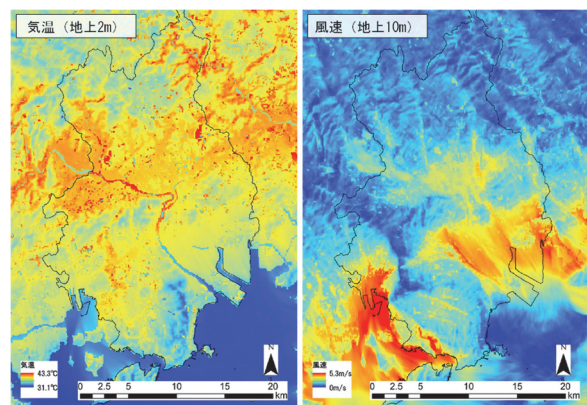


図1 メソ気象計算の結果 (14時)

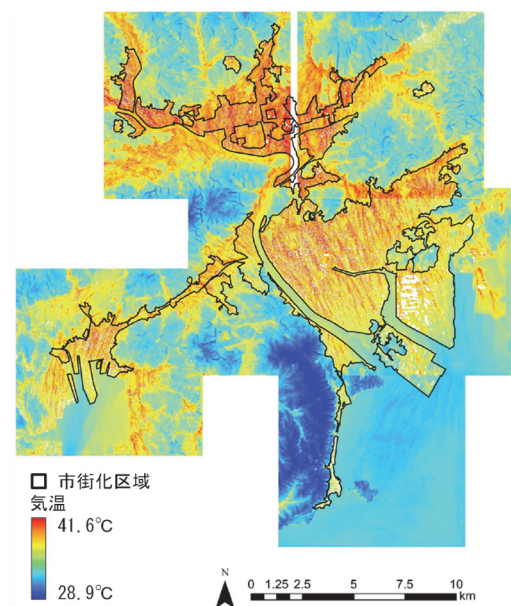


図2 建物解像計算の結果 (14時)

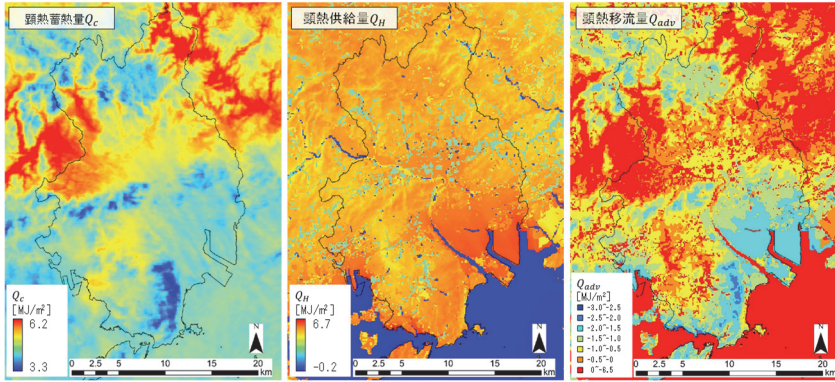


図3 メソ気象計算の結果

(左：顕熱蓄熱量、中央：顕熱供給量、右：顕熱移流量)

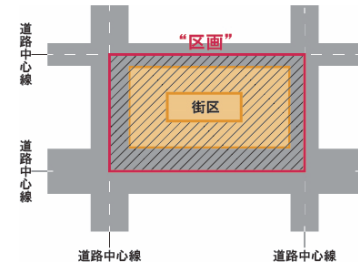


図4 区画の概念図

次にメソ気象計算の結果を境界条件として、解像度10mのLES計算<sup>3)</sup>を行った(以下、建物解像計算)。対象エリアはメソ気象計算と同様に福山市の都市計画区域とし、これを含むように6つの計算領域を設定し、それぞれ計算を行った。計算結果は一部補正を行い、図2に示すように統合した。計算期間は8月8日13:00~14:10とし、最後の10分間の平均値を以降の分析に用いた。

### 3. 海風効果に基づく都市気候ゾーニング

#### 3.1 顕熱移流量の算出

メソ気象計算の結果を用いて、日中の海風による気温低減効果(以降、海風効果)に基づく対象エリアの都市気候ゾーニングを行った。具体的には、海風効果の指標として、「顕熱移流量」と「風速(地上10m)」を設定し、これらの値の大小により対象エリアを分類することとした。

まず顕熱移流量は海風が吹き始める10時から14時までを対象時刻とし、文献3、4を参考に、以下の式を用いて算出した。

$$Q_c = \int_{Z_g}^{Z_{top}} c_p \rho (\theta_{t_1} - \theta_{t_0}) dz \quad (1)$$

$$Q_H = \int_{t_0}^{t_1} H dt \quad (2)$$

$$Q_{adv} = Q_c - Q_H \quad (3)$$

$Q_c$  : 顕熱蓄熱量、 $Q_H$  : 顕熱供給量、 $Q_{adv}$  : 顕熱移流量、 $Z_{top}$  : 大気混合層の上端高度 (m)、 $Z_g$  : 標高 (m)、 $c_p$  : 空気の定圧比熱 (J/kg・K)、 $\rho$  : 空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $\theta$  : 温度 (K)、 $t_0$  : 10:00、 $t_1$  : 14:00、 $H$  : 地表面からの顕熱フラックス (MJ/m<sup>2</sup>)

具体的には、まず混合層内の昇温量として顕熱蓄熱量 $Q_c$ を、人口排熱を含む地表面からの顕熱として顕熱供給量 $Q_H$ を100mメッシュ毎にそれぞれ算出した。次にこれらの差分から顕熱移流量 $Q_{adv}$ を算出した。なお混合層の上端高度は文献3、4を参考に、メソ気象計算の鉛直層設定より1113.5mに設定した。

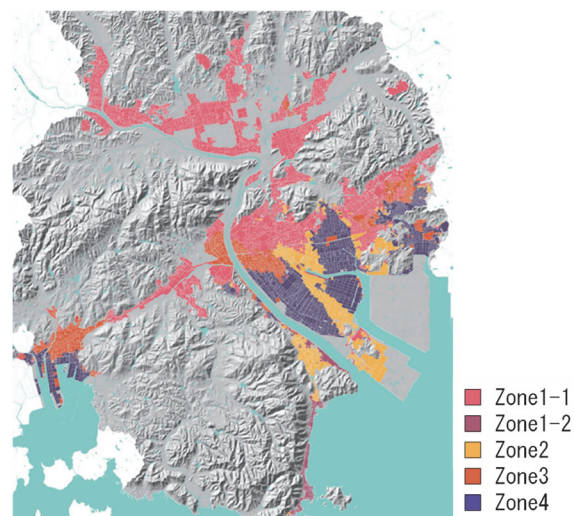


図5 5つのゾーンの空間分布

算出された顕熱蓄熱量 $Q_c$ 、顕熱供給量 $Q_H$ 、顕熱移流量 $Q_{adv}$ の空間分布を図3にそれぞれ示す。冷涼な海風は都市部の地表面からの熱を受け、海岸線から遠くなるほど冷却効果を失うと考えられる。顕熱移流量 $Q_{adv}$ の分布を見ると、海岸線から徐々に顕熱移流量の値が大きくなり、福山市の北部では0を超えるエリアも見られる。これらのエリアに吹く風には移流による気温低減効果がなく、場合によっては気温上昇をもたらすと考えられる。

#### 3.2 都市気候ゾーニングの作成

前節で算出した顕熱移流量 $Q_{adv}$ と図1の風速(地上10m)に関する閾値を設定し、都市気候ゾーニングを行った。なおここで分析単位を図4に示す街区と街路を合わせた「区画」とし、区画毎の顕熱移流量と風速の空間平均値を算出し、分類に用いることとした。2つの指標に関する閾値は次の条件として設定した。

##### ① 風速条件

気象庁ビューフォート風力階級を参考に風力階級3以上(風速3.4m/s以上)では、区画内の空気を拡散し換気を促進する効果(風速ポテンシャル)が大

表1 重回帰分析結果 (表中の\*\*は1%有意を示す)

Zone	重回帰モデル		説明変数		第1変数	第2変数	第3変数	第4変数	第5変数	第6変数
	重回帰係数	p値	標準化偏回帰係数	p値						
Zone1-1 (n=4,641)	0.583	<0.001	-0.408	<0.001	樹木被覆率(100m)	地表面緑被率(0m)	建物密度(50m)	建物高さ標準偏差(300m)	水面率(50m)	
	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定
Zone1-2(n=252)	0.735	<0.001	-0.510	<0.001	樹木被覆率(50m)	建物密度(0m)	アスファルト被覆率(300m)	建物高さ標準偏差(200m)	水面率(200m)	
	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定
Zone2(n=1,109)	0.689	<0.001	0.457	<0.001	建物密度(300m)	地表面緑被率(50m)				
	**	**	**	**	**	**				
	判定	判定	判定	判定	判定	判定				
Zone3(n=1,395)	0.583	<0.001	-0.269	<0.001	水面率(300m)	建物密度(0m)	樹木被覆率(300m)	地表面緑被率(0m)	平均建物高さ(200m)	
	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定
Zone4(n=2,325)	0.654	<0.001	0.308	<0.001	建物密度(300m)	樹木被覆率(300m)	地表面緑被率(0m)	建物敷地被覆率(150m)	水面率(300m)	平均建物高さ(300m)
	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定	判定

きいと考え、これを閾値とした。

## ② 顕熱移流量条件

図3右の空間分布傾向より、顕熱移流量  $Q_{adv}$  が  $1.5\text{MJ/m}^2$  以下では、移流による海風効果(冷却ポテンシャル)が大きいと考え、これを閾値とした。

上記2条件を用いて、対象エリアの区画を5つに分類した結果を図5に示す。Zone1は風速ポテンシャル、冷却ポテンシャルともに閾値を下回るゾーンであり、市北部と市南部に存在するが、これらは気温および空間分布傾向が大きく異なるため、Zone1-1とZone1-2のさらに2つに分類することとした。一方、風速ポテンシャル、冷却ポテンシャルともに大きいのはZone4であり、沿岸近くの港や川沿い等、陸地に水域が入り込む地形沿いに立地している。このゾーンでは冷却ポテンシャルの大きい風が強く吹くため、暑熱緩和策として海風活用が最も効果的と考えられる。またZone3風速ポテンシャルが大きい、冷却ポテンシャルが小さいゾーンであり、Zone4の北側に位置している。南側から流入した海風がZone4で熱交換されることで、徐々に冷却ポテンシャルが低下するためと考えられる。このゾーンでは冷却ポテンシャルは小さいものの比較的強い風が吹くため、暑熱緩和策として海風利用は効果的と考えられる。

## 4. ゾーン毎の気温形成要因分析

前章で作成した5つの都市気候ゾーンにおける気温の形成要因分析をそれぞれ行い、各ゾーンで推奨される暑熱緩和策とそれらの影響を明らかにした。

具体的には、区画を分析単位として、区画の平均気温を目的変数、区画の形態指標を説明変数とした重回帰分析を行った。形態指標には、アスファルト被覆率、建物密度、樹木被覆率、水面率、地表面緑被率、建物敷地被覆率、平均建物高さ、建物高さの標準偏差の8指標を選定し、算出範囲を区画の外縁(0m)から300mまで50m間隔で広げた7段階に設定した。重回帰分析における変数選択の際には、これら計56指標を次の2段階の手順で選択した。

- ① 全56指標を説明変数として入力し、ステップワイズ法による変数選択を行う。
- ② に同じ指標で算出範囲が異なる変数が同時に選択された場合は、寄与の小さい方の変数を外して再度ステップワイズ法による変数選択を行う。

以上の手順による重回帰分析の結果を表1に示す。選

択された説明変数の内、標準化偏回帰係数が大きい順に第1変数、第2変数とした。各ゾーンの結果を以下にそれぞれ示す。

### Zone1-1

第1,2変数が樹木被覆率(100m)と地表面緑被率(0m)であり、緑に関する物的指標の影響力が大きい。またこれらの算出範囲は小さいため、街区内や道路沿いに小規模の緑を導入していく対策が効果的と考えられる。また多くの区画は住宅地と農地が混在する市北部に位置するため、農地の保全も重要である。

### Zone1-2

第1変数が樹木被覆率(50m)であり、この標準化偏回帰係数は他ゾーンと比較しても大きいため、街区内や道路沿いに樹木を配置する対策が効果的と考えられる。また第2変数は建物密度(0m)であるため、道路や建物への蓄熱に配慮しつつ、建物の除却により区画の密度を減らす対策も有効と考えられる。

### Zone2

第1変数が建物密度(300m)であり、これはエリア全体の都市化度合いと対応しているため、中心市街地周辺で大きい。また第2変数は地表面緑被率(50m)であった。そのため中心市街地周辺では建物の除却と敷地の緑化を組み合わせる対策が効果的と考えられる。一方、中心市街地から離れた住農混在エリアではZone1-1と同様に農地の保全が重要である。

### Zone3

第1変数が水面率(300m)であり、これは芦田川周辺で気温が低下している影響と考察される。第2変数は建物密度(0m)であり、第1変数と合せて考えると、河川沿いの建物密度を低下させ、河川がもたらす気温低減効果の影響範囲を広げる対策が期待される。その際には河川方向と卓越風向に配慮して建物配置を工夫することも必要と考えられる第3,4変数に緑に関する変数が選択されていることから、街区内や道路沿いの緑化も併せて考えていくとより良いと考えられる。

### Zone4

第1変数が建物密度(300m)である。このゾーンは風ポテンシャル、冷却ポテンシャルともに大きいゾーンであるため、海風利用を主とした対策が効果的である。そのため風通しが悪くしている建物を除却し、風通し改善を図ることが第一である。第2変数は樹木被覆率(300m)、

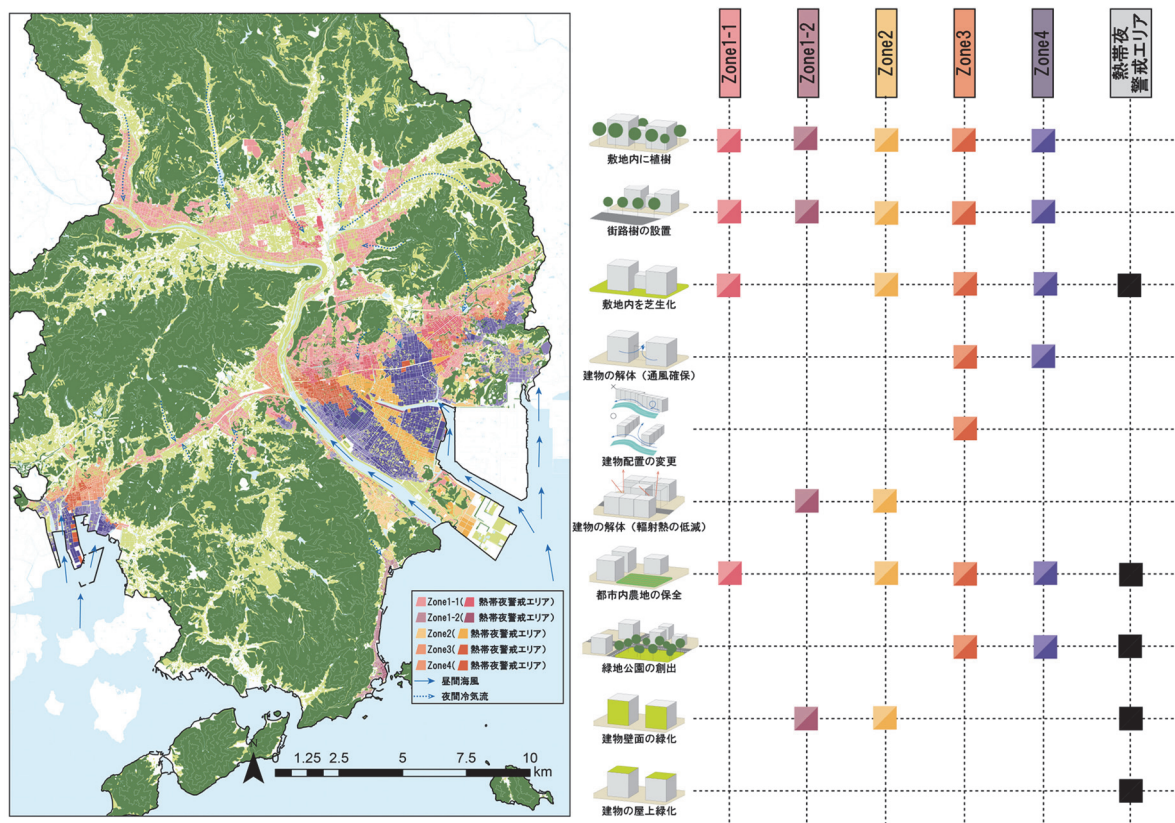


図6 夏季屋外熱環境に対する情報提供ツール

第3変数は地表面緑被率(0m)であるため、街区内、道路沿いの緑化および緑地公園の新設なども有効と考えられる。

最後に以上の分析結果を基に作成した夏季屋外熱環境に対する情報提供ツールを図6に示す。

## 5. おわりに

本稿では地方の沿岸都市である広島県福山市を対象に、MSSGと球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)を用いて将来都市気候を計算し、この計算結果に基づく都市気候ゾーニングとゾーン毎の気温形成要因分析を行い、夏季屋外熱環境に対する情報提供ツールを作成した結果を報告した。

福山市を対象とした今後の展開としては、将来都市気候計算における計算対象日を増やし、より平均的な傾向を掴むことが必要である。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費(20H02331、20K14913)による成果の一部である。大規模数値計算には(国研)海洋研究開発機構の支援により、地球シミュレータ及び大型計算機システムを用いた。

## 文献

- 1) 日本建築学会編, ヒートアイランドと建築・都市一対策のビジョンと課題, 日本建築学会, 2007.
- 2) K. Takahashi, R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto and H. Fuchigami, "Challenge toward the prediction of typhoon behavior and down pour", Journal of Physics: Conference Series, vol.454, no.1, 2013.
- 3) K. Matsuda, R. Onishi and K. Takahashi, "Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.173, p.53-66, 2018.
- 4) Y. Takane, Y. Ohashi, H. Kusaka and Y. Shigeta, "Effects of Synoptic-Scale Wind under the Typical Summer Pressure Pattern on the Mesoscale High-Temperature Events in the Osaka and Kyoto Urban Areas by the WRF Model", Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol.52, p.1764-1778, 2013.
- 5) 松尾薫, 田中貴宏, "夏広島平野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—海風による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, vol.81, pp.283-4293 2016

# Making Urban Environmental Design Guideline for Urban Warming Mitigation: Zoning Based on Future Urban Climate Characteristics and Analyzing Formation Factors of Air Temperature in Fukuyama City

Project Representative

Takahiro Tanaka

Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

Authors

Makoto Yokoyama<sup>\*1</sup>, Kenta Tanaka<sup>\*2</sup>, Takahiro Tanaka<sup>\*3</sup>, Kaoru Matsuo<sup>\*4</sup>, Toru Sugiyama<sup>\*5</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Urban Management, Fukuyama City University, <sup>\*2</sup> Fukken Co., Ltd.,

<sup>\*3</sup> Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University,

<sup>\*4</sup> Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University,

<sup>\*5</sup> Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In this paper, Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) and database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) were used to calculate the future urban climate of Fukuyama City. Based on the calculation results, a zoning map based on daytime sea breeze effect was created and the factors of air temperature in each zone were clarified. Then, an example of planning support tool to provide information on the summer outdoor thermal environment in Fukuyama City was designed.

**Keywords :** Urban warming, MSSG, Workshop, d4PDF, Future urban climate, Planning support tool

## 1. Introduction

In recent years, the effects of urban warming have been observed in various urban areas, and there is a demand for urban planning considering urban warming mitigation. On the other hand, effective countermeasures to urban warming may differ depending on the climatic characteristics of the target area, so it's necessary to introduce appropriate countermeasures in place. From this background, the goal of this study is making urban environmental design guidelines that show effective urban warming countermeasures in each region.

In this paper, MSSG and d4PDF were used to calculate the future urban climate of Fukuyama City. Based on the calculation results, a zoning map based on daytime sea breeze effect was created and the factors of air temperature in each zone were clarified. Then, an example of planning support tool to provide information on the summer outdoor thermal environment in Fukuyama City was designed.

## 2. Calculation of future urban climate using MSSG and d4PDF

Numerical calculation predicting future urban climate was executed using MSSG with d4PDF as the boundary condition for the target area, which is the urbanization promotion area of Fukuyama City. Three domains were set for this calculation, and the highest resolution is 100m. Here, August 8, 2071 (model: CCSM4, perturbation: 102) was selected from the 2°C rise experiment of d4PDF as the target date for calculation.

Next, LES calculations with a 10m resolution were executed using the 100m resolution calculation results as boundary

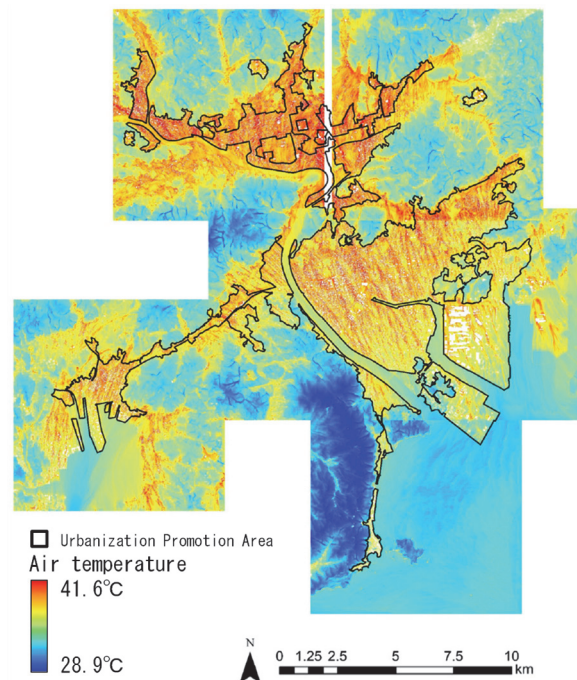


Fig. 1 Surface air temperature distribution  
(2071/8/8 14:00-14:10)

conditions. The target area was the urban planning area of Fukuyama City, and six calculation areas were set up to include this area, and calculations were performed for each. The calculation results were partially corrected and integrated as shown in Figure 1.

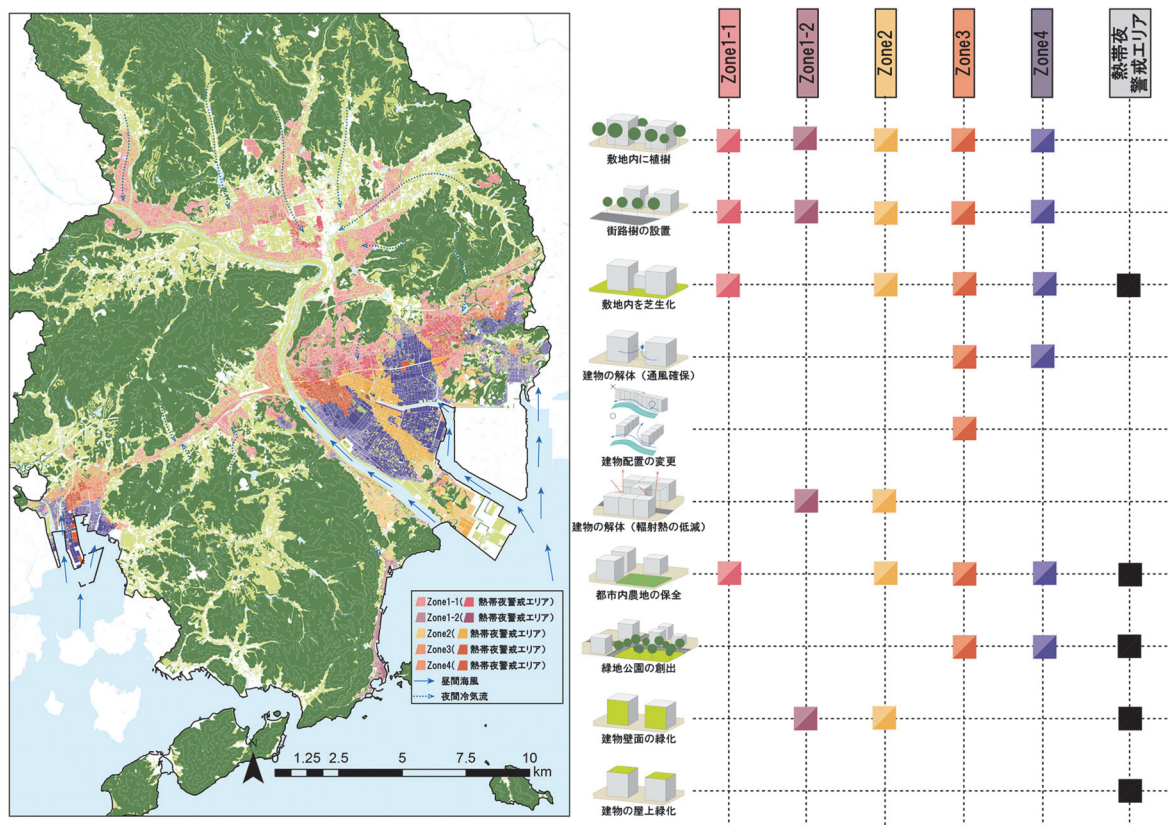


Fig. 2 Example planning support tool for Fukuyama City

### 3. Urban climate zoning based on sea breeze effect

Urban climate zoning based on sea breeze effects was performed using 100m resolution numerical results. The cooling potential of the sea breeze was evaluated by calculating the sensible heat advection for each mesh in addition to the results of the surface wind speed calculations. The target area was classified into five zones with a threshold value of 3.4 m/s or higher for wind speed and  $-1.5 \text{ MJ/m}^2$  or lower for sensible heat advection. The distribution of each zone is shown on the left side of Figure 2. Zone 1-1, Zone 1-2, and Zone 2 have a small potential for sea breeze utilization, while Zone 4 and Zone 5 have a large potential for sea breeze utilization.

### 4. Analysis of air temperature formation by zone

To identify the factors that contribute to the formation of air temperature in each of the zones created in the previous chapter, a multiple regression analysis was performed with air temperature as the objective variable and the urban forms parameter as the explanatory variable. Fifty-six explanatory variables were prepared by combining eight parameter (asphalt coverage ratio, building density, tree coverage ratio, water surface coverage ratio, green coverage ratio, building site coverage ratio, average building height, and standard deviation of building height) and seven calculation ranges (50 m intervals

from 0 m to 300 m from parcel edge), which were selected for each zone using the stepwise method. Then, based on the explanatory variables selected in the multiple regression analysis and their contributions, recommended countermeasures to urban warming were extracted for each zone. The results are shown as a list on the right side of Figure 2.

### 5. Summary

In this paper, MSSG and d4PDF were used to calculate the future urban climate of Fukuyama City. Based on the calculation results, a zoning map based on daytime sea breeze effect was created and the factors of air temperature in each zone were clarified. Then, an example of planning support tool to provide information on the summer outdoor thermal environment in Fukuyama City was designed.