

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： 広島デルタの都市気候形成要因分析

課題責任者

田中 貴宏 広島大学大学院工学研究科

著者

横山 真^{*1}, 松尾 薫^{*2}, 田中 貴宏^{*3}, 杉山 徹^{*4}, 佐土原 聡^{*5}

^{*1} 福山市立大学都市経営学部, ^{*2} 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科, ^{*3} 広島大学大学院工学研究科,

^{*4} 海洋研究開発機構付加価値情報創生部門情報エンジニアリングプログラム, ^{*5} 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院

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。本稿では広島市の中心市街地が位置する広島デルタを対象に MSSG による都市熱環境の数値計算を行い、広島デルタ全域の気温・風の分布傾向を把握した。さらに数値計算結果を入力条件とした重回帰分析により、河川周辺市街地の熱環境・風環境の形成要因分析を行った。

キーワード：都市温暖化, 海風, MSSG, 重回帰分析

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¹⁾。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 Geoenvironment²⁾ (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。本稿では広島市の中心市街地が位置する広島デルタを対象に MSSG による都市熱環境の数値計算を行い、広島デルタ全域の気温・風の分布傾向を把握し、広島湾・河川との関連を分析した。さらに数値計算結果を入力条件とした重回帰分析により、河川周辺市街地の熱環境・風環境の形成要因分析を行った。

2. 研究概要

2.1 対象地概要

本研究は広島市内、図1に示す広島デルタを対象とした。広島デルタは太田川により形成され、太田川放水路と5本の河川（天満川、旧太田川、元安川、京橋川、猿猴川）に分岐している。これらの多くは100m以上の河川幅を有している箇所が多いことから、広島湾から吹く海風の通り道（風の道）となることやまた低温な河川水の効果により、市街地の熱環境形成に大きな影響を与えと考えられる。

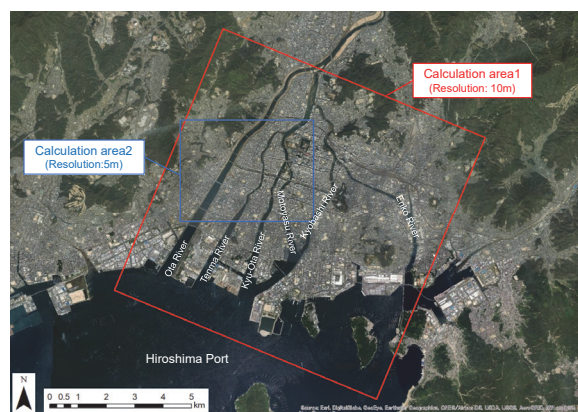


図1 対象エリアと数値計算領域

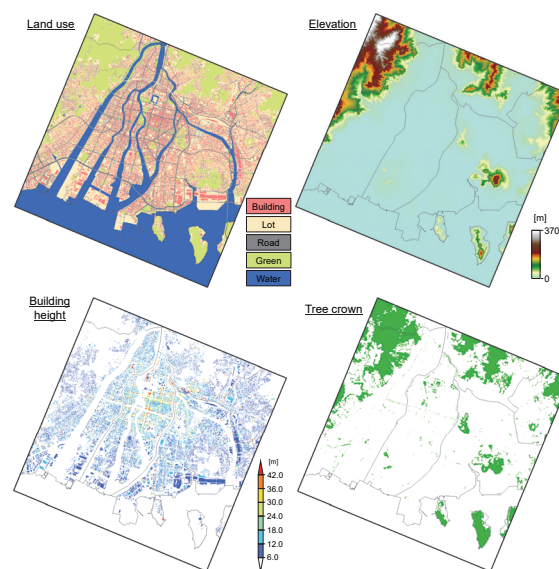


図2 数値計算の地表面条件（10m 解像度）

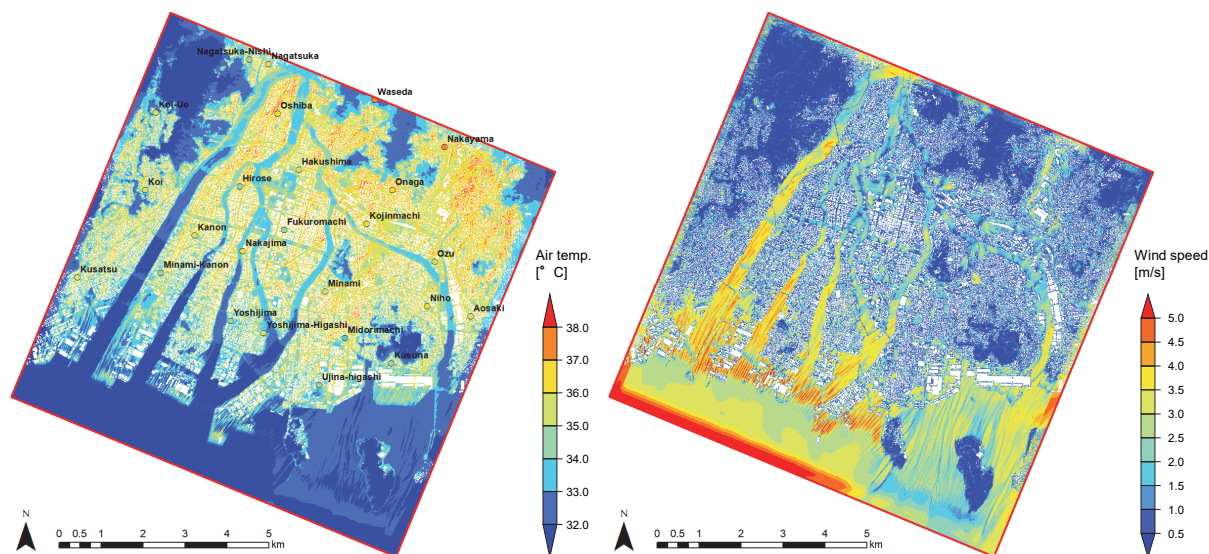


図3 デルタ全域の気温分布、風速分布（10m 解像度）

2.2 数値計算概要

対象地の都市熱環境を把握するため、MSSG による非定常の LES（Large eddy simulation）を用いて³⁾、図1 赤枠で示すエリアを対象とした「デルタ全域計算」と、図1 青枠で示す河川が集中するエリアを対象とした「河川周辺市街地計算」を行った。

対象日は典型的な夏季晴天日であった2013 年8 月13 日とし、水平空間解像度はデルタ全域計算を10m、河川周辺市街地計算を5m にそれぞれ設定した。

数値計算に用いた地表面条件（土地利用、標高、建物高さ、樹冠位置）は広島市都市計画基礎調査 GIS データ、基盤地図情報数値標高モデル、ArcGIS データコレクション、Sentinel-2 による衛星画像から算出した NDVI データを用いてそれぞれ作成した。図2 に例としてデルタ全域計算の地表面条件を示す。

数値計算の気象条件（初期値・境界値）には、MSSG による広島市周辺の気象計算（100m 解像度、1 時間値）を行い、この結果を時間的・空間的に補間したものを用いた。なお今回はデルタ全域計算と河川周辺市街地計算の間のネスティングは行っていない。

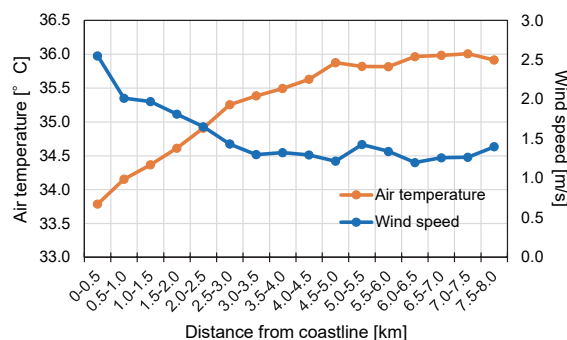


図4 海岸線からの距離と気温・風速の関係

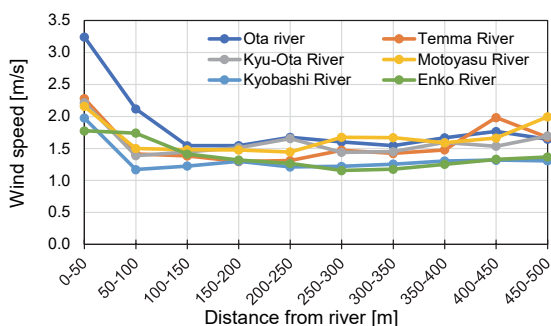
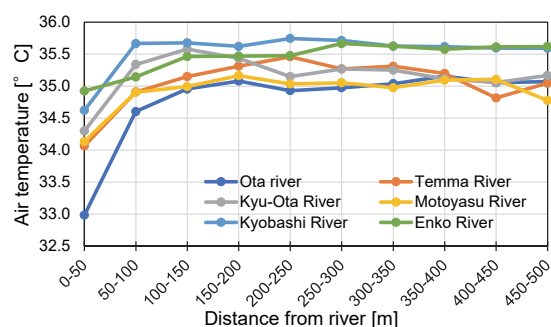


図5 各河川からの距離と気温、風速の関係

3. デルタ全域計算

3.1 水平気温分布・風速分布

図3 にデルタ全域計算の結果の内、水平気温分布と風速分布（地上 2.5m）をそれぞれ示す（13：00～13：10 の平均値）。図3 より、南南西方向からの風が卓越している。これは広島市の典型的な夏季晴天日の卓越風向であり、この日の広島地方気象台の観測値とも一致している。沿岸部の河川上では風速が大きく、南南西風が進入している様子が見られる。特に東側の猿猴川を除く、西側の5つの河川で風速が大きい。これは海岸線やデルタの形状等の地形的な影響と考えられる⁴⁾。進入した海風は河川上を遡上するが、河川幅の縮小や河川方向の変化に伴い風速は徐々に低下し、河川毎に風速の大きい距離

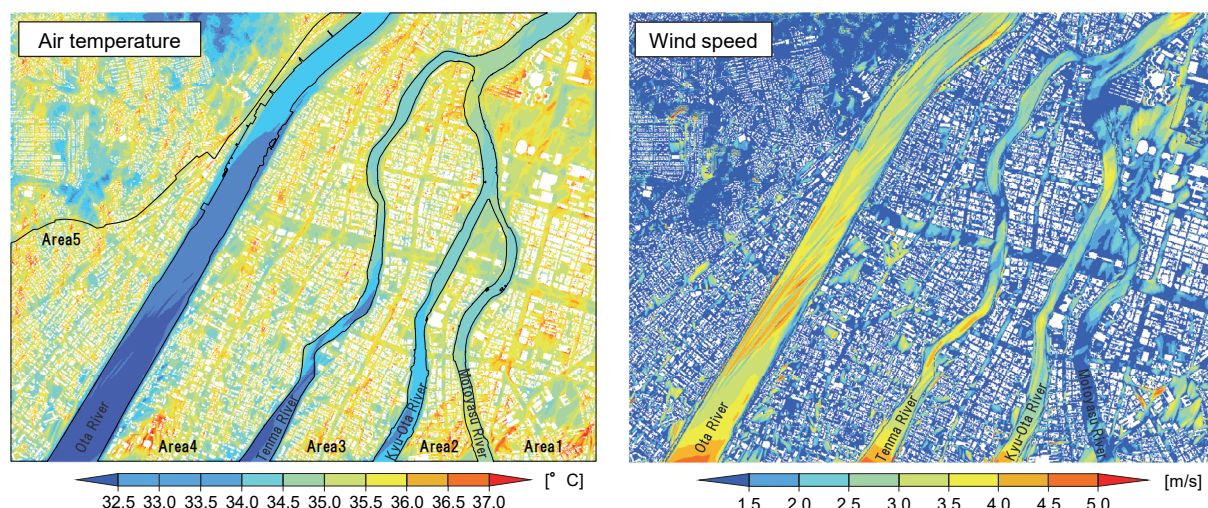


図6 河川周辺市街地の気温分布、風速分布（5m 解像度）

は異なる。そのため河川幅が大きく、形状も単純な太田川放水路の風速が他の河川と比べて最も大きい。なおこれ以降の時間帯も海風の進入域に大きな変化は見られなかった。

気温は広島湾上で低く、海風の河川遡上に伴い河川上でも市街地と比べて大きく低下しており、特に海岸線に近い河川上の気温が相対的に低い。市街地においてもばつきはあるが、全体的には沿岸から内陸にかけて徐々に上昇している。また図3中には小学校の百葉箱で観測した結果を併せて示しており、全体的な気温分布傾向は一致していることが分かる。

3.2 海岸距離との関係

図4に海岸線からの距離帯毎（500m 毎）の平均気温と平均風速を示す（13:00～13:30の平均値）。ここでは土地利用の内、アスファルト（主に道路）の結果を用いて作成した。図4より気温は沿岸から徐々に上昇し、逆に風速は沿岸から徐々に低下する。また沿岸から5km程度まではこれらの変化幅が特に大きく、この時間帯においては海岸線から概ね5kmが海風の影響が大きい範囲と考えられる。

3.3 河川距離との関係

図5に6つの河川（境界）からの距離帯毎（50m 毎）の平均気温と平均風速を示す（13:00～13:30の平均値）。図4と同様に土地利用がアスファルト（主に道路）の結果を用いた。河川直近の気温が低く、一方風速が大きい。その影響範囲は比較的小さい（100m程度）。また河川毎に気温や風速の変化幅は異なり、大田川放水路が最も大きく、東側に位置する猿猴川で最も小さい。

4. 河川周辺市街地計算

4.1 水平気温分布・風速分布

図6に河川周辺市街地計算の結果の内、水平気温分布と風速分布（地上2.5m）をそれぞれ示す（14:55～

15:00の平均値）。全体的な傾向としてオープンスペースの風速が大きく、気温が低い。このエリアは概ね海岸線から5km前後のエリアに位置し、海風の影響を受ける範囲に含まれているためと考えられる。

前章の結果と同様に河川上の風速が市街地と比べると相対的に大きく、気温が低い。河川毎に見ると、主南向（南南西）に沿った方向のエリアが比較的少ない元安川上では、風速が小さく、気温低下もあまり見られない。河川形状により南南西からの海風が遡上しにくいと推察される。

隣接する河川により傾向が異なるが、河川直近のエリアでは風速が大きく、気温が低い。特に太田川放水路周辺の気温が低く、前章と同様の傾向が見られる。

4.2 熱環境・風環境の形成要因分析

河川周辺市街地における熱環境・風環境の形成要因を把握するため、対象エリアを5つの地区に分け（図6左図）、それぞれの地区に対して、街区毎の平均気温・平均風速を目的変数、街区形態指標・海風遡上指標（計6変数）を説明変数とした重回帰分析（ステップワイズ法）を行った。説明変数の概要を表1に示す。

表2に各地区の重回帰分析の結果をそれぞれ示す。まず平均風速に対しては、いずれの地区においても重回帰相関係数は0.6以上であり比較的高い。説明変数を見ると、全ての地区においてグロス建蔽率および海風方向海岸距離が選択されており、これらの影響が比較的大きいと考えられる。また河川距離（対数）が選択されたのは地区3のみであり、河川が街区内の平均風速に対して与える影響は今回の対象エリアにおいては限定的であると考えられる。一方で平均気温に対しては、地区3～5では河川距離（対数）が選択されており、これらの地区においては河川が街区内の平均気温に与える影響が比較的大きいと考えられる。またこれらの地区ではグロス建蔽率が選択されていることから、建物密度を低下させつつ、河川からの冷却効果を活用すべきと考えられる。

一方で地区1および地区2では緑被率が選択されており、グロス建蔽率は選択されていない。そのためこれらの地区では地表面被覆の改善などの対策が有効と考えられる。ただし、平均気温に対しては重相関係数が低い地区もあるため、他の説明変数の検討も必要と考えられる。

5. まとめ

本稿では広島市の中心市街地が位置する広島デルタを対象に MSSG による都市熱環境の数値計算を行い、広島デルタ全域の気温・風の分布傾向を把握し、広島湾・河川との関連を分析した。さらに数値計算結果を入力条件とした重回帰分析により、河川周辺市街地の熱環境・風環境の形成要因分析を行った。

今後は数値計算結果の精度を向上した上で海風と河川による気温低減効果の影響範囲により広島デルタをゾーニングし、ゾーン毎の対策方針リストを作成する。

謝辞

大規模数値計算には国立研究開発法人海洋研究開発機構の支援により、地球シミュレータおよび大型計算機システムを用いた。そして本研究を進めるに当たり、広島市環境局環境政策課および都市整備局都市計画課の方々にご協力をいただいた。また百葉箱を用いた気温観測に際しては、広島市教育委員会および広島市内の小学校の方々にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 日本建築学会編, ヒートアイランドと建築・都市へ対策のビジョンと課題, 日本建築学会, 2007.
- 2) 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) 大田修平, 松尾薫, 横山真, 田中貴宏, "広島市平野部の温熱環境の現状分析及び沿岸地形が海風効果に与える影響に関する研究", 日本建築学会中国支部研究報告集, vol.42, pp.351-354, 2019.

表1 説明変数の概要

Explanatory variable	Definition
Gross building coverage ratio	Ratio of building area to block area
Green coverage ratio	Ratio of green area to block area
Average building height	Average of building height in each block
Standard deviation of elevation	Standard deviation of building height in each block
Distance from Coastline	Distance from center of gravity of block to its intersection with coastline by drawing a line in a south-southwest
Distance from River	Distance from center of gravity of block to the nearest river as a logarithmic value

■: Index of block pattern ■: Index of sea breeze

表2 重回帰分析結果（上段：風速、下段：気温）

Objective variable: Average wind speed in block [m/s]	Explanatory variable						Multiple correlation coefficient
	Gross building coverage ratio	Green coverage ratio	Average building height	Standard deviation of elevation	Distance from Coastline	Distance from River	
Area1	-0.54 **	0.18 **			-0.11 *		0.63
Area2	-0.62 **				-0.18 *		0.66
Area3	-0.54 **				-0.16 **	-0.15 **	0.62
Area4	-0.59 **		-0.2 **		-0.27 **		0.67
Area5	-0.65 **		0.3 **		-0.21 **		0.69

*="p value"<0.05 **="p value"<0.01

Objective variable: Average air temperature in block [degree Celsius]	Explanatory variable						Multiple correlation coefficient
	Gross building coverage ratio	Green coverage ratio	Average building height	Standard deviation of elevation	Distance from Coastline	Distance from River	
Area1		-0.21 **		-0.37 *			0.40
Area2		-0.48 *	-0.5 *				0.58
Area3	0.22 **		-0.3 *		0.39 **	0.38 **	0.56
Area4	0.2 **		-0.2 **		0.51 **	0.35 *	0.60
Area5	0.12 **	-0.14 *	-0.3 **		0.52 **	0.24 *	0.62

*="p value"<0.05 **="p value"<0.01

Making Urban Environmental Design Guideline for Urban Warming Mitigation: Analysis of Urban Climate Formation Factors in the Hiroshima Delta

Project Representative

Takahiro Tanaka Graduate school of Engineering, Hiroshima University

Authors

Makoto Yokoyama^{*1}, Kaoru Matsuo^{*2}, Takahiro Tanaka^{*3}, Toru Sugiyama^{*4}, Satoru Sadohara^{*5}

^{*1} Faculty of Urban Management, Fukuyama City University

^{*2} Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University

^{*3} Graduate school of Engineering, Hiroshima University

^{*4} Information Engineering Program, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

^{*5} Graduate school of urban innovation, Yokohama National University

In recent years, the thermal environment in urbanized areas is becoming increasingly inhospitable for residents because of urban warming. Many countermeasures against urban warming and its effects have been studied. However, these countermeasures should be introduced into suitable places for effective urban environmental planning. In this paper, the urban thermal environment in the coastal area of Hiroshima City was numerically calculated using MSSG, and the temperature distribution trend in the entire delta was determined.

Keywords: Urban warming, Sea breeze, MSSG, Multiple regression analysis

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 indicate effective urban warming measures in each region.

In this paper, spatial patterns of air temperature and wind distribution in Hiroshima Delta was visualized based on results of numerical calculation of urban thermal environment using MSSG, and effects with Hiroshima Bay and six rivers was analyzed. Furthermore, formation factors of thermal and wind environments in the urbanized area around rivers were analyzed by multiple regression analysis using the numerical results as input conditions.

2. Target area and calculation setting

Target area was Hiroshima Delta where Central Hiroshima City is located. This delta was formed by Ota River, and six rivers flow through the city. Two numerical calculations were carried out, one for the entire delta (red frame) and the other for the area where the rivers are concentrated (blue frame), using MSSG. The spatial resolution of the former is 10 m and the latter are 5 m.

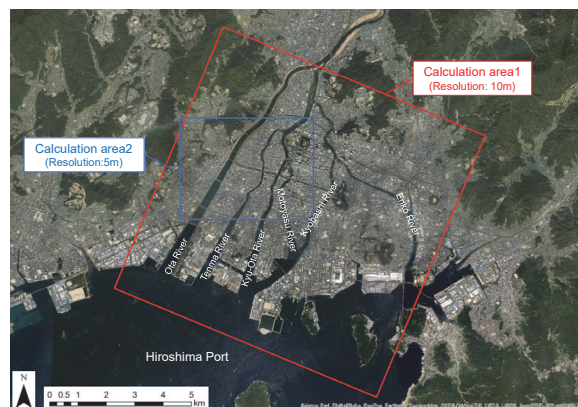


Fig. 1 Target area and calculation domain

3. Distribution patterns of air temperature and wind in whole Hiroshima Delta

Figure 2 shows air temperature and wind speed distributions over the entire delta. Figure 2 shows that sea breeze from Hiroshima Bay blow along river, and air temperature on the rivers is lower than that in the urban area.

Depending on shape and width of the river, distance that blowing sea breeze along river are different. Ota river drainage channel located western part of target area has large width and simple shape, so this distance is longer than other rivers.

As the whole distribution patterns, air temperature rises gradually from the coast to the inland, the wind speed gradually decreases on the contrary. This pattern is almost

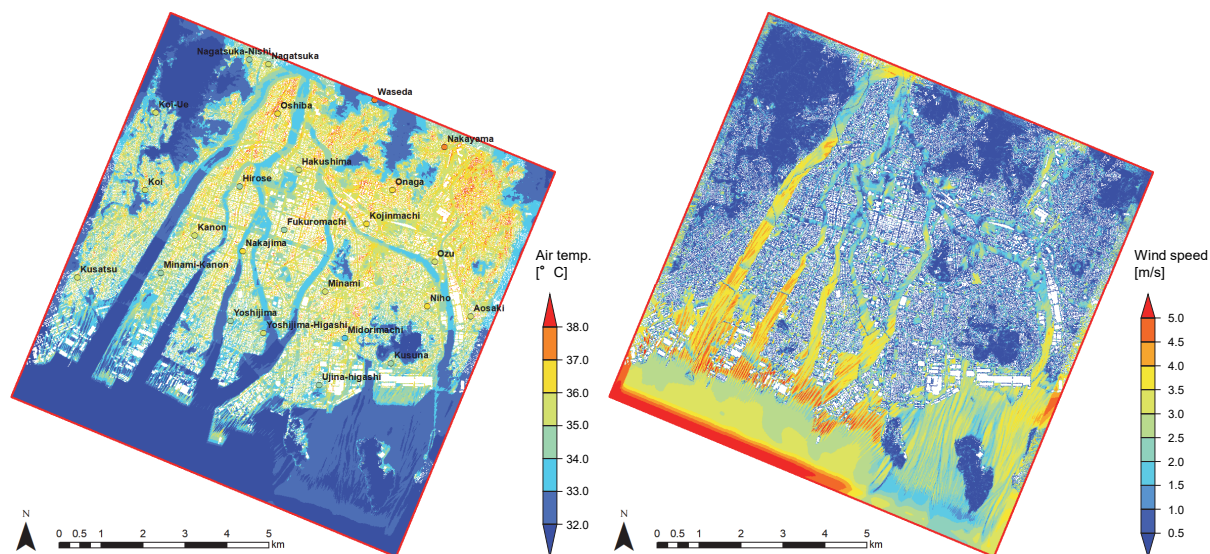


Fig. 2 Horizontal distribution of air temperature and wind speed

same with air temperature observation results measured in Stevenson screen at the elementary schools shown in figure 2.

4. Formation factors of thermal and wind environment in urbanized areas around rivers

A multiple regression analysis was performed using the results of numerical calculation for urbanized areas around rivers as input conditions. Objective variables were the average air temperature and wind speed for each block, and six variables shown in Table 1 were used as the explanatory variables. The analysis was carried out for five districts divided by the river, respectively. The results of the multiple regression analysis are shown in Table 2. When mean wind speed was used as the objective variable, all multiple correlation coefficients were above 0.6, with gross building coverage ratio and distance from coastline were chosen as the explanatory variables. Distance from the river was chosen in only one district.

On the other hand, when mean air temperature was used as the objective variable, distance from river were chosen in three districts. Distance from coastline and Gross building coverage ratio are also chosen in all of these districts, so it seems that utilizing wind effects are important to improve thermal environment in these areas.

5. Summary

In this paper, the urban thermal environment in Hiroshima Delta was calculated using MSSG.

In the future, Hiroshima Delta will be classified into some zones based on air temperature reduction effect of sea breeze and river by improving the accuracy of the numerical calculation results, and a list of countermeasures for each zone will be created.

Table 1 Summary of explanatory variables

Explanatory variable	Definition
Gross building coverage ratio	Ratio of building area to block area
Green coverage ratio	Ratio of green area to block area
Average building height	Average of building height in each block
Standard deviation of elevation	Standard deviation of building height in each block
Distance from Coastline	Distance from center of gravity of block to its intersection with coastline by drawing a line in a south-southwest
Distance from River	Distance from center of gravity of block to the nearest river as a logarithmic value

Index of block pattern Index of sea breeze

Table 2 Result of multiple regression analysis

Objective variable: Average wind speed in block [m/s]		Explanatory variable						Multiple correlation coefficient
		Gross building coverage ratio	Green coverage ratio	Average building height	Standard deviation of elevation	Distance from Coastline	Distance from River	
Standardised partial regression coefficient	Area1	-0.54 **	0.18 **			-0.11 *		0.63
	Area2	-0.62 **				-0.18 *		0.66
	Area3	-0.54 **				-0.16 **	-0.15 **	0.62
	Area4	-0.59 **		-0.2 **		-0.27 **		0.67
	Area5	-0.65 **		0.3 **		-0.21 **		0.69

*="p value"<0.05 **="p value"<0.01

Objective variable: Average air temperature in block [degree Celsius]		Explanatory variable						Multiple correlation coefficient
		Gross building coverage ratio	Green coverage ratio	Average building height	Standard deviation of elevation	Distance from Coastline	Distance from River	
Standardised partial regression coefficient	Area1		-0.21 **		-0.37 *			0.40
	Area2		-0.48 *	-0.5 *				0.58
	Area3	0.22 **		-0.3 *		0.39 **	0.38 **	0.56
	Area4	0.2 **		-0.2 **		0.51 **	0.35 *	0.60
	Area5	0.12 **	-0.14 *	-0.3 **		0.52 **	0.24 *	0.62

*="p value"<0.05 **="p value"<0.01